

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DQO DE UN
HUMEDAL ARTIFICIAL PARA EL TRATAMIENTO SECUNDARIO
DE LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO ROMERILLOS,
CANTÓN MEJÍA**

**TRABAJO PREVIO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR: CHRISTIAN ANTONIO TOTOY QUINGA

DIRECTOR: Ing. NATHALIA TERESA VALENCIA BONILLA MSc.


CODIRECTOR: Ing. ANA LUCÍA BALAREZO AGUILAR PhD.

QUITO, JULIO DE 2022

DECLARACIÓN

Yo **Totoy Quinga Christian Antonio**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



CHRISTIAN ANTONIO TOTOY QUINGA

CERTIFICACIONES

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Christian Totoy, bajo nuestra supervisión.



**Ing. Nathalia Teresa Valencia Bonilla, MsC.
DIRECTOR DEL PROYECTO**



**Ing. Ana Lucía Balarezo Aguilar, PhD.
CODIRECTOR DEL PROYECTO**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la salud y la vida que me ha otorgado, por haberme permitido llegar hasta este punto de mi vida. Por haberme guiado espiritualmente para saber elegir entre lo bueno y lo malo y también le agradezco por todas las bendiciones que me dio a lo largo de mi vida personal y profesional.

A mis padres Nelson y Alvina, son los mejores padres que un hijo puede tener, por el esfuerzo y sacrificio que fue lo que me ha permitido culminar con esta etapa y por sus enseñanzas, que ante los problemas y obstáculos que la vida nos presenta jamás hay que darse por vencido.

A las dos mujeres que luego de mi madre son las más importantes en mi vida, a Jessi y Jess, a Jessi por enseñarme el amor de hermana, desde el inicio de mi carrera su compañía en cada noche fue muy valiosa para no rendirme y a mi Jess por su amor, cariño, compañía y comprensión, fue importante frente a las tristezas o problemas que se me presentaron.

A Karol, mi mejor amiga, es la mejor amiga que alguien puede tener, gracias por haber compartido conmigo tantas experiencias en nuestro paso por la Universidad, realmente con tu comprensión y apoyo hiciste que esta etapa de mi vida haya sido muy gratificante.

A la Ingeniera Nathalia Valencia, gracias por su apoyo académico y personal, gracias por acceder a ser directora de este proyecto, por las enseñanzas impartidas, por sus vivencias compartidas y sobre todo por su ejemplo en el ámbito profesional.

A la Dra. Ana Balarezo, por haber accedido a ser codirectora de este proyecto, por su aporte para lograr desarrollar de la mejor manera el proyecto y la culminación del mismo.

A la Escuela Politécnica Nacional, por haber sido mi segundo hogar, donde conocí excelentes profesionales, amigos y compañeros de clase. Por haberme permitido adentrar en el mundo del conocimiento a través de sus docentes.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo principalmente a mis padres, Nelson y Alvina, quienes con su esfuerzo y dedicación me dieron la oportunidad de formarme profesionalmente en la Escuela Politécnica Nacional.

Gracias a mi madre, por esos días en los que se levantaba temprano para poder tener un plato de comida en la mesa, por esforzarse cada día y así permitirme tener lo necesario para cumplir con las obligaciones que la Universidad requería, por sus bendiciones y por preocuparse siempre por mí.

Gracias a mi padre, a pesar de su enfermedad no me dejó sin sus consejos, por el esfuerzo que día a día realiza qué fue lo que hizo que pueda llegar hasta este punto de mi vida y por enseñarme a afrontar los problemas.

También dedicó este trabajo a mi perrito Amanecer, por todas esas madrugadas en las que me hacía levantar para no llegar tarde a la Universidad, por su manera de expresarme cariño cada vez que llegaba de la Universidad y a mi otro perrito Negrito, has aprendido a quererme y acompañarme en el poco tiempo que llevamos juntos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
CERTIFICACIONES	I
AGRADECIMIENTOS	III
DEDICATORIA	V
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE ANEXOS	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XV
RESUMEN	XVII
ABSTRACT.....	XIX
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3 ALCANCE	5
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	5
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1 HUMEDALES Y TIPOS	7
2.1.1 HUMEDALES NATURALES.....	7
2.1.2 HUMEDALES ARTIFICIALES.....	8
2.1.3 COMPONENTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	10

2.1.4 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES.....	13
2.2 SELECCIÓN DE VEGETACIÓN.....	16
2.2.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN	16
2.2.2 APLICACIÓN DE LAS MACRÓFITAS.....	17
2.2.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS MACRÓFITAS.....	18
2.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA POR MEDIO DE LOS HUMEDALES	20
2.3.1 INFLUENCIA DEL CLIMA FRÍO EN LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA POR MEDIO DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	20
2.3.2 MECANISMOS QUE INFLUYEN EN LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA POR MEDIO DE LOS HUMEDALES.....	21
2.4 TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN HUMEDALES ARTIFICIALES.....	23
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA.....	27
3.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	27
3.2 EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD BIOLÓGICA DE LA VEGETACIÓN ORNAMENTAL	28
3.3 DISEÑO y CONSTRUCCIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	36
3.4 PUESTA EN MARCHA DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO VERTICAL.....	39
3.5 EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DE LOS HUMEDALES	40
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO PROCEDENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL RELLENO SANITARIO	42
4.2 VIABILIDAD BIOLÓGICA	43
4.3 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DQO	49
4.4 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO DEL HUMEDAL ..	57

4.4.1	pH.....	57
4.4.2	TEMPERATURA	58
4.4.3	NITRÓGENO AMONIACAL.....	59
4.4.4	NITRATOS	60
4.4.5	FOSFATOS	60
4.4.6	COLOR.....	61
4.5	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	62
4.5.1.	VEGETACIÓN.....	62
4.5.2.	EFLUENTE EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	64
5.	CONCLUSIONES	72
6.	RECOMENDACIONES	73
	BIBLIOGRAFÍA	74
	ANEXOS.....	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 <i>Implementación de macrófitas emergentes en diferentes áreas para el tratamiento de aguas residuales</i>	17
Tabla 2.2 <i>Profundidad tolerable aproximada de agua por parte de las macrófitas emergentes</i>	17
Tabla 2.3 <i>Eficiencias de remoción de materia orgánica con el uso de macrófitas emergentes en distintos tipos de agua</i>	18
Tabla 2.4 <i>Caracterización de lixiviados en función de su edad</i>	24
Tabla 2.5 <i>Eficiencias de remoción de carga orgánica en lixiviados mediante humedales artificiales</i>	26
Tabla 3.1 <i>Características fisiológicas de <i>Canna limbata</i> antes y después de 30 días de exposición a concentraciones de 0, 25, 50, 75 y 100 % de lixiviado sanitario pretratado</i>	31
Tabla 3.2 <i>Características fisiológicas de <i>Iris pseudacorus</i> antes y después de 30 días de exposición a concentraciones de 0, 25, 50, 75 y 100 % de lixiviado sanitario pretratado</i>	32
Tabla 3.3 <i>Características fisiológicas de <i>Phragmites australis</i> antes y después de 30 días de exposición a concentraciones de 0, 25, 50, 75 y 100 % de lixiviado sanitario pretratado</i>	34
Tabla 3.4 <i>Parámetros físico-químicos de las diluciones del lixiviado sanitario</i>	35
Tabla 3.5 <i>Características físicas del sustrato</i>	38
Tabla 3.6 <i>Métodos utilizados para la caracterización físico-química, de la calidad del lixiviado</i>	41
Tabla 4.1 <i>Características físicas y químicas del lixiviado del relleno sanitario Romerillos</i>	42
Tabla 4.2 <i>Estadísticos descriptivos de la elongación de raíz de las diferentes especies expuestas a los diferentes gradientes de concentración</i>	44

Tabla 4.3 <i>Análisis de normalidad aplicado a la elongación de raíz de las diferentes especies expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado</i>	45
Tabla 4.4 <i>Análisis ANOVA aplicado a la elongación de raíz de las diferentes especies expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado</i>	45
Tabla 4.5 <i>Hipótesis sobre los factores del Análisis ANOVA aplicado a la elongación de raíz de las diferentes especies expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado</i>	46
Tabla 4.6 <i>Prueba de Tukey aplicada al tipo de especie</i>	48
Tabla 4.7 <i>Resultados de eficiencia promedio en términos de DQO registradas en los efluentes de los humedales artificiales a nivel de laboratorio, durante las 6 semanas de experimentación, para TRH de 2, 5 y 7 días.</i>	50
Tabla 4.8 <i>Análisis de normalidad de la eficiencia de remoción de DQO, con medidas repetidas de las especies para los tiempos de retención 2, 5 y 7 días</i> ...	51
Tabla 4.9 <i>Análisis ANOVA de la eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas de las especies para los tiempos de retención 2, 5 y 7 días</i>	52
Tabla 4.10 <i>Hipótesis sobre los factores del Análisis ANOVA de la eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas de las especies para los tiempos de retención 2, 5 y 7 días para cada semana</i>	53

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1.</i> Porcentaje de disposición de los RSU mediante rellenos sanitarios en ciertos países del mundo	1
<i>Figura 1.2.</i> Formas de disposición de los RSU en el Ecuador	2
<i>Figura 2.1.</i> Tipos de disposición del sustrato en los humedales artificiales, horizontal (a) y vertical (b)	11
<i>Figura 2.2.</i> Formas de vida dominantes de las macrófitas acuáticas: emergentes: <i>Scirpus lacustris</i> (a), <i>Phragmites australis</i> (b), <i>Typha latifolia</i> (c); flotantes: <i>Nymphaea alba</i> (d), <i>Potamogeton gramineus</i> (e), <i>Hydrocotyle vulgaris</i> (f) y sumergidas: <i>Potamogeton crispus</i> (g), <i>Littorella uniflora</i> (h).....	12
<i>Figura 2.3.</i> Esquema de un humedal de flujo superficial	14
<i>Figura 2.4.</i> Esquema de un humedal artificial de flujo subterráneo: horizontal (a) y vertical (b)	15
<i>Figura 3.1.</i> Ubicación de la zona de estudio:.....	27
<i>Figura 3.2.</i> <i>Iris pseudacorus</i>	28
<i>Figura 3.3.</i> <i>Canna limbata</i>	28
<i>Figura 3.4.</i> <i>Phragmites australis</i>	29
<i>Figura 3.5.</i> Registro de las condiciones iniciales	30
<i>Figura 3.6.</i> Lugar de trabajo y disposición de las plantas	30
<i>Figura 3.7.</i> De izquierda a derecha, Diluciones 0%, 25%, 50%, 75%, 100%.....	35
<i>Figura 3.8.</i> Dimensiones utilizadas en cada HSSV a escala de laboratorio	37
<i>Figura 4.1.</i> Elongación de raíz, media, de las diferentes especies, en los gradientes de concentración aplicados	49
<i>Figura 4.2.</i> Eficiencia de remoción, media, de <i>Iris pseudacorus</i> , con los diferentes tiempos de retención en las distintas semanas de implantación	55

<i>Figura 4.3.</i> Eficiencia de remoción, media, de <i>Phragmites australis</i> , con los diferentes tiempos de retención en las distintas semanas de implantación	55
<i>Figura 4.4.</i> Eficiencia de remoción, media, de las unidades únicamente con sustrato, con los diferentes tiempos de retención, en las distintas semanas de implantación.....	56
<i>Figura 4.5.</i> pH en las unidades experimentales, con TRH de 2, 5 y 7 días, durante las seis semanas de operación	57
<i>Figura 4.6.</i> Temperatura de las distintas unidades experimentales, con TRH de 2, 5 y 7 días, durante las seis semanas de operación	58
<i>Figura 4.7.</i> Nitrógeno amoniacal de las distintas unidades experimentales, con TRH de 2, 5 y 7 días, durante las seis semanas de operación	59
<i>Figura 4.8.</i> Nitratos de las distintas unidades experimentales, con TRH de 2, 5 y 7 días, durante las seis semanas de operación	60
<i>Figura 4.9.</i> Fosfatos de las distintas unidades experimentales, con TRH de 2, 5 y 7 días, durante las seis semanas de operación	61
<i>Figura 4.10.</i> Color de las distintas unidades experimentales, con TRH de 2, 5 y 7 días, durante las seis semanas de operación	62

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Evidencias y resultados de las especies antes y después de su exposición al lixiviado pretratado fuera de las unidades experimentales	92
ANEXO 2. Evidencias y resultados de las especies a lo largo de la exposición al lixiviado pretratado en las unidades experimentales	104
ANEXO 3. Hoja de campo utilizada para la recolección de información de los indicadores fisiológicos de las macrófitas utilizadas en el proyecto.....	115
ANEXO 4. Resultado del análisis físico del sustrato empleado en los humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical a escala de laboratorio	118
ANEXO 5. Hoja de campo utilizada para la recolección de datos de la caracterización del afluente durante las 6 semana en los humedales	121
ANEXO 6. Hoja de campo utilizada en la recolección de datos de la caracterización del efluente provenientes de los humedales artificiales utilizados en el proyecto	124
ANEXO 7. pH registrados en las unidades experimentales durante 6 semanas y TRH de 2, 5 y 7 días.	143
ANEXO 8. Temperatura registrada en las unidades experimentales durante 6 semanas y TRH de 2, 5 y 7 días.	146
ANEXO 9. Nitrógeno amoniacal registrado en las unidades experimentales durante 6 semanas y TRH de 2, 5 y 7 días.	149
ANEXO 10. Nitratos registrados en las unidades experimentales durante 6 semanas y TRH de 2, 5 y 7 días.	152
ANEXO 11. Fosfatos registrados en las unidades experimentales durante 6 semanas y TRH de 2, 5 y 7 días	155
ANEXO 12. Color registrado en las unidades experimentales durante 6 semanas y TRH de 2, 5 y 7 días.	158

ANEXO 13. Resultados de DQO registradas en los afluentes y efluentes de los humedales artificiales a nivel de laboratorio, durante las 6 semanas de experimentación, para TRH de 2, 5 y 7 días.	161
ANEXO 14. Evidencias fotográficas del trabajo realizado	164

LISTA DE ABREVIATURAS

°C	Grados celsius
ANOVA	Análisis de varianza
cm	Centímetros
COT	Carbono Orgánico Total
CO₂	Dióxido de carbono
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
FA	Filtros de arena
gl	Grados de libertad
ha	Hectárea
Ha	Hipótesis alternativa
Ho	Hipótesis nula
HS	Humedal de Flujo Superficial
HSS	Humedal de Flujo Subterráneo
HSSH	Humedal de Flujo Subterráneo Horizontal
HSSV	Humedal de Flujo Subterráneo Vertical
km	Kilómetros
L	Litros
LA	Laguna aireada
LAC	Lodos activados
LAN	Laguna anaerobia
m	Metros

mg	Miligramos
ml	Mililitros
mm	Milímetros
MO	Materia Orgánica
n	Porosidad
ONU	Organización de las Naciones Unidas
p	Nivel de Significancia
PET	Tereftalato de Polietileno
pH	Potencial Hidrógeno
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SNIM	Sistema Nacional de Información Municipal
SST	Sólidos Suspendidos Totales
TN	Nitrógeno Total
TP	Fósforo Total
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica
TULSMA	Texto de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente
V	Volumen
W_{ss}	Peso de Suelo Saturado
Φ	Diámetro

RESUMEN

En las últimas décadas, el continuo crecimiento de la producción industrial y el comercio, ha provocado un rápido incremento de la producción mundial de los residuos sólidos municipales e industriales, lo que ha obligado a adoptar prácticas para su gestión, como las realizadas en rellenos sanitarios. Sin embargo, esta forma de disposición final libera una amplia gama de compuestos tóxicos, como el caso de los lixiviados, poniendo en riesgo a la salud humana y al ambiente.

Con el fin de atenuar el impacto de los lixiviados en el ambiente, surge la necesidad de investigar tecnologías de tratamiento alternativas o complementarias a los sistemas de depuración implementados para este tipo de residuos líquidos, que consideren menores costos de operación y mantenimiento.

Por lo anterior, en el presente proyecto se evaluó a nivel de laboratorio un sistema de tratamiento no convencional: humedales artificiales subsuperficiales verticales, utilizando como indicador la eficiencia de remoción de DQO del lixiviado generado en el Relleno Sanitario Romerillos, del Cantón Mejía, y pretratado con un proceso primario avanzado. Para la implementación de los humedales artificiales experimentales se utilizaron las siguientes especies vegetales: i) *Canna limbata*, ii) *Iris pseudacorus*, y iii) *Phragmites australis*, considerando un reactor batch con tiempos de retención hidráulico de 2, 5 y 7 días.

Se realizaron ensayos toxicológicos para cada una de las especies vegetales, con lixiviado proveniente de la planta de tratamiento, aplicando concentraciones al 0 %, 25 %, 50%, 75 % y 100%, en botellas PET. Se registraron los cambios fisiológicos a lo largo de los 30 días de operación, considerando tamaño de planta, elongación de la raíz, coloración de hoja y número de hojas.

Posteriormente, con los datos registrados, se procedió a la aplicación de un análisis estadístico, mediante el ANOVA test, determinando así, que las especies tolerantes

al lixiviado resultaron ser: *Iris pseudacorus* y *Phragmites australis*, por el contrario, *Canna limbata*, presentó una tolerancia máxima al 25% del lixiviado, descartando así su aplicación en el humedal artificial.

Mediante un análisis ANOVA test, se determinó que los tiempos de retención guardan una relación directamente proporcional con la remoción de DQO, logrando eficiencias similares a los obtenidos con sistemas altamente mecanizados. *Iris pseudacorus* y *Phragmites australis* presentaron una eficiencia promedio de 14,06% y 14,88%, respectivamente, con TRH de 2 días, y aumentaron a una eficiencia promedio de 30,9% y 19,5%, respectivamente, con un TRH de 7 días. La unidad sin especie, alcanzó su máxima eficiencia con un TRH de 2 días (30,8%); mientras que, con un TRH de 7 días, su eficiencia disminuyó hasta un valor promedio de 16,5%.

PALABRAS CLAVE: Relleno sanitario, lixiviados, DQO, macrófitas.

ABSTRACT

In recent decades, the continuous growth of industrial production and trade has caused a rapid increase in the world production of municipal and industrial solid waste, which has forced the adoption of practices for its management, such as those carried out in landfills. However, this form of final disposal releases a wide range of toxic compounds, such as leachate, putting human health and the environment at risk.

In order to mitigate the impact of leachates on the environment, there is a need to investigate alternative or complementary treatment technologies to the purification systems implemented for this type of liquid waste, which consider lower operating and maintenance costs.

Therefore, in this project, an unconventional treatment system was evaluated at the laboratory level: artificial vertical subsurface wetlands, using as an indicator the efficiency of COD removal from the leachate generated in the Romerillos Sanitary Landfill, in the Mejía Canton, and pretreated with an advanced primary process. For the implementation of experimental artificial wetlands, the following plant species were used: i) *Canna limbata*, ii) *Iris pseudacorus*, and iii) *Phragmites australis*, considering a Bach reactor with hydraulic retention times of 2, 5 and 7 days.

Toxicological tests were carried out for each of the plant species, with leachate from the treatment plant, applying concentrations of 0%, 25%, 50%, 75% and 100%, in PET bottles. Physiological changes were recorded throughout the 30 days of operation, considering plant size, root elongation, leaf color and number of leaves.

Subsequently, with the recorded data, a statistical analysis was carried out, using the ANOVA test, thus determining that the species tolerant to leachate turned out to be: *Iris pseudacorus* and *Phragmites australis*, on the contrary, *Canna limbata*,

presented a tolerance maximum 25% of the leachate, thus ruling out its application in the artificial wetland.

Through an ANOVA test analysis, it was determined that the retention times have a directly proportional relationship with the removal of COD, achieving efficiencies similar to those obtained with highly mechanized systems. *Iris pseudacorus* and *Phragmites australis* showed an average efficiency of 14.06% and 14.88%, respectively, with 2-day HRT, and increased to an average efficiency of 30.9% and 19.5%, respectively, with a 2-day HRT. of 7 days. The unit without species reached its maximum efficiency with a HRT of 2 days (30.8%); while, with a HRT of 7 days, its efficiency decreased to an average value of 16.5%.

KEYWORDS: Landfill, leachate, COD, macrophytes.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El aumento en la generación de residuos sólidos y subproductos, constituyen una problemática asociada a la salud pública y ambiente. En la segunda mitad de la década de 1990, el volumen anual de producción de residuos oscilaba entre 300-800 kg per cápita en los países desarrollados, y menos de 200 kg per cápita en otros países. Los residuos mundiales casi se duplicarán hasta alcanzar los 2.200 millones de toneladas anuales en 2025 y la mayoría de ciudades del mundo están luchando por cumplir sus objetivos de reducción de residuos (Chan, 2016).

Los vertederos abiertos y los rellenos sanitarios, son la práctica habitual para la eliminación de los RSU en todo el mundo (Vaverková, 2019), este último en ciertos países su aplicación es alta como en Malasia, Arabia Saudí y China mientras que en países como Venezuela, Ecuador y Tailandia es baja, como se ilustra en la Figura 1.1.

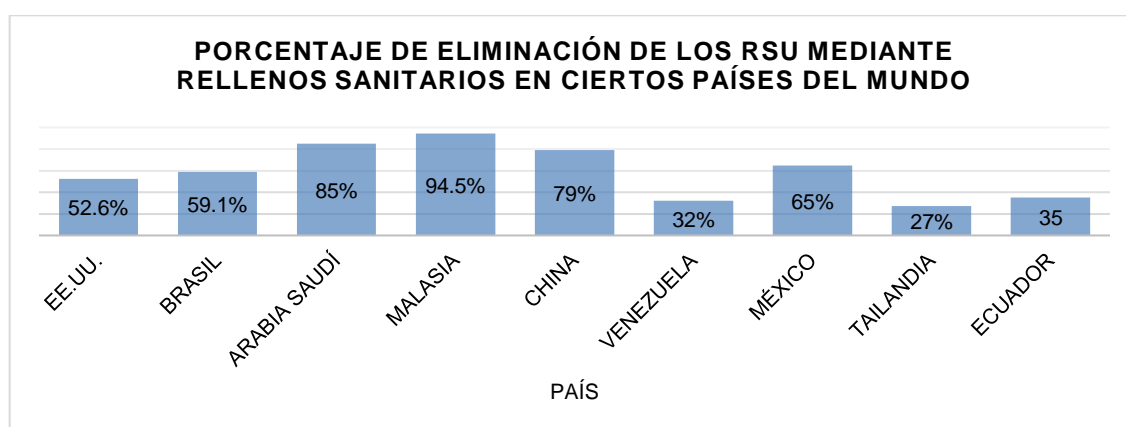


Figura 1.1. Porcentaje de disposición de los RSU mediante rellenos sanitarios en ciertos países del mundo

Fuente: Vaverková, (2019), Solíz et al., (2020)

Elaborado por: Christian Totoy

De acuerdo a la ONU (2018), el aumento constante del volumen y la complejidad de los residuos sólidos asociados a la economía moderna, pone en riesgo al ambiente y a la salud humana. Anualmente, se recolectan 11.2 mil millones de toneladas de residuos sólidos en todo el mundo.

Los rellenos sanitarios son los métodos de disposición final de residuos sólidos mayormente utilizados en todo el mundo, debido a que son más económicos (Renou et al., 2008). El Ecuador en el 2018, según el Sistema Nacional de Información Municipal (SNIM), generó 12.900 ton/día de residuos sólidos (Solíz et al., 2020), cuya disposición se muestra en la Figura 1.2.

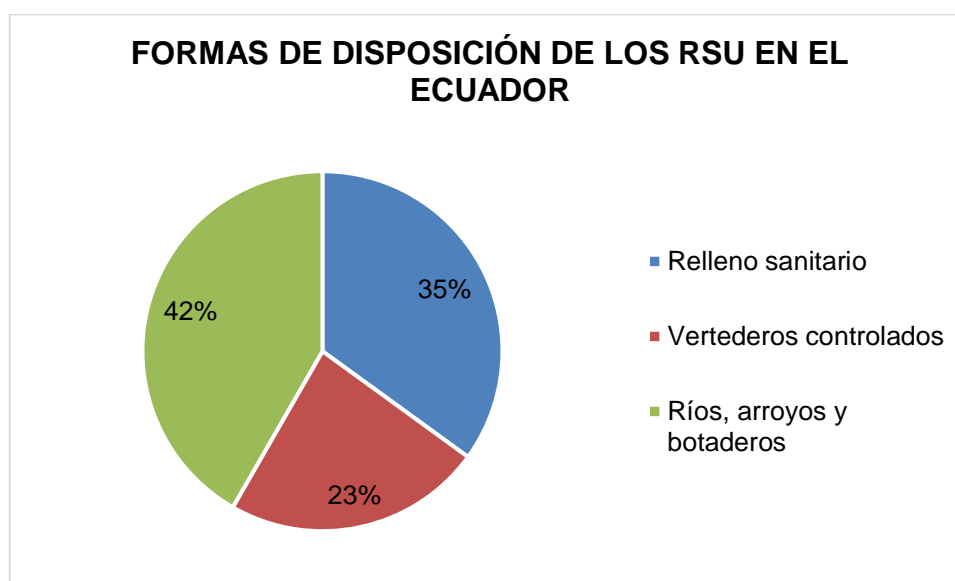


Figura 1.2. Formas de disposición de los RSU en el Ecuador

Fuente: Solíz et al., (2020)

Elaborado por: Christian Totoy

Como resultado de la descomposición de los residuos sólidos (Ziyang et al., 2009), y de las reacciones químicas y bioquímicas recurrentes, los rellenos sanitarios liberan una variada gama de compuestos, a través de sus lixiviados (Tchobanoglous & Angelakis, 1996). Este líquido es considerado como un tipo de agua residual muy específico, formado por una gran cantidad de MO disuelta y particulada, además de componentes inorgánicos que se producen cuando una

corriente de agua atraviesa los residuos, produciendo impactos negativos a ciertos componentes del ambiente aledaños al relleno: agua y suelo (Jianqing et al., 2001). Su composición permite identificar el tipo y la etapa en la que se encuentran los lixiviados, información necesaria para implementar un método de tratamiento viable (Foo & Hameed, 2009).

El lixiviado de vertedero generalmente es una solución acuosa de color oscuro, con un fuerte olor, que lleva una alta carga orgánica disuelta (ácidos grasos volátiles, sustancias húmicas), inorgánica (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} , HCO_3^-), metales pesados (Cd^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+}), compuestos orgánicos xenobióticos (hidrocarburos aromáticos, fenoles, pesticidas, etc.) y microorganismos, predominantemente coliformes totales y termotolerantes (Peng, 2017).

La composición del lixiviado de los vertederos depende de la naturaleza de los residuos sólidos descargados, de los procesos químicos y bio-químicos responsables de la descomposición de los materiales de desecho y del contenido total de agua en los residuos. La disposición de los lixiviados crudos, sin tratamiento previo, supone una amenaza potencial para la calidad del suelo y las aguas subterráneas (Naveen et al., 2016).

El volumen de lixiviados generado está directamente relacionado con factores como la precipitación, la evapotranspiración, la escorrentía superficial, la infiltración, la intrusión de aguas subterráneas en el vertedero y el grado de compactación de los residuos. Por ello, se aplican diferentes técnicas (revestimientos, capas de impermeabilización y capas de cobertura) para controlar la entrada de agua en el vertedero y, en consecuencia, el volumen de lixiviados generado (Costa et al., 2019).

Ante la importancia de la calidad de agua superficial y subterránea en zonas cercanas a los rellenos se han desarrollado diversas tecnologías: químicas (proceso Fenton, precipitación química, etc.), físico-químicos (procesos de

adsorción, de membrana, etc.) y biológicas (procesos de lodos activados, reactores de lecho fluidizado, humedales artificiales, etc.). Su selección dependerá de la relación beneficio-costo, así como de la composición y grado de biodegradabilidad del residuo. Para el tratamiento de los lixiviados de los rellenos sanitarios es importante conocer a fondo la composición de los mismos, así como su variación y sus características de degradación (Teng et al., 2021).

Los tratamientos biológicos en humedales artificiales, han mostrado ser efectivos cuando se aplican luego de un tratamiento preliminar, con resultados prometedores, convirtiéndose en una alternativa ecológica, de bajo costo (0,05-0,006 US\$/m³) (Programa de Medio Ambiente, 2010) y de bajo o nulo consumo energético (0,1 Kw-h/m³) (Morales et al., 2013).

Por los antecedentes mencionados el presente trabajo de titulación, propone como alternativa de tratamiento de lixiviados, a través de un HSSV, mismo que será evaluado a nivel de laboratorio, para cada una de las siguientes macrófitas: *Canna limbata*, *Iris pseudacorus* y *Phragmites australis*, utilizando como indicador la reducción de la carga contaminante, en términos de DQO del lixiviado pretratado, generado en el relleno sanitario Romerillos, ubicado en la provincia de Pichincha, Cantón Mejía, km 11, vía E35, a fin de aportar con información científica, sobre el potencial de las especies investigadas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia de remoción de DQO, a través de un humedal artificial, utilizando las especies *Canna limbata*, *Iris pseudacorus* y *Phragmites australis*, en los lixiviados procedentes de un tratamiento primario avanzado.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el lixiviado procedente de la planta de tratamiento, mediante parámetros físico-químicos de calidad.

- Determinar la concentración máxima tolerable del lixiviado pretratado, por parte de las macrófitas *Canna limbata*, *Iris pseudacorus* y *Phragmites australis*, mediante una evaluación de las características físicas de las especies, a través de bioensayos.
- Operar un humedal artificial a escala de laboratorio, para cada especie seleccionada, a fin de evaluar su eficiencia en la remoción de DQO del lixiviado pretratado.

1.3 ALCANCE

El presente trabajo de titulación, propone evaluar a nivel laboratorio, la eficiencia de reducción de la carga contaminante, en términos de DQO, del lixiviado pretratado generado en el relleno sanitario Romerillos, a través de un HSSV, utilizando las macrófitas *Canna limbata* e *Iris pseudacorus*, poco investigadas en estos biosistemas, además de *Phragmites australis*, como especies depuradoras de lixiviados.

La información obtenida, será un aporte científico, para ser divulgada y consolidada, sobre el rol de esta vegetación ornamental, en procesos hidro-biológicos, que de ser favorable el estudio, permitirá tomar políticas apropiadas para una mejor gestión de este tipo de aguas residuales en sistemas menores.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Los lixiviados están constituidos por contaminantes de variada toxicidad como: materia orgánica, metales pesados, componentes inorgánicos y xenobióticos; los cuales son responsables de los impactos negativos en ciertos componentes del ambiente (agua y suelo), como lo reportan diferentes estudios (Kiss & Encarnación, 2006).

Mor et al., (2006), analizaron la calidad del agua subterránea, cercana al relleno sanitario en Gazipur, India; determinando que ésta fue afectada debido a la infiltración de los lixiviados a la capa subterránea del suelo; mientras que Kasasi

et al., (2008), mediante una caracterización de suelo, de un relleno sanitario en Thessaloniki, Grecia, determinaron altas concentraciones de metales pesados.

Debido a los impactos al ambiente, aumentó la preocupación ambiental en cuanto al tratamiento de lixiviados, desarrollándose tecnologías para tal fin. En la actualidad, se encuentran tratamientos fisicoquímicos, biológicos y recirculación (Zafra & Romero, 2019). Los humedales artificiales, son un tipo de tratamiento biológico, de bajo costo, de fácil operación y mantenimiento que involucra la interacción entre sus diferentes componentes. Los humedales artificiales principalmente dependen del desempeño de la vegetación implantada, permitiendo la depuración de las aguas, por medio de la captura de carbono, nutrientes y oligoelementos los cuales son incorporados en sus tejidos (Fonseca, 2010).

Debido a su fiabilidad, sencillez y alta rentabilidad, el tratamiento biológico se utiliza habitualmente para la eliminación de la mayor parte de los lixiviados que contienen elevadas concentraciones de DBO y de DQO. La biodegradación es llevada a cabo por microorganismos, que pueden degradar los compuestos orgánicos a CO_2 y lodo en condiciones aeróbicas y a biogás en condiciones anaeróbicas. Los procesos biológicos han demostrado ser muy eficaces para eliminar la materia orgánica y nitrogenada de los lixiviados inmaduros cuando la relación DBO/DQO tiene un valor elevado ($>0,5$) (Peng, 2017).

Por consiguiente, el presente trabajo de titulación pretende aportar con información científica básica en el campo de tratamiento de lixiviados con tecnología no convencional, evaluando la eficiencia de remoción de DQO, a través de un HSSV, con especies ornamentales, que, de ser consolidada, puede formar parte de un tratamiento alternativo eficiente, que permitiría reducir el volumen almacenado en diferentes rellenos, a través de la descarga de los mismos cumpliendo las normativas vigentes.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 HUMEDALES Y TIPOS

2.1.1 HUMEDALES NATURALES

Los humedales naturales son sistemas ecológicos complejos que incorporan procesos físicos, biológicos y químicos. Estos humedales desempeñan un importante papel en la protección de los ecosistemas de agua dulce y marinos frente a los aportes excesivos de nutrientes, agentes patógenos, limo, demanda de oxígeno, metales, sustancias orgánicas y sólidos en suspensión, además de servir de amortiguador frente a las tormentas, estabilizar el suelo y servir de hábitat a la fauna. La Convención sobre los Humedales de Importancia Internacional, conocida comúnmente como la Convención de Ramsar, celebrada en 1971, estableció un marco mundial para la conservación de los humedales naturales. Las estimaciones de la superficie de los ecosistemas de humedales a escala mundial varían entre 917 millones de ha a 1270 millones de ha (Metcalfé et al., 2018).

Estos cuerpos semiterrestres forman parte del ecosistema y son hábitat para numerosos seres vivos. Se encuentran inundados durante parte o la totalidad del año, dependiendo de su ubicación. Históricamente, los humedales se denominaban ciénagas, marismas, pantanos, en función de las condiciones de las plantas, del agua y del entorno geográfico (Kadlec & Wallace, 2009).

Por más de un siglo los humedales han sido descuidados debido al desconocimiento de la población, siendo utilizados como receptores de aguas residuales, este mismo hecho permitió observar una mejora en la calidad del agua en los humedales naturales, concluyendo su capacidad de autodepuración de aguas residuales (Comisión Nacional del Agua, 2019). En consecuencia, a partir de 1971, se iniciaron las investigaciones en Europa, Estados Unidos y Suramérica, acerca de humedales que sean capaces de emular los procesos de descontaminación de las aguas y con resultados satisfactorios, originándose así los denominados humedales artificiales o construidos (Suárez et al., 2014).

2.1.2 HUMEDALES ARTIFICIALES

Son zanjas largas y estrechas o canales poco profundos, que fueron creados de manera artificial, los cuales por medio de un monocultivo o policultivo de plantas (macrófitas), emulan procesos de depuración (Crespi et al., 2018), a través de la interacción entre los diferentes componentes: agua, sustrato, microorganismos y vegetación, resultando en la reducción del contenido de nutrientes, MO, y sustancias tóxicas, presentes en diversos influentes (Mosquera & Lara, 2012).

Las profundidades varían, dependiendo de la penetración de las raíces de la vegetación plantada, por lo general es de hasta 1 m, esto con la finalidad de disminuir las zonas con ausencia de oxígeno. Los humedales plantados con *Phragmites australis* son los más comunes, con una profundidad de 0,6 - 0,8 m (Vymazal, 2002).

Los humedales artificiales proporcionan un tratamiento a diferentes tipos de aguas residuales, siendo estas de origen industrial o doméstico, incluyendo a los lixiviados de rellenos sanitarios, puesto que sus eficiencias reportadas por varios autores, en la eliminación de distintos contaminantes en las aguas, son prometedoras (Altafin, 2020).

Según Rahman et al., (2020), los humedales de flujo subterráneo reportan eficiencias de DBO (27 - 98%), DQO (11,1 - 96%) y SST (17,3 - 88%). La vegetación seleccionada en estos procesos, se ha centrado en el uso de ciertas especies de macrófitas emergentes: *Thypha*, *Spircus* y *Phragmites* (Calheiros et al., 2007), por ello, existen pocas investigaciones en cuanto al uso de otro tipo de macrófitas denominadas ornamentales, a pesar de sus eficiencias reportadas en la depuración de ciertos tipos de aguas.

En aguas residuales domésticas sintéticas, Montoya et al., (2010), utilizando *Canna limbata*, registraron remociones de DQO del 97,49%, mientras que Lenis & Bernal, (2019), utilizando *Iris pseudacorus*, reportaron una eficiencia del 91,15% para DQO. En aguas residuales municipales, Abou & Hellal, (2012), utilizando

Canna limbata reportaron una eficiencia de DQO del 88%, mientras que Barco & Borin, (2017), utilizando *Iris pseudacorus* registraron una remoción de DQO del 46,7%.

Adicionalmente, los humedales artificiales son de fácil operación, no requieren de reactivos químicos ni de energía eléctrica, además, poseen una productividad baja de lodos residuales, razón por la cual sus costos de operación y mantenimiento son bajos. Es por ello que estos sistemas no convencionales son considerados una tecnología sostenible, ecológica y económica (Espinosa et al., 2007).

La aplicación de este tipo de tecnologías en países de Europa y Norteamérica, donde los climas predominantes son templados a fríos, se ha logrado consolidar y expandir debido a sus grandes resultados, sin embargo, en países en desarrollo, donde las condiciones de temperatura son mucho más favorables, su información e implementación es escasa (Alarcón et al., 2018).

La mayoría de los estudios se realizaron en Asia (45%) y Europa (41%), mientras que pocos se realizaron en América del Norte (12%) y ninguno en África. La mayoría de los estudios se centraron en el tratamiento de amoníaco-N y DQO (Bakhshoodeh et al., 2020).

Aunque los beneficios de los humedales artificiales son múltiples, su aplicación sigue presentando problemas, como la disponibilidad de terrenos, el apoyo de la comunidad, el mantenimiento y la supervisión. El rendimiento de los humedales artificiales puede ser deficiente si el diseño o el mantenimiento del humedal son deficientes. Aunque el mantenimiento y el funcionamiento de los humedales artificiales es menos exigente que el de los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales, siguen necesitando un mantenimiento y una supervisión regulares. Los retos de la implantación de los humedales también pueden estar motivados por los costos de capital, que variarán en todo el mundo, dependiendo de la disponibilidad de materiales y de los costos de la mano de obra (Metcalf et al., 2018)

2.1.3 COMPONENTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales artificiales, independientemente del tipo constan principalmente de los siguientes componentes:

- Impermeabilizante

Es una especie de recubrimiento, instalado en la base del humedal, con el objetivo de prevenir posibles infiltraciones o fugas de agua residual y alteraciones en el balance hídrico y de masa, asegurando así una depuración eficaz. Los métodos más usados en la impermeabilización son: i) con suelos arcillosos, ii) geomembranas (polietileno de alta densidad, espesor de 0,75 - 1 mm) y iii) concreto (Alarcón et al., 2018).

- Sistema de distribución y recogida del agua residual

García & Corzo, (2008), explican que los elementos que los constituyen son:

- i) Arquetas, depósitos usados para recibir o enlazar diferentes canalizaciones,
- ii) Red de tuberías, permiten la distribución y circulación homogénea del agua a través del humedal; y
- iii) Canales de entrada, es la vía de ingreso del agua residual.

- Sustrato o lecho filtrante

Son medios de soporte y fijación para las plantas y microorganismos del sistema de tratamiento, además, opera como conductor hidráulico (Romero et al., 2009). Está compuesto por diferentes capas de grava gruesa, grava fina y arena, cuyos rangos de diámetro son variados. Su disposición debe ser adaptada a la disponibilidad del material y a la dirección de flujo del agua en el humedal (Z. Ji et al., 2022). Conforme a la dirección, existe el sustrato para el flujo horizontal como se observa en la Figura 2.1 a y para el flujo vertical como se observa en la Figura 2.1 b.

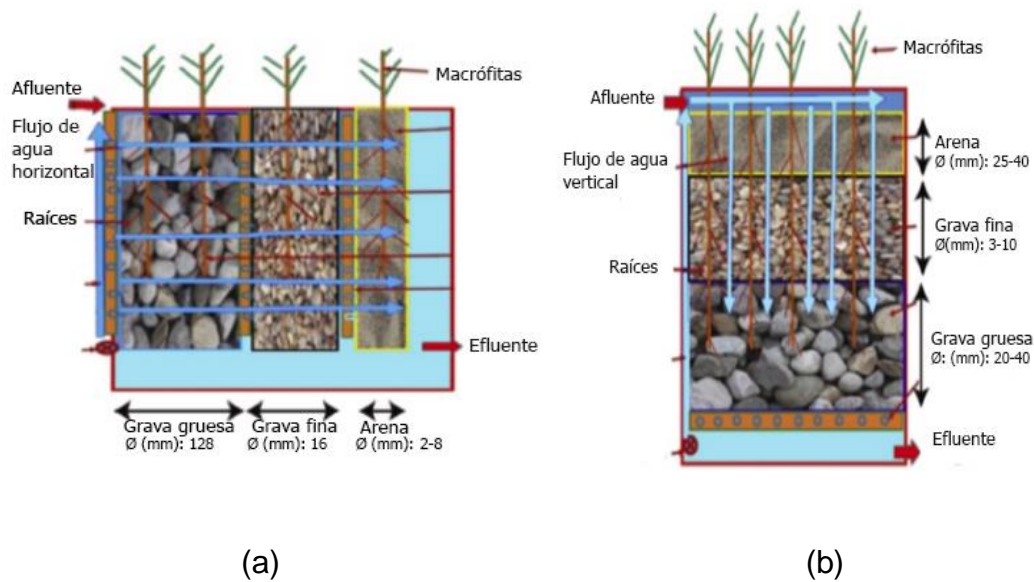


Figura 2.1. Tipos de disposición del sustrato en los humedales artificiales, horizontal (a) y vertical (b)

Fuente: Ji et al., (2022)

Elaborado por: Christian Totoy

- Microorganismos

Los microorganismos llevan a cabo el tratamiento biológico, mediante la eliminación de nutrientes y elementos traza, la desinfección y la degradación de materia orgánica. Existen dos tipos de microorganismos localizados en distintas zonas del humedal, microorganismos aerobios (zona superior) y anaerobios (resto de la zona) (Arias, 2004). Entre los microorganismos presentes en el biofilm, se pueden encontrar: hongos, bacterias, levaduras y protozoarios (Delgadillo et al., 2010).

- Vegetación

Es un componente clave para la depuración de aguas residuales. Su funcionamiento está basado en los procesos de fitorremediación (Arias et al., 2010).

La vegetación usada en los humedales artificiales son ciertas especies de plantas acuáticas, denominadas macrófitas. Vidal & Hormazábal, (2018), las definen como toda aquella vegetación cormófitas (presencia de raíz, tallo y hojas), que habita en

ambientes inundados como: estuarios, lagunas, lagos, ríos o arroyos, ya sea flotantes, sumergidos o emergentes, como se ilustra en la Figura 2.2. La vegetación usualmente implantada en los humedales artificiales son macrófitas emergentes de las especies *Thypha* spp., *Phragmites* spp., y *Scirpus* spp (EPA, 2020).

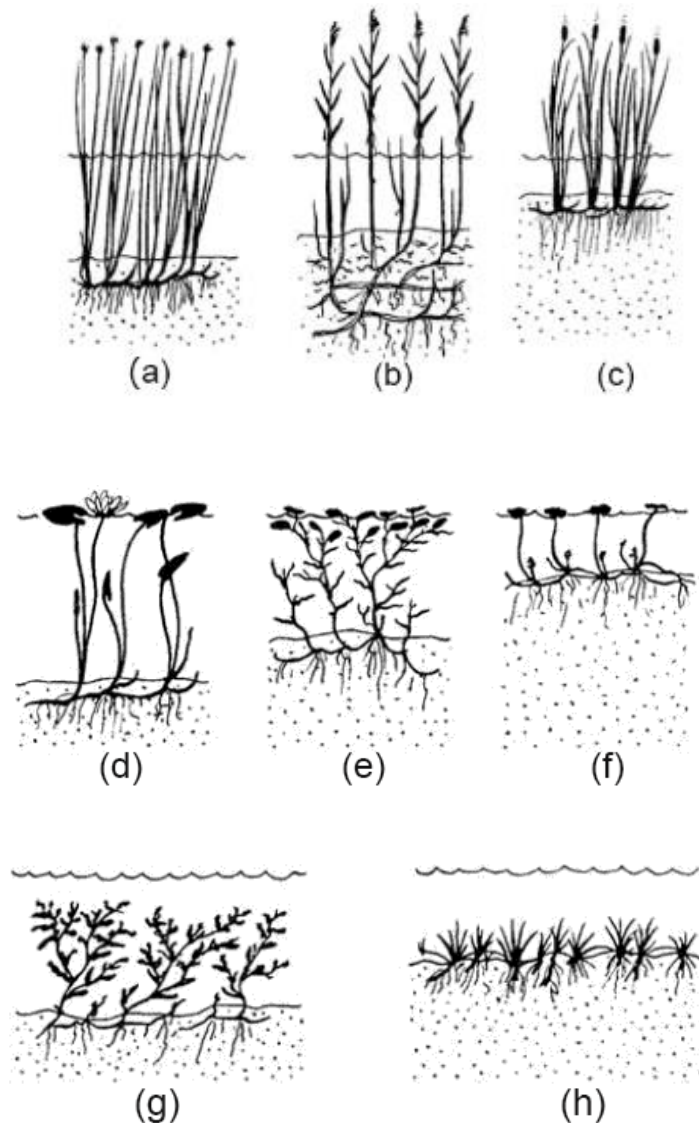


Figura 2.2. Formas de vida dominantes de las macrófitas acuáticas: emergentes: *Scirpus lacustris* (a), *Phragmites australis* (b), *Typha latifolia* (c); flotantes: *Nymphaea alba* (d), *Potamogeton gramineus* (e), *Hydrocotyle vulgaris* (f) y sumergidas: *Potamogeton crispus* (g), *Littorella uniflora* (h)

Fuente: Kadlec & Wallace, (2009)

Elaborado por: Christian Totoy

Estas absorben nutrientes y acumulan los contaminantes, además de crear sitios adecuados para el crecimiento del biofilm, liberar oxígeno dentro del sustrato y brindar estética en el lugar. Su implementación está en función de la resistencia ante los medios agresivos del agua residual y a las condiciones climáticas de la zona a implementarse, por ello, su selección debe ser minuciosa, a través de pruebas preliminares de laboratorio (Corzo & Sanabria, 2019).

2.1.4 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Según la EPA, (2020), clasifica a los humedales según el tipo de vegetación presente y a la circulación del flujo del agua.

De acuerdo al tipo de macrófitas a utilizarse en los lechos los humedales se clasifican en:

- i) Humedales artificiales con macrófitas de hojas flotantes
- ii) Humedales artificiales con macrófitas sumergidas
- iii) Humedales artificiales con macrófitas enraizadas emergentes

El uso de estos diferentes tipos de macrófitas en el tratamiento de las aguas residuales, dependerá de su capacidad de resistencia antes los medios agresivos que poseen dichas aguas (Arias & Brix, 2003).

De acuerdo a la circulación del agua que se emplee:

- i) Humedales de flujo superficial (HS)

Son sistemas en donde la circulación del agua ocurre especialmente a lo largo del humedal, a través de los tallos de las macrófitas, como se observa en la Figura 2.3, de esta manera los sólidos en suspensión y la materia orgánica se depositan en el trayecto. Este tipo de humedales son una variante del sistema de lagunas convencionales. Son menos profundos (no más de 0,6 m) (Delgadillo et al., 2010).

Generalmente consta de un canal en el que se puede controlar el nivel del agua mediante una estructura de salida, la vegetación al estar expuesta directamente a la atmósfera, utiliza el viento y la energía solar, para proporcionar aireación a través de la interfaz agua-aire de la superficie y para realizar la fotosíntesis (Kirby, 2013).

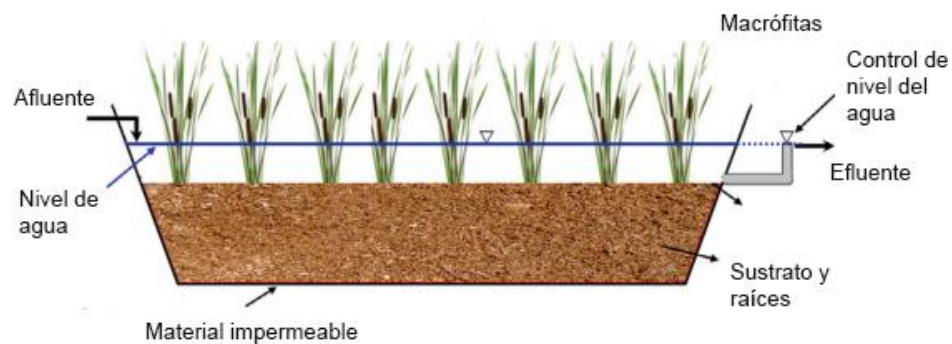


Figura 2.3. Esquema de un humedal de flujo superficial

Fuente: Stefanakis et al., (2014)

Elaborado por: Christian Totoy

ii) Humedales de flujo subterráneo (HSS)

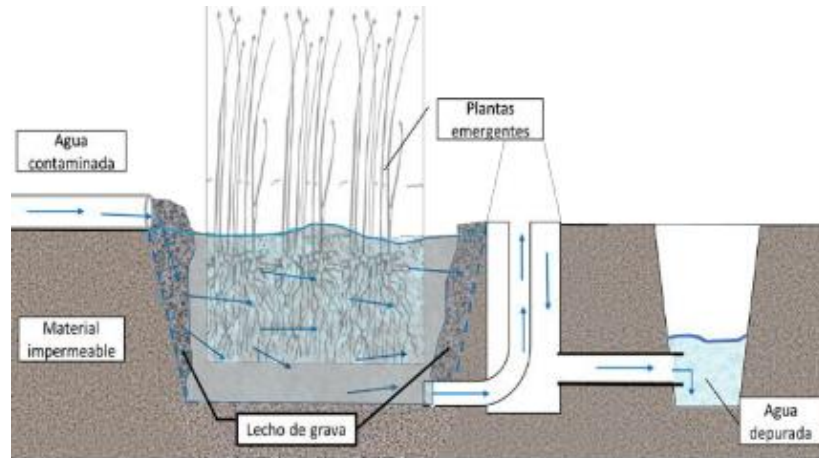
Estos humedales generalmente poseen una profundidad aproximada de entre 0,3 y 0,9 m, el nivel del agua se encuentra por debajo de la superficie, razón por la cual las macrófitas emergentes son el tipo de vegetación común, en este tipo de humedales. Están diseñados para la depuración de aguas residuales en su fase final, debido a ciertas ventajas (Fonseca, 2010):

- Previenen la presencia o propagación de insectos
- Previenen los malos olores
- El contacto de personas con el agua pretratada es casi nulo

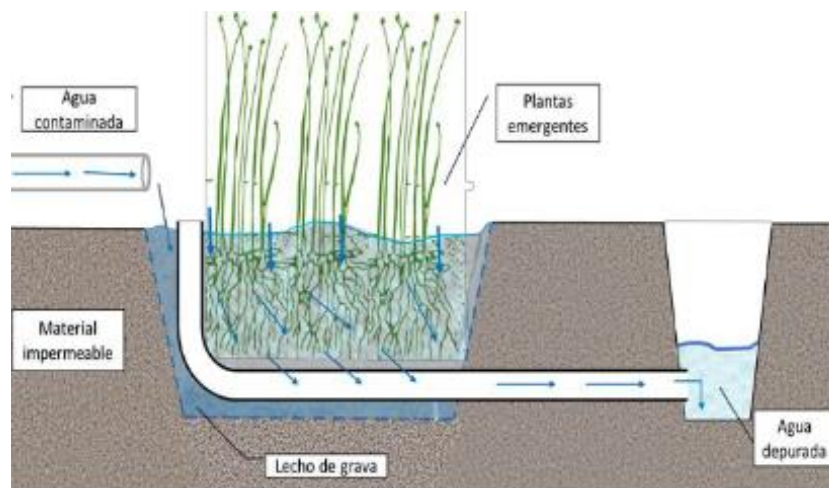
La actividad biológica ocurre dentro del sustrato, constituido por grava, arena gruesa u otro material filtrante. En la actualidad son de los humedales más usados

en el tratamiento de aguas residuales procedentes de la industria alimentaria, industria textil, industria del carbón, etc. (Grinberga, 2020).

En estos humedales la circulación del agua puede ser de manera horizontal o vertical, como se indica en la Figura 2.4.



(a)



(b)

Figura 2.4. Esquema de un humedal artificial de flujo subterráneo: horizontal (a) y vertical (b)

Fuente: Alarcón et al., (2018)

Elaborado por: Christian Totoy

En un HSSH, el agua residual ingresa en un extremo del lecho, circulando horizontalmente a lo largo del medio granular entre las raíces de las macrófitas, y termina siendo recogida en el otro extremo por un tubo de drenaje, como se ilustra en la Figura 2.4 (a). Mientras que en un HSSV, el agua vertida, desciende gradualmente a través del lecho, para finalmente ser recolectada por una red de drenaje en la base (Morales, 2008; Vymazal & Kröpfelová, 2008), como se ilustra en la Figura 2.4 (b).

2.2 SELECCIÓN DE VEGETACIÓN

2.2.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN

La selección apropiada de las macrófitas, es crucial para el desempeño del humedal artificial. Por ello, a continuación, se presentan ciertos criterios que se deben tener en cuenta.

La Comisión Nacional del Agua, (2019), hace referencia que la selección de macrófitas, está en función del tipo de humedal artificial:

- HS, donde se pueden seleccionar macrófitas sumergidas, flotantes y/o emergentes; y
- HSS, donde prima el uso de macrófitas emergentes.

Agregando a lo anterior, Kadlec et al., (2000), señalan otros criterios a tomar en cuenta:

- localidad, deben ser especies nativas, caso contrario, deben soportar condiciones climáticas de la zona en cuestión,
- tolerancia y asimilación de altas cargas contaminantes,
- resistencia a enfermedades e insectos,
- profundidad del agua,
- potencial de crecimiento,
- calidad del agua esperada; y
- costo de la plantación.

2.2.2 APLICACIÓN DE LAS MACRÓFITAS

En función de los criterios para la selección de vegetación anteriormente descritos, se presenta información relevante, en relación a las especies usadas en el presente proyecto. En la Tabla 2.1 se encuentra información sobre las macrófitas usadas en diferentes partes del mundo, en la Tabla 2.2 se presentan las profundidades máximas de agua tolerables por parte de las macrófitas y en la Tabla 2.3 se encuentran las eficiencias reportadas para el tratamiento de distintos tipos de aguas.

Tabla 2.1

Implementación de macrófitas emergentes en diferentes áreas para el tratamiento de aguas residuales

Espece de planta	Tipo de agua	Área reportada	Observaciones
<i>Iris pseudacorus</i>	Municipal	España, República Checa, México, China, Irán	Buena eliminación de TN, amoníaco, nitrato, DQO, alta aireación
	Doméstica		
<i>Canna limbata</i>	Municipal	China, India, Vietnam, Denmark	Tolerancia a alta carga contaminante, mejor eliminación de TN, TP y DQO, alta capacidad de absorción de nutrientes
	Gris		
<i>Phragmites australis</i>	Municipal	Zonas templadas y tropicales	Eficientes en la remoción de DQO, DBO, N, P. Tolerante a metales.
	Textil		

Fuente: Katakí et al., (2021)

Elaborado por: Christian Totoy

Tabla 2.2

Profundidad tolerable aproximada de agua por parte de las macrófitas emergentes

Espece de planta	Profundidad máxima de agua (m)
<i>Iris pseudacorus</i>	< 0,05 - 0,2

Continuación de la Tabla 2.2

Especie de planta	Profundidad máxima de agua (m)
<i>Canna limbata</i>	< 0,05 - 0,25
<i>Phragmites australis</i>	< 0,05 - 0,5

Fuente: Kadlec et al., (2000)

Elaborado por: Christian Totoy

Tabla 2.3

Eficiencias de remoción de materia orgánica con el uso de macrófitas emergentes en distintos tipos de agua

Especie de macrófita	Tipo de agua residual	Eficiencia en DQO (%)	Eficiencia en DBO (%)
<i>Canna limbata</i>	Municipal	77	86
	Doméstica	82,31	88,6
<i>Iris pseudacorus</i>	Curtiembre	41 - 73	41 - 58
	Doméstica	45 - 72	57 - 88
<i>Phragmites australis</i>	Municipal	91 - 93	93 - 94
	Textil	81	66

Fuente: Calheiros et al., (2007; Kataki et al., (2021); Rahman et al., (2020)

Elaborado por: Christian Totoy

2.2.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS MACRÓFITAS

i) *Canna limbata*

Comúnmente conocida como achira, posee una altura aproximada de hasta 2 m, se la distingue por sus láminas foliares las cuales son particularmente elípticas, con

una longitud de hasta 65 cm, además de sus sépalos elípticos de color rojo, (Lázaro, 1995; Universidad Nacional Autónoma de México, 2009).

Se desarrolla en una variedad de condiciones climáticas, soporta ligeras heladas de hasta 0 °C, crece normalmente a temperaturas bajas menores a 10 °C y altas temperaturas de 30-32 °C, prefiere una precipitación media anual de 1000-2000 mm, sin embargo, tolera precipitaciones de entre 250-4000 mm. Los suelos favorables para su desarrollo, incluyen suelos meteorizados, tropicales, húmedos, ácidos, arcillosos y pantanosos, sin embargo, existe preferencias por los suelos profundos, franco arenoso y aireado, con un pH de 4-8 (Lim, 2016).

ii) *Iris pseudacorus*

También conocida como lirio amarillo, es una planta perenne erecta, posee una altura aproximada de 40-150 cm. Su rizoma mide 1-4 cm de diámetro, con raíces de una longitud de hasta 30 cm, aunque generalmente suelen ser de 10-20 cm. Se las identifica por sus espatas que contienen entre 5 a 10 flores de color amarillo con un diámetro de 8-10 cm, con hojas de 1,5-2,5 cm de diámetro, largas y estrechas (Chinery, 1998; Sutherland, 1990).

Su desarrollo ocurre en una variedad de condiciones ambientales, incluyendo temperaturas bajo cero, sin embargo, las plántulas no toleran temperaturas por debajo de los -10 °C. Se encuentran en zonas áridas, manantiales desbordados, laderas húmedas y sobre todo en zonas donde existe mucha filtración, como en valles y pantanos. Sus requerimientos de nitrógeno son altos, posee gran resistencia a suelos ácidos con pH de 3,6-7,7. Su colonización ocurre rápidamente a partir de fragmentos de rizoma (Hill et al., 2016; Sutherland, 1990; Tu, 2003).

iii) *Phragmites australis*

Conocida como carrizo, es una planta robusta que alcanza una altura de 2-6 m, generalmente forma rodales densos y extensos, es muy variable morfológica y genéticamente, es de fácil propagación a partir de sus rizomas perenes, sus raíces

penetran en el suelo alcanzando una profundidad de 60 cm, poseen hojas con lígula membranácea ciliada y crecen en agua estancada con profundidades de 1 m o más (Brix et al., 2014; Fonseca, 2010; Lot et al., 2015).

Es una especie que se encuentra en la mayor parte del mundo, originaria de la flora británica. Se desarrolla en diferentes climas, desde fríos en límite latitudinales de 70 ° N y 43 ° S hasta tropicales, como en los oasis al norte de África y Austria central. Los sustratos en los que crece son variados, encontrándose en suelos inundados, marismas y arenas litorales, donde las raíces y rizomas se encuentren totalmente cubiertas por el nivel freático, además, sobrevive a rangos de pH de 2,5-9,8 (Packer et al., 2017).

2.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA POR MEDIO DE LOS HUMEDALES

2.3.1 INFLUENCIA DEL CLIMA FRÍO EN LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA POR MEDIO DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Debido a la viabilidad de costos y eficiencias, la implementación de los humedales artificiales en todo el mundo, va en aumento, siendo utilizados exitosamente para el tratamiento de una vasta gama de aguas residuales (industriales, municipales, domésticas, etc.), en zonas donde predominan los climas tropicales y subtropicales (Beutel, 2012; Kujala et al., 2019). Sin embargo, en zonas de clima frío, donde las temperaturas de los meses más fríos y más cálidos poseen una temperatura media menor a 0°C y mayor a 10 °C respectivamente (Wittgren & Mæhlum, 1997), han producido ciertas complicaciones en los procesos de depuración.

Las bajas temperaturas repercuten en los componentes del humedal, disminuyendo su desempeño. La actividad microbiana que ocurre en el sustrato y la viscosidad del agua residual disminuyen, dificultando el transporte de oxígeno y provocando una acumulación de la materia orgánica en el sistema. Además, la red de tuberías que permiten la circulación del agua residual, puede sufrir obstrucciones o roturas, debido a un posible congelamiento (Ji et al., 2020; Varma et al., 2021).

En cuanto a las macrófitas, las bajas temperaturas las inactivan, ya que ocasionan un secado prematuro a la vegetación, reducen su metabolismo. En consecuencia, el suministro de oxígeno al humedal disminuye y por ende, la remoción de carga orgánica y principalmente la reducción de nitrógeno y fósforo disminuye también (Stein & Hook, 2010; Wang et al., 2016).

A pesar de los efectos negativos del clima frío, existen zonas en donde han sido implementados un gran número de humedales artificiales con ciertas estrategias, permitiendo disminuir los efectos del clima frío, como en Noruega, Canadá, parte del norte de EE.UU., centro y noreste de Europa y parte del norte de China (Ji et al., 2020).

Gao & Hu, (2012), mediante la implementación de una estructura de invernadero, lograron mantener la temperatura de las aguas residuales por encima de los 8 °C, teniendo en cuenta que la temperatura atmosférica del lugar es de menos de -30 °C, de esta manera la eficiencia de remoción de DQO aumento un 20%. Otra técnica es el uso de un material aislante (lana de roca o paja, etc.), con el fin de mantener una temperatura adecuada en el proceso de depuración, Zhang et al., (2006), utilizaron una película de plástico como material aislante, alcanzando una eficiencia de remoción de DQO del 46,6%. Además, debido al bajo desempeño de las macrófitas, para el transporte de oxígeno necesario para la degradación completa de la materia orgánica, se han estudiado la implementación de aireación artificial a través de ventiladores o difusores (Brix, 1997). Ouellet-Plamondon et al., (2006), implementaron la aireación artificial en la zona de la raíz que trataba aguas residuales de una granja, con grandes resultados, obtuvieron una eficiencia en la remoción de DQO del 90%.

2.3.2 MECANISMOS QUE INFLUYEN EN LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA POR MEDIO DE LOS HUMEDALES

La materia orgánica está presente en los humedales artificiales de forma particulada o disuelta (Alarcón et al., 2018), su eliminación es compleja ya que

depende de la interrelación de procesos físicos, químicos y biológicos, además, su desempeño difiere y depende del diseño del humedal (Dotro et al., 2017).

La materia orgánica particulada es removida una vez que el agua residual fluye a través del conjunto sustrato-raíces-tallo, mediante la filtración. Este proceso ocurre en diferentes zonas dependiendo del humedal, cerca de la entrada en los HSSH y cerca de la superficie en los HSSV (Morales et al., 2013). Sin embargo, la acumulación del material orgánico es un problema en los HSSV, debido a que puede ocasionar taponamientos en estos sistemas, por ello, es recomendable que el afluente haya sido tratado previamente (Dotro et al., 2017).

Por otro lado, la materia orgánica disuelta, dependiendo de la presencia o ausencia de oxígeno disuelto, es degradada particularmente mediante dos mecanismos:

- Vía aerobia

Los HSSH, para la degradación de materia orgánica, requieren de oxígeno en un rango de $2-4 \frac{g}{m^2 \text{ día}}$ (Kadlec & Wallace, 2009), y el oxígeno liberado por las raíces de las macrófitas es insuficiente, en consecuencia, la degradación es poco efectiva en este tipo de humedales (Vymazal, 2002). En cambio, en los HSSV, las concentraciones de oxígeno son mayores, por ende, la ocurrencia de esta vía predomina en estos sistemas (Kadlec & Wallace, 2009). La remoción ocurre prácticamente en su totalidad, dentro del biofilm presente en el sustrato, en las raíces y hasta en los sedimentos (Kadlec et al., 2000).

Este proceso es realizado primordialmente por la presencia de microorganismos quimioheterótrofos quienes están adheridos a las macrófitas y a los sedimentos, estos oxidan compuestos orgánicos utilizando el oxígeno que proviene directamente de la atmósfera o el que es captado por las plantas y trasladado a la base de las raíces (Delgadillo et al., 2010). Su aplicación ha permitido alcanzar remociones de materia orgánica con valores de hasta un 75% y 80% para DBO₅ y DQO respectivamente (Vymazal, 2005).

- Vía anaerobia

Es una vía mucho más lenta que el aerobio, su ocurrencia está ligada a la ausencia de oxígeno en los humedales y a las altas cargas contaminantes de las aguas residuales (Kadlec et al., 2000), principalmente en los HSSH, ya que son sistemas que se encuentran saturados de agua y por ende existe un desplazamiento de los gases atmosféricos de los poros, promoviendo el origen de un sustrato anóxico (Secretariado Alianza por el Agua, 2014).

Las bacterias fermentativas facultativas permiten el desarrollo de esta vía, mediante la transformación de las moléculas complejas (materia orgánica) en monómeros simples (ácido láctico, ácido acético, etanol, dióxido de carbono e hidrógeno) para ser utilizados por las bacterias metanogénicas y sulfatoreductoras en sus actividades metabólicas, promoviendo la formación de CH_4 y CO_2 , proceso conocido como metanogénesis (Alarcón et al., 2018; García & Corzo, 2008).

2.4 TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN HUMEDALES ARTIFICIALES

Los lixiviados provenientes de rellenos sanitarios, son un tipo de líquido residual generados por la percolación de agua lluvia y el agua producida por los mismos desechos, en su proceso de biodegradación, posee elevadas cantidades de materia orgánica disuelta, iones de metales pesados, sales y distintos compuestos orgánicos como pesticidas, alifáticos clorados, entre otros compuestos (Teng et al., 2021).

La generación y la calidad depende de algunos elementos: tipo, grado de compactación, nivel y volumen de degradación de los residuos sólidos, además, del nivel de desarrollo del país y el tiempo de operación del relleno principalmente de la celda de almacenamiento de los lixiviados. En este sentido, considerando la edad del relleno, existen lixiviados: i) jóvenes y ii) maduros, cuya diferencia resalta en la elevada carga contaminante que poseen los primeros (Méndez et al., 2002; Torres et al., 2014), tal y como se ilustra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4*Caracterización de lixiviados en función de su edad*

Edad del relleno	Joven (<2 años)	Joven (<2 años)	Maduro (> 10 años)
Constituyentes	Rango	Valor típico	Rango típico
DQO	3000 - 60000	18000	100 - 500
DBO₅	2000 - 30000	10000	100- 200
COT	1500 - 20000	6000	80 - 160
SST	200 - 2500	500	100- 400
Nitrógeno Total	20 - 1500	400	100 - 200
Fósforo Total	5 - 100	30	5 - 10
pH	5 - 8	6	6,6 - 7,5

Fuente: Caicedo, (2006)**Elaborado por:** Christian Totoy

Estos líquidos debido a sus contaminantes químicos y biológicos de elevada toxicidad, pueden causar problemas en la salud humana y el ambiente (Raco et al., 2013); el impacto ambiental más significativo es la contaminación de fuentes de aguas subterráneas y superficiales, razón por la cual, el tratamiento de lixiviados se ha convertido en la mayor preocupación ambiental relacionada a los rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales.

Existen múltiples técnicas y tecnologías para el tratamiento de lixiviados, como fisicoquímicos, biológicos y recirculación (Pablos et al., 2011). Sin embargo, son costosas tanto en su implementación como en su operación, además de no ser totalmente eficientes, principalmente debido a la materia orgánica disuelta, ya que dificultan los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, evidenciándolo

en eficiencias reportadas de DQO del 40% (Méndez et al., 2008; Mosquera & Lara, 2012).

Por el contrario, existen tratamientos naturales menos costosos en su operación, de fácil manejo que se logran adaptar a diferentes niveles de tratamiento (Mosquera & Lara, 2012), tal es el caso de los humedales artificiales, los cuales además de abaratan los costos de tratamiento, con un consumo energético inclusive nulo (Programa de Medio Ambiente, 2010; Morales et al., 2013).

Vymazal, (1995), en su revisión señala que, aunque los costos de construcción pueden ser similares a los de las tecnologías convencionales, los costos en cuanto a su operación y mantenimiento son menores, convirtiéndolos en una alternativa ecológicamente racional y con mayor rentabilidad en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios.

En cuanto a su eficiencia, los humedales artificiales se han utilizado con éxito para la eliminación de carga orgánica en los lixiviados (Akinbile et al., 2012). La revisión realizada por Bakhshoodeh et al., (2020), reveló eficiencias de remoción de carga orgánica en HSSH y HSSV, con DBO de 60,1% y 79,7% y DQO del 54,5% y 59,2%, respectivamente. Además, recalca que la eficiencia de remoción está ligada al tiempo en el cual los contaminantes están en contacto con las raíces de las macrófitas y el sustrato, a este tiempo se lo denomina tiempo de retención hidráulico (TRH), en dicha investigación la máxima remoción de carga contaminante ocurrió entre los 7-9 días.

Por otra parte, Sánchez et al., (2013), investigaron la remoción de carga contaminante de lixiviados pre tratados, mostrando que a partir del día 1 la eficiencia fue significativa, en la DBO y la DQO fue de 53,27% 46,72% respectivamente, por ende, como lo sugiere Ghosh & Gopal, (2010), es importante investigar su eficiencia con un TRH mayor (>4 días).

En la tabla 2.5 se presentan las eficiencias de remoción reportadas en términos de DQO, con lixiviados en distintos tratamientos con humedales artificiales.

Tabla 2.5

Eficiencias de remoción de carga orgánica en lixiviados mediante humedales artificiales

Tipo de tratamiento	% de remoción	
	DBO	DQO
HS	57-91	41-81,6
HSSV	86-97	27,3-96
HSSH	26,7-98	11,1-94
LAN-LA-2HSSH-FL	87,5-97,5	81,6-90
LA-FL-FA		
LAC-HSSV		
3HSSV		
2HSSV-1HSSH	59	50
HSSH-HSSV	65,5	40,9

Fuente: Mosquera & Lara, (2012)

Elaborado por: Christian Totoy

Como se observa en la Tabla 2.5 los humedales artificiales cuando son implementados en un tren de tratamiento, alcanzan eficiencias notoriamente significativas, mientras que cuando son aplicados en solitario, tienden a disminuir su eficiencia.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Relleno Sanitario Romerillos se localiza a 13 km aproximadamente del centro de la ciudad de Machachi en la Provincia de Pichincha, cantón Mejía, en el km 11 vía E 35 o Panamericana Sur. Esta zona posee una temperatura entre 0 °C y 8 °C y una precipitación anual entre 1000 mm y 2000 mm (Gobierno del Cantón Mejía, 2019). En la Figura 3.1, se puede apreciar la distribución espacial del relleno sanitario.

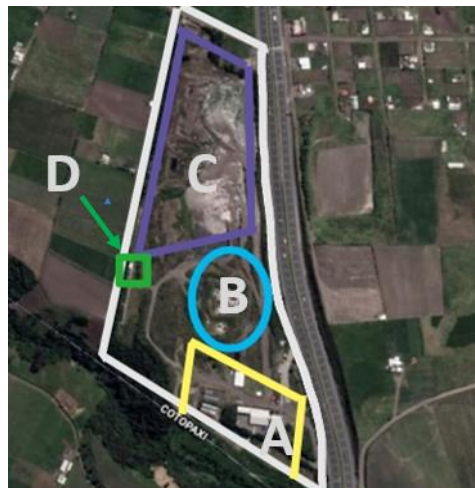


Figura 3.1. Ubicación de la zona de estudio: A) área administrativa, de separación y reciclaje de residuos, B) antiguo botadero, C) área de las celdas 1 a 4 y las piscinas de lixiviado y D) es la ubicación de la planta de tratamiento.

Elaborado por: Christian Totoy

Los lixiviados utilizados en la presente investigación correspondieron al efluente de la Planta de Tratamiento del relleno sanitario Romerillos, localizada en la zona D, recolectados al final del tratamiento, con un caudal promedio de 1,44 m³/día.

3.2 EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD BIOLÓGICA DE LA VEGETACIÓN ORNAMENTAL

Para el presente estudio, en base a las guías botánicas y atlas de las plantas correspondientes, se identificaron y se utilizaron las siguientes macrófitas, ilustradas en las figuras 3.2, 3.3 y 3.4:

- *Iris pseudacorus* (Lirio Amarillo), (Chinery, 1998).



Figura 3.2. *Iris pseudacorus*

Elaborado por: Christian Totoy

- *Canna limbata* (Achira), (Universidad Nacional Autónoma de México, 2009).



Figura 3.3. *Canna limbata*

Elaborado por: Christian Totoy

- *Phragmites australis* (Carrizo), (Lot et al., 2015).



Figura 3.4. *Phragmites australis*

Elaborado por: Christian Totoy

Previo a la puesta en marcha de los humedales y siguiendo las recomendaciones de Corzo & Sanabria, (2019), la vegetación ornamental seleccionada fue sometida a pruebas preliminares de viabilidad biológica a través de bioensayos toxicológicos. Similar al trabajo realizado por Cuenca & Carrión C., (2009) y Castillo, (2004), las especies vegetales fueron expuestas, durante 30 días, a diferentes concentraciones, acuosas, de lixiviado: 0, 25, 50, 75 y 100 %, en botellas PET, de 2 L de capacidad. Al final del periodo de exposición se determinaron algunas propiedades morfológicas de la vegetación, a fin de comparar con las condiciones iniciales y el grupo de control (0%) además de la tolerabilidad de la vegetación al lixiviado del relleno sanitario Romerillos.

Las especies seleccionadas fueron colectadas en lonas, transportadas al lugar de experimentación, para determinar las condiciones iniciales de indicadores fisiológicos como altura de la planta, color de hojas, número de hojas, color de raíz y principalmente la longitud promedio de las raíces como se observa en la Figura 3.5. Posteriormente, la vegetación fue colocada en las respectivas unidades experimentales (botellas PET) y colocadas en unidades experimentales (botellas PET).

Se dispuso un duplicado por cada gradiente de concentración, con un total de treinta unidades experimentales. El lugar de trabajo y la disposición de las mismas se muestran en la Figura 3.6.



Figura 3.5. Registro de las condiciones iniciales

Elaborado por: Christian Totoy



Figura 3.6. Lugar de trabajo y disposición de las plantas

Elaborado por: Christian Totoy

Las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3, presentan los datos recolectados en los ensayos de viabilidad de las especies vegetales, además, los registros fotográficos presentados en los Anexos 1 y 2 permiten constatar algunos de los cambios observados y registrados durante la operación de las unidades experimentales, además, en el Anexo 3, constan las hojas de campo utilizadas para la recolección de los datos de las tablas mostradas a continuación.

Tabla 3.1

*Características fisiológicas de *Canna limbata* antes y después de 30 días de exposición a concentraciones de 0, 25, 50, 75 y 100 % de lixiviado sanitario pretratado.*

Concentración	Unidad experimental	Desarrollo foliar y radicular inicial (0 días)	Desarrollo foliar y radicular final (30 días)
0%	C1.1	Planta madre de altura 64,3 cm y con 3 hojas verdes Hijuelo con altura de 23 cm y 2 hojas verdes Raíces blancas de 10 cm de largo	Planta madre de altura 64,8 cm, con 1 hoja verde y 1 hoja marchita Hijuelo marchito con altura de 23,2 cm y 2 hojas marchitas Predominio de raíces grises de 10,6 cm de largo
	C1.2	Planta madre de altura 58,2 cm y con 5 hojas verdes Hijuelo de altura 3,5 cm Raíces blancas de 12,3 cm de largo	Planta madre de altura 58,9 cm, con 3 hojas verdes y 2 hojas marchitas Hijuelo marchito de altura 3,6 cm Predominio de raíces grises de 12,7 cm de largo
25%	C2.1	Planta madre de altura 57 cm y con 1 hoja verde Hijuelo de altura 6,5 cm Raíces blancas de 9,5 cm de largo	Planta madre de altura 57,4 cm y con 1 hoja verde Hijuelo marchito de altura 6,4 cm Predominio de raíces negras y grises de 10 cm de largo
	C2.2	Planta madre de altura 65 cm y con 3 hojas verdes Raíces blancas de 17,5 cm de largo	Planta madre de altura 65,2 cm, con 1 hoja verde y 2 hojas marchitas Predominio de raíces negras y grises de 17,9 cm de largo
50%	C3.1	Planta madre con altura de 51,1 cm y 2 hojas verdes Hijuelo de altura 10,5 cm Raíces blancas de 18,2 cm de largo	Planta madre con altura de 51,5 cm y 2 hojas verdes Hijuelo marchito de altura 10,3 cm Predominio de raíces negras y grises de 18,5 cm de largo

Continuación de la Tabla 3.1

Concentración	Unidad experimental	Desarrollo foliar y radicular inicial (0 días)	Desarrollo foliar y radicular final (30 días)
50%	C3.2	Planta madre de altura 59,6 cm y con 3 hojas verdes Hijuelo de altura 48,5 cm y con 2 hojas verdes Raíces blancas de 10,6 cm de largo	Planta madre de altura 59,8 cm, con 2 hojas verdes 2 1 hoja marchita Hijuelo marchito de altura 48,4 cm y con 2 hojas marchitas Predominio de raíces negras y grises de 11 cm de largo
75%	C4.1	Planta madre de altura 50,8 cm y con 2 hojas verdes Raíces blancas de 13,1 cm de largo	Planta madre de altura 50,6 cm, con 1 hoja empezando a marchitarse y 1 hoja marchita Predominio de raíces negras y grises de 13,3 cm de largo
	C4.2	Planta madre de altura 67 cm y con 6 hojas color verde Hijuelo de altura 10 cm Raíces blancas de 13,1 cm de largo	Planta madre de altura 66,8 cm, con 1 hoja empezando a marchitarse y 5 hojas marchitas Hijuelo marchito de altura 9,8 cm Predominio de raíces negras y grises de 13,3 cm de largo
100%	C5.1	Planta madre de altura 59 cm y con 4 hojas verdes 2 hijuelos de altura 9,5 cm y 3,5 cm Raíces blancas de 16 cm de largo	Planta madre de altura 59 cm, con 1 hojas empezando a marchitar y 3 hojas marchitas 2 hijuelos marchitos de altura 9,2 cm y 3,2 cm Predominio de raíces negras y grises de 16,1 cm de largo
	C5.2	Planta madre de altura 57,2 cm y con 2 hojas verdes Hijuelo de altura de 8,5 cm Raíces blancas de 17,2 cm de largo	Planta madre de altura 57,1 cm, con 1 hoja empezando a marchitarse y 1 hoja marchita Hijuelo marchito de altura de 8,1 cm Predominio de raíces negras y grises de 17,4 cm de largo

Elaborado por: Christian Totoy

Tabla 3.2

Características fisiológicas de Iris pseudacorus antes y después de 30 días de exposición a concentraciones de 0, 25, 50, 75 y 100 % de lixiviado sanitario pretratado.

Concentración	Unidad experimental	Desarrollo foliar y radicular inicial (0días)	Desarrollo foliar y radicular final (30 días)
0%	I1.1	47 cm de altura con 9 hojas verdes Raíces blancas y amarillo anaranjadas de 17 cm de largo	47,7 cm de altura con 7 hojas verdes y 2 hojas naranja-amarillo Raíces blancas y amarillo anaranjadas de 17,6 cm de largo

Continuación de la Tabla 3.2

Concentración	Unidad experimental	Desarrollo foliar y radicular inicial (0días)	Desarrollo foliar y radicular final (30 días)
0%	11.2	57 cm de altura con 7 hojas verdes Raíces blancas y amarillo anaranjadas de 13 cm de largo	57,8 cm de altura con 4 hojas verdes y 3 hojas naranja-amarillo Raíces blancas y amarillo anaranjadas de 13,5 cm de largo
	12.1	37,2 cm de altura con 7 hojas verdes Raíces blancas y amarillo anaranjadas de 12 cm de largo	37,5 cm de altura con 5 hojas verdes y 2 hojas naranja-amarillo Raíces blancas y amarillo anaranjadas de 12,4 cm de largo
25%	12.2	79,4 cm de altura con 9 hojas verdes Predominio de raíces blancas de 23 cm de largo	79,9 cm de altura con 7 hojas verdes y 2 hojas naranja-amarillo Predominio de raíces blancas de 23,5 cm de largo
	13.1	61,4 cm de altura con 9 hojas verdes Raíces blancas y amarillo anaranjadas de 12 cm de largo	62,1 cm de altura con 7 hojas verdes y 2 hojas naranja-amarillo Raíces blancas y amarillo anaranjadas de 12,3 cm de largo
50%	13.2	41,1 cm de altura con 6 hojas verdes Predominio de raíces blancas de 21 cm de largo	41,6 cm de altura con 5 hojas verdes y 1 hoja naranja-amarillo Predominio de raíces blancas de 21,5 cm de largo
	14.1	68,6 cm de altura con 8 hojas verdes Predominio de raíces blancas de 25.1 cm de largo	69,2 cm de altura con 6 hojas verdes y 2 hojas naranja-amarillo Predominio de raíces blancas de 25.5 cm de largo
75%	14.2	65.2 cm de altura con 11 hojas verdes Raíces blancas y amarillo anaranjadas de 32 cm de largo	65.7 cm de altura con 8 hojas verdes y 3 hojas naranja-amarillo Raíces blancas y amarillo anaranjadas de 32,5 cm de largo
	15.1	62 cm de altura con 12 hojas verdes Predominio de raíces amarillo anaranjadas de 15 cm de largo	62,8 cm de altura con 8 hojas verdes y 4 hojas naranja-amarillo Predominio de raíces amarillo anaranjadas de 15,6 cm de largo
100%	15.2	64,5 cm de altura con 9 hojas verdes Predominio de raíces blancas de 27,5 cm de largo	65,4 cm de altura con 7 hojas verdes y 2 hojas naranja-amarillo Predominio de raíces blancas de 28,1 cm de largo

Elaborado por: Christian Totoy

Tabla 3.3

Características fisiológicas de Phragmites australis antes y después de 30 días de exposición a concentraciones de 0, 25, 50, 75 y 100 % de lixiviado sanitario pretratado.

Concentración	Unidad experimental	Desarrollo foliar y radicular inicial (0 días)	Desarrollo foliar y radicular final (30 días)
0%	I1.1	42 cm de altura con 2 hojas verdes Raíces blancas y marrones de 18,4 cm de largo	42,3 cm de altura con 1 hoja verde y 1 hoja gris visón Raíces blancas y marrones de 19 cm de largo
	I1.2	40 cm de altura con 6 hojas verdes Raíces blancas y marrones de 17 cm de largo	40,8 cm de altura con 5 hojas verdes y 1 hoja gris visón Raíces blancas y marrones de 17,4 cm de largo
25%	I2.1	Planta madre seca de altura 37,8 cm Hijuelo de altura 28 cm con 3 hojas verdes Raíces blancas y marrones de 16,2 cm de largo	Planta madre seca de altura 37,8 cm Hijuelo de altura 28,3 cm con 3 hojas verdes Raíces blancas y marrones de 16,7 cm de largo
	I2.2	76,1 cm de altura con 5 hojas verdes Predominio de raíces blancas de 9 cm de largo	77 cm de altura con 5 hojas verdes Predominio de raíces blancas de 9,7 cm de largo
50%	I3.1	58,5 cm de altura con 4 hojas verdes Predominio de raíces blancas de 5 cm de largo	59,2 cm de altura con 3 hojas verdes y 1 hoja gris visón Predominio de raíces blancas de 5,6 cm de largo
	I3.2	52 cm de altura con 2 hojas verde Raíces blancas y marrones de 14 cm largo	52,3 cm de altura con 2 hojas verde Raíces blancas y marrones de 14,4 cm largo
75%	I4.1	64,3 cm de altura con 4 hojas verde Raíces blancas y marrones de 28 cm de largo	65,1 cm de altura con 3 hojas verde y 1 hoja gris visón Raíces blancas y marrones de 28,5 cm de largo
	I4.2	64 cm de altura con 3 hojas verde Predominio de raíces blancas de 20,5 cm de largo	64 cm de altura con 2 hojas verde y 1 hoja gris visón Predominio de raíces blancas de 21,1 cm de largo
100%	I5.1	67,8 cm de altura con 5 hojas verdes Raíces blancas de 14 cm de largo	68,6 cm de altura con 5 hojas verdes Raíces blancas de 14,4 cm de largo

Continuación de la Tabla 3.3

Concentración	Unidad experimental	Desarrollo foliar y radicular inicial (0 días)	Desarrollo foliar y radicular final (30 días)
100%	15.2	70,5 cm de altura con 4 hojas verdes Raíces blancas de 14,2 cm de largo.	71,2 cm de altura con 4 hojas verdes Raíces blancas de 14,7 cm de largo.

Elaborado por: Christian Totoy

Además, se tomaron muestras del efluente en vasos de precipitación de 100 ml, de las diferentes diluciones preparadas, como se ilustra en la Figura 3.7, con el fin de conocer la carga contaminante a la que fueron expuestas las especies. La Tabla 3.4, presenta los resultados de la caracterización físico-química, respectiva.



Figura 3.7. De izquierda a derecha, Diluciones 0%, 25%, 50%, 75%, 100%

Elaborado por: Christian Totoy

Tabla 3.4

Parámetros físico-químicos de las diluciones del lixiviado sanitario

Parámetros	Concentraciones				
	0%	25%	50%	75%	100%
DQO (mg/L)	0,0	223	700	1380	2248
pH	7,77	8,79	8,47	8,32	8,36

Continuación de la Tabla 3.4

Parámetros	Concentraciones				
	0%	25%	50%	75%	100%
Temperatura (°C)	12,1	12,5	11,8	11,5	11,9
Color (Pt-Co)	19	37	101	260	322
Nitrógeno amoniacal (mg/L)	0,4	1,1	131	640	1600
Nitratos (mg/L)	0,4	1,1	5,71	12,1	16,9
Fosfatos (mg/L)	0,73	1,53	2,3	4,9	6,1

Elaborado por: Christian Totoy

3.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Para la depuración de lixiviado procedente de un tratamiento primario del relleno sanitario Romerillos, se propuso un HSSV, puesto que al desarrollarse el tratamiento en la subsuperficie del suelo, y frente a las condiciones climáticas del sitio, como lo indican Werker et al., (2002), las comunidades bacterianas, en parte, responsables de la depuración de las aguas residuales, logran aislarse parcialmente del aire gélido beneficiando así su desarrollo y mantenimiento.

Los humedales artificiales en general son construidos utilizando una geometría rectangular, ya que benefician la depuración de las aguas, además, en cuanto a su profundidad esta se encuentra ligada a la longitud de las raíces de las macrófitas, puesto que su contacto con el agua posibilita un efecto en el tratamiento (Comisión Nacional del Agua, 2019). Por ello, los HSSV se desarrollaron a escala de laboratorio, en modo batch, siguiendo la recomendación de Delgadillo et al., (2010), se utilizó una relación largo: ancho 2:1 (0,73 m x 0,34 m).

Por otra parte, se consideró una capa de sustrato (cascajo) de 0,30 m, puesto que la longitud de las raíces de las macrófitas, se encontraban en un rango de 0,20 m y 0,25 m, además, resultó necesario considerar un borde libre de 0,05 m, ya que como lo sugiere United Nations Human Settlements Programme, (2008), es necesario tener en cuenta en el diseño el acumulamiento de lodos que se producen en estos sistemas, puesto que de esta manera se evita el desbordamiento del material.

El dimensionamiento anteriormente expuesto, se ilustra en la Figura 3.8.

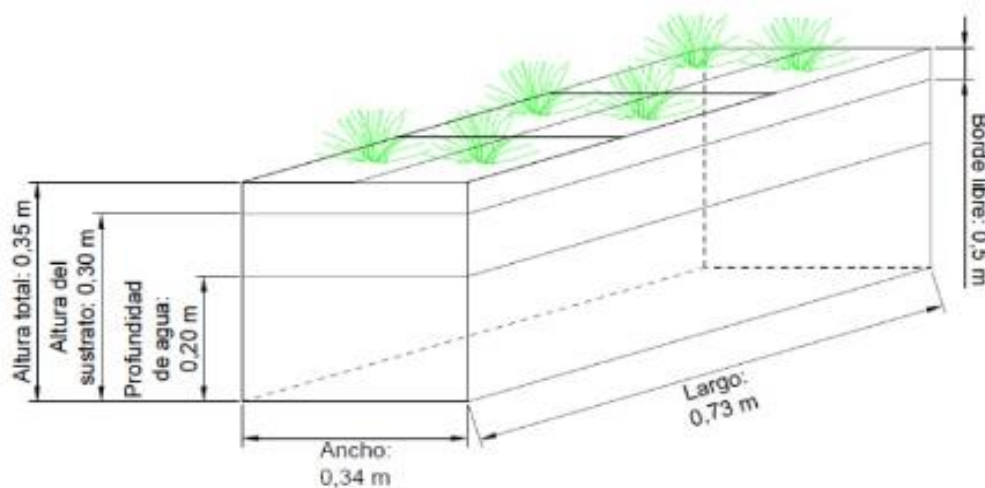


Figura 3.8. Dimensiones utilizadas en cada HSSV a escala de laboratorio

Elaborado por: Christian Totoy

Las propiedades físicas del sustrato utilizado se presentan en la Tabla 3.5, mismas que fueron determinadas mediante un análisis granulométrico, en el Laboratorio de Ensayos de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental (FICA) en la Escuela Politécnica Nacional. El cálculo de la porosidad del sustrato utilizado se obtuvo a partir de la ecuación 3.1, con los datos obtenidos en el laboratorio para el cálculo de gravedad específica y absorción mostrados en el Anexo 4, con un valor de 32,7%:

$$\text{Porosidad } (n) = \frac{(W_{ss} - W_{seco})}{V_T} * 100\% \text{ (Ecuación 3.1)}$$

Donde:

W_{ss} = Peso del sustrato saturado

W_{seco} = Peso de sustrato seco

VT = Volumen total

$$Porosidad (n) = \frac{(300,2 - 208,8)g * \frac{cm^3}{1g}}{(188,1 + 91,4) cm^3}$$

$$Porosidad (n) = 32,7\%$$

Tabla 3.5

Características físicas del sustrato

Granulometría		n= 32,7%
mm	%	
9,50	2,80	
4,75	17,2	
2,36	30,7	
1,18	28,1	
0,6	14,5	
0,3	3,0	

Elaborado por: Christian Totoy

En base en los resultados del ensayo en cuanto a la viabilidad de las especies presentados en el capítulo 4, se adecuaron 3 HSSV, descartando a *Canna limbata* por su baja tolerancia a lixiviado, estos HSSV se desarrollaron a escala de laboratorio, como se indica en la Figura 3.9, cada uno con 6 especies esto con la finalidad de que sus raíces ocupen su respectiva área para facilitar su desarrollo.

- HSSV 1: especie *Phragmites australis*
- HSSV 2: especie *Iris pseudacorus*
- HSSV 3: sin especie

Este último actuó como testigo, de esta manera los resultados son comparables y discutibles con respecto a los humedales con especies.



Figura 3.9. De izquierda a derecha: HSSV 1, HSSV 2 Y HSSV 3

Elaborado por: Christian Totoy

3.4 PUESTA EN MARCHA DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO VERTICAL

Para el vertido de lixiviado en los humedales, se consideró la tolerabilidad de las macrófitas a inundaciones a una determinada profundidad, propuestos por Kadlec et al., (2000), por consiguiente, se estableció una profundidad de agua de 0,2 m, obteniendo así un volumen de 24 L.

El volumen necesario de lixiviado, fue recolectado de la planta de tratamiento con la ayuda de un recipiente aforado, este fue depositado en un barril, con la finalidad de homogeneizar la muestra, posteriormente el lixiviado fue vertido en los humedales con el mismo recipiente hasta alcanzar la profundidad de agua establecida anteriormente.

El proceso fue sometido a repeticiones durante seis semanas, durante las cuales únicamente en los TRH establecidos existió un efluente, es decir cada semana al TRH=0 días, se cargaba un volumen de 24 L, a los TRH= 2, 5 y 7 días se recolectaba el efluente de cada unidad experimental, para ser sometido a un análisis físico-químico.

3.5 EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DE LOS HUMEDALES

Una vez realizada la aplicación de lixiviados a los humedales, se procedió a monitorear los parámetros físicos y químicos de caracterización descritos en la Tabla 3.6., de los efluentes como se observa en la Figura 3.10, utilizando los tiempos de retención de 2, 5 y 7 días, puesto que, de acuerdo a los estudios realizados por Sánchez et al., (2013) y Ghosh & Gopal, (2010), se evidencia la posibilidad de un mejor tratamiento utilizando TRH mayores a 1 día. La operación de los HSSV se llevó a cabo durante un periodo de seis semanas.



Figura 3.10. Toma de muestras en los humedales

Elaborado por: Christian Totoy

La caracterización del lixiviado se verificó mediante los parámetros físicos como temperatura y color y de parámetros químicos como pH, nitratos, fosfatos, nitrógeno

amoniaco y Demanda Química de Oxígeno (DQO), parámetros que comúnmente se evalúan en humedales artificiales (Rincón & Millán, 2013)

En parámetros como DQO, nitratos, fosfatos y nitrógeno amoniacal fue necesario aplicar diluciones, 1:2, 1:10, 1:10, 1:1000 (en dos pasos), respectivamente, estos datos fueron recolectados en función de los TRH considerados, en las hojas de campo elaboradas e ilustradas en los Anexos 5 y 6.

Tabla 3.6

Métodos utilizados para la caracterización físico-química, de la calidad del lixiviado

Parámetro	Método
pH	Potenciómetro
Temperatura	Electroquímico
DQO	HACH 8000 DR 1900
Color	HACH 8025 DR 1900
Nitratos	HACH 8039 DR 1900
Fosfatos	HACH 8048 DR 1900
Nitrógeno amoniacal	HACH 8038 DR 1900

Fuente: HACH, (2022)

Elaborado por: Christian Totoy

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO PROCEDENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL RELLENO SANITARIO

El lixiviado proveniente del efluente de la Planta de Tratamiento Romerillos, fue caracterizado previo a la experimentación en los humedales artificiales a nivel de laboratorio, por parámetros físicos y químicos.

La Tabla 4.1 presenta los resultados de los parámetros de caracterización y se compara con la normativa de descargas a cuerpos de agua dulce del Anexo I, Libro VI del TULSMA, (2017) para los parámetros que se encuentran dentro de dicha normativa, evidenciándose que existe incumplimiento en casi todos los parámetros a excepción del pH y temperatura.

Tabla 4.1

Características físicas y químicas del lixiviado del relleno sanitario Romerillos

Parámetro	Promedio \bar{x}	Desviación estándar σ	Valores máximos permisible (TULSMA Libro VI Anexo 1)
			Tabla 9
pH	7,18	0,81	5-9
Temperatura (°C)	12,47	0,39	<35
DQO (mg/L)	1883,94	264,37	250
Color (Pt-Co)	108	13,52	Inapreciable
Nitrógeno amoniacal (mg/L)	1123,33	135,48	30
Nitratos (mg/L)	17,85	10,77	-
Fosfatos (mg/L)	4,78	2,53	-

Elaborado por: Christian Totoy

El lixiviado caracterizado presentó un pH neutro de 7,18 y con una temperatura de 12,47 °C, parámetros que en base al TULSMA, (2017) se encuentran dentro del LMP. Por su parte la temperatura guarda relación con las condiciones ambientales del sitio las cuales oscilan entre 0 °C y 8 °C.

La DQO promedio registrada fue de 1883,9 mg/L, los valores para este parámetro depende de algunos factores como: el diseño del relleno sanitario, la composición de los RSU, las características del sitio y la edad del relleno sanitario, en consecuencia y de manera general en los rellenos sanitarios jóvenes es propio encontrar valores muy altos en relación a este parámetro, valores que superan los 500 mg/L (Caicedo, 2006; Rivera et al., 2013).

El lixiviado presentó un color medio de 108 Pt-Co, esto se debe según lo expuesto por Méndez et al., (2002), a la presencia de la materia orgánica disuelta, en suspensión, fijo o volátil propios de los residuos sólidos.

Los aniones como nitrato, nitrógeno amoniacal forman parte del nitrógeno total, son fundamentales, puesto que su presencia junto con el fósforo, promueven de la formación de la biomasa. Los valores promedio registrados fueron 17,85 mg/L, 1123,33 mg/L y 4,78 mg/L, para nitratos, nitrógeno amoniacal y fosfatos respectivamente, permitiendo inferir una adecuada condición para la aplicación de un tratamiento biológico.

4.2 VIABILIDAD BIOLÓGICA

La tabla 4.2 presenta los resultados de la elongación radicular de la vegetación alcanzada, por exposición a diferentes gradientes de concentración de lixiviado durante un periodo de 30 días.

Tabla 4.2

Estadísticos descriptivos de la elongación de raíz de las diferentes especies expuestas a los diferentes gradientes de concentración

Elongación					
			Media	Desviación estándar	Recuento
<i>Canna limbata</i>	Concentración	0%	0,50	0,14	2
		100%	0,15	0,07	2
		25%	0,45	0,07	2
		50%	0,35	0,07	2
		75%	0,20	0,00	2
<i>Iris pseudacorus</i>	Concentración	0%	0,55	0,07	2
		100%	0,60	0,00	2
		25%	0,45	0,07	2
		50%	0,40	0,14	2
		75%	0,45	0,07	2
<i>Phragmites australis</i>	Concentración	0%	0,50	0,14	2
		100%	0,45	0,07	2
		25%	0,60	0,14	2
		50%	0,50	0,14	2
		75%	0,55	0,07	2

Elaborado por: Christian Totoy

Los resultados y su análisis estadístico ANOVA se presentan en las Tablas 4.3, 4.4 y 4.5 indica, donde además se indica si los datos obtenidos siguen una distribución normal. Los resultados de la prueba de normalidad de detallan a continuación:

Tabla 4.3

Análisis de normalidad aplicado a la elongación de raíz de las diferentes especies expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Elongación	0,176	30	0,072	0,924	30	0,051
a. Corrección de significación de Lilliefors						

Elaborado por: Christian Totoy

Teniendo en consideración, que para una cantidad menor de 50 datos se debe adoptar la prueba de Shapiro – Wilk, las mediciones de elongación de raíz, con una significancia de 0,051 siguen una distribución normal.

Tabla 4.4

Análisis ANOVA aplicado a la elongación de raíz de las diferentes especies expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado

Pruebas de los efectos inter-sujetos					
Variable dependiente: longitud de elongación de la raíz de cada especie					
Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	P
Modelo corregido	0,475 ^a	14	0,034	3,633	0,009
Intersección	5,985	1	5,985	641,286	0,000
Especie	0,209	2	0,104	11,179	0,001
Concentración	0,078	4	0,020	2,089	0,133
Especie * Concentración	0,188	8	0,024	2,518	0,059

Pruebas de los efectos inter-sujetos					
Variable dependiente: longitud de elongación de la raíz de cada especie					
Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	P
Error	0,140	15	0,009		
Total	6,600	30			
Total corregida	0,615	29			
a. R cuadrado = 0,772 (R cuadrado corregida = 0,560)					

Elaborado por: Christian Totoy

Tabla 4.5

Hipótesis sobre los factores del Análisis ANOVA aplicado a la elongación de raíz de las diferentes especies expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado

Fuente	Ho	Ha	P	Interpretación
Modelo global	No hay diferencias significativas entre el promedio de la elongación de la raíz de las diferentes especies expuestas a diferentes concentraciones	Hay diferencias significativas entre el promedio de la elongación de la raíz de las diferentes especies expuestas a diferentes concentraciones	0,009	Debido a que se tiene un valor p menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula al existir una diferencia significativa. Por lo tanto, se infiere que hay diferencias significativas entre el promedio de la longitud de la elongación de la raíz de las diferentes especies expuestas a diferentes concentraciones
Especie	Todas las especies tienen una elongación de raíz semejante.	No todas las especies tienen una elongación de raíz semejante.	0,001	Debido a que se tiene un valor p menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula al existir una diferencia significativa. Por lo tanto, se infiere que no todas las especies tienen una elongación de raíz semejante.

Continuación de la Tabla 4.5

Fuente	Ho	Ha	P	Interpretación
Concentración	La elongación de raíz es semejante en los diferentes gradientes de concentración aplicados.	La elongación de raíz no es semejante en los diferentes gradientes de concentración aplicados.	0,113	Debido a que se tiene un valor p mayor a 0.05 no se rechaza la hipótesis nula al no existir una diferencia significativa. Por lo tanto, se infiere que la elongación de raíz es semejante en los diferentes gradientes de concentración aplicados.
Interacción Especie – Concentración	La elongación de raíz es semejante en cada una de las interacciones de los factores especie y concentración	La elongación de raíz no es semejante en la interacción de los factores especie y concentración	0,059	Debido a que se tiene un valor p mayor a 0.05 no se rechaza la hipótesis nula al no existir una diferencia significativa. Por lo tanto, se infiere que la elongación de raíz es semejante en cada una de las interacciones de los factores especie y concentración

Elaborado por: Christian Totoy

Como se puede observar en la Tabla 4.3, existe una diferencia significativa con un nivel de confianza del 95% para el modelo global y la variable especie, es decir un valor $P < 0,05$, rechazando así la hipótesis nula, en cuanto a las variables concentraciones e interacción especie – concentración, no existe diferencia significativa es decir el valor $P > 0,05$, aceptando estadísticamente la hipótesis nula. Por ello se procede a realizar un test de comparación múltiple una vez rechazada la hipótesis nula, a través de la prueba de Tukey como se indica en la Tabla 4.5.

Los pares de especie que presentan un valor $p < 0,05$ indica diferencias significativas en la Tabla 4.5, con un nivel del 95,0% de confianza, estos valores son correspondientes a la especie *Canna limbata*.

De esta manera se observa que la especie *Canna limbata* posee diferencias en su elongación con respecto al resto de especies en el presente estudio. A partir de esta información se podría establecer que la variable especie en el nivel *Canna limbata* posee una menor elongación de raíz, sin embargo, es necesario considerar el factor concentración, puesto que esta interacción es la responsable de su

diferencia como se observa en la Figura 4.1, además, el resto de indicadores fisiológicos evaluados de igual manera permitieron evidenciar, de manera notoria, que dicha especie mostró cambios bruscos en su desarrollo foliar, en comparación al resto de especies.

Igualmente, fue posible determinar que las especies *Iris pseudacorus* y *Phragmites australis*, toleran un gradiente de concentración al 100%, muy por el contrario, con *Canna limbata* que, debido a la respuesta negativa de sus indicadores fisiológicos, así como la elongación de raíz observada, se logró establecer una tolerancia máxima de un 25% del lixiviado, razón por la cual para la puesta en marcha de los humedales fue descartada su aplicación.

Tabla 4.6

Prueba de Tukey aplicada al tipo de especie

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente: longitud de elongación de la raíz de cada especie						
DHS de Tukey						
(I) Especie expuesta a diferentes concentraciones de lixiviado	(J) Especie expuesta a diferentes concentraciones de lixiviado	Diferencia de medias (I-J)	Error típ.	P	Intervalo de confianza 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Canna	Iris	-0,1600*	0,0432	0,006	-0,2722	-0,0478
	Phragmites	-0,1900*	0,0432	0,001	-0,3022	-0,0778
Iris	Canna	0,1600*	0,0432	0,006	0,0478	0,2722
	Phragmites	-0,0300	0,0432	0,770	-0,1422	0,0822
Phragmites	Canna	0,1900*	0,0432	0,001	0,0778	0,3022
	Iris	0,0300	0,0432	0,770	-0,0822	0,1422

Elaborado por: Christian Totoy

En base a la prueba de Tukey de la Tabla 4.6, donde se realizan comparaciones múltiples, se puede observar que las especies *Iris pseudacorus* y *Phragmites australis* presentan diferencias significativas es decir un $P < 0,05$ esto ocurre únicamente cuando se comparan con la especie *Canna limbata*, constatando que esta última macrófita presentó una elongación de raíz diferente al resto de macrófitas. En la Figura 4.1 se puede observar que esta diferencia se debe a la corta elongación que presentó *Canna limbata* cuando se la expuso a una concentración mayor al 25%.

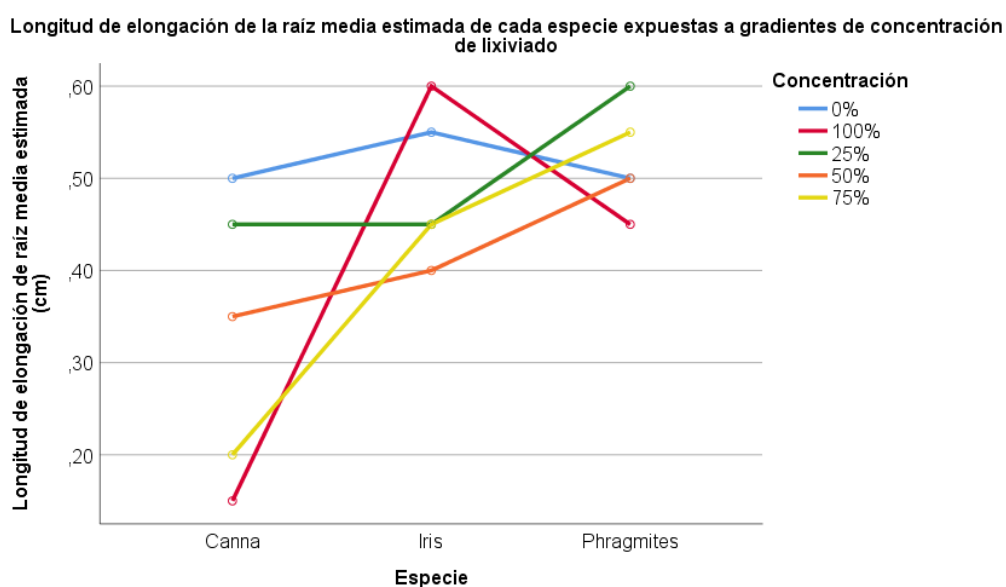


Figura 4.1. Elongación de raíz, media, de las diferentes especies, en los gradientes de concentración aplicados

Elaborado por: Christian Totoy

4.3 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DQO

En la tabla 4.7, se detallan las eficiencias promedio en términos de DQO, calculadas a partir de los datos obtenidos y registrados, que se indica en el Anexo 13 durante las seis semanas de experimentación de cada unidad experimental, en términos de DQO.

Tabla 4.7

Resultados de eficiencia promedio en términos de DQO registradas en los efluentes de los humedales artificiales a nivel de laboratorio, durante las 6 semanas de experimentación, para TRH de 2, 5 y 7 días.

Semana	TRH	<i>Iris pseudacorus</i> (%)	<i>Phragmites australis</i> (%)	Sin especie (%)
1	2	13,66	23,41	41,15
	5	17,76	5,80	46,13
	7	9,26	8,17	32,88
2	2	17,29	16,63	34,47
	5	-4,51	-3,52	21,14
	7	-2,75	1,54	-4,31
3	2	22,09	14,63	50,01
	5	22,92	16,46	45,64
	7	28,40	9,84	24,89
4	2	15,87	26,09	17,27
	5	19,78	23,12	15,34
	7	27,04	22,33	9,59
5	2	10,36	4,71	15,30
	5	17,12	8,81	3,55
	7	22,12	14,55	3,55
6	2	11,19	10,81	40,82
	5	13,19	10,84	36,93
	7	46,17	31,32	28,02

Elaborado por: Christian Totoy

La eficiencia de remoción, se calculó considerando la concentración de DQO inicial al TRH= 0 días y la concentración de DQO final registrado para cada TRH. Además, para evaluar el comportamiento en la remoción, en los diferentes TRH, se utilizó el análisis ANOVA, con medidas repetidas, siendo este parecido al diseño de bloques con la diferencia que a cada unidad experimental se le mide la variable dependiente en los diferentes TRH.

Según Pérez (2009), el funcionamiento de los humedales artificiales depende del periodo de aclimatación de las especies, así como de la formación del biofilm; en base los resultados de las eficiencias, se evaluaron en dos periodos: un periodo de aclimatación y un periodo de post-aclimatación.

En base a las eficiencias obtenidas en la Tabla 4.7, se analizó si dichos datos siguen una distribución normal, a través de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro Wilk. Los resultados se muestran en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8

Análisis de normalidad de la eficiencia de remoción de DQO, con medidas repetidas de las especies para los tiempos de retención 2, 5 y 7 días

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	P	Estadístico	gl	P
Remoción	0,076	108	0,148	0,986	108	0,341
a. Corrección de significación de Lilliefors						

Elaborado por: Christian Totoy

Considerando que, para una cantidad mayor de 50 datos, se adoptan los resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov, los cuales, con un valor de 0,148, muestran que los datos de remoción de DQO siguen una distribución normal. De esta manera se procede a realizar un test estadístico ANOVA con medidas repetidas, el cual se

presenta en la Tabla 4.9, además, también se plantean las respectivas hipótesis presentadas en la Tabla 4.10, las mismas que ajustan al modelo de experimentación realizado.

Tabla 4.9

Análisis ANOVA de la eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas de las especies para los tiempos de retención 2, 5 y 7 días

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Variable dependiente: Disminución					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	P
Modelo corregido	19154,035 ^a	53	361,397	5,037	0,000
Intersección	38144,344	1	38144,344	531,627	0,000
Semana	4953,147	5	990,629	13,807	0,000
THR	376,580	2	188,290	2,624	0,082
Especie	2774,862	2	1387,431	19,337	0,000
Semana * THR	2991,112	10	299,111	4,169	0,000
Semana * Especie	4511,495	10	451,150	6,288	0,000
THR * Especie	2158,489	4	539,622	7,521	0,000
Semana * THR * Especie	1388,350	20	69,418	0,967	0,513
Error	3874,511	54	71,750		
Total	61172,890	108			
Total corregido	23028,546	107			
a. R al cuadrado = 0,832 (R al cuadrado ajustada = 0,667)					

Elaborado por: Christian Totoy

Tabla 4.10

Hipótesis sobre los factores del Análisis ANOVA de la eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas de las especies para los tiempos de retención 2, 5 y 7 días para cada semana.

Fuente	Ho	Ha	P	Interpretación
Modelo global	No hay diferencias significativas entre el promedio de la eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas de las especies para los tiempos de retención 2, 5 y 7 días para cada semana.	Hay diferencias significativas entre el promedio de la eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas de las especies para los tiempos de retención 2, 5 y 7 días para cada semana.	0,000	Debido a que se tiene un valor p menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula al existir una diferencia significativa. Por lo tanto, se infiere que hay diferencias significativas entre el promedio de la eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas de las especies para los tiempos de retención 2, 5 y 7 días para cada semana.
Semanas	La eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas es semejante en las diferentes semanas de implantación.	La eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas no es semejante en las diferentes semanas de implantación.	0,000	Debido a que se tiene un valor p menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula al existir una diferencia significativa. Por lo tanto, se infiere que la eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas no es semejante en las diferentes semanas de implantación.
THR	La eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas es semejante en los diferentes THR.	La eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas no es semejante en los diferentes THR.	0,082	Debido a que se tiene un valor p mayor a 0.05 no se rechaza la hipótesis nula al no existir una diferencia significativa. Por lo tanto, se infiere que la eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas no es semejante en los diferentes THR.
Especie	La eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas es semejante en las diferentes especies.	La eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas no es semejante en las diferentes especies.	0,000	Debido a que se tiene un valor p menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula al existir una diferencia significativa. Por lo tanto, se infiere que la eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas no es semejante en las diferentes especies.

Continuación de la Tabla 4.10

Fuente	Ho	Ha	P	Interpretación
Interacción Semana - THR	La eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas es semejante en cada una de las interacciones de los THR y la semana de implantación.	La eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas no es semejante en cada una de las interacciones de los THR y la semana de implantación.	0,000	Debido a que se tiene un valor p menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula al existir una diferencia significativa. Por lo tanto, se infiere que la eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas no es semejante en cada una de las interacciones de los THR y la semana de implantación.
Interacción Semana - Especie	La eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas es semejante en cada una de las interacciones de las especies y la semana de implantación.	La eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas no es semejante en cada una de las interacciones de las especies y la semana de implantación.	0,000	Debido a que se tiene un valor p menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula al existir una diferencia significativa. Por lo tanto, se infiere que la eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas no es semejante en cada una de las interacciones de las especies y la semana de implantación.
Interacción THR - Especie	La eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas es semejante en cada una de las interacciones de los THR y las especies.	La eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas no es semejante en cada una de las interacciones de los THR y las especies.	0,000	Debido a que se tiene un valor p menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula al existir una diferencia significativa. Por lo tanto, se infiere que la eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas no es semejante en cada una de las interacciones de los THR y las especies.
Interacción Semana - THR - Especie	La eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas es semejante en cada una de las interacciones de las semanas de implantación, los THR y las especies.	La eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas no es semejante en cada una de las interacciones de las semanas de implantación, los THR y las especies.	0,513	Debido a que se tiene un valor p mayor a 0.05 no se rechaza la hipótesis nula al no existir una diferencia significativa. Por lo tanto, se infiere que la eficiencia de remoción de DQO con medidas repetidas no es semejante en cada una de las interacciones de las semanas de implantación, los THR y las especies.

Elaborado por: Christian Totoy

Es así que se rechaza la hipótesis nula en aquellas fuentes donde su nivel de significancia es $p < 0,05$. Además, mediante las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4, se puede

evidenciar el comportamiento de reducción de DQO respecto a los TRH, a lo largo del tiempo de experimentación teniendo en cuenta aquellas fuentes donde $p < 0,05$.

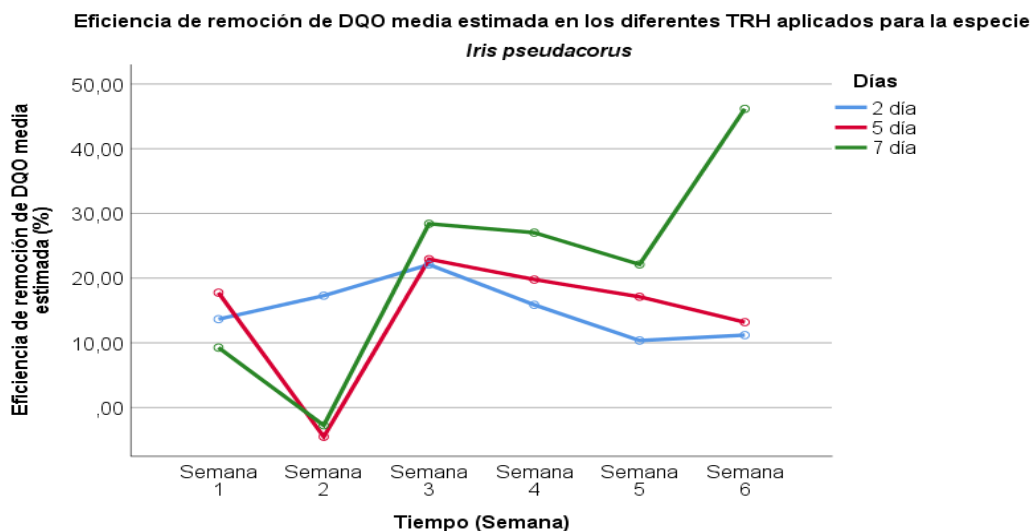


Figura 4.2. Eficiencia de remoción, media, de *Iris pseudacorus*, con los diferentes tiempos de retención en las distintas semanas de implantación

Elaborado por: Christian Totoy

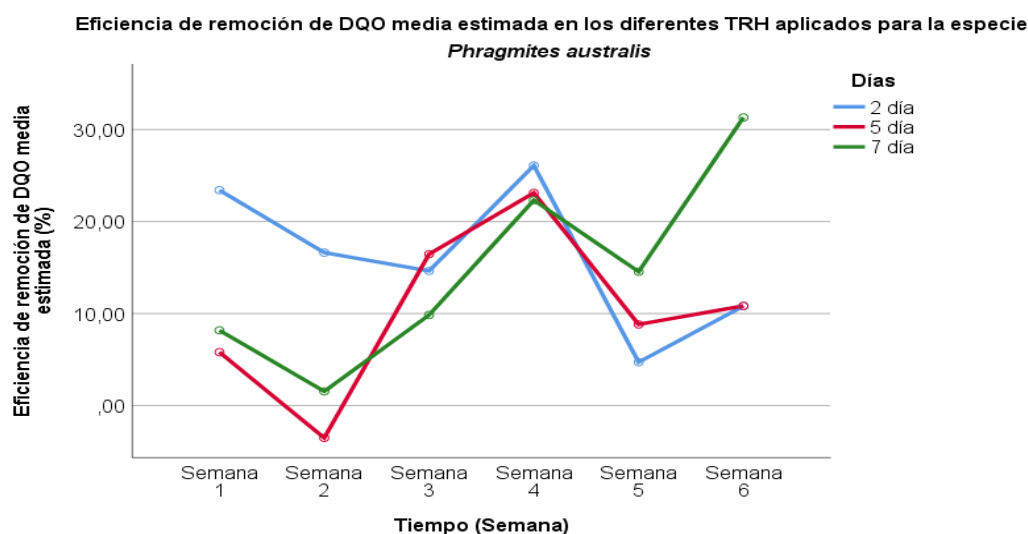


Figura 4.3. Eficiencia de remoción, media, de *Phragmites australis*, con los diferentes tiempos de retención en las distintas semanas de implantación

Elaborado por: Christian Totoy

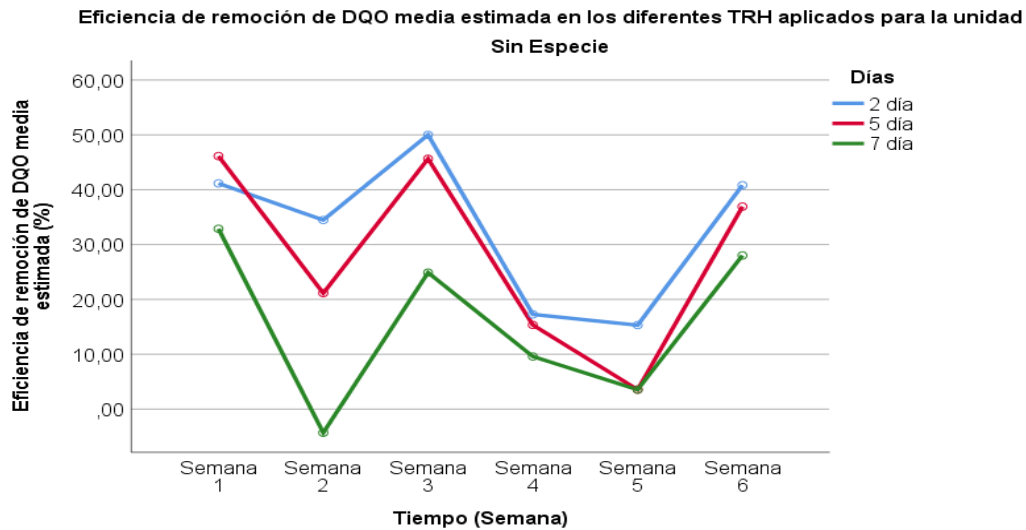


Figura 4.4. Eficiencia de remoción, media, de las unidades únicamente con sustrato, con los diferentes tiempos de retención, en las distintas semanas de implantación

Elaborado por: Christian Totoy

En base a las eficiencias obtenidas y mostradas en la Tabla 4.7, así como en las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 ilustradas anteriormente, se puede apreciar que con un TRH= 5 días, en la segunda semana, los HSSV plantados con *Iris pseudacorus* y *Phragmites australis*, registraron su pico más bajo, con una eficiencia promedio de -4,51% y -3,52%, respectivamente, mientras que el pico más bajo, para la unidad sin especie, con un TRH= 7 días fue en la segunda semana, con una eficiencia promedio de -4,31%. Por otro lado, el pico más alto en las unidades implantadas con *Iris pseudacorus* y *Phragmites australis* fue en un TRH= 7 días durante la sexta semana, con un valor de 46,17% y 31,32%, respectivamente, mientras que para la unidad sin especie su pico más alto fue en la tercera semana con un TRH= 2 días, registrando una eficiencia de 50,01%.

Además, es posible evidenciar que durante la mayoría del tiempo de operación la unidad sin especie registró una mejor eficiencia con un TRH= 2 días, como se observa en la línea de tendencia de la Figura 4.4, mientras que la unidad con *Iris pseudacorus* a partir de la tercera semana, un TRH= 7 días arrojó una mejor

eficiencia en comparación resto de TRH, como se visualiza en la Figura 4.2. La unidad con *Phragmites australis*, se puede observar en la Figura 4.3 que a partir de la quinta semana, con un TRH= 7 días comenzó a aumentar su eficiencia en comparación a las anteriores semanas.

4.4 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO DEL HUMEDAL

4.4.1 pH

En la Figura 4.5 se presentan los resultados de los pH registrados en las unidades experimentales, durante el periodo de experimentación de seis semanas y para los TRH considerados.

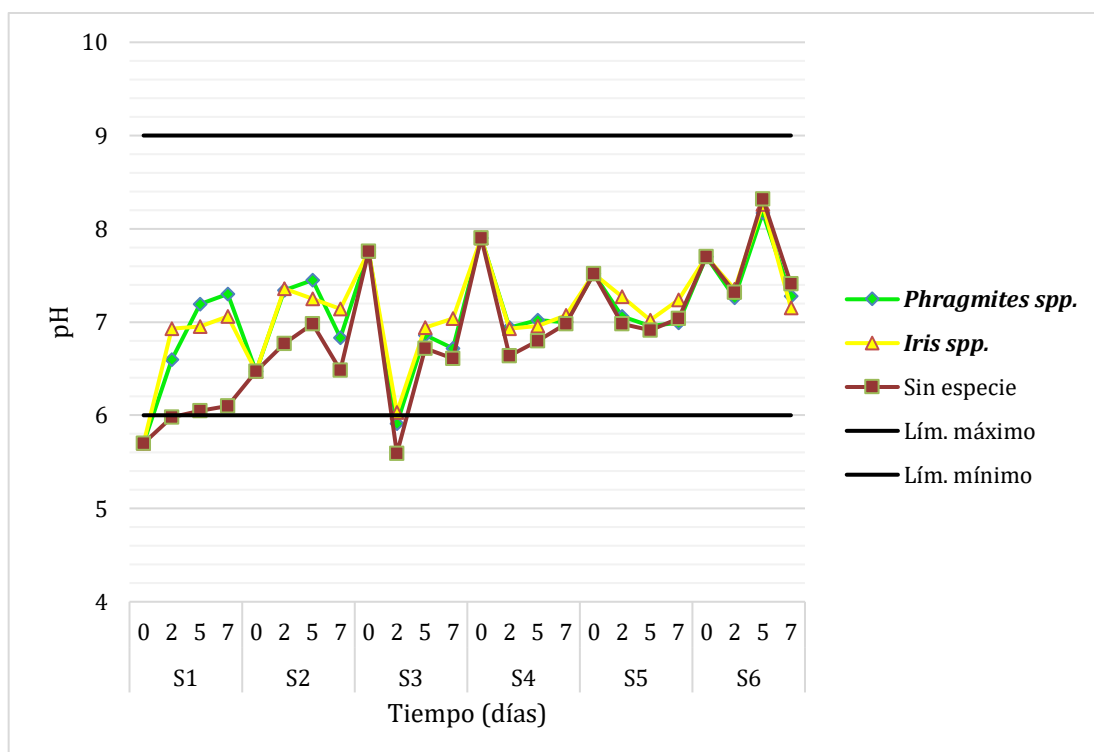


Figura 4.5. pH en las unidades experimentales, con TRH de 2, 5 y 7 días, durante las seis semanas de operación

Elaborado por: Christian Totoy

La Figura 4.5 muestra que los valores de pH inician en un rango ácido con un pH entre 5 y 6, mientras que, al finalizar las 6 semanas de experimentación con valores prácticamente neutros entre 7 y 8, además, se puede visualizar que durante casi toda la operación se encontró dentro de los límites permisibles para descargas a cuerpos de agua dulce.

4.4.2 TEMPERATURA

En la Figura 4.6 se presentan los resultados de temperatura registradas en las unidades experimentales, durante el periodo de experimentación de seis semanas, con los TRH considerados.

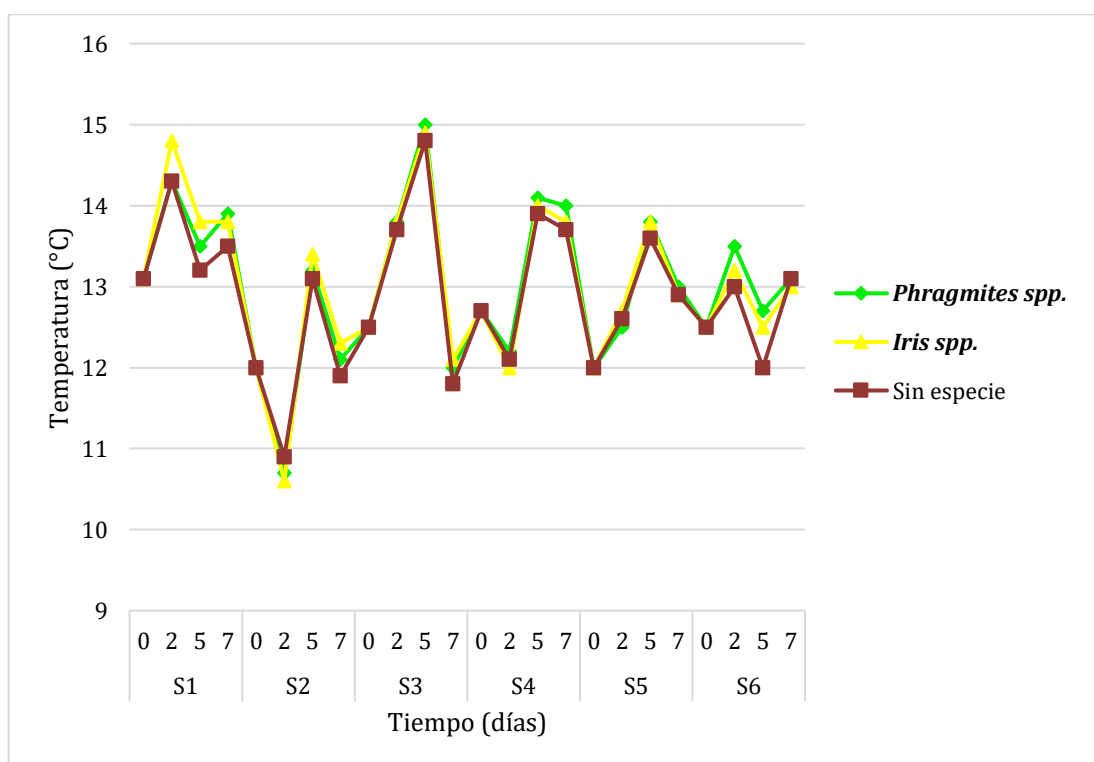


Figura 4.6. Temperatura de las distintas unidades experimentales, con TRH de 2, 5 y 7 días, durante las seis semanas de operación

Elaborado por: Christian Totoy

En casi todas las unidades experimentales, los estudios sobre el tratamiento de lixiviados se realizaron en el rango de temperaturas de 10-16 °C como se observa

en la Figura 4.6. En este rango, no se observó ningún cambio aparente en la eliminación de los diferentes contaminantes con el cambio de temperatura.

4.4.3 NITRÓGENO AMONIAICAL

La Figura 4.7 presentan los resultados obtenidos en concentraciones de nitrógeno amoniacal en las unidades experimentales, durante el periodo de experimentación de seis semanas, con los TRH considerados.

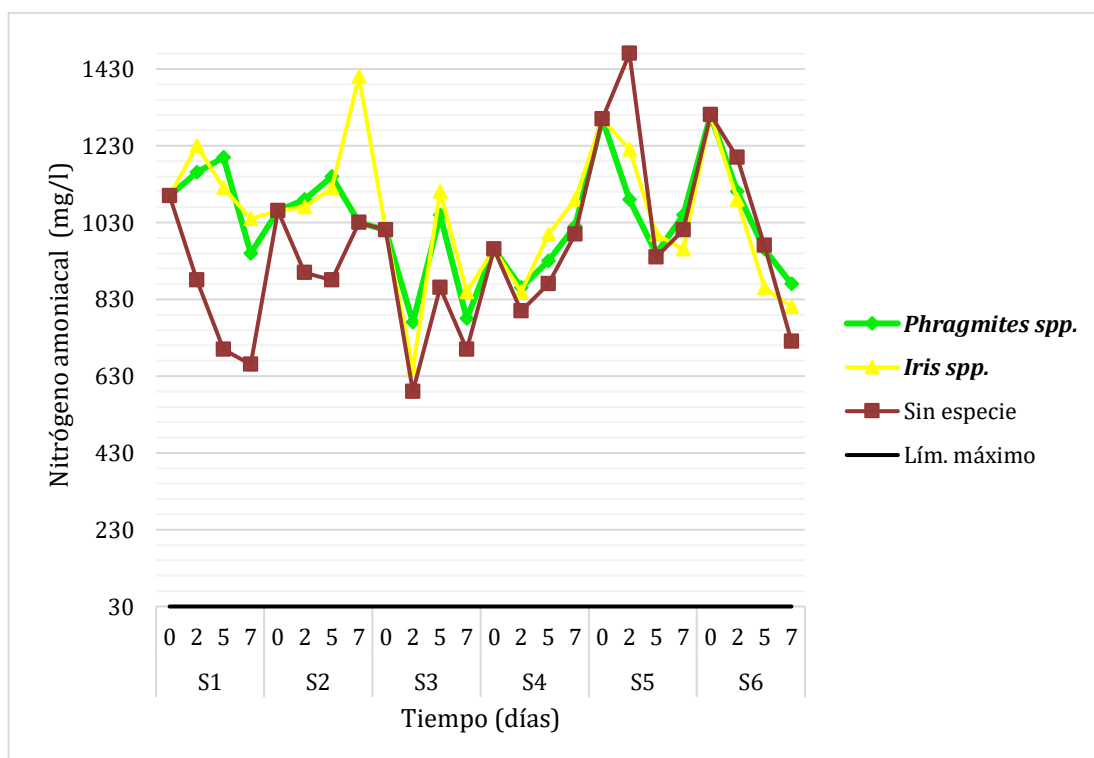


Figura 4.7. Nitrógeno amoniacal de las distintas unidades experimentales, con TRH de 2, 5 y 7 días, durante las seis semanas de operación

Elaborado por: Christian Totoy

En la Figura 4.7, se puede observar que las concentraciones registradas de nitrógeno amoniacal, en las unidades experimentales van de 575 – 1475 mg/L, sobrepasando el LMP de 30 mg/L, para descargas a cuerpos de agua dulce.

4.4.4 NITRATOS

La Figura 4.8 presentan los resultados obtenidos en concentraciones de nitratos en las unidades experimentales, durante el periodo de experimentación de seis semanas, con los TRH considerados.

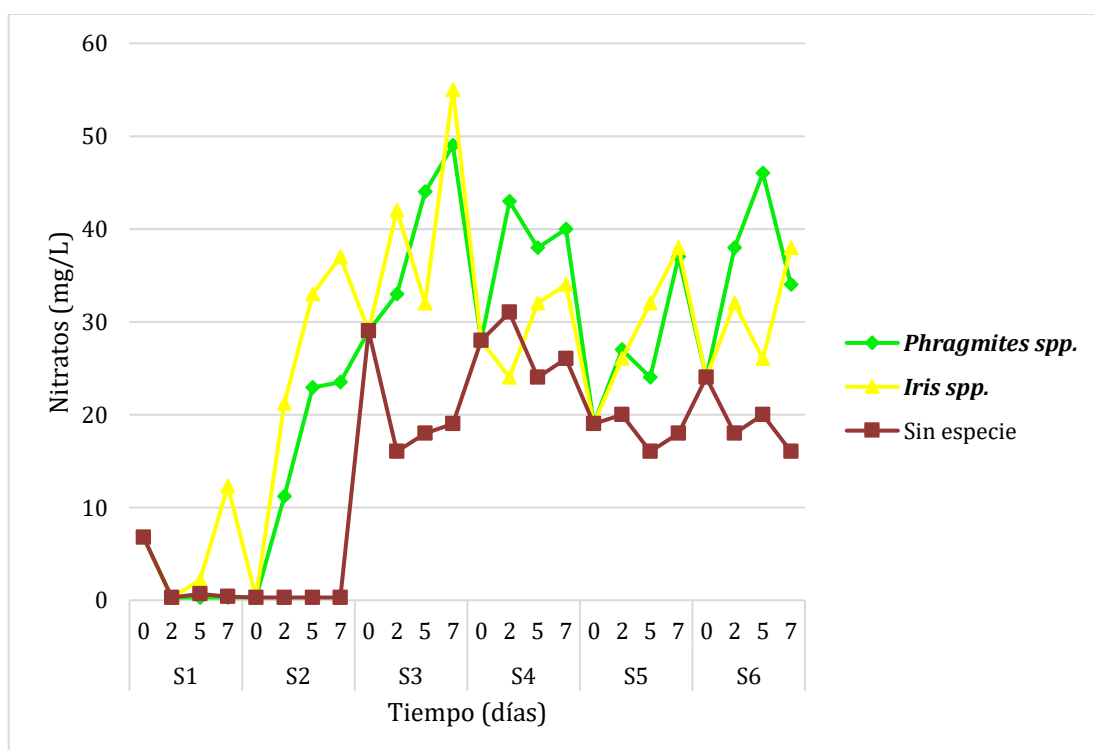


Figura 4.8. Nitratos de las distintas unidades experimentales, con TRH de 2, 5 y 7 días, durante las seis semanas de operación

Elaborado por: Christian Totoy

A partir de los resultados expuestos en la Figura 4.8, se puede observar que, las concentraciones de nitrato van entre 0 – 70 mg/L.

4.4.5 FOSFATOS

La Figura 4.9 presentan los resultados obtenidos en concentraciones de fosfatos en las unidades experimentales, durante el periodo de experimentación de seis semanas, con los TRH considerados.

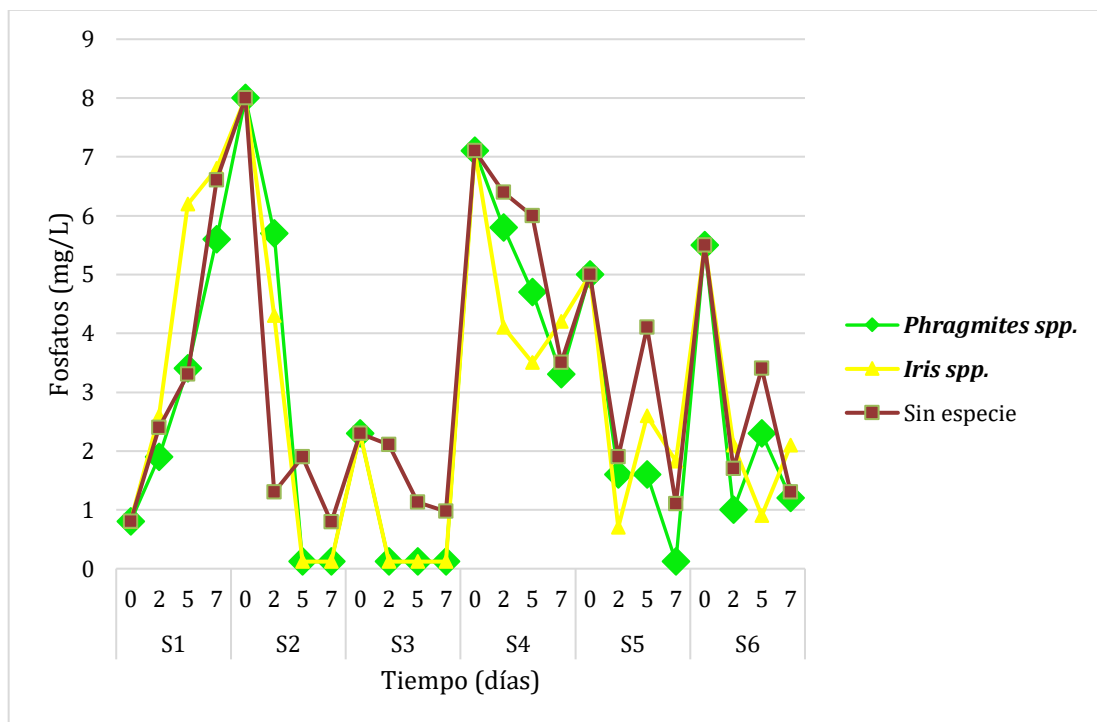


Figura 4.9. Fosfatos de las distintas unidades experimentales, con TRH de 2, 5 y 7 días, durante las seis semanas de operación

Elaborado por: Christian Totoy

En la Figura 4.9, se observa que las concentraciones de fosfatos toman valores de 0 – 9 mg/L.

4.4.6 COLOR

La Figura 4.10 presentan los resultados obtenidos en concentraciones de color en las unidades experimentales, durante el periodo de experimentación de seis semanas, con los TRH considerados.

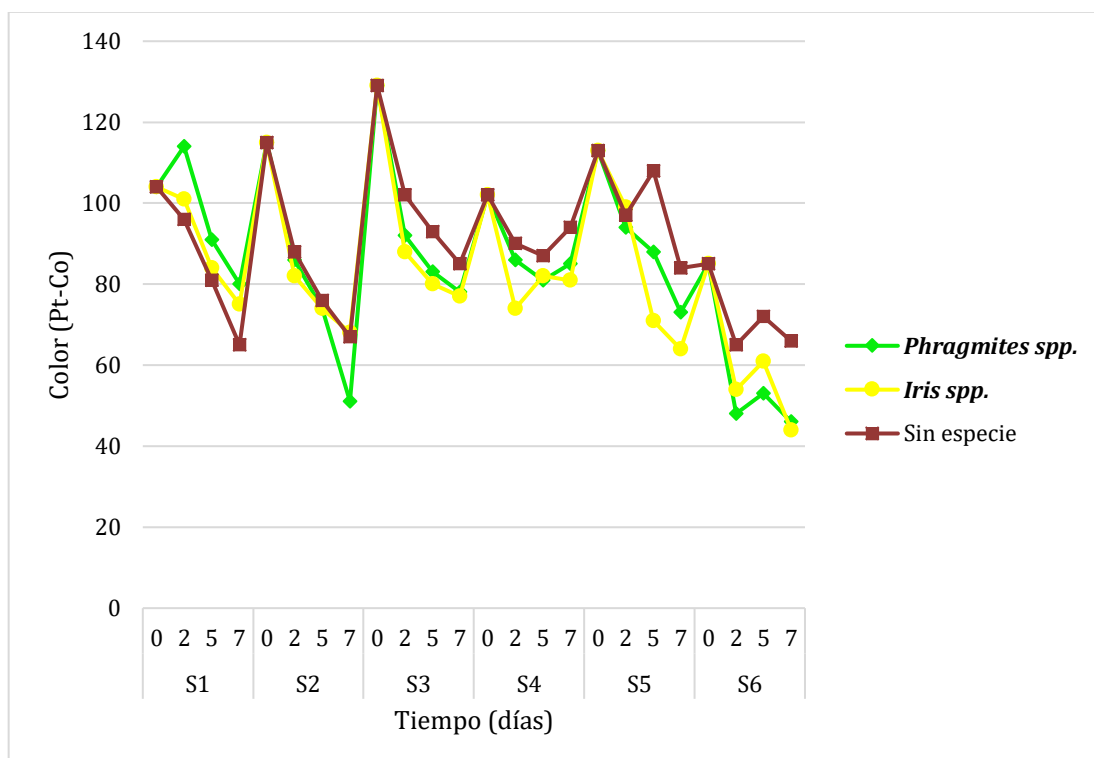


Figura 4.10. Color de las distintas unidades experimentales, con TRH de 2, 5 y 7 días, durante las seis semanas de operación

Elaborado por: Christian Totoy

En la Figura 4.10, se puede observar que las concentraciones se encuentran en el rango de 40 a 140 unidades de color Pt – Co, evidenciando en el color característico del lixiviado, y bajo este registro excede la normativa para descarga a cuerpos de agua dulce.

4.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.5.1. VEGETACIÓN

En base a los resultados registrados en cuanto a la elongación de raíz de cada especie en la Tabla 3.3, se pudo observar que, a lo largo de los 30 días de estudio, se registraron longitudes de elongación no mayores a 1 cm y posteriormente con el test estadístico aplicado, fue posible evidenciar que existe diferencia en dicha elongación en función de la concentración de lixiviado aplicada.

En la Figura 4.1 se puede observar de mejor manera que la especie más afectada resultó ser *Canna limbata*, puesto que en las unidades donde fue aplicado el lixiviado con una concentración mayor al 25% la elongación de la raíz disminuyó significativamente. Según Mónica et al., (2016), la ocurrencia de dicho fenómeno se debe a que las raíces de las macrófitas al ser hidratadas con sustancias tóxicas, su proceso de mitosis se retarda o a la par ocurre una destrucción celular, reflejándolo en una inhibición de los meristemos radicales o un crecimiento anormal de la raíz. De tal manera, en el presente estudio es posible afirmar que tal efecto negativo es debido al tipo de residuo líquido aplicado y a las concentraciones empleadas, además, el uso de las unidades testigo (0% v/v) utilizadas permitió corroborar tal afirmación, puesto que en dichas unidades la elongación de raíz fue mayor.

De igual manera, en base a la Figura 4.1 se puede constatar que la especie *Iris pseudacorus* toleró la aplicación del lixiviado concentrado y registró una mejor elongación de raíz, además, como se esperaba, *Phragmites australis*, una especie que ha sido utilizada en varios estudios para el tratamiento de aguas residuales de diferente tipo, debido a su buena adaptabilidad frente a sustancias tóxicas, toleró el lixiviado concentrado, evidenciándolo en su elongación de raíz.

Por otra parte, el resto de cambios fisiológicos que presentaron las especies fueron más notorios en la especie *Canna Limbata*, la cual evidencia un claro deterioro en su fisiología, hasta llegar incluso a la muerte: tanto en su tallo como en sus hojas se observó un característico color café y el aspecto seco. Los Anexos 1 y 2 incluyen fotografías que muestran los efectos descritos.

Henry-Silva et al., (2008), en su investigación sobre la tolerancia de las especies de macrófitas a los nutrientes fósforo y nitrógeno, hace referencia a que el poco o nulo desarrollo de este tipo de especies de macrófitas, se debe a la baja asimilación de la concentración de nutrientes presentes en las aguas residuales, valores que en el presente estudio se encontraron por encima de 131; 5,31 y 2,3 mg/L, como

nitrógeno amoniacal, nitrato y fosfato respectivamente, a partir de una concentración mayor al 50% del lixiviado.

Henry-Silva et al., (2008), también hace referencia en cuanto a la variable temperatura, la cual puede limitar el desarrollo de las especies, siempre que esta no sea tolerable por parte de la vegetación. Lim, (2016), en su revisión indica que *Canna limbata* soporta temperaturas bajas menores a 10°C y altas hasta 32°C, y debido a que en el presente estudio la temperatura promedio se encontró en los 11,96 °C, probablemente no fue el factor limitante para su desarrollo.

Por otro lado, *Iris pseudacorus* presento cierta coloración amarillenta en sus hojas como se observa en los Anexos 1 y 2, esto según Barbazán, (1998), es debido a una inadecuada nutrición nitrogenada, puesto que el N presente en el lixiviado en sus diferentes formas fue deficiente para su proceso de nutrición, ocasionando una disminución del contenido de clorofila y probablemente pueda deberse también a una deficiencia en K y Mg, siendo necesaria un análisis de estos elementos, mientras, *Phragmites australis*, no presentó cambios bruscos o bastante evidentes durante el tiempo de exposición, lo cual es un indicativo que el lixiviado aplicado en sus diferentes concentraciones es tolerable por parte de dicha especie.

4.5.2. EFLUENTE EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

4.5.2.1 pH

Según los resultados tabulados en el Anexo 7 y reflejados en la Figura 4.5, es posible evidenciar que, a lo largo del tiempo de experimentación, el comportamiento del pH, resultó ser indiferente al estar con o sin especie. Registró un pH promedio en el afluente de 7,18, mientras que en los efluentes el pH medio, para cada TRH de 2, 5 y 7 días fueron: *Phragmites australis* de 6,85, 7,28, 7,02; *Iris pseudacorus* de 6,98, 7,23, 7,12 y para la unidad sin especie de 6,55, 6,96, 6,77, respectivamente, presentando una tendencia similar durante todo el periodo de experimentación. Estos resultados fueron similares al estudio de El-Sheikh et al., (2010), el pH no mostró cambios significativos entre la entrada y la salida de los

cauces; donde se registraron valores medios de 7,9 y 7,8 en los puntos de entrada y salida, respectivamente.

Además, en los resultados mostrados en la Figura 4.5 se observa que, prácticamente todos los valores de pH son neutros, además, se encuentran dentro de los límites establecidos en la normativa de descargas a cuerpos de agua dulce del Anexo I, Libro VI del TULSMA, (2017), con valores de pH entre 6 – 9.

4.5.2.2 TEMPERATURA

Como se puede evidenciar con los datos tabulados en el Anexo 8 y reflejados en la Figura 4.6, la variación de la temperatura fue independiente del tipo de especie, así como también si la unidad fue implantada o no, pues existió una diferencia leve, con un promedio de 1 °C entre los valores del afluente y efluente del humedal.

La temperatura se encuentra íntimamente ligada a la temperatura ambiente de la zona, la cual fluctúa en un valor de 0 °C y 8 °C (Gobierno del Cantón Mejía, 2019), mientras que la temperatura promedio en el afluente fue de 12,5 °C y del efluente en cada TRH= 2, 5 y 7 días para: *Phragmites australis* de 12,8, 13,7, 13 °C; *Iris pseudacorus* de 12,9, 13,7, 13 °C y la unidad sin especie de 12,8, 13,4 y 12,8 °C, respectivamente, evidenciando además que no existen diferencias que puedan ser atribuibles al tipo de especie o la presencia de las mismas. Estos valores durante todo el periodo de experimentación se encontraron dentro de los LMP (<35 °C).

Por otra parte, este parámetro influye en la eliminación biológica, (Bakhshoodeh et al., 2020), puesto que las bajas temperaturas inhiben la actividad microbiana e inclusive afecta el crecimiento y adaptabilidad de la planta; por ello, a pesar de las temperatura bajas que presentó, las especies plantadas en los respectivos humedales, mostraron tolerancia, siendo reflejado en las eficiencias en términos de DQO reportadas más adelante, así como en la fisiología que se puede observar en el Anexo 14.

4.5.2.3 NITROGENO (NITROGENO AMONIAL, NITRATO)

Según los resultados tabulados en el Anexo 9 y en Figura 4.7, no reflejan una tendencia clara de disminución o aprovechamiento del nitrógeno amoniacal de las unidades con las especies, sin embargo, fue evidente el incumplimiento del LMP de la normativa el cual es 30 mg/L.

Durante el tiempo de operación, se registró un valor promedio en el afluente de 1123 mg/L, mientras en el efluente con TRH= 2, 5 y 7 días, *Phragmites australis* registró valores promedio de 1013,3, 1040, 950 mg/L; *Iris pseudacorus* de 1018,3, 1035, 1026,7 mg/L y la unidad sin especie de 973,3, 870, 853 mg/L, respectivamente. Según el estudio realizado por Torres et al., (2017), la disminución de la concentración de nitrógeno amoniacal es posible cuando los humedales alcanzan una madurez elevada y esto ocurre comúnmente posterior al año de operación, por lo que las seis semanas de operación no permitieron registrar valores con una tendencia clara.

Sin embargo, como se puede observar existe en la Figura 4.7, existió una ligera diferencia con respecto a la unidad sin especie, donde se registraron concentraciones menores, esto según Benimeli et al., (2019), explica que algunos suelos pueden encontrarse cargados negativamente por lo que atraen momentáneamente a los iones NH_4^+ .

En cuanto a nitratos, según los datos mostrados en el Anexo 10 y la tendencia que se presenta en la Figura 4.8, permitió evidenciar un mayor aumento de la concentración de nitratos en las unidades con especies. Registró un valor promedio en el afluente de 17,85 mg/L y en los efluentes con TRH= 2, 5 y 7 días para: *Phragmites australes* de 25,4, 29,2, 30,6 mg/L; *Iris pseudacorus* de 24,3, 26,2, 35,7 mg/L, respectivamente. Según Wdowczyk et al. (2022), un pH alrededor de 7, favorecen al proceso de nitrificación, además, Á. Torres et al., (2017), en su investigación indica que los HSSV poseen una alta capacidad para la nitrificación, los cuales pueden aumentar sus concentraciones en nitratos por encima del 100%.

Además, también es importante tener en cuenta que la absorción por parte de las plantas como mecanismo de eliminación es eficaz sólo en el caso de que las plantas sean cosechadas y retiradas del sistema. De lo contrario, el nitrógeno vuelve al sistema durante la descomposición de las plantas (Bakhshoodeh et al., 2020), por lo que también esto explicaría el aumento en las concentraciones de nitratos.

En cuanto a la unidad sin especie se puede evidenciar que de un valor promedio de 17,85 mg/L pasó a un valor promedio para cada TRH= 2, 5 y 7 días de 14,3, 13,2 y 13,3 mg/L, respectivamente, pudiendo deberse a la pérdida del mismo debido a la transformación de NO_3 en Óxido de Nitrógeno o como Nitrógeno molecular (N_2), como lo indica Larios-González et al., (2021), proceso que ocurre cuando el agua permanece estancada por un tiempo considerable.

4.5.2.4 FOSFATOS

En base a los datos registrados en el Anexo 11 e ilustrados en la Figura 4.9, se obtuvo un afluente promedio de 4,78 mg/L y en el efluente con TRH= 2, 5, 7 días, valores promedio en las unidades con: *Phragmites australis* de 2,69, 2,04, 1,74 mg/L; *Iris pseudacorus* de 2,32, 2,24, 2,53 mg/L y sin especie de 2,64, 3,31, 2,38 mg/L, respectivamente, observando que los valores en concentración de las unidades con especie presentaron cierta semejanza en relación a la unidad sin especie, esto puede deberse principalmente al tipo de sustrato utilizado en cada HSSV. Según Vymazal (2007), la disminución es posible por el tipo de sustrato utilizado puesto que influye enormemente su alta capacidad de sorción, sin embargo, este mecanismo pueden agotarse ya que los medios de humedales artificiales pueden saturarse de fósforo adsorbido o filtrado

Por otra parte, puede notarse que en las primeras semanas la concentración de fosfatos se incrementa, alcanzando un valor máximo de 6,6 mg/L, esto probablemente puede deberse a la presencia de materia orgánica en el sustrato utilizado, puesto que las tres unidades presentaron similares incrementos, tal y como ocurrió en el estudio realizado por Arias et al., (2020), mientras que a partir de la tercera semana, sin bien existió una disminución en su concentración, sin

embargo, esta no fue alta, ya que la captación de fósforo por parte de la microbiota es sólo temporal y la captación por parte de las macrófitas mediante la absorción, ocurre sólo en el caso de que las macrófitas se cosechen (Bakhshoodeh et al., 2020), y en vista de que en el presente estudio no se realizó el proceso de cosecha, el fósforo probablemente fue devuelto al agua durante la descomposición de la biomasa. En este sentido no existió un buen aprovechamiento de P por parte de las plantas, ya que en comparación con la unidad sin especie prácticamente reflejaron similares concentraciones de fosfato.

4.5.2.6 COLOR

Los resultados registrados en cuanto a color verdadero, en el Anexo 12 y en la Figura 4.10, permiten evidenciar la variación de un afluente promedio de 108 Pt-Co, a un efluente con TRH= 2, 5 y 7 días para: *Phragmites australis* de 86,7, 78,3, 68,8 Pt-Co; *Iris pseudacorus* de 83, 75,3, 68,2 Pt-Co y para la unidad sin especie de 89,7, 86,2, 76,8 Pt-Co, respectivamente. De esta manera se observa que existió una disminución de color en las tres unidades con valores relativamente semejantes, permitiendo aseverar que el principal responsable de la eliminación de color fue el sustrato, debido a los procesos de fijación de los sólidos que ocurre en él.

Por otra parte, en las unidades con especies a partir de la tercera semana, existió una mayor remoción de color con un TRH de 7 días, pudiendo deberse a la adsorción de los sólidos presentes en el lixiviado, siendo *Iris pseudacorus* la especie que mayor remoción de color alcanzó, puesto que esta especie presenta una mayor abundancia radicular que *Phragmites australis*, condición que resulta favorable para la eliminación de color.

Sin embargo, a pesar de la disminución registrada, no se obtuvieron resultados que permitan cumplir con la normativa ambiental vigente, en cuanto a descargas a cuerpos de agua dulce, ya que se lograba identificar la coloración del lixiviado en los efluentes muestreados, como se observa en el Anexo 14.

4.5.2.7 DQO

En el presente estudio la concentración promedio de entrada tuvo un valor de 1884 mg/L, evidenciando una deficiencia en el tratamiento primario avanzado propio del relleno sanitario Romerillos y por otro lado la elevada cantidad de carga orgánica a la cual fueron expuestas las unidades experimentales.

En los resultados mostrados en el Anexo 13, las eficiencias registradas durante el tiempo de operación en las diferentes unidades experimentales varían, siendo que *Iris pseudacorus* y *Phragmites australis* alcanzaron su máxima eficiencia a los 7 días con un valor promedio de 30,93% y 19,51% respectivamente, además se puede evidenciar que *Iris pseudacorus*, presentó una mejor eficiencia, aproximadamente en un 10%, esto es atribuible a la abundancia y extensión de la raíz que presentó esta macrófita, ya que según Peña et al., (2013), esto favorece a la transferencia de oxígeno y la formación de comunidades microbianas, puesto que abarca una mayor área en el tratamiento.

Por otro lado, la unidad experimental sin especie alcanzó su máxima eficiencia a los 2 días, con un valor de 30,84%. La eficiencia obtenida a los 2 días fue similar en todo el periodo de operación, esto se debe a que según Arteaga et al., (2020), el sustrato influye en la remoción de DQO provocando un proceso de adsorción, afirmando así que las plantas efectivamente actúan en la remoción, puesto que la unidad sin especie actuó como testigo.

Por otra parte, durante las dos primeras semanas, existieron deficiencias para *Iris pseudacorus*, en los TRH= 5 y 7 días de -4,51%, -2,75%, respectivamente, mientras que para la unidad con *Phragmites australis* las eficiencias fluctuaron entre la primera semana y la cuarta semana, donde predominó una mejor eficiencia a un TRH= 2 días, alcanzando valores promedio de hasta 26,09%, mientras que con TRH= 5 y 7 días su eficiencia llegó a disminuir hasta -3,52% y 1,54%, respectivamente. A partir de la tercera semana, en el caso de la unidad con *Iris pseudacorus*, su eficiencia aumenta con un TRH= 7 días hasta un 46,17%, mientras

que para *Phragmites australis* este aumento ocurrió a partir de la quinta semana, alcanzando una eficiencia de hasta un 31,32%

Por lo anterior, la variación entre los dos periodos para las unidades con especies, son atribuibles al proceso de aclimatación de las especies y de la formación del biofilm, puesto que Según Chaudhary et al., (2003), este proceso puede requerir días o incluso semanas para su formación y aclimatación, afirmando así que *Iris pseudacorus* y *Phragmites australis*, requirieron de dos y cuatro semanas, respectivamente, para su aclimatación.

Además, se puede observar en las Figuras 4.2 y 4.3, la presencia de ciertos decrementos en las eficiencias durante las semanas post aclimatación en los TRH monitoreados. Según Vera et al., (2010), esto se debe al aporte de MO de las plantas a las aguas residuales, debido a la descomposición de ciertos órganos de las macrófitas; a pesar de aquello, el tiempo de retención continua actuando proporcionalmente en las unidades con *Iris pseudacorus* y *Phragmites australis*, puesto que a mayor tiempo de retención existe una mejor eficiencia de remoción, muy por el contrario la unidad sin especie, la cual mantiene su comportamiento durante el tiempo de operación.

Como se ha mencionado, el TRH influyó en la eficiencia de remoción proporcionalmente, atribuyendo tal proceso a las macrófitas puesto que, al aumentar el TRH es posible que exista una mayor interacción de las raíces de las plantas con el agua residual a depurar. Del mismo modo, el tamaño de partícula influye, puesto que, al ser menor, su porosidad disminuye, lo que ocasiona que el agua residual mantenga un mayor tiempo de contacto con las raíces de las macrófitas, contribuyendo así la ocurrencia de que la materia biodegradable y no biodegradable sea químicamente oxidada, por lo tanto, una porosidad de 32,7% del sustrato utilizado en el presente estudio, permite evidenciar que contribuye a que la eficiencia aumente cuando se considera un TRH mayor. Sin embargo, es necesario considerar un valor óptimo para este aspecto, puesto que una menor porosidad podría ocasionar taponamientos en el sistema.

Las eficiencias reportadas en cuanto a la depuración de lixiviados en el presente estudio, han resultado ser diferentes y menores a estudios realizados con anterioridad, debiéndose posibles causas, como la concentración de carga orgánica, el tiempo de operación, el número de capas, etc., sin embargo, registró eficiencias comparables con sistemas altamente mecanizados. Tatsi et al.,(2003), utilizando un proceso de coagulación-floculación obtuvieron remociones de 25 a 38 % de DQO, mientras que, Morais & Zamora (2005), reportaron una eficiencia del 30%, mediante una oxidación avanzada. A pesar de tales semejanzas en las eficiencias alcanzadas, los efluentes, no registraron valores que permitan el nivel de cumplimiento que lo exige la normativa ambiental (<250 mg/L).

5. CONCLUSIONES

- El análisis de los resultados operativos de las unidades experimentales permite concluir que el afluente de lixiviado del relleno sanitario Romerillos en promedio presentó una concentración promedio en términos de DQO de 1884 mg/L y los sistemas de humedales artificiales pueden tratar esta carga contaminante, con una eficiencia promedio del 30,93% y 19,51% para *Iris pseudacorus* y *Phragmites australis*, respectivamente, siendo *Iris pseudacorus* la especie con una eficiencia superior en un 10%, en promedio.
- *Iris pseudacorus* y *Phragmites australis* son tolerantes al lixiviado sin dilución. *Iris pseudacorus*, registró una mejor elongación de raíz en promedio, de 0,15 cm más que *Phragmites australis*, muy por el contrario: *Canna Limbata*, registró en promedio 0,30 cm menos que *Phragmites australis*. Por ende, en función de la respuesta de viabilidad tanto en su fisiología y análisis estadísticos en cuanto a su elongación de raíz, *Canna Limbata* mostró una tolerancia al lixiviado diluido al 25%.
- El tiempo de operación de los humedales de seis semanas, según lo indicado en estudios no fue suficiente para obtener las eficiencias esperadas, puesto que la clave de la depuración de los humedales está en su maduración alcanzada después del año de operación.
- Los TRH poseen una relación directamente proporcional con la DQO, a partir del periodo post aclimatación, asegurando así que con un mayor TRH las eficiencias en los humedales artificiales aumenta debido al mayor tiempo de contacto que poseen las raíces de las macrófitas con el lixiviado, sin embargo, no lograron alcanzar eficiencias que permitan el nivel de cumplimiento de la normativa ambiental del Ecuador.

6. RECOMENDACIONES

- Para mejorar las eficiencias en la remoción de DQO, se recomienda adecuar los humedales con las especies utilizadas, incrementando el número de capas, ya que entre otros aspectos los niveles de capas de sustrato son un componente principal para la depuración de los lixiviados.
- En futuras investigaciones, se recomienda aplicar distintos medios filtrantes, como la adición de biocarbón/zeolita/adsorbente, y combinarse con otros métodos, como el reactor anaeróbico de doble cámara y el humedal artificial acoplado a una célula de combustible microbiana, con el fin de determinar cuál resulta ser el más idóneo.
- Los sistemas de humedales artificiales deben ser aplicados como mínimo en una segunda etapa en un tren de tratamiento, con la finalidad de que las macrófitas no entren en contacto directo con el lixiviado crudo.
- Los medios filtrantes deben ser expuestos previamente a aguas de carga contaminante bajas, para que de esta manera faciliten la formación del biofilm y el acondicionamiento de las especies, que son el soporte de las colonias bacterianas, permitiendo mejorar el rendimiento de los humedales. Un periodo de 2 a 3 semanas es adecuado para la formación de esta biopelícula.
- Realizar un análisis a profundidad, de los contaminantes que pueden ser absorbidos, acumulados o metabolizados por la planta, para que de esta manera sea posible evaluar una disposición correcta de los órganos de la vegetación al momento de podarlas, puesto que, este hecho en algunas especies ha significado un aumento en la eficiencia de depuración.

BIBLIOGRAFÍA

- Abou, I., & Hellal, S. (2012). Municipal wastewater treatment using vertical flow constructed wetlands planted with Canna, Phragmites and Cyprus. *Ecological Engineering*, 47, 209–213. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2012.06.044>
- Akinbile, C. O., Yusoff, M. S., & Ahmad Zuki, A. Z. (2012). Landfill leachate treatment using sub-surface flow constructed wetland by Cyperus haspan. *Waste Management*, 32(7), 1387–1393. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2012.03.002>
- Alarcón, M. T., Zurita, F., Lara, J. M., & Vidal, G. C. (2018). *Humedales de tratamiento: alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina*. Pontificia Universidad Javeriana. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/34519>
- Altafin, I. (2020). Innovaciones en el desarrollo e implementación de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en Latinoamérica y El Caribe. *Banco Interamericano de Desarrollo*, 6–11. <https://doi.org/10.18235/0002341>
- Arias, C., & Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13(1), 17–24. <https://doi.org/10.18359/RCIN.1321>
- Arias, Ó. (2004). *Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial*. [Tesis de grado, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3339>
- Arias, S., Betancur, F., Gómez, G., Salazar, J., & Hernández, M. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico*, 74. <https://doi.org/10.23850/22565035.5>

- Arias, T., Rodríguez, D. C., Peñuela, G. A., & Peñuela, P. (2020). Influencia de los suelos en la dinámica de transferencia de nutrientes en la interfase suelo-agua en un embalse tropical. *Ingeniería*, 25(3), 223–236. <https://doi.org/10.14483/23448393.15993>
- Arteaga, V. M., Quevedo, A., Del Valle, D. H., Castro, M., Bravo, Á., & Ramírez, J. A. (2020). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 10(5). <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-12>
- Aziz, S. Q., Aziz, H. A., Yusoff, M. S., Bashir, M. J. K., & Umar, M. (2010). Leachate characterization in semi-aerobic and anaerobic sanitary landfills: A comparative study. *Journal of Environmental Management*, 91(12), 2608–2614. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2010.07.042>
- Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Oldham, C., Santos, R. M., Babaei, A. A., Vymazal, J., & Payday, P. (2020). Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A review. *Ecological Engineering*, 146. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2020.105725>
- Barco, A., & Borin, M. (2017). Treatment performance and macrophytes growth in a restored hybrid constructed wetland for municipal wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 107, 160–171. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.07.004>
- Benimeli, M. ., Plasencia, A., Corbella, R. D., Andina Guevara, D., Sanzano, A., Sosa, F. A., & Fernández de Ullivari, J. (2019). El nitrógeno del suelo. *Cátedra de Edafología Facultad de Agronomía y Zootecnia Universidad Nacional de Tucumán: Tucumán, Argentina.*, 3. <https://www.edafologia.org/app/download/7953478176/El+nitrogeno+del+suelo+2019.pdf?t=1563476239>

- Beutel, M. W. (2012). Water quality in a surface-flow constructed treatment wetland polishing tertiary effluent from a municipal wastewater treatment plant. *Water Science and Technology*, 66(9), 1977–1983. <https://doi.org/10.2166/WST.2012.351>
- Brix, H., Ye, S., Laws, E. A., Sun, D., Li, G., Ding, X., Yuan, H., Zhao, G., Wang, J., & Pei, S. (2014). Large-scale management of common reed, *Phragmites australis*, for paper production: A case study from the Liaohe Delta, China. *Ecological Engineering*, 73, 760–769. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2014.09.099>
- Caicedo, F. J. (2006). *Diseño, construcción y arranque de un reactor U.S.B. piloto para el tratamiento de lixiviados*. [Tesis de posgrado, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3413>
- Calheiros, C., Rangel, A., & Castro, P. (2007). Constructed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater. *Water Research*, 41(8), 1790–1798. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2007.01.012>
- Castillo, G. (Ed). (2004). *Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas. Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones*. Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Chan, J. K. H. (2016). The ethics of working with wicked urban waste problems: The case of Singapore's Semakau Landfill. *Landscape and Urban Planning*, 154, 123–131. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2016.03.017>
- Chaudhary, D. S., Vigneswaran, S., Ngo, H. H., Shim, W. G., & Moon, H. (2003). Biofilter in water and wastewater treatment. *Korean Journal of Chemical Engineering* 2003 20:6, 20(6), 1054–1065. <https://doi.org/10.1007/BF02706936>

- Chinery, M. (1998). *Guía de campo de las plantas silvestres* (1st ed.). [https://aytocarrizo.es/descargas/botanica-libro-guia-de-campo-de-las-plantas-silvestres-\(michael-chinery-blume\).pdf](https://aytocarrizo.es/descargas/botanica-libro-guia-de-campo-de-las-plantas-silvestres-(michael-chinery-blume).pdf)
- Comisión Nacional del Agua. (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas>
- Corzo, A., & Sanabria, O. (2019). Adaptation of vegetation in high-rate constructed wetland using artificial carriers for bacterial growth: Assessment using phytopathological indicators. *Journal of Water Process Engineering*, 32, 100974. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2019.100974>
- Costa, A., Alfaia, R., & Campos, J. (2019). Landfill leachate treatment in Brazil – An overview. *Journal of Environmental Management*, 232, 110–116. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2018.11.006>
- Crespi, R., Soler, C., Soler, E., & Pugliese, M. (2018). Performance of free water surface flow constructed wetland with floating aquatic macrophytes. *Ingeniería Del Agua*, 22(2), 69–78. <https://doi.org/10.4995/IA.2018.8596>
- Cuenca L., N., & Carrión C., L. (2009). *Bioensayo con macrófitas acuáticas para el tratamiento de lixiviados procedentes del relleno sanitario de Pichacay* [Universidad del Azuay, Tesis de posgrado]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/2982>
- De Morais, J. L., & Zamora, P. P. (2005). Use of advanced oxidation processes to improve the biodegradability of mature landfill leachates. *Journal of Hazardous Materials*, 123(1–3), 181–186. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2005.03.041>

- Delgadillo, O., Camacho, A., Andrade, M., & Pérez, L. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua. <https://bit.ly/3cCVSIT>
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., & von Sperling, M. (2017). *Treatment Wetlands*. *Water Intelligence Online* (Vol. 7). <https://doi.org/10.2166/9781780408774>
- El-Sheikh, M. A., Saleh, H. I., El-Quosy, D. E., & Mahmoud, A. A. (2010). Improving water quality in polluted drains with free water surface constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 36(10), 1478–1484. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2010.06.030>
- EPA. (2020). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales*. Estados Unidos. <https://bit.ly/3tMUR1Y>
- Espinosa, M. G. R., Sánchez, L. M. R., & Cruz, P. M. (2007). Uso de macrofitas acuáticas en el tratamiento de aguas para el cultivo de maíz y sorgo. *Hidrobiológica*, 17(1), 7–15. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57809904>
- Fonseca, C. (2010). *Diseño de Humedal Construido para tratar los lixiviados del Proyecto de Relleno Sanitario de Pococí*. [Tesis de posgrado, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. <https://hdl.handle.net/2238/6158>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2009). An overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1–3), 54–60. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2009.06.038>
- Gao, D. W., & Hu, Q. (2012). Bio-contact oxidation and greenhouse-structured wetland system for rural sewage recycling in cold regions: A full-scale study. *Ecological Engineering*, 49, 249–253. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2012.08.012>

- García, J., & Corzo, A. (2008). Depuración con Humedales Construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. *Universidad Politécnica de Catalunya*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/2474>
- Ghosh, D., & Gopal, B. (2010). Effect of hydraulic retention time on the treatment of secondary effluent in a subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 36(8), 1044–1051. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2010.04.017>
- Gobierno del Cantón Mejía. (2019). *Actualización Del Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial*. <https://municipiodemejia.gob.ec/assets/PDOT.pdf>
- Grinberga, L. (2020). Water Quality Assurance with Constructed Wetlands in Latvia. *Springer Water*, 87–103. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39701-2_5
- HACH. (2022). *Métodos y procedimientos HACH*. <https://es.hach.com/espectrofotometro-portatil-dr1900/product-downloads?id=26096931896>
- Henry-Silva, G. G., Camargo, A. F. M., & Pezzato, M. M. (2008). Growth of free-floating aquatic macrophytes in different concentrations of nutrients. *Hydrobiologia*, 610(1), 153–160. <https://doi.org/10.1007/S10750-008-9430-0>
- Hill, D. J., Tarasoff, C., Whitworth, G. E., Baron, J., Bradshaw, J. L., & Church, J. S. (2016). Utility of unmanned aerial vehicles for mapping invasive plant species: a case study on yellow flag iris (*Iris pseudacorus* L.). *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2083–2105. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1264030>
- Ji, B., Zhao, Y., Vymazal, J., Qiao, S., Wei, T., Li, J., & Mander, Ü. (2020). Can subsurface flow constructed wetlands be applied in cold climate regions? A

review of the current knowledge. *Ecological Engineering*, 157, 2–11.
<https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2020.105992>

Ji, Z., Tang, W., & Pei, Y. (2022). Constructed wetland substrates: A review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal. *Chemosphere*, 286, 131564.
<https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.131564>

Jianqing, D., Ren, W., Weidong, F., & Guoliang, Z. (2001). *Water Hyacinth in China: Its Distribution, Problems and Control Status*.
<http://aciar.gov.au/publication/PR102>

Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press.
https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=hPDqfNRMH6wC&oi=fnd&pg=PP1&dq=treatment+wetlands+kadlec&ots=k8L-bWhT3O&sig=qqwFL-z-zeNxADmBIBHm_w4iwrl#v=onepage&q&f=false

Kadlec, R., Knight, R., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P., & Haberl, R. (2000). *Constructed wetlands for pollution control: Processes, performance, design and operation*. <http://biblioteca.cehum.org/handle/CEHUM2018/1649>

Kasassi, A., Rakimbei, P., Karagiannidis, A., Zabaniotou, A., Tsiouvaras, K., Nastis, A., & Tzafeiropoulou, K. (2008). Soil contamination by heavy metals: Measurements from a closed unlined landfill. *Bioresource Technology*, 99(18), 8578–8584. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2008.04.010>

Kataki, S., Chatterjee, S., Vairale, M. G., Dwivedi, S. K., & Gupta, D. K. (2021). Constructed wetland, an eco-technology for wastewater treatment: A review on types of wastewater treated and components of the technology (macrophyte, biofilm and substrate). *Journal of Environmental Management*, 283, 111986.
<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.111986>

- Kirby, A. (2013). Wastewater Treatment Using Constructed Wetlands. *Canadian Water Resources Journal*, 27(3), 263–272. <https://doi.org/10.4296/CWRJ2703263>
- Kiss, G., & Encarnación, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica*, 79, 39–51. <https://doi.org/http://estudiosterritoriales.org/resumen.oa?id=53907903>
- Kujala, K., Karlsson, T., Nieminen, S., & Ronkanen, A. K. (2019). Design parameters for nitrogen removal by constructed wetlands treating mine waters and municipal wastewater under Nordic conditions. *Science of The Total Environment*, 662, 559–570. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.01.124>
- Larios-González, R. C., García Centeno, L., Ríos, M. J., Avalos Espinoza, C. del S., & Castro Salazar, J. R. (2021). Pérdidas de nitrógeno por volatilización a partir de dos fuentes nitrogenadas y dos métodos de aplicación. *Siembra*, 8(2), e2475. <https://doi.org/10.29166/SIEMBRA.V8I2.2475>
- Lázaro, J. N. (1995). *Flora del valle de Lerma Cannaceae* (Vol. 3). Universidad Nacional de Salta. http://natura.unsa.edu.ar/web/documents/Herbario/HERBARIO_MCNS/Flora_Valle_de_Lerma/C/CANNACEAE.pdf
- Lenis, V. D., & Bernal, D. P. (2019). Importancia de los humedales naturales y artificiales en el ámbito socio-ambiental. Una revisión bibliográfica. *Repositorio Institucional USC*. <https://repository.usc.edu.co/handle/20.500.12421/4453>
- Lim, T. K. (2016). *Canna indica*. Springer, Dordrecht, 69–81. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7276-1_3

- Lot, O., Flores, C., & Díaz, A. (2015). *Guía ilustrada de campo. Plantas Indicadoras de Humedales* (1st ed.). Universidad Nacional Autónoma de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/102190/Gu_a_PIH-min.pdf
- Méndez, R., Cachón, E., Sauri, M., & Castillo, E. (2002). Influencia del material de cubierta en la composición de los lixiviados de un relleno sanitario. *Revista de Ingeniería*, 6(2), 7–12. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46760201>
- Méndez, R., Novelo, A., Coronado, V., Castillo, E., & Sauri, M. (2008). Remoción de materia orgánica y metales pesados de lixiviados por flotación con aire disuelto. *Revista de Ingeniería*, 12(1), 13–19. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46712102>
- Metcalfe, C., Nagabhatla, N., & Fitzgerald, S. (2018). Multifunctional Wetlands: Pollution Abatement by Natural and Constructed Wetlands. *Springer International*, 1–14. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67416-2_1
- Mónica Barbazán, I. A. (1998). *AGRONOMIA ANÁLISIS DE PLANTAS Y SÍNTOMAS VISUALES DE DEFICIENCIA DE NUTRIENTES*.
- Mónica, E., Sardi, L., García, B. N., Larroudé, V., Picicelli, R., Reynoso, C. Y., & Ramírez Martínez, E. (2016). Uso de allium cepa test como indicador de eficacia para el tratamiento de efluentes. *Nº*, 16, 81–89.
- Montoya, J. I., Ceballos, L., Casas, J. C., & Morató, J. (2010). Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas (Comparative study of the organic matter removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands usi). *Revista EIA*, 7(14), 75–84. <https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/420>
- Mor, S., Ravindra, K., Dahiya, R. P., & Chandra, A. (2006). Leachate

- Characterization and Assessment of Groundwater Pollution Near Municipal Solid Waste Landfill Site. *Environmental Monitoring and Assessment*, 118(1), 435–456. <https://doi.org/10.1007/S10661-006-1505-7>
- Morales, G. E. (2008). *Tendencias de la investigación en Ingeniería Ambiental*. Universidad de Medellín. <http://hdl.handle.net/11407/1427>
- Morales, G., López, D., Vera, I., & Vidal, G. (2013). Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas. *Theoria*, 22(1), 33–46. <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RT/article/view/1188>
- Mosquera, Y., & Lara, J. (2012). Tratamiento de lixiviados mediante humedales artificiales: revisión del estado del arte. *Tumbaga*, 1(7), 6. <http://revistas.ut.edu.co/index.php/tumbaga/article/view/377>
- Naveen, B., Mahapatra, D., Sitharam, T., Sivapullaiah, P., & Ramachandra, T. (2016). Physico-chemical and biological characterization of urban municipal landfill leachate. *Environmental Pollution*, 220(Pt A), 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2016.09.002>
- Organización de las Naciones Unidas. (2018). *Cómo la basura afecta al desarrollo de América Latina*. <https://news.un.org/es/story/2018/10/1443562>
- Ouellet-Plamondon, C., Chazarenc, F., Comeau, Y., & Brisson, J. (2006). Artificial aeration to increase pollutant removal efficiency of constructed wetlands in cold climate. *Ecological Engineering*, 27(3), 258–264. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2006.03.006>
- Pablos, M. V., Martini, F., Fernández, C., Babín, M. M., Herraéz, I., Miranda, J., Martínez, J., Carbonell, G., San-Segundo, L., García-Hortigüela, P., & Tarazona, J. V. (2011). Correlation between physicochemical and

- ecotoxicological approaches to estimate landfill leachates toxicity. *Waste Management*, 31(8), 1841–1847.
<https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2011.03.022>
- Packer, J. G., Meyerson, L. A., Skálová, H., Pyšek, P., & Kueffer, C. (2017). Biological Flora of the British Isles: *Phragmites australis*. *Journal of Ecology*, 105(4), 1123–1162. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12797>
- Peña, E., Madera, C., Sánchez, J., & Medina, V. (2013). Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *Heliconia psittacorum* (heliconiaceae). *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(145), 469–481.
<https://doi.org/10.18257/RACCEFYN.29>
- Peng, Y. (2017). Perspectives on technology for landfill leachate treatment. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S2567–S2574.
<https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2013.09.031>
- Pérez, M. (2009). *Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango* [Centro de Investigación de Materiales Avanzados S.C].
[https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/598/1/Tesis Ma. Elena Pérez López.pdf](https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/598/1/Tesis%20Ma.%20Elena%20Pérez%20López.pdf)
- Programa de Medio Ambiente. (2010). *Informe final licitación pública N LE09 consultoría de apoyo a los procesos de normas ambientales en sistemas hídricos. Estimación de costos de abatimiento de contaminantes en residuos líquidos*. (Informe N° 1588-151-LE09). <https://docplayer.es/18848545-Informe-final-licitacion-publica-n-1588-151-le09-consultoria-de-apoyo-a-los-procesos-de-normas-ambientales-en-sistemas-hidricos.html>
- Raco, B., Dotsika, E., Battaglini, R., Bulleri, E., Doveri, M., & Papakostantinou, K. (2013). A Quick and Reliable Method to Detect and Quantify Contamination

- from MSW Landfills: a Case Study. *Water, Air, & Soil Pollution*, 224(3), 1–18. <https://doi.org/10.1007/S11270-012-1380-5>
- Rahman, M. E., Halmi, M. E. Bin, Samad, M. Y. Bin, Uddin, M. K., Mahmud, K., Shukor, M. Y., Abdullah, S. R., & Shamsuzzaman, S. M. (2020). Design, operation and optimization of constructed wetland for removal of pollutant. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(22), 1–40. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228339>
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468–493. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2007.09.077>
- Rincón, J., & Millán, N. (2013). *Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales de la Universidad Libre* [Tesis de pregrado, Universidad Libre]. <https://repository.unilivre.edu.co/handle/10901/9997>
- Rivera, E., Barba, L., & Torres, P. (2013). Determinación de la toxicidad de lixiviados provenientes de residuos sólidos urbanos mediante indicadores biológicos. *Afinidad*, 70(563). <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/276257>
- Romero, M., Colín, A., Sánchez, E., & Ortiz, L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25, 157–167. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37012012004>
- Sánchez, G. C., Caamaño, N., Gonzalez, C., Pedro, M., Caffaratti, S., Hadad, H., & Maine, M. (2013). Rol de macrófitas en la remoción de contaminantes de un lixiviado de relleno sanitario utilizando un wetland construido subsuperficial. In *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)*. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

http://www.aaiq.org.ar/SCongresos/docs/04_025/papers/07e/07e_1535_18

Secretariado Alianza por el Agua. (2014). *Manual de Depuración de Aguas Residuales Urbanas*. Agua.org.mx. <https://agua.org.mx/biblioteca/manual-de-depuracion-de-aguas-residuales-urbanas/>

Solíz, M. F., Durango, J. S., Solano, J. L., & Yépez, M. A. (2020). *Cartografía de los residuos sólidos en Ecuador 2020*. Universidad Andina Simón Bolívar. <http://hdl.handle.net/10644/7773>

Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2014). *Constructed Wetlands Classification*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404612-2.00002-7>

Stein, O., & Hook, P. (2010). Temperature, Plants, and Oxygen: How Does Season Affect Constructed Wetland Performance? *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 40(6–7), 1331–1342. <https://doi.org/10.1081/ESE-200055840>

Suárez, A., Agudelo, N., Rincón, J., & Millán, N. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista Mutis*, 4(1), 8–14. <https://doi.org/10.21789/22561498.905>

Sutherland, W. J. (1990). *Iris Pseudacorus* L. *The Journal of Ecology*, 78(3), 848. <https://doi.org/10.2307/2260902>

Tatsi, A. A., Zouboulis, A. I., Matis, K. A., & Samaras, P. (2003). Coagulation–flocculation pretreatment of sanitary landfill leachates. *Chemosphere*, 53(7), 737–744. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00513-7](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00513-7)

Tchobanoglous, G., & Angelakis, A. N. (1996). Technologies for wastewater treatment appropriate for reuse: potential for applications in Greece. *Water Science and Technology*, 33(10–11), 15–24.

<https://doi.org/10.2166/WST.1996.0657>

Teng, C., Zhou, K., Peng, C., & Chen, W. (2021). Characterization and treatment of landfill leachate: A review. *Water Research*, 203, 117525. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2021.117525>

Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente. Publicado en el Registro Oficial Edición Especial 2 del 31 de marzo de 2003. Última modificación: 29 de marzo de 2017. Ecuador. (2017).

Torres, Á., Hernández, N., Fausto, A., & Zurita Martínez, F. (2017). Evaluación de tres sistemas de humedales híbridos a escala piloto para la remoción de nitrógeno. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(1), 37–47. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.03>

Torres, P., Barba, L. E., Ojeda, C., Martínez, J., & Castaño, Y. (2014). Influencia de la edad de lixiviados sobre su composición físico-química y su potencial de toxicidad. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17(1), 245–255. <https://doi.org/10.31910/RUDCA.V17.N1.2014.960>

Tu, M. (2003). *Element stewardship abstract for Iris pseudacorus L.* University of California. <https://www.invasive.org/gist/esadocs/documnts/irispse.pdf>

United Nations Human Settlements Programme. (2008). *Constructed Wetlands Manual*. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/UN_HABITAT_2008_Constructed_Wetlands_Manual.pdf

Universidad Nacional Autónoma de México. (2009). *Atlas de las plantas de la medicina tradicional mexicana*. <http://www.medicinatradicionalmexicana.unam.mx/apmtm/terminos-entrada.php?opcion=fb&letra=c>

- Varma, M., Gupta, A. K., Ghosal, P. S., & Majumder, A. (2021). A review on performance of constructed wetlands in tropical and cold climate: Insights of mechanism, role of influencing factors, and system modification in low temperature. *Science of The Total Environment*, 755, 142540. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.142540>
- Vaverková, M. D. (2019). Landfill Impacts on the Environment—Review. *Geosciences*, 9(10), 431. <https://doi.org/10.3390/GEOSCIENCES9100431>
- Vera, A., Andrade, C., Flores, E., Núñez, M., Cárdenas, C., & Morales, E. (2010). Remoción de nutrientes y materia orgánica en un humedal construido en función del desarrollo de la macrófita *Typha dominguensis* Pers. *Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería Universidad Del Zulia*, 33(2), 153–163. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702010000200006
- Vidal, G., & Hormazábal, S. (2018). Humedales construidos, Diseño y Operación. In *Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental (GIBA-UDEC)*. Universidad de Concepción. http://www.eula.cl/giba/wp-content/uploads/2018/09/HUMEDALES-CONSTRUIDOS-_DISEÑO-Y-OPERACIÓN.pdf
- Vymazal, J. (1995). Constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic — State of the art. *Water Science and Technology*, 32(3), 357–364. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00635-4](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00635-4)
- Vymazal, J. (2002). The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. *Ecological Engineering*, 18(5), 633–646. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(02\)00025-3](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(02)00025-3)
- Vymazal, J. (2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 25(5), 478–490.

<https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2005.07.010>

Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *The Science of the Total Environment*, 380(1–3), 48–65. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2006.09.014>

Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008). Types of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Environmental Pollution*, 14, 121–202. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8580-2_4

Wang, P., Zhang, H., Zuo, J., Zhao, D., Zou, X., Zhu, Z., Jeelani, N., Leng, X., & An, S. (2016). A Hardy Plant Facilitates Nitrogen Removal via Microbial Communities in Subsurface Flow Constructed Wetlands in Winter. *Scientific Reports*, 6(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep33600>

Wdowczyk, A., Szymańska-Pulikowska, A., & Gałka, B. (2022). Removal of selected pollutants from landfill leachate in constructed wetlands with different filling. *Bioresource Technology*, 353, 127136. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2022.127136>

Werker, A. G., Dougherty, J. M., McHenry, J. L., & Van Loon, W. A. (2002). Treatment variability for wetland wastewater treatment design in cold climates. *Ecological Engineering*, 19(1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(02\)00016-2](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(02)00016-2)

Wittgren, H. B., & Mæhlum, T. (1997). Wastewater treatment wetlands in cold climates. *Water Science and Technology*, 35(5), 45–53. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00051-6)





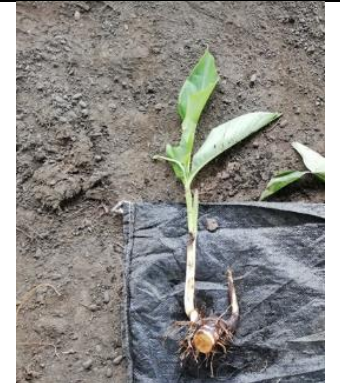

Zafra, C., & Romero, D. (2019). Tendencias tecnológicas de depuración de lixiviados en rellenos sanitarios iberoamericanos. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(35), 125–147. <https://doi.org/10.22395/RIUM.V18N35A8>







- Zhang, J., Shao, W., He, M., Hu, H., & Gao, B. (2006). Treatment performance and enhancement of subsurface constructed wetland treating polluted river water in winter. *Huanjing Kexue*, 27(8), 1560–1564. <https://europepmc.org/article/med/17111611>
- Ziyang, L., Youcai, Z., Tao, Y., Yu, S., Huili, C., Nanwen, Z., & Renhua, H. (2009). Natural attenuation and characterization of contaminants composition in landfill leachate under different disposing ages. *Science of The Total Environment*, 407(10), 3385–3391. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2009.01.028>







ANEXOS



ANEXO 1.



**Evidencias y resultados de las especies antes y después de su exposición al
lixiviado pretratado fuera de las unidades experimentales**







UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Canna limbata</i>	INICIO	30 DÍAS
C1.1 (0%)		
C1.2 (0%)		
C2.1 (25%)		







<p>UNIDAD EXPERIMENTAL:</p> <p><i>Canna limbata</i></p>	<p>INICIO</p>	<p>30 DÍAS</p>
<p>C2.2 (25%)</p>		
<p>C3.1 (50%)</p>		
<p>C3.2 (50%)</p>		







UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Canna limbata</i>	INICIO	30 DÍAS
C4.1 (75%)	 A photograph of a young Canna limbata plant at the start of the experiment. The plant has a single green leaf and a reddish stem, with a visible root system. It is growing in a dark, moist substrate.	 A photograph of the Canna limbata plant at 30 days. The plant appears significantly wilted and its leaves are yellowed and drooping. The root system is visible and appears to be in a state of decay.
C4.2 (75%)	 A photograph of a young Canna limbata plant at the start of the experiment. The plant has two green leaves and a reddish stem, with a visible root system. It is growing in a dark, moist substrate.	 A photograph of the Canna limbata plant at 30 days. The plant is severely wilted, with its leaves yellowed and its stem drooping. The root system is visible and appears to be in a state of decay.
C5.1 (100%)	 A photograph of a young Canna limbata plant at the start of the experiment. The plant has two green leaves and a reddish stem, with a visible root system. It is growing in a dark, moist substrate.	 A photograph of the Canna limbata plant at 30 days. The plant is severely wilted, with its leaves yellowed and its stem drooping. The root system is visible and appears to be in a state of decay.







UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Canna limbata</i>	INICIO	30 DÍAS
C5.2 (100%)		







UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Iris pseudacorus</i>	INICIO	30 DÍAS
I1.1 (0%)		







UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Canna limbata</i>	INICIO	30 DÍAS
I1.2 (0%)		
I2.1 (25%)		
I2.2 (25%)		



UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Canna limbata</i>	INICIO	30 DÍAS
I3.1 (50%)	 A photograph of a Canna limbata plant at the start of the experiment. The plant has several green leaves and a white stem, with a small root system visible at the base. It is growing in a dark, moist soil.	 A photograph of a Canna limbata plant at 30 days. The plant has grown significantly, with a much larger and more developed root system and several green leaves. A yellow measuring tape is visible next to the plant for scale.
I3.2 (50%)	 A photograph of a Canna limbata plant at the start of the experiment. The plant has several green leaves and a white stem, with a small root system visible at the base. It is growing in a dark, moist soil.	 A photograph of a Canna limbata plant at 30 days. The plant has grown significantly, with a much larger and more developed root system and several green leaves. A yellow measuring tape is visible next to the plant for scale.
I4.1 (75%)	 A photograph of a Canna limbata plant at the start of the experiment. The plant has several green leaves and a white stem, with a small root system visible at the base. It is growing in a dark, moist soil.	 A photograph of a Canna limbata plant at 30 days. The plant has grown significantly, with a much larger and more developed root system and several green leaves. A yellow measuring tape is visible next to the plant for scale.

UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Canna limbata</i>	INICIO	30 DÍAS
I4.2 (75%)		
I5.1 (100%)		
I5.2 (100%)		

UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Phragmites australis</i>	INICIO	30 DÍAS
P1.1 (0%)		
P1.2 (0%)		
P2.1 (25%)		










UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Phragmites australis</i>	INICIO	30 DÍAS
P2.2 (25%)		
P3.1 (50%)		
P3.2 (50%)		

UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Phragmites australis</i>	INICIO	30 DÍAS
P4.1 (75%)		
P4.2 (75%)		
P5.1 (100%)		










UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Phragmites australis</i>	INICIO	30 DÍAS
P5.2 (100%)	 A photograph of a Phragmites australis plant at the start of the experiment. The plant has a thick, light-colored stem with several green leaves at the top. The roots are visible at the base, which is resting on a black plastic bag on a dirt surface.	 A photograph of the same Phragmites australis plant after 30 days. The plant appears to have grown slightly taller and has more green leaves. The roots are still visible at the base, which is resting on a black plastic bag on a dirt surface.

ANEXO 2.







**Evidencias y resultados de las especies a lo largo de la exposición al
lixiviado pretratado en las unidades experimentales**










UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Canna limbata</i>	INICIO	5 DÍAS	30 DÍAS
C1.1 (0%)			
C1.2 (0%)			
C2.1 (25%)			










UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Canna limbata</i>	INICIO	5 DÍAS	30 DÍAS
C2.2 (25%)	 A young Canna limbata plant with two large green leaves, growing in a clear plastic bottle used as a pot, placed on dark soil in an outdoor experimental field.	 The Canna limbata plant after 5 days, showing slight growth and a more upright stem.	 The Canna limbata plant after 30 days, showing significant growth with several large, broad leaves.
C3.1 (50%)	 A young Canna limbata plant with two large green leaves, growing in a clear plastic bottle used as a pot, placed on dark soil in an outdoor experimental field.	 The Canna limbata plant after 5 days, showing slight growth and a more upright stem.	 The Canna limbata plant after 30 days, showing significant growth with several large, broad leaves.
C3.2 (50%)	 A young Canna limbata plant with two large green leaves, growing in a clear plastic bottle used as a pot, placed on dark soil in an outdoor experimental field.	 The Canna limbata plant after 5 days, showing slight growth and a more upright stem.	 The Canna limbata plant after 30 days, showing significant growth with several large, broad leaves.







UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Canna limbata</i>	INICIO	5 DÍAS	30 DÍAS
C4.1 (75%)			
C4.2 (75%)			
C5.1 (100%)			

UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Canna limbata</i>	INICIO	5 DÍAS	30 DÍAS
C5.2 (100%)			










UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Iris pseudacorus</i>	INICIO	5 DÍAS	30 DÍAS
I1.1 (0%)			
I1.2 (0%)			










UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Iris pseudacorus</i>	INICIO	5 DÍAS	30 DÍAS
I2.1 (25%)			
I2.2 (25%)			
I3.1 (50%)			










UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Iris pseudacorus</i>	INICIO	5 DÍAS	30 DÍAS
13.2 (50%)			
14.1 (75%)			
14.2 (75%)			

UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Iris pseudacorus</i>	INICIO	5 DÍAS	30 DÍAS
I5.1 (100%)			
I5.2 (100%)			

UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Phragmites australis</i>	INICIO	5 DÍAS	30 DÍAS
P1.1 (0%)			

UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Phragmites australis</i>	INICIO	5 DÍAS	30 DÍAS
P1.2 (0%)			
P2.1 (25%)			
P2.2 (25%)			

UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Phragmites australis</i>	INICIO	5 DÍAS	30 DÍAS
P3.1 (50%)			
P3.2 (50%)			
P4.1 (75%)			

UNIDAD EXPERIMENTAL: <i>Phragmites australis</i>	INICIO	5 DÍAS	30 DÍAS
P4.2 (75%)			
P5.1 (100%)			
P5.2 (100%)			

ANEXO 3.

Hoja de campo utilizada para la recolección de información de los indicadores fisiológicos de las macrófitas utilizadas en el proyecto

HOJA DE CAMPO							
Nombre:	Christian Antonio Totoy Quinga					Hora:	12:52
Fecha:	06/11/2021						
Especie:	<i>Canna limbata</i>						
Unidad experimental	Longitud raíz (cm)	Color de raíz	Número de hojas	Color de hojas	Altura de la planta (cm)	Color de flores	Observaciones
C1.1	10,0	Blanco	3	Verde	64,3	NIA	Hijuelo: h=23cm, 2 hojas verdes
C1.2	12,3	Blanco	5	Verde	58,2	NIA	Hijuelo: h=3,5cm
C2.1	9,5	Blanco	1	Verde	57,0	NIA	Hijuelo: h=6,5cm
C2.2	17,5	Blanco	3	Verde	65,0	NIA	
C3.1	18,2	Blanco	2	Verde	51,1	NIA	Hijuelo: h=10,5cm
C3.2	10,6	Blanco	3	Verde	59,6	NIA	Hijuelo: h=18,5cm, 2 hojas verdes
C4.1	13,1	Blanco	2	Verde	50,8	NIA	
C4.2	13,1	Blanco	6	Verde	67,0	NIA	Hijuelo: h=10cm
C5.1	16,0	Blanco	4	Verde	59,0	NIA	Hijuelo 1: h=9,5cm ; Hijuelo 2: h=3,5cm
C5.2	17,2	Blanco	2	Verde	57,2	NIA	Hijuelo: h=8,5cm
Especie:	<i>Iris pseudacorus</i>						
Unidad experimental	Longitud raíz (cm)	Color de raíz	Número de hojas	Color de hojas	Altura de la planta (cm)	Color de flores	Observaciones
I1.1	17,0	Blanco y amarillo amarillado	9	verde	47,0	NIA	
I1.2	13,0	Blanco y amarillo amarillado	7	verde	57,0	NIA	
I2.1	12,0	Blanco y amarillo amarillado	7	verde	37,2	NIA	
I2.2	23,0	Predominio Blanco	9	verde	79,4	NIA	
I3.1	12,0	Blanco y amarillo amarillado	9	verde	61,4	NIA	
I3.2	21,0	Predominio Blanco	6	verde	41,1	NIA	
I4.1	25,1	Predominio Blanco	8	verde	68,6	NIA	
I4.2	32,0	Blanco y amarillo amarillado	11	verde	65,2	NIA	
I5.1	15,0	Predominio amarillo amarillado	12	verde	62,0	NIA	
I5.2	25,5	Predominio Blanco	9	verde	64,5	NIA	
Especie:	<i>Phragmites australis</i>						
Unidad experimental	Longitud raíz (cm)	Color de raíz	Número de hojas	Color de hojas	Altura de la planta (cm)	Color de flores	Observaciones
P1.1	18,4	Blanco y marrón	2	verde	42,0	NIA	
P1.2	17,0	Blanco y marrón	6	verde	40,0	NIA	
P2.1	16,2	Blanco y marrón	NIA	NIA	37,8	NIA	Hijuelo: h=28,0cm, 3 hojas verdes
P2.2	9,0	Blanco	5	verde	76,1	NIA	
P3.1	5,0	Blanco	4	verde	58,5	NIA	
P3.2	14,0	Blanco y marrón	2	verde	52,0	NIA	
P4.1	28,0	Blanco y marrón	4	verde	64,3	NIA	
P4.2	20,5	Blanco	3	verde	64,0	NIA	
P5.1	14,0	Blanco	5	verde	67,8	NIA	
P5.2	14,2	Blanco	4	verde	70,5	NIA	

NIA = No aplica.

HOJA DE CAMPO							
Nombre:	Christian Antonio Totoy Quiñga					Hora:	13:15
Fecha:	06/12/2021						
Especie:	<i>Canna limbata</i>						
Unidad experimental	Longitud raíz (cm)	Color de raíz	Número de hojas	Color de hojas	Altura de la planta (cm)	Color de flores	Observaciones
C1.1	10,6	Predominio Gris	1	verde/ verde oliva	64,8	N/A	Hijuelo: seco h=23,2cm, 2 hojas secas
C1.2	12,7	Predominio Gris	3	verde/ verde oliva	58,9	N/A	Hijuelo: seco h=3,6cm
C2.1	10,0	Negro y Gris	1	verde	57,4	N/A	Hijuelo: seco h=6,4cm
C2.2	17,9	Negro y Gris	1	verde/ verde oliva	65,2	N/A	
C3.1	18,5	Negro y Gris	2	verde	51,5	N/A	Hijuelo: seco h=10,3cm
C3.2	11,0	Negro y Gris	1	verde/ verde oliva	59,8	N/A	Hijuelo: seco h=48,4cm, 2 hojas secas
C4.1	13,3	Negro y Gris	1	verde/ verde oliva	50,6	N/A	
C4.2	13,3	Negro y Gris	5	verde/ verde oliva	66,8	N/A	Hijuelo: seco, h=40cm
C5.1	16,1	Negro y Gris	3	verde/ verde oliva	59,0	N/A	Hijuelo 1: seco, h=9,2cm, Hijuelo 2: seco h=3,2cm
C5.2	17,4	Negro y Gris	1	verde/ verde oliva	57,1	N/A	Hijuelo: seco, h=8,1cm
Especie:	<i>Iris pseudacorus</i>						
Unidad experimental	Longitud raíz (cm)	Color de raíz	Número de hojas	Color de hojas	Altura de la planta (cm)	Color de flores	Observaciones
I1.1	17,6	Bianco y amarillo amarillado	7	verde/ naranja-amarillo	47,7	N/A	
I1.2	13,5	Bianco y amarillo amarillado	4	Verde/ naranja amarillado	57,8	N/A	
I2.1	12,4	Bianco y amarillo amarillado	5	Verde/ naranja amarillado	37,5	N/A	
I2.2	23,5	Predominio Blanco	7	verde/ naranja amarillado	79,9	N/A	
I3.1	12,3	Bianco y amarillo amarillado	7	Verde/ naranja amarillado	62,1	N/A	
I3.2	21,5	Predominio Blanco	5	Verde/ naranja amarillado	41,6	N/A	
I4.1	25,5	Predominio Blanco	6	Verde/ naranja amarillado	69,2	N/A	
I4.2	32,5	Bianco y amarillo amarillado	3	Verde/ naranja amarillado	65,7	N/A	
I5.1	15,6	Predominio Blanco	4	Verde/ naranja amarillado	62,8	N/A	
I5.2	28,1	Predominio Blanco	7	Verde/ naranja amarillado	65,4	N/A	
Especie:	<i>Phragmites australis</i>						
Unidad experimental	Longitud raíz (cm)	Color de raíz	Número de hojas	Color de hojas	Altura de la planta (cm)	Color de flores	Observaciones
P1.1	19,0	Bianco y marrón	1	verde/ gris visón	42,3	N/A	
P1.2	17,4	Bianco y marrón	5	verde/ gris visón	40,8	N/A	
P2.1	16,7	Bianco y marrón	N/A	N/A	37,8	N/A	Hijuelo: h=28,3, 3 hojas verde bien desarrolló.
P2.2	9,7	Bianco	5	verde	77,0	N/A	
P3.1	5,6	Bianco	3	verde/ gris visón	59,2	N/A	
P3.2	14,4	Bianco y marrón	2	verde	52,3	N/A	
P4.1	28,5	Bianco y marrón	3	verde/ gris visón	65,1	N/A	
P4.2	21,1	Bianco	1	verde/ gris visón	65,2	N/A	
P5.1	14,4	Bianco	5	verde	68,6	N/A	
P5.2	14,7	Bianco	4	verde	71,2	N/A	

N/A= No aplica.

ANEXO 4.

Resultado del análisis físico del sustrato empleado en los humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical a escala de laboratorio



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN

INF. No. 22 - 0055-I
Hoja 01 de 01

Quito, 28 de enero de 2022

DATOS DEL CLIENTE


Razón Social: CHRISTIAN ANTONIO TOTOY QUINGA
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA
Teléfono: 0993322779

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DQO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL PARA EL TRATAMIENTO SECUNDARIO DE LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO ROMERILLOS, CANTÓN MEJÍA
Contratante: ***
Contratista: ***
Fiscalizador: ***
PROCEDENCIA: ***
TIPO DE MUESTRA: CASCAJO
FECHA DE ENSAYO: 2022-01-13
NORMA: ASTM C128-15

RESULTADOS DEL ENSAYO					
IDENTIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	DENSIDAD RELATIVA SECA	DENSIDAD RELATIVA S.S.S	DENSIDAD RELATIVA APARENTE	ABSORCIÓN DE AGUA (%)
033-I-1	Cascajo	1.11	1.60	2.16	43.77

OBSERVACIÓN: La procedencia de los ítems de ensayo son proporcionadas por el cliente, lo que involucra su total responsabilidad.


ING. MERCEDES VILLACIS
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300
Ext.: 1609



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

INF. No. 22-0046-I
Hoja 01 de 01

Quito, 21 de enero de 2022

DATOS DEL CLIENTE

Razón social: CHRISTIAN ANTONIO TOTOY QUINGA
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA
Teléfono: 0993322779

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DQO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL PARA EL TRATAMIENTO SECUNDARIO DE LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO ROMERILLOS, CANTÓN MEJÍA

Contratante: ***
Contratista: ***
Fiscalizador: ***
MUESTRA: SUELO ROMERILLOS
PROCEDENCIA: ***
FECHA DE ENSAYO: 2021-12-23
NORMA: ASTM C136M

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
1"	25,4	0,0	0,0	0,0	100,0
3/4"	19,0	3,3	0,7	0,7	99,3
1/2"	12,7	11,3	2,3	2,9	97,1
3/8"	9,5	13,9	2,8	5,7	94,3
No. 4	4,750	85,4	17,2	23,0	77,0
No. 8	2,360	152,3	30,7	53,7	46,3
No. 16	1,180	139,4	28,1	81,8	18,2
No. 30	0,600	71,8	14,5	96,2	3,8
No. 50	0,300	14,9	3,0	99,2	0,8
No. 100	0,150	2,5	0,5	99,7	0,3
No. 200	0,075	1,0	0,2	99,9	0,1
BANDEJA	-	0,3	0,1	100,0	0,0
TOTAL		496,1			

Observaciones: Los datos de procedencia son responsabilidad del cliente



ING. MERCEDES VILLACÍS
JEFE DE LABORATORIO



GR-F-22-012-I

Telf.: 2976300
Ext.: 1609

Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía / Edif. Ing. Civil / Mezanine / Ofic. M15 Email: lemsur@epn.edu.ec

ANEXO 5.

Hoja de campo utilizada para la recolección de datos de la caracterización del afluente durante las 6 semana en los humedales

HOJA DE CAMPO					
Nombre:	Christian Totoy			Hora:	9:29
Fecha:	08/12/2021				
Afluente:	Lixiviado pretratado				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	1150	1150	1150	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	1092	1092	1092	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	5,70				
Temperatura	13,1		°C		
Color	104		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	4,10		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	6,8		mg/L N-NO ₃ ⁻		
Fosfatos	0,08		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
NOMBRE:	Christian Totoy			Hora:	10:10
FECHA :	15/12/2021				
Afluente:	Lixiviado pretratado				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	793	793	793	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	713	713	714	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,47				
Temperatura	12,0		°C		
Color	115		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,06		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	2,0,3		mg/L N-NO ₃ ⁻		
Fosfatos	0,8		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:20
NOMBRE:	Christian Totoy			Hora:	10:10
FECHA :	22/12/2021				
Afluente:	Lixiviado pretratado				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	934	936	934	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	1035	1037	1035	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,76				
Temperatura	12,5		°C		
Color	129		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,01		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	2,9		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	2,3		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10

HOJA DE CAMPO					
Nombre:	Christian Totoy			Hora:	10:15
Fecha:	29/12/2021				
Afluente:	Lixiviado pretratado				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	827	828	828	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	990	988	988	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad	Observaciones	
pH	7,90				
Temperatura	12,7		°C		
Color	102		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,96		mg/L N-NH ₃	Dilución 1:1000 en 2 pasos	
Nitratos	2,8		mg/L N-NO ₃ ⁻	Dilución 1:10	
Fosfatos	0,71		mg/L PO ₄ ³⁻	Dilución 1:10	
NOMBRE:	Christian Totoy			Hora:	10:16
FECHA:	05/01/2022				
Afluente:	Lixiviado pretratado				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	854	854	855	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	834	834	834	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad	Observaciones	
pH	7,52				
Temperatura	12,0		°C		
Color	113		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,30		mg/L N-NH ₃	Dilución 1:1000 en 2 pasos	
Nitratos	1,9		mg/L N-NO ₃ ⁻	Dilución 1:10	
Fosfatos	0,5		mg/L PO ₄ ³⁻	Dilución 1:10	
NOMBRE:	Christian Totoy			Hora:	10:20
FECHA:	12/01/2022				
Afluente:	Lixiviado pretratado				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	982	982	983	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	1098	1098	1097	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad	Observaciones	
pH	7,70				
Temperatura	12,5		°C		
Color	85		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,31		mg/L N-NH ₃	Dilución 1:1000 en 2 pasos	
Nitratos	2,4		mg/L N-NO ₃ ⁻	Dilución 1:10	
Fosfatos	0,55		mg/L PO ₄ ³⁻	Dilución 1:10	

ANEXO 6.

Hoja de campo utilizada en la recolección de datos de la caracterización del efluente provenientes de los humedales artificiales utilizados en el proyecto

HOJA DE CAMPO					
Nombre:	Christian Totoy			Hora:	9:32
Fecha:	10/12/2021				
Efluente:	<i>Phragmites australis</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	946	948	948	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	772	774	774	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,60				
Temperatura	14,3		°C		
Color	114		Pt Co		
Nitrógeno amoniacal	1,16		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	20,3		mg/L N-NO ₃ ⁻		
Fosfatos	0,19		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	<i>Iris pseudacorus</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	1032	1032	1032	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	906	906	906	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,93				
Temperatura	14,8		°C		
Color	101		Pt Co		
Nitrógeno amoniacal	1,23		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	20,3		mg/L N-NO ₃ ⁻		
Fosfatos	0,26		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	Sin especie				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	625	626	625	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	692	692	692	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	5,98				
Temperatura	14,3		°C		
Color	96		Pt Co		
Nitrógeno amoniacal	0,88		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	20,3		mg/L N-NO ₃ ⁻		
Fosfatos	0,24		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10

HOJA DE CAMPO					
Nombre:	Christian Totoy			Hora:	09:40
Fecha:	13/12/2021				
Efluente:	<i>Phragmites australis</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	912	912	915	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	872	872	872	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,19				
Temperatura	13,5		°C		
Color	91		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,20		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	20,3		mg/L N-NO ₃ ⁻		
Fosfatos	0,34		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	<i>Iris pseudacorus</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	909	910	910	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	932	933	933	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,95				
Temperatura	13,8		°C		
Color	84		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,12		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	2,2		mg/L N-NO ₃ ⁻		
Fosfatos	0,62		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	Sin especie				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	569	569	569	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	635	637	637	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,05				
Temperatura	13,2		°C		
Color	81		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,70		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	0,7		mg/L N-NO ₃ ⁻		
Fosfatos	0,33		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10

HOJA DE CAMPO					
Nombre:	Christian Totoy			Hora:	10:10
Fecha:	15/12/2021				
Efluente:	<i>Phragmites australis</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	942	943	943	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	890	891	891	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,30				
Temperatura	13,9		°C		
Color	80		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,95		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	20,3		mg/L N-NO ₃ ⁻		
Fosfatos	0,56		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	<i>Iris pseudacorus</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	984	986	986	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	1046	1047	1046	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,06				
Temperatura	13,8		°C		
Color	75		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,04		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	12,3		mg/L N-NO ₃ ⁻		
Fosfatos	0,68		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	Sin especie				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	729	730	731	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	772	773	774	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,10				
Temperatura	13,5		°C		
Color	65		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,66		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	0,4		mg/L N-NO ₃ ⁻		
Fosfatos	0,66		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10

HOJA DE CAMPO					
Nombre:	Christian Totoy			Hora:	09:27
Fecha:	17/12/2021				
Efluente:	<i>Phragmites australis</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	689	689	688	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	570	570	570	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,34				
Temperatura	10,7		°C		
Color	86		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,09		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	11,2		mg/L N-NO ₃ ⁻		
Fosfatos	0,57		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	<i>Iris pseudacorus</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	659	660	660	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	587	587	586	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,36				
Temperatura	10,6		°C		
Color	82		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,07		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	21,2		mg/L N-NO ₃ ⁻		
Fosfatos	0,43		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	Sin especie				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	515	515	515	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	472	471	472	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,77				
Temperatura	10,9		°C		
Color	88		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,90		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	20,3		mg/L N-NO ₃ ⁻		
Fosfatos	0,13		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10

HOJA DE CAMPO					
Nombre:	Christian Totoy			Hora:	09:30
Fecha:	20/12/2021				
Efluente:	<i>Phragmites australis</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	767	767	767	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	785	788	788	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,45				
Temperatura	13,2		°C		
Color	74		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,15		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	22,9		mg/L N-NO ₃ ⁻		
Fosfatos	20,12		mg/L PO ₄ ³⁻		
Efluente:	<i>Iris pseudacorus</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	743	743	743	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	822	823	823	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,25				
Temperatura	13,4		°C		
Color	74		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,12		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	3,3		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	20,12		mg/L PO ₄ ³⁻		
Efluente:	Sin especie				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	556	556	557	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	624	625	625	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,98				
Temperatura	13,1		°C		
Color	76		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,88		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	20,3		mg/L N-NO ₃ ⁻		
Fosfatos	1,90		mg/L PO ₄ ³⁻		

HOJA DE CAMPO					
Nombre:	Christian Totoy			Hora:	10:00
Fecha:	22/12/2021				
Efluente:	<i>Phragmites australis</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	769	770	769	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	713	713	712	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,83				
Temperatura	12,1		°C		
Color	51		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,03		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	23,5		mg/L N-NO ₃ ⁻		
Fosfatos	0,12		mg/L PO ₄ ³⁻		
Efluente:	<i>Iris pseudacorus</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	791	790	790	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	755	755	755	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,14				
Temperatura	12,3		°C		
Color	68		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,41		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	3,7		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,12		mg/L PO ₄ ³⁻		
Efluente:	Sin especie				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	775	775	775	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	791	791	791	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,48				
Temperatura	11,9		°C		
Color	67		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,03		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	20,3		mg/L N-NO ₃ ⁻		
Fosfatos	0,79		mg/L PO ₄ ³⁻		

HOJA DE CAMPO					
Nombre:	Christian Totoy			Hora:	09:45
Fecha:	24/12/2021				
Efluente:	<i>Phragmites australis</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	814	817	818	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	865	863	863	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	5,91				
Temperatura	13,8		°C		
Color	92		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,77		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	3,3		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	<0,12		mg/L PO ₄ ³⁻		
Efluente:	<i>Iris pseudacorus</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	745	744	744	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	790	788	789	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,03				
Temperatura	13,8		°C		
Color	88		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,65		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	4,2		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	<0,12		mg/L PO ₄ ³⁻		
Efluente:	Sin especie				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	484	483	483	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	499	499	502	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	5,59				
Temperatura	13,7		°C		
Color	102		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,59		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	1,6		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	2,11		mg/L PO ₄ ³⁻		

HOJA DE CAMPO						
Nombre:	Christian Totoy				Hora:	09:50
Fecha:	27/12/2021					
Efluente:	<i>Phragmites australis</i>					
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones	
DQO 1	858	859	859	mg/L	Dilución 1:2	
DQO 2	779	779	779	mg/L	Dilución 1:2	
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones	
pH	6,86					
Temperatura	15,0		°C			
Color	83		PtCo			
Nitrógeno amoniacal	1,05		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos	
Nitratos	4,4		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10	
Fosfatos	20,12		mg/L PO ₄ ³⁻			
Efluente:	<i>Iris pseudacorus</i>					
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones	
DQO 1	739	740	739	mg/L	Dilución 1:2	
DQO 2	776	778	778	mg/L	Dilución 1:2	
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones	
pH	6,94					
Temperatura	14,9		°C			
Color	80		PtCo			
Nitrógeno amoniacal	1,11		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos	
Nitratos	3,2		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10	
Fosfatos	20,12		mg/L PO ₄ ³⁻			
Efluente:	Sin especie					
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones	
DQO 1	565	565	565	mg/L	Dilución 1:2	
DQO 2	500	500	500	mg/L	Dilución 1:2	
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones	
pH	6,72					
Temperatura	14,8		°C			
Color	93		PtCo			
Nitrógeno amoniacal	0,86		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos	
Nitratos	1,8		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10	
Fosfatos	1,13		mg/L PO ₄ ³⁻			

HOJA DE CAMPO					
Nombre:	Christian Totoy			Hora:	10:15
Fecha:	29/12/2021				
Efluente:	<i>Phragmites australis</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	936	936	937	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	830	830	830	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,72				
Temperatura	12,0		°C		
Color	78		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,78		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	4,9		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	<0,12		mg/L PO ₄ ⁻		
Efluente:	<i>Iris pseudacorus</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	737	737	738	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	666	666	666	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,04				
Temperatura	12,1		°C		
Color	77		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,85		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	5,5		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	<0,12		mg/L PO ₄ ⁻		
Efluente:	Sin especie				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	717	718	717	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	761	761	761	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,61				
Temperatura	11,8		°C		
Color	85		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,70		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	1,9		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,97		mg/L PO ₄ ⁻		

HOJA DE CAMPO					
Nombre:	Christian Totoy			Hora:	09:46
Fecha:	31/12/2021				
Efluente:	<i>Phragmites australis</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	691	691	691	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	636	636	636	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,94				
Temperatura	12,2		°C		
Color	86		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,86		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	4,3		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,58		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	<i>Iris pseudacorus</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	748	748	748	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	770	770	770	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,93				
Temperatura	12,0		°C		
Color	74		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,85		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	2,4		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,41		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	Sin especie				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	709	709	709	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	789	789	789	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,64				
Temperatura	12,1		°C		
Color	90		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,80		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	3,1		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,64		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10

HOJA DE CAMPO					
Nombre:	Christian Totay			Hora:	09:52
Fecha:	03/04/2022				
Efluente:	<i>Phragmites australis</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	710	710	710	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	672	672	672	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,02				
Temperatura	14,1		°C		
Color	81		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,93		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	3,8		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,47		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	<i>Iris pseudacorus</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	741	741	741	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	701	701	701	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,96				
Temperatura	14,0		°C		
Color	82		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,00		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	3,2		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,35		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	Sin especie				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	797	797	797	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	722	722	722	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,80				
Temperatura	13,9		°C		
Color	87		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,87		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	2,4		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,60		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10

HOJA DE CAMPO					
Nombre:	Christian Totoy			Hora:	10:20
Fecha:	05/01/2022				
Efluente:	<i>Phragmites australis</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	702	702	702	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	697	698	697	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,00				
Temperatura	14,0		°C		
Color	85		Pt Co		
Nitrógeno amoniacal	1,02		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	4,0		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,33		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	<i>Iris pseudacorus</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	612	612	612	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	712	712	711	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,07				
Temperatura	13,8		°C		
Color	81		Pt Co		
Nitrógeno amoniacal	1,09		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	3,4		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,42		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	Sin especie				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	826	826	826	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	801	801	801	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,98				
Temperatura	13,7		°C		
Color	94		Pt Co		
Nitrógeno amoniacal	1,00		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	2,6		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,35		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10

HOJA DE CAMPO					
Nombre:	Christian Totoy			Hora:	09:36
Fecha:	07/01/2022				
Efluente:	<i>Phragmites australis</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	838	838	838	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	772	771	771	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,06				
Temperatura	12,5		°C		
Color	94		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,09		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	2,7		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,16		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	<i>Iris pseudacorus</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	777	777	777	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	738	736	736	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,27				
Temperatura	12,7		°C		
Color	99		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,22		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	2,6		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,07		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	Sin especie				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	712	713	712	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	717	718	717	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,98				
Temperatura	12,6		°C		
Color	97		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,47		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	2,0		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,19		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10

HOJA DE CAMPO					
Nombre:	Christian Totoy			Hora:	09:40
Fecha:	10/01/2022				
Efluente:	<i>Phragmites australis</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	757	757	757	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	782	782	782	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,96				
Temperatura	13,8		°C		
Color	88		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,95		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	2,4		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,16		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	<i>Iris pseudacorus</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	710	709	709	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	690	690	690	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,02				
Temperatura	13,8		°C		
Color	71		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,00		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	3,2		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,26		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	Sin especie				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	893	893	893	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	737	737	737	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	6,91				
Temperatura	13,6		°C		
Color	108		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	0,94		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	1,6		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,41		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10

HOJA DE CAMPO						
Nombre:	Christian Totoy				Hora:	10:22
Fecha:	12/01/2022					
Efluente:	<i>Phragmites australis</i>					
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones	
DQO 1	715	715	716	mg/L	Dilución 1:2	
DQO 2	727	727	727	mg/L	Dilución 1:2	
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones	
pH	6,99					
Temperatura	13,0		°C			
Color	73		PtCo			
Nitrógeno amoniacal	1,05		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos	
Nitratos	3,7		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10	
Fosfatos	0,12		mg/L PO ₄ ³⁻			
Efluente:	<i>Iris pseudacorus</i>					
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones	
DQO 1	654	654	654	mg/L	Dilución 1:2	
DQO 2	661	661	660	mg/L	Dilución 1:2	
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones	
pH	7,24					
Temperatura	12,9		°C			
Color	64		PtCo			
Nitrógeno amoniacal	0,96		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:2000 en 2 pasos	
Nitratos	3,8		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10	
Fosfatos	1,83		mg/L PO ₄ ³⁻			
Efluente:	Sin especie					
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones	
DQO 1	861	860	861	mg/L	Dilución 1:2	
DQO 2	768	769	769	mg/L	Dilución 1:2	
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones	
pH	7,04					
Temperatura	12,9		°C			
Color	84		PtCo			
Nitrógeno amoniacal	1,01		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos	
Nitratos	1,8		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10	
Fosfatos	1,10		mg/L PO ₄ ³⁻			

HOJA DE CAMPO					
Nombre:	Christian Totoy			Hora:	09:45
Fecha:	14/01/2022				
Efluente:	<i>Phragmites australis</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	931	931	933	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	917	917	917	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,26				
Temperatura	13,5		°C		
Color	48		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,11		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	3,8		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,10		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	<i>Iris pseudacorus</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	911	911	910	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	932	932	932	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,35				
Temperatura	13,2		°C		
Color	54		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,09		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	3,2		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,21		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	Sin especie				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	624	624	624	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	602	602	602	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	7,32				
Temperatura	13,0		°C		
Color	65		PtCo		
Nitrógeno amoniacal	1,20		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	1,8		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,17		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10

HOJA DE CAMPO					
Nombre:	Christian Totoy			Hora:	09:40
Fecha:	17/01/2022				
Efluente:	<i>Phragmites australis</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	909	910	910	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	941	941	941	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	8,17				
Temperatura	12,7		°C		
Color	53		Pt Co		
Nitrógeno amoniacal	0,96		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	4,6		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,23		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	<i>Iris pseudacorus</i>				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	906	906	907	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	893	893	893	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	8,26				
Temperatura	12,5		°C		
Color	61		Pt Co		
Nitrógeno amoniacal	0,86		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	2,6		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,09		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10
Efluente:	Sin especie				
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones
DQO 1	687	687	687	mg/L	Dilución 1:2
DQO 2	617	617	617	mg/L	Dilución 1:2
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones
pH	8,32				
Temperatura	12,0		°C		
Color	72		Pt Co		
Nitrógeno amoniacal	0,97		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos
Nitratos	2,0		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10
Fosfatos	0,34		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10

HOJA DE CAMPO						
Nombre:	Christian Totay				Hora:	09:55
Fecha:	19/10/2022					
Efluente:	<i>Phragmites australis</i>					
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones	
DQO 1	711	710	710	mg/L	Dilución 1:2	
DQO 2	714	714	714	mg/L	Dilución 1:2	
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones	
pH	7,28					
Temperatura	13,1		°C			
Color	46		PtCo			
Nitrógeno amoniacal	0,87		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos	
Nitratos	3,4		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10	
Fosfatos	0,12		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10	
Efluente:	<i>Iris pseudacorus</i>					
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones	
DQO 1	580	580	580	mg/L	Dilución 1:2	
DQO 2	533	534	534	mg/L	Dilución 1:2	
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones	
pH	7,15					
Temperatura	13,0		°C			
Color	44		PtCo			
Nitrógeno amoniacal	0,81		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos	
Nitratos	3,8		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10	
Fosfatos	0,21		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10	
Efluente:	Sin especie					
Parámetro	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Unidad	Observaciones	
DQO 1	752	752	752	mg/L	Dilución 1:2	
DQO 2	740	740	740	mg/L	Dilución 1:2	
Parámetros de control	Dato		Unidad		Observaciones	
pH	7,41					
Temperatura	13,1		°C			
Color	66		PtCo			
Nitrógeno amoniacal	0,72		mg/L N-NH ₃		Dilución 1:1000 en 2 pasos	
Nitratos	1,6		mg/L N-NO ₃ ⁻		Dilución 1:10	
Fosfatos	0,13		mg/L PO ₄ ³⁻		Dilución 1:10	

ANEXO 7.

pH registrados en las unidades experimentales durante 6 semanas y TRH de 2, 5 y 7 días.

Semana	TRH	<i>Iris pseudacorus</i> (Unidades de pH)	<i>Phragmites australis</i> (Unidades de pH)	Sin especie (Unidades de pH)
1	0	5,70	5,70	5,70
	2	6,93	6,6	5,98
	5	6,95	7,19	6,05
	7	7,06	7,30	6,10
2	0	6,47	6,47	6,47
	2	7,36	7,34	6,77
	5	7,25	7,45	6,98
	7	7,14	6,83	6,48
3	0	7,76	7,76	7,76
	2	6,03	5,91	5,59
	5	6,94	6,86	6,72
	7	7,04	6,72	6,61
4	0	6,9	6,9	6,9
	2	6,93	6,94	6,64
	5	6,96	7,02	6,8
	7	7,07	7,00	6,98
5	0	6,52	6,52	6,52
	2	7,27	7,06	6,98
	5	7,02	6,96	6,91
	7	7,24	6,99	7,04
6	0	7,39	7,39	7,39

Semana	TRH	<i>Iris pseudacorus</i> (Unidades de pH)	<i>Phragmites australis</i> (Unidades de pH)	Sin especie (Unidades de pH)
	2	7,35	7,26	7,32
	5	8,26	8,17	8,32
	7	7,15	7,28	7,41

ANEXO 8.

**Temperatura registrada en las unidades experimentales durante 6 semanas
y TRH de 2, 5 y 7 días.**

Semana	TRH	<i>Iris pseudacorus</i> (°C)	<i>Phragmites australis</i> (°C)	Sin especie (°C)
1	0	13,1	13,1	13,1
	2	14,3	14,8	14,3
	5	13,5	13,8	13,2
	7	13,9	13,8	13,5
2	0	12,0	12,0	12,0
	2	10,7	10,6	10,9
	5	13,2	13,4	13,1
	7	12,1	12,3	11,9
3	0	12,5	12,5	12,5
	2	13,8	13,8	13,7
	5	15,0	14,9	14,8
	7	12,0	12,1	11,8
4	0	12,7	12,7	12,7
	2	12,2	12,0	12,1
	5	14,1	14,0	13,9
	7	14,0	13,8	13,7
5	0	12,0	12,0	12,0
	2	12,5	12,7	12,6
	5	13,8	13,8	13,6
	7	13,0	12,9	12,9
6	0	12,5	12,5	12,5

Semana	TRH	<i>Iris pseudacorus</i> (°C)	<i>Phragmites australis</i> (°C)	Sin especie (°C)
	2	13,5	13,2	13,0
	5	12,7	12,5	12,0
	7	13,1	13,0	13,1

ANEXO 9.

Nitrógeno amoniacal registrado en las unidades experimentales durante 6 semanas y TRH de 2, 5 y 7 días.

Semana	TRH	<i>Iris pseudacorus</i> (mg/L)	<i>Phragmites australis</i> (mg/L)	Sin especie (mg/L)
1	0	1100	1100	1100
	2	1230	1160	880
	5	1120	1200	700
	7	1040	950	660
2	0	1060	1060	1060
	2	1070	1090	900
	5	1120	1150	880
	7	1410	1030	1030
3	0	1010	1010	1010
	2	650	770	590
	5	1110	1050	860
	7	850	780	700
4	0	960	960	960
	2	850	860	800
	5	1000	930	870
	7	1090	1020	1000
5	0	1300	1300	1300
	2	1220	1090	1470
	5	1000	950	940
	7	960	1050	1010
6	0	1310	1310	1310

Semana	TRH	<i>Iris pseudacorus</i> (mg/L)	<i>Phragmites australis</i> (mg/L)	Sin especie (mg/L)
	2	1090	1110	1200
	5	860	960	970
	7	810	870	720

ANEXO 10.

**Nitratos registrados en las unidades experimentales durante 6 semanas y
TRH de 2, 5 y 7 días.**

Semana	TRH	<i>Iris pseudacorus</i> (mg/L)	<i>Phragmites australis</i> (mg/L)	Sin especie (mg/L)
1	0	6,8	6,8	6,8
	2	<0,3	<0,3	<0,3
	5	2,2	<0,3	0,7
	7	12,3	<0,3	0,4
2	0	<0,3	<0,3	<0,3
	2	21,2	11,2	<0,3
	5	33,4	22,9	<0,3
	7	37,5	23,5	<0,3
3	0	29,0	29,0	29,0
	2	16,6	23,3	16,5
	5	32,4	29,0	18,3
	7	25,4	19,0	13,0
4	0	32,0	32,0	32,0
	2	68,0	54,0	46,0
	5	33,0	38,0	23,0
	7	37,0	39,0	33,0
5	0	19,0	19,0	19,0
	2	26,0	33,0	23,0
	5	35,0	47,0	17,0
	7	38,0	22,0	18,0
6	0	24,0	24,0	24,0

Semana	TRH	<i>Iris pseudacorus</i> (mg/L)	<i>Phragmites australis</i> (mg/L)	Sin especie (mg/L)
	2	32,0	38,0	19,0
	5	26,0	47,0	23,0
	7	39,0	35,0	28,0

ANEXO 11.

**Fosfatos registrados en las unidades experimentales durante 6 semanas y
TRH de 2, 5 y 7 días**

Semana	TRH	<i>Iris pseudacorus</i> (mg/L)	<i>Phragmites australis</i> (mg/L)	Sin especie (mg/L)
1	0	0,8	0,8	0,8
	2	2,6	1,9	2,4
	5	6,2	3,4	3,3
	7	6,8	5,6	6,6
2	0	8,0	8,0	8,0
	2	4,3	5,7	1,3
	5	0,12	0,12	1,9
	7	0,12	0,12	0,79
3	0	2,3	2,3	2,3
	2	0,12	0,12	8,0
	5	0,12	0,12	4,5
	7	0,12	0,12	6,6
4	0	7,1	7,1	7,1
	2	4,1	5,8	6,4
	5	3,5	4,7	6,0
	7	4,2	3,3	3,5
5	0	5,0	5,0	5,0
	2	0,7	1,6	1,9
	5	2,6	1,6	4,1
	7	1,8	0,12	1,1
6	0	5,5	5,5	5,5

Semana	TRH	<i>Iris pseudacorus</i> (mg/L)	<i>Phragmites australis</i> (mg/L)	Sin especie (mg/L)
	2	2,1	1,0	1,7
	5	0,9	2,3	3,4
	7	2,1	1,2	1,3

ANEXO 12.

Color registrado en las unidades experimentales durante 6 semanas y TRH de 2, 5 y 7 días.

Semana	TRH	<i>Iris pseudacorus</i> (Pt-Co)	<i>Phragmites australis</i> (Pt-Co)	Sin especie (Pt-Co)
1	0	104	104	104
	2	101	114	96
	5	84	91	81
	7	75	80	65
2	0	115	115	115
	2	82	86	88
	5	74	74	76
	7	68	51	67
3	0	129	129	129
	2	88	92	102
	5	80	83	93
	7	77	78	85
4	0	102	102	102
	2	74	86	90
	5	82	81	87
	7	81	85	94
5	0	113	113	113
	2	99	94	97
	5	71	88	108
	7	64	73	84
6	0	85	85	85

Semana	TRH	<i>Iris pseudacorus</i> (Pt-Co)	<i>Phragmites australis</i> (Pt-Co)	Sin especie (Pt-Co)
	2	54	48	65
	5	61	53	72
	7	44	46	66

ANEXO 13.

Resultados de DQO registradas en los afluentes y efluentes de los humedales artificiales a nivel de laboratorio, durante las 6 semanas de experimentación, para TRH de 2, 5 y 7 días.

Semana	TRH	<i>Iris pseudacorus</i> (mg/L)		<i>Phragmites australis</i> (mg/L)		Sin especie (mg/L)	
		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 1	Repetición 2
1	0	2300,67	2184,00	2300,67	2184,00	2300,67	2184,00
	2	2064,00	1812,00	1894,67	1546,67	1250,67	1383,33
	5	1819,33	1865,33	1826,00	1744,00	1138,00	1272,67
	7	1970,67	2092,67	1885,33	1781,33	1460,00	1546,00
2	0	1586,00	1426,67	1586,00	1426,67	1586,00	1426,67
	2	1319,33	1173,33	1377,33	1140,00	1030,00	943,33
	5	1486,00	1645,33	1534,00	1574,00	1112,67	1249,33
	7	1580,67	1510,00	1538,67	1425,33	1550,00	1582,00
3	0	1869,33	2071,33	1869,33	2071,33	1869,33	2071,33
	2	1488,67	1578,00	1632,67	1727,33	966,67	1000,00
	5	1478,67	1554,67	1717,33	1558,00	1130,00	1000,00
	7	1474,67	1332,00	1872,67	1660,00	1434,67	1522,00
4	0	1655,33	1977,33	1655,33	1977,33	1655,33	1977,33
	2	1496,00	1540,00	1382,00	1272,00	1418,00	1578,00
	5	1482,00	1402,00	1420,00	1344,00	1594,00	1444,00
	7	1224,00	1423,33	1404,00	1394,67	1652,00	1602,00
5	0	1708,67	1668,00	1708,67	1668,00	1708,67	1668,00
	2	1554,00	1473,33	1676,00	1542,67	1424,67	1434,67
	5	1418,67	1380,00	1514,00	1564,00	1786,00	1474,00
	7	1308,00	1321,33	1430,67	1454,00	1721,33	1537,33
6	0	1964,67	2195,33	1964,67	2195,33	1964,67	2195,33

Semana	TRH	<i>Iris pseudacorus</i> (mg/L)		<i>Phragmites australis</i> (mg/L)		Sin especie (mg/L)	
		Repetición 1	Repetición 2	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 1	Repetición 2
	2	1821,33	1864,00	1863,33	1834,00	1248,00	1204,33
	5	1812,67	1786,00	1819,33	1882,00	1374,00	1234,00
	7	1160,00	1067,33	1420,67	1428,00	1504,00	1480,00

ANEXO 14.
Evidencias fotográficas del trabajo realizado.

Anexo 14.1 Caracterización física del sustrato en el LEMSUR.



Anexo 14.2 Caracterización de parámetros físico químicos del lixiviado a la entrada y a la salida de los humedales artificiales a escala de laboratorio.





Anexo 14.3 Recolección del lixiviado de la PTAR del relleno sanitario Romerillos y preparación de las diluciones empleadas en el ensayo de viabilidad.



Anexo 14.4 Puesta en marcha de los humedales a escala de laboratorio.



Anexo 14.5 Humedales artificiales al inicio de la experimentación (a la izquierda), humedales artificiales al finalizar la experimentación (a la derecha).



Anexo 14.6 Lixiviado obtenido de la PTAR del relleno sanitario Romerillos (a la izquierda), lixiviado obtenido a la salida de los humedales artificiales a escala de laboratorio (a la derecha).

