

**CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES A ESCALA LABORATORIO
PARA EL ESTUDIO DE CUATRO ESPECIES VEGETALES NATIVAS COMO
ALTERNATIVA PARA LA DESCONTAMINACIÓN DE LIXIVIADOS GENERADOS
EN EL RELLENO SANITARIO, MUNICIPIO DE MOCOA, PUTUMAYO.**

**CONSTRUCTION OF LABORATORY SCALE ARTIFICIAL WETLANDS FOR THE
STUDY OF FOUR NATIVE VEGETABLE SPECIES AS AN ALTERNATIVE FOR THE
DECONTAMINATION OF LIXIVIATES GENERATED IN THE SANITARY FILLING,
MOCOA, PUTUMAYO.**

*Edwin Sánchez, Ingeniero Químico, Esp. Gerencia Ambiental. Candidato a M.Sc. Maestría en desarrollo sostenible y medio ambiente. Universidad de Manizales. Docente Instituto Tecnológico del Putumayo, edwsan01@gmail.com, edwin.sanchez@itp.edu.co.

Manuel F. Polanco, Ingeniero Agrónomo, M.Sc en Ciencias Agrícolas, PhD. En Desarrollo Sostenible. Docente Universidad de Manizales. mpolanco@umanizales.edu.co.

Cristian Gelpud, Ingeniero Agrónomo M.Sc. Ciencias Biológicas. Instituto Tecnológico del Putumayo. Cristian.gelpud@itp.edu.co

Estudio de especies vegetales nativas como alternativa para la descontaminación de lixiviados

* Edwin Sánchez, Ingeniero Químico, Esp. Gerencia Ambiental. Candidato a M.Sc. Maestría en desarrollo sostenible y medio ambiente. Universidad de Manizales. Docente Instituto Tecnológico del Putumayo, edwsan01@gmail.com, edwin.sanchez@itp.edu.co.

RESUMEN

La fitorremediación se refiere a la degradación, transformación, asimilación y reducción en los niveles de contaminación a través del empleo de vegetación in situ y su aplicación resulta atractiva por aspectos como bajos costos de construcción, mantenimiento y adaptación al paisaje natural. Con el objetivo de evaluar la capacidad de fitorremediación de especies vegetales nativas amazónicas, en relación a parámetros fisicoquímicos y de crecimiento, se diseñó un experimento compuesto por especies nativas amazónicas, (*Heliconia sp.*, *Mauritia flexuosa*, *Carludovica palmata* y *Colocasia esculenta*) sometidas a 60 días de exposición con lixiviados provenientes del relleno sanitario del Municipio de Mocoa. En general las especies excepto el testigo, indujeron altos porcentajes de remoción ($p \leq 0,05$) de Al, Zn, Ni, Cu, DBO, DQO y sólidos suspendidos totales, las especies *Mauritia flexuosa*, *Carludovica palmata* y *Colocasia esculenta* presentaron mayores remociones de grasas y aceites, se evidenciaron ajustes variables de crecimiento en función de exposición al lixiviado ($p \leq 0,05$), indicando capacidades deseables de fitorremediación. Las condiciones iniciales de lixiviado no limitaron la capacidad de remoción y crecimiento de las especies evaluadas, exceptuando el testigo. Son recomendadas las especies *Mauritia flexuosa*, *Carludovica palmata* y *Colocasia esculenta* en etapas posteriores de evaluación.

Palabras claves: Contaminación, Fitoacumulación, Fitorremediación, Medio Ambiente, Metales pesados,

ABSTRACT

Phytoremediation refers to the degradation, transformation, assimilation and reduction in pollution levels through the use of in situ vegetation and its application is attractive due to aspects such as low construction costs, maintenance and adaptation to the natural landscape. The objective of evaluating the phytoremediation capacity of Amazonian native plant species, in relation to physical chemical and growth parameters, was designed an experiment composed of native Amazonian species, (*Heliconia sp.*, *Mauritia flexuosa*, *Carludovica palmata* and *Colocasia esculenta*) submitted to 60 days of exposure to leachate from the landfill of the Municipality of Mocoa. In general, the species, except the control, induced high removal rates ($p \leq 0.05$) of Al, Zn, Ni, Cu, BOD, COD and

total suspended solids, the species *Mauritia flexuosa*, *Carludovica palmata* and *Colocasia esculenta* had higher removals of fat and oils, variable growth adjustments were evidenced in terms of leaching exposure ($p \leq 0.05$), indicating desirable phytoremediation capabilities. The initial leaching conditions did not limit the capacity for removal and growth of the species evaluated, except the control. The species *Mauritia flexuosa*, *Carludovica palmata* and *Colocasia esculenta* are recommended at later stages of evaluation.

Keywords: Environment, Heavy metals, Phytoaccumulation, Phytoremediation, Pollution,

1. INTRODUCCIÓN

El inadecuado manejo y disposición final de los residuos sólidos genera contaminación sobre el suelo y mantos acuíferos por la generación de lixiviados y contaminan el aire cuando son quemados, hoy en día es uno de los problemas ambientales más complejos que tiene la sociedad (Sánchez, 2005). Los lixiviados son el resultado de la percolación de líquidos a través de los desechos en un proceso de estabilización y los cambios que se producen en su calidad dependen del desarrollo de cada una de las fases de formación: ajuste inicial, transición, formación de ácidos, fermentación mecánica y maduración final. (Corena, 2008), en su maduración final los lixiviados contienen alta carga contaminante de metales pesados, demanda química de Oxígeno (DQO) y carbono orgánico total (COT), sin embargo, los metales pesados a diferencia de los contaminantes orgánicos, son persistentes en la naturaleza y por lo tanto tienden a acumularse en distintos nichos de los ecosistemas, de este modo son bioacumulables y biomagnificables a medida que se avanza en los diferentes niveles de la red trófica, estas sustancias son de reconocido impacto en el ambiente, agua, aire y suelo, según Cuartas, (2010), algunos de ellos como el Cd^{2+} y Pb^{2+} están asociados a malformaciones congénitas.

En la historia, el tratamiento de lixiviados ha dependido en gran medida de la evaporación natural y la purificación en los estanques de estabilización a través de procesos físicos, químicos y biológicos convencionales como la filtración por membrana, la floculación-coagulación, el intercambio iónico y el proceso de oxidación avanzada (Kumari y Tripathi, 2015); sin embargo, el alto costo de estas tecnologías es un limitante a la hora de su aplicación; por tal motivo, existe la

necesidad de estudiar nuevas tecnologías que sean efectivas, rentables y amigables con el medio ambiente; en este sentido, en los últimos años aparece la fitorremediación como una alternativa ecotecnológica que se puede utilizar para la eliminación de contaminantes presentes en los lixiviados. (Greipsson, 2011). La fitorremediación se define como el uso de plantas para eliminar, destruir o transformar contaminantes del suelo, agua y aire (Panich-Pat et al., 2010; Niu et al., 2007), en este proceso, las plantas son seleccionadas principalmente por su potencial fisiológico, como en el caso de enzimas presentes para tolerar y asimilar sustancias tóxicas, por sus tasas de crecimiento, por la profundidad de sus raíces y su habilidad para bioacumular y/o degradar contaminantes (Wei et al., 2009; Ospina-Álvarez et al., 2006; Peña-Salamanca et al., 2005). Las plantas actúan como trampas o filtros biológicos que descomponen los contaminantes y estabilizan las sustancias metálicas presentes en el suelo y agua al fijarlos en sus raíces y tallos, o metabolizándolos tal como lo hacen los microorganismos para finalmente convertirlos en compuestos menos peligrosos y más estables, como dióxido de carbono, agua y sales minerales (Peña, 2001).

Distintos estudios sobre el uso de la fitorremediación para la descontaminación de lixiviados han mostrado principalmente porcentajes significativamente altos de remoción para DQO, DBO5, SST, Fosforo total, Nitrógeno total, Nitrógeno Amoniacal, Hierro, Magnesio, Manganeso y Zinc. (Garbo et al., 2017; Ogata et al., 2015), especies como *Salvinia cucullata* es considerada óptima para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados (Das y Mazumdar K, 2016), sin embargo, la aplicación exitosa de la fitorremediación depende de la identificación de las especies con un conjunto apropiado de características (Massa et al., 2010).

Maurita flexuosa, incluida dentro de la familia *Arecaceae*, esta palma con tallo solitario de 20 a 35 m de altura y de 3 a 4 dm de diámetro tiene su origen en Bolivia, Colombia, Puerto Rico y Venezuela. Su estado actual, presenta un alto índice de peligro debido a la acción de contaminantes solubles en el agua, provenientes de las actividades petroleras y agroindustriales, así como por los efectos de la tala y la quema indiscriminada que por consiguiente altera y modifica sus mecanismos de regeneración natural. (Torres, 2018).

Carludovica Palmata, incluida dentro de la familia *Cyclanthaceae*, esta planta presenta sus hojas en forma de abanico, su limbo tiene cuatro lóbulos, cada uno de ellos está dividido en segmentos lineales de forma aguda y su pecíolo mide hasta 3 m de longitud. Las flores de color rosado claro, son unisexuales, pequeñas y usualmente una flor femenina se halla rodeada por cuatro flores masculinas. Los frutos constituyen una masa que al madurar se vuelve de color rojizo y las semillas están rodeadas por una carnosidad de color naranja y tienen 1 cm de diámetro (Gómez, 2017).

Colocasia Esculenta, planta herbácea, perteneciente a la familia *Arecaceae* con hojas enteras, generalmente grandes de forma oval, de corazón o flecha; los tallos se encuentran en la parte subterránea, son tubérculos o cormos esféricos de forma alargada y su peso varía entre 2 a 6 kg en estado maduro. Su desarrollo se favorece especialmente en suelos húmedos y ricos en materia orgánica, y presenta un gran valor nutricional debido a su alto contenido de carbohidratos, minerales y vitaminas, esta especie es considerada fuente energética debido a su contenido de “Almidón”, fibra dietaria, vitamina B6 y manganeso siendo comestibles únicamente después de su cocción (Pomahualí, 2015).

Heliconia psittacorum, es una especie nativas de centro, sur América y algunas islas del Pacífico Sur, la *Heliconia sp.* es una especie de uso comercial que desde los años 70's se ha cultivado, debido en gran parte, a su valor ornamental. Colombia es considerada el país más diverso en Heliconias con 94 especies que equivalen a aproximadamente el 50% del total de especies descritas; las especies de *Heliconia sp* alcanzan la mayor diversidad entre los 500 y los 1500 m.s.n.m., (Kress et. al., 1993). Recientemente, estudios han evaluado el papel de esta especie en la remediación de aguas residuales encontrando efectos positivos en la biorremediación (Peña et al., 2011). Estas evidencias muestran una cierta tolerancia de *Heliconia sp* a un amplio espectro de condiciones ambientales, por lo que la hace una especie atractiva para su uso en sistemas naturales como los humedales subsuperficiales construidos para el tratamiento de aguas residuales (Madera et al., 2013; Brisson y Chazarenc, 2009; Maza, 2006).

Poaceae, representan uno de los grupos de plantas vasculares más diversos sobre la faz de la tierra. Están adaptadas a diferentes hábitats, tales como cálido-secos, húmedos, tropicales, alpinos, etcétera. A menudo cohabitan con otros representantes herbáceos, formando extensas áreas de

pastizales (Gould y Shaw, 1983), existen 702 géneros y 9675 especies Dávila et al. (1990). Dadas estas cifras, la familia *Poaceae* ocupa el tercer lugar en diversidad en el mundo, en cuanto a géneros se refiere, y el quinto a nivel específico.

El objetivo de esta investigación es identificar a escala laboratorio el potencial fitorremediador de especies nativas de la región amazónica, para lo cual, se diseñó un experimento compuesto por las especies *Heliconia sp.*, *Mauritia flexuosa*, *Carludovica palmata* y *Colocasia esculenta*, sometidas a condiciones de crecimiento en humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal de un lixiviado con recirculación durante 60 días, en el cual se determinaron porcentajes de remoción, alteraciones en crecimiento, así como también el cumplimiento normativo según los límites máximos permisibles para el vertimiento de lixiviados establecidos en la resolución 631 de 2015.

2. MATERIALES Y METODOS.

2.1 Condiciones experimentales.

Los experimentos fueron desarrollados en el laboratorio de Aguas y Suelos del Instituto Tecnológico del Putumayo sede Mocoa, el cual se encuentra ubicado en el barrio Luis Carlos Galán, localizado geográficamente a 1°09'24" N - 76°39'07" W; con una altitud 643 m, temperatura promedio de 25°, precipitación promedio de 3880 y brillo solar de característico de un clima de bosque húmedo tropical según la clasificación de Holdrige. (Hoyos y Sánchez, 2015)



Figura 1. Plantación y desarrollo de las especies vegetales en los humedales artificiales utilizados en el tratamiento de los lixiviados

2.2. Material vegetal y simulación del humedal.

Se seleccionaron cuatro especies vegetales amazónicas nativas; Heliconia (*Heliconia sp.*), Canangucha (*Mauritia Flexuosa*), Iraca (*Carludovica Palmata*), Bore (*Colocasia Esculenta*) y Gramínea (*Poaceae*), plantas de 1 mes de edad fueron extraídas de la finca la Primavera ubicada en la vereda Rumiyo del Municipio de Mocoa, un total de 30 plantas por cada una de las especies fueron trasplantadas en cada humedal artificial, el tiempo de aclimatación a las condiciones fue de 3 semanas, tiempo partir del cual se iniciaron las evaluaciones.

Se construyeron un total de 5 humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con dimensiones 30*40*26cm, uno para cada especie a evaluar (figura 1), con una composición en la base inferior de ± 7 cm de grava gruesa, ± 7 cm de grava fina, ± 3 cm de arena fina y ± 4 cm de tierra, siguiendo la metodología expuesta por Garbo et al. (2017); Madera et al., (2015); Ogata et al., (2015); Gomes et al., (2014) (Figura 1). Cada especie vegetal en cada humedal artificial fue sometida a un tratamiento en tiempo continuo durante 60 días con 30 litros de lixiviados en recirculación semicontinua con periodos de 8 días de acuerdo a lo reportado por Garbo F et al., (2017); Sawaitayothin y Polprasert, (2007); Das y Mazumdar (2016); Dan et al., (2017); los lixiviados fueron sometidos a dos etapas de pre-tratamiento; homogenización de caudal y filtración, y a una etapa de pos-tratamiento, aireación; mediante un aireador en cascada.

2.3. Caracterización fisicoquímica de los lixiviados generados en el relleno sanitario.

Para la caracterización fisicoquímica de lixiviados generados en el relleno sanitario, localizado en la Vereda Medio afán del Municipio de Mocoa, se tomaron n=4 muestras de 1L del lixiviado completamente aleatorizadas, las cuales fueron transportadas al laboratorio para su análisis bajo cadena de custodia y refrigeración a $4^{\circ}\text{C}\pm 1$; para la determinación de los parámetros fisicoquímicos se tuvo en cuenta lo indicado en la resolución 631 del 2015 emitida por el Ministerio de Medio Ambiente de Colombia, “*Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones*”.

Los parámetros estudiados en el tiempo 1 y 2 de la investigación fueron Alcalinidad, Dureza, BDO (mg/L), DQO (mg/L), Grasas y Aceites (mg/L), Al (mg/L), Cr (mg/L), Cu (mg/L), Ni (mg/L), Zn (mg/L), Pb (mg/L), pH (mg/L), sólidos suspendidos totales y sólidos sedimentables; los cuales fueron procesados mediante la metodología expuesta por Rice et al., (2017), el procesamiento de estos parámetros es reportados por (Herzig et al., 2014; Meeinkuirt et al., 2013; Kim, 2010).

2.4. Cálculo del porcentaje de remoción y estudio de los cambios morfológicos de cada una de las especies vegetales.

Para determinar la concentración final de la carga contaminante fueron procesadas n=4 muestras de los lixiviados a la salida de cada uno de los 5 humedales artificiales posterior a 60 días de exposición permanente al lixiviado, se analizaron los parámetros fisicoquímicos referidos en la caracterización inicial del lixiviado. La estimación del porcentaje de remoción de cada parámetro en relación a los valores finales de cada parámetro físico químico, fue calculado según lo expuesto por Rice et al., (2017), y reportados por Akinbile et al., (2016); Kumar et al., (2016); Mishra et al., (2013); Sooksawat et al., (2013).

$$\% \text{ Remoción de carga} = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) * 100 \quad \text{ecuación 1.}$$

Donde:

C_i = Concentración de entrada de la carga contaminante.

C_f = Concentración final de la carga contaminante.

Con el objetivo de determinar el efecto de la exposición de las especies al lixiviado sobre las tasas netas de crecimiento y del incremento en el diámetro del tallo, se evaluó la tasa de crecimiento de cada una de las especies en n=10 plantas por cada especie en función del tiempo durante 5 semanas continuas de manera posterior a la exposición al lixiviado. (Rezania et al., 2016; Sweta et al., 2015; Ali et al., 2013; Marchand et al., 2010; Memon y Schröder, 2009)

2.4. Análisis del cumplimiento normativo de los vertimientos de lixiviados tratado en la fitorremediación.

Posterior a la obtención de los resultados de la caracterización fisicoquímica inicial y final de los lixiviados en función de cada una de las especies evaluadas, estos fueron comparados con los límites máximos permisibles según lo establecido en la resolución 631 del 2015, emitida por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia.

2.5. Procedimientos estadísticos.

2.5.1. Parámetros fisicoquímicos

Se ajustó un modelo lineal, general con dos factores: Tiempo de exposición al lixiviado (T1 – tiempo inicial y T2 – tiempo final); Especie (Testigo, Gramínea (*Poaceae*), Heliconia (*Heliconia sp.*), Canangucha (*Mauritia Flexuosa*), Iraca (*Carludovica Palmata*), Bore (*Colocasia Esculenta*) y sus interacciones de la siguiente manera:

$$Y_{ijkl} = \mu + T_i + E_j + (T^*E)_{ji} + \varepsilon_{ijk} \quad \text{ecuación 2.}$$

Donde:

Y_{ijk} : Variables de respuesta (pH, Ssup, SS, Alcalinidad, Dureza, Cl-, SO4-, Al, Zn, Pb, Cr, Ni, Cu, DBO, DQO, GYA,)

μ : Media general.

T_i : Es el efecto del i-esimo nivel de tiempo.

E_j : Es el efecto del j-esimo Especie vegetal.

$(T^*E)_{ij}$: Es el término de interacción entre el tiempo y la especie vegetal.

ε_{ijk} : Error estándar del tiempo 1, perteneciente a la especie i.

Se utilizó la prueba de comparación de medias LSD de Fisher ($\alpha = 0.01$), para los factores fijos y sus interacciones, los análisis se llevaron a cabo usando el software R versión 3.4.0 (R

Development Core Team, 2017), utilizando la interfaz implementada en InfoStat (Di Rienzo et al., 2017).

La varianza residual se modeló para contemplar varianzas diferentes (Heterocedasticidad, H) por tiempo de muestreo, mientras que la correlación residual para las observaciones sucesivas realizadas sobre una misma planta se contempló mediante los modelos de simetría compuesta (SC), autorregresiva de orden 1 (AR1) y sin estructura (SE). (Di Rienzo et al., 2011).

2.5.2. Parámetros de crecimiento.

Se ajustó un modelo lineal, general con dos factores: Semanas de exposición al lixiviado (0,1,2,3,4,5), Especie (Testigo, Gramínea (*Poaceae*), Heliconia (*Heliconia sp.*), Canangucha (*Mauritia Flexuosa*), Iraca (*Carludovica Palmata*), Bore (*Colocasia Esculenta*) y sus interacciones de la siguiente manera:

$$Y_{ijkl} = \mu + S_i + E_j + (S^*E)_{ji} + \varepsilon_{ijk} \quad \text{ecuación 3.}$$

Donde:

Y_{ijk} : Variables de respuesta (Crecimiento altura, diámetro de tallo)

μ : Media general.

T_i : Es el efecto del i-ésimo nivel de semana de exposición al lixiviado.

E_j : Es el efecto del j-ésimo Especie vegetal.

$(T^*E)_{ij}$: Es el término de interacción entre la semana de exposición y la especie vegetal.

ε_{ijk} : Error estándar de la semana 1, perteneciente a la especie i,

Se utilizó la prueba de comparación de medias LSD de Fisher ($\alpha = 0.01$), para los factores fijos y sus interacciones, los análisis se llevaron a cabo usando el software R versión 3.4.0 (R Development Core Team, 2017), utilizando la interfaz implementada en InfoStat (Di Rienzo et al., 2017).

3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

3.1. Caracterización fisicoquímica de los lixiviados generados en el relleno sanitario

Los resultados indican que la concentración de sólidos suspendidos, DBO, DQO, grasas y aceites, Cobre, Níquel y Cinc en los lixiviados sobrepasan los valores máximos permisibles según la Resolución 631 de 2015 (tabla 1-2), diferentes autores (Al-Hamadani et al., 2011; Bashir et al., 2010; Othman et al., 2010; Ghafari et al., 2009) reportan rangos de concentración de contaminantes en lixiviados con comportamiento similar a las concentraciones reportadas en esta investigación; de igual manera se evidencio que la alcalinidad, dureza y cloruros presentan una alta carga contaminante; a pesar de no existir un límite máximo permisible en la normatividad vigente para estos parámetros. La concentración de sólidos suspendidos indica la presencia de sólidos orgánicos e inorgánicos en el lixiviado (Akinbile et al., 2012).

Tabla 1-2. Resultados de la caracterización fisicoquímica de los lixiviados generados en el relleno sanitario. n=4.

Parámetro	Unidades de medida	media	E.E	Valor máximo permisible*
pH	Unidades de pH	7.44	± 0.0010	6.0-9.0
Ssup	mg/L	467.5	± 0.4056	90
SS	mg/L	0.64	± 0.0028	5.0
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	4357.5	± 23.9277	Análisis y reporte
Dureza	mg/L CaCO ₃	53174.0	± 154.2726	Análisis y reporte
Cl-	mg/L Cl-	573.84	± 8.6999	Análisis y reporte
SO ₄ -	mg/L SO ₄	134.35	± 0.3326	Análisis y reporte
Al	mg/L Al	4.05	± 0.0243	Análisis y reporte
Zn	mg/L Zn	10.5	± 0.0811	3.0
Pb	mg/L Pb	0.0010	± 0.0	0.5
Cr	mg/L Cr	0.0395	± 0.0001	0.5
Ni	mg/L Ni	3.55	± 0.081	0.5
Cu	ml/L Cu	2.0	± 0.0	1.0
DBO	mg/L O ₂	3981.48	± 11.2979	90
DQO	mg/L O ₂	6183.8	± 12.9874	180
GYA	mg/L	50.25	± 0.1703	20

* Límites máximos permisibles según resolución 631 del 2015. **pH:** Potencial de hidrogeno, **Ssup:** Sólidos suspendidos, **SS:** Sólidos sedimentables, Alcalinidad, Dureza, **Cl-:** Cloruros, **SO4-:** Sulfatos, **Al:** Aluminio, **Zn:** Cinc, **Pb:** Plomo, **Cr:** Cromo, **Ni:** Níquel, **Cu:** Cobre, **DBO:** Demanda biológica de oxígeno, **DQO:** Demanda química de oxígeno, **GYA:** Grasas y Aceites.

3.2. Potencial fitorremediador las especies vegetales nativas

El análisis de varianza realizado para los factores tiempo y especie para las variables solidos suspendidos y solidos sedimentables indicaron cambios estadísticos altamente significativos para el factor tiempo, especie y la interacción tiempo*especie ($p < 0.05$). (Tabla 1-3).

Tabla 1 -3. Análisis de varianza de los efectos Tiempo y Especie, y sus interacciones. **pH:** Potencial de hidrogeno, **Ssup:** Sólidos suspendidos, **SS:** Sólidos sedimentables, Alcalinidad, Dureza, **Cl-:** Cloruros, **SO4-:** Sulfatos, **Al:** Aluminio, **Zn:** Cinc, **Pb:** Plomo, **Cr:** Cromo, **Ni:** Níquel, **Cu:** Cobre, **DBO:** Demanda biológica de oxígeno, **DQO:** Demanda química de oxígeno, **GYA:** Grasas y Aceites.

p-valores basados en el estadístico de Fisher (f)			
Variabes	Tiempo	Especie	Tiempo*Especie
pH	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Ssup	<0,0001	<0,0001	<0,0001
SS	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Alcalinidad	0.9542	<0,0001	0.9542
Dureza	>0.9999	<0,0001	>0.9999
Cl-	0.9969	<0,0001	0.9969
SO4-	0.0022	<0,0001	0.0022
Al	0.0005	<0,0001	0.0005
Zn	>0.9999	<0,0001	>0.9999
Pb	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Cr	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Ni	>0.9999	<0,0001	>0.9999
Cu	0.1285	<0,0001	0.9439
DBO	0.8849	<0,0001	0.8849
DQO	0.7741	<0,0001	0.7741
GYA	<0,0001	<0,0001	<0,0001

Tabla 1-4. Parámetros Físico químicos de lixiviados, en cinco especies vegetales (Testigo, *Carludovica palmata*, *Colocasia esculenta*, *Mauritia flexuosa*, *Heliconia sp*) en diferentes tiempos ((T1 – tiempo inicial y T2 – tiempo final); Los resultados muestran las medias \pm error estándar (E.E). Valores en filas con distintas letras indican diferencias significativas entre tiempos utilizadas para cada especie. (post-hoc L.S.D, $p < 0.01$). $n=4$.

Variable	Unidad	Testigo		<i>Carludovica palmata</i>		<i>Colocasia esculenta</i>		<i>Mauritia flexuosa</i>		<i>Heliconia sp</i>	
		Tiempo 1	Tiempo 2	Tiempo 1	Tiempo 2	Tiempo 1	Tiempo 2	Tiempo 1	Tiempo 2	Tiempo 1	Tiempo 2
pH	mg/L	7,44 \pm 2,9e-3 ^a	7,0 \pm 0,01 ^b	7,44 \pm 2,9e-3 ^a	6,84 \pm 0,01 ^c	7,44 \pm 2,9e-3 ^a	7,0 \pm 0,01 ^b	7,44 \pm 2,9e-3 ^a	7,04 \pm 0,01 ^b	7,44 \pm 2,9e-3 ^a	7,04 \pm 0,01 ^b
Ssup	mg/L	467,5 \pm 1,44 ^a	49,85 \pm 0,82 ^c	467,5 \pm 1,44 ^a	49,0 \pm 0,82 ^c	467,5 \pm 1,44 ^a	28,0 \pm 0,82 ^e	467,5 \pm 1,44 ^a	34,0 \pm 0,82 ^d	467,5 \pm 1,44 ^a	114,0 \pm 0,82 ^b
SS	mg/L	0,64 \pm 0,01 ^a	0,38 \pm 0,01 ^b	0,64 \pm 0,01 ^a	0,10 \pm 0,01 ^d	0,64 \pm 0,01 ^a	0,10 \pm 0,01 ^d	0,64 \pm 0,01 ^a	0,20 \pm 0,01 ^c	0,64 \pm 0,01 ^a	0,64 \pm 0,01 ^a
Alcalinidad	mg/L	4357,5 \pm 85,16 ^a	193,76 \pm 1,28 ^e	4357,5 \pm 85,16 ^a	208,73 \pm 1,28 ^d	4357,5 \pm 85,16 ^a	276,55 \pm 1,28 ^b	4357,5 \pm 85,16 ^a	192,61 \pm 1,28 ^e	4357,5 \pm 85,16 ^a	221,86 \pm 1,28 ^c
Dureza	mg/L	53174,0 \pm 549,06 ^a	109,45 \pm 1,01 ^c	53174,0 \pm 549,06 ^a	114,2 \pm 1,01 ^b	53174,0 \pm 549,06 ^a	112,85 \pm 1,01 ^{b,c}	53174,0 \pm 549,06 ^a	114,4 \pm 1,01 ^b	53174,0 \pm 549,06 ^a	102,0 \pm 1,01 ^d
Cl-	mg/L	573,84 \pm 30,96 ^a	79,89 \pm 1,13 ^c	573,84 \pm 30,96 ^a	76,83 \pm 1,13 ^c	573,84 \pm 30,96 ^a	88,29 \pm 1,13 ^b	573,84 \pm 30,96 ^a	71,48 \pm 1,13 ^d	573,84 \pm 30,96 ^a	79,69 \pm 1,13 ^c
SO4-	mg/L	134,35 \pm 1,18 ^a	15,65 \pm 0,27 ^{c,d}	134,35 \pm 1,18 ^a	14,7 \pm 0,27 ^d	134,35 \pm 1,18 ^a	16,45 \pm 0,27 ^c	134,35 \pm 1,18 ^a	10,4 \pm 0,27 ^e	134,35 \pm 1,18 ^a	18,5 \pm 0,27 ^b
Al	mg/L	4,05 \pm 0,09 ^a	0,85 \pm 0,01 ^b	4,05 \pm 0,09 ^a	0,40 \pm 0,01 ^d	4,05 \pm 0,09 ^a	0,19 \pm 0,01 ^f	4,05 \pm 0,09 ^a	0,34 \pm 0,01 ^e	4,05 \pm 0,09 ^a	0,47 \pm 0,01 ^c
Zn	mg/L	10,5 \pm 0,2 ^a	0,02 \pm 0,2 ^b	10,5 \pm 0,2 ^a	0,02 \pm 0,2 ^b	10,5 \pm 0,2 ^a	0,02 \pm 0,2 ^b	10,5 \pm 0,2 ^a	0,02 \pm 0,2 ^b	10,5 \pm 0,2 ^a	0,02 \pm 0,2 ^b
Pb	mg/L	1,0e-3 \pm 3,7e-5 ^e	0,03 \pm 3,7e-5 ^a	1,0e-3 \pm 3,7e-5 ^e	0,02 \pm 3,7e-5 ^c	1,0e-3 \pm 3,7e-5 ^e	0,02 \pm 3,7e-5 ^d	1,0e-3 \pm 3,7e-5 ^e	0,02 \pm 3,7e-5 ^d	1,0e-3 \pm 3,7e-5 ^e	0,02 \pm 3,7e-5 ^b
Cr	mg/L	0,04 \pm 2,9e-4 ^d	0,04 \pm 4,5e-4 ^b	0,04 \pm 2,9e-4 ^d	0,08 \pm 4,5e-4 ^c	0,04 \pm 2,9e-4 ^d	0,08 \pm 4,5e-4 ^c	0,04 \pm 2,9e-4 ^d	0,10 \pm 4,5e-4 ^a	0,04 \pm 2,9e-4 ^d	0,10 \pm 4,5e-4 ^a
Ni	mg/L	3,55 \pm 0,02 ^a	0,1 \pm 0,02 ^b	3,55 \pm 0,02 ^a	0,1 \pm 0,02 ^b	3,55 \pm 0,02 ^a	0,1 \pm 0,02 ^b	3,55 \pm 0,02 ^a	0,1 \pm 0,02 ^b	3,55 \pm 0,02 ^a	0,1 \pm 0,02 ^b
Cu	mg/L	2,0 \pm 0,0 ^a	1,04 \pm 0,0 ^b	2,0 \pm 0,0 ^a	1,04 \pm 0,0 ^b	2,0 \pm 0,0 ^a	1,04 \pm 0,0 ^b	2,0 \pm 0,0 ^a	1,04 \pm 0,0 ^b	2,0 \pm 0,0 ^a	1,04 \pm 0,0 ^b
DBO	mg/L	3982,42 \pm 40,21 ^a	69,63 \pm 0,61 ^c	3982,42 \pm 40,21 ^a	46,09 \pm 0,61 ^d	3982,42 \pm 40,21 ^a	43,6 \pm 0,61 ^e	3982,42 \pm 40,21 ^a	31,32 \pm 0,61 ^f	3982,42 \pm 40,21 ^a	84,2 \pm 0,61 ^b
DQO	mg/L	6183,8 \pm 46,22 ^a	183,61 \pm 1,19 ^b	6183,8 \pm 46,22 ^a	141,95 \pm 1,19 ^c	6183,8 \pm 46,22 ^a	142,78 \pm 1,19 ^c	6183,8 \pm 46,22 ^a	113,08 \pm 1,19 ^d	6183,8 \pm 46,22 ^a	185,5 \pm 1,19 ^b
GYA	mg/L	50,25 \pm 0,61 ^a	36,65 \pm 0,58 ^c	50,25 \pm 0,61 ^a	15,65 \pm 0,61 ^d	50,25 \pm 0,61 ^a	16,0 \pm 0,61 ^d	50,25 \pm 0,61 ^a	15,25 \pm 0,61 ^d	50,25 \pm 0,61 ^a	42,05 \pm 0,61 ^b

pH: Potencial de hidrogeno, **Ssup:** Sólidos suspendidos, **SS:** Sólidos sedimentables, Alcalinidad, Dureza, **Cl-:** Cloruros, **SO4-:** Sulfatos, **Al:** Aluminio, **Zn:** Cinc, **Pb:** Plomo, **Cr:** Cromo, **Ni:** Níquel, **Cu:** Cobre, **DBO:** Demanda biológica de oxígeno, **DQO:** Demanda química de oxígeno, **GYA:** Grasas y Aceit

las variables sólidos suspendidos y sólidos sedimentables en las especies evaluadas fueron afectadas en función del tiempo de exposición al lixiviado ($p < 0.05$). (Tabla 1-4). Las especies evaluadas incluido el testigo presentaron reducciones significativas de los contenidos de sólidos suspendidos luego del tratamiento implementado; la *Colocasia esculenta* fue la especie que mayor reducción de sólidos suspendidos mostró, con una remoción del 94% (467.5mg/L \pm 1.44 a 28.0mg/L \pm 0.82)(Tabla 1-4), especies como la *Mauritia flexuosa*, *Carludovica palmata* y *Heliconia sp*, mostraron en la misma tendencia remociones del 92.7% (467.5 mg/L \pm 1.44 a 34.0mg/L \pm 0,82), 89.5% (467.5mg/L \pm 1.44 a 49.0mg/L \pm 0.82) y 75.6% (467.5mg/L \pm 1.44 a 114.0mg/L \pm 0.82),respectivamente. El testigo utilizado presento una remoción de 89.3% (467.5mg/L \pm 1.44 a 49.85mg/L \pm 0.82).

Resultados similares son reportados por Oluwakunmi et al., (2012), indicando remociones de sólidos suspendidos del 98.8% utilizando como especie fitorremediadora *Cyperus haspan*, del mismo modo Yalçuk y Ugurlu (2019), reportan remociones de sólidos suspendidos de 74.4% con la especie *T. latifolia* y de 49.2% con la especie *Cannacea*.

La reducción significativa de los contenidos de sólidos suspendidos evidenciada puede ser explicada en relación a los bajos tiempos de retención hidráulica implementados en cada uno de los humedales artificiales implementados, sin embargo, cabe mencionar que parte de los sólidos pudieron ser retenidos por el lecho filtrante de los humedales (Saengwilai et al., 2017; Kumar et al., 2016; Phusantisampan et al., 2016; Steer et al., 2002).

El análisis de varianza realizado para los factores tiempo y especie para las variable alcalinidad y dureza indicaron cambios estadísticos significativos para el factor especie ($p < 0.05$), mientras que el factor tiempo y la interacción tiempo*especie no se presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$). (Tabla 1-3). La alcalinidad en los lixiviados para las especies evaluadas fue afectada únicamente en función de la especie mas no del tiempo de exposición de estas al lixiviado ($p < 0.05$). (Tabla 1-4).

A pesar de que las especies no presentaron cambios estadísticamente significativos en relación al tiempo de exposición al lixiviado, se evidencia una tendencia en la reducción de alcalinidad y la

dureza en todas las especies incluido el testigo. El humedal en donde se evidencio una mayor reducción de alcalinidad fue el desarrollado con la especie *Mauritia flexuosa*, con una remoción del 95.6% (4357.5mg/L±85.16 a 192.61mg/L±1.28), especies como la *Carludovica palmata*, *Heliconia sp* y *Colocasia esculenta*, mostraron en la misma tendencia remociones del 95.2% (4357.5mg/L±85.16 a 208.73mg/L± 1.28), 94.9% (4357.5mg/L±85.16 a 221.86mg/L±1.28) y 93.4% (4357.5mg/L±85.16 a 114.0mg/L±276.55), respectivamente. El testigo utilizado presento una remoción de 95.6% (4357.5mg/L±85.16 a 193.76mg/L±1.28). Para la variable dureza no se evidenciaron diferencias significativas en la remoción para las especies incluyendo el testigo; la remoción promedio para la dureza fue de 99.1% (53174.0mg/L±549.06 a 102.0mg/L±1.01).

El análisis de varianza realizado para los factores tiempo y especie para cloruros y sulfatos, indicaron cambios estadísticos significativos para cloruros con respecto al factor especie ($p < 0.05$), mientras que el factor tiempo y la interacción tiempo*especie no se presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$). (Tabla 1-3). Los sulfatos presentaron diferencias estadísticas significativas para los factores tiempo, especie y la interacción tiempo*especie ($p < 0.05$). A pesar de que las especies no presentaron cambios estadísticamente significativos en relación al tiempo de exposición al lixiviado, se evidencia una tendencia en las especies incluida el testigo para la reducción de cloruros luego del tratamiento implementado; la *Mauritia flexuosa* fue la especie que mayor reducción de cloruros mostró, con una remoción del 87.5% (573.84mg/L±30.96 a 71.48mg/L±1.13). Las especies *Carludovica palmata*, *Heliconia sp*, *Colocasia esculenta*, mostraron remociones del 86.6% (573.84mg/L±30.96 a 76.83mg/L±1.13), 86,2% (573.84mg/L±30.96 a 79.69mg/L±1.13) y 84.5% (573.84mg/L±30.96 a 88.29mg/L±1.13) el testigo mostró una remoción de 86% (573.84mg/L±30.96 a 79.89mg/L±1.13).

Los cambios significativos evidenciados para la disminución de sulfatos, indicaron reducciones significativas de los contenidos de sulfatos para cada una de las especies evaluadas incluida el testigo; la especie *Mauritia flexuosa* presento la mayor reducción de sulfatos con un 92.3% (134.35mg/L±1.18 a 10.4mg/L±0.27) de remoción. Las especies *Carludovica palmata*, *Colocasia esculenta*, y *Heliconia sp*, mostraron porcentajes de remoción del 89.1% (134.35mg/L±1.18 a 14.7mg/L±0.27), 87.2% (134.35mg/L±1.18 a 16.45mg/L±0.27) y 86.2% (134.35mg/L±1.18 a 18.5mg/L±0.27). respectivamente, el testigo presento una remoción de 88.4%, (134.35mg/L±1.18

a 15.65mg/L±0.27), resultados similares son reportados por Das & Suchismita (2016), en la especie *Salvinia cucullata*.

La remoción de alcalinidad, dureza, cloruros y sulfatos pueden ser explicados debido a la capacidad de retención de minerales que tiene cada una de las especies, así como a lecho filtrante que componen los humedales artificiales utilizados en el experimento (Zalesny y Bauer 2007; Sander y Ericsson, 1998; Bañuelos et al., 1999; Greger y Landberg, 1999).

En análisis de varianza efectuado para metales pesados, indicaron que metales como el Al, Pb y Cr presentaron diferencias estadísticas significativas para los factores tiempo, especie y la interacción tiempo*especie ($p < 0.05$), mientras que, para Zn, Ni, Cu, indicaron cambios estadísticos significativos para el factor especie ($p < 0.05$), mientras que el factor tiempo y la interacción tiempo*especie no se presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$). (Tabla 1-3).

Las reducciones evidenciadas en la concentración de Al en las especies evaluadas incluido el testigo, indicaron que la especie *Colocasia esculenta* presento una remoción de 95.3% (4.05mg/L±0.09 a 0.19mg/L±0.01), siendo la especie que mejor comportamiento frente a la reducción de Al presentó, especies como la *Mauritia flexuosa*, *Carludovica palmata* y *Heliconia sp.*, mostraron remociones del 91.6% (4.05mg/L±0.09 a 0.34mg/L±0.01), 90.2% (4.05mg/L±0.09 a 0.40mg/L±0.01) y 88.3% (4.05mg/L±0.09 a 0.47mg/L±0.01), respectivamente, mientras que el testigo presento una remoción de 79% (4.05mg/L±0.09 a 0.85mg/L±0.01).

Los resultados para el Pb y el Cr indicaron un aumento de la concentración de los contaminantes para todas las especies incluido el testigo; resultados similares fueron obtenidos por Madera-Parra et al., (2015), este fenómeno puede atribuirse a la capacidad de hiperacumulación que tienen las especies, tendencias similares fueron reportadas por (Das y Suchismita, 2016; Anning et al., 2013; Sooksawat et al., 2013; Soda et al., 2012; Moreno et al., 2008; Liu et al., 2007; Skinner et al. 2007; Salt et al., 1995;).

A pesar de que las especies no presentaron cambios estadísticamente significativos en relación al tiempo de exposición en los lixiviados, se evidencia una tendencia en todas las especies incluido

el testigo para la reducción de Zn, Ni y Cu posterior a la inducción del lixiviado, las remociones se estiman en valores del 99.8% (10.5mg/L±0.2 a 0.02mg/L±0.2), para el Zn, 97.2% (3.55mg/L±0.02 a 0.1mg/L±0.02) para el Ni y del 96.2% (2.0mg/L±0.0 a 1.04mg/L±0.0) para Cu, para todas las especies incluido el testigo.

Resultados similares reportados por Akinbile et al., (2012), indicaron remociones de Zn de 89.4%, para la especie *Cyperus haspan*, del mismo modo, Abbas et al., (2019), reportaron remociones de Zn (80% y 90%) para Cu (37% y 40%) y Ni (25.6% y 28.4%) en las especies *Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes* respectivamente, resultados similares de remociones de Zn son reportados por (Abbas et al., 2019; Kumar y Chopra, 2018; Sricoth et al., 2018; Zhou et al., 2018; Kumar et al., 2016; Saha et al., 2016; Akinbile et al., 2015; Swain et al., 2014; Priya y Selvan, 2014; Elfeky et al., 2013; Ajayi y Ogunbayo, 2012; Mokhtar et al., 2011).

El análisis de varianza realizado para los factores tiempo y especie para las variables DBO y DQO, indicaron cambios estadísticos significativos para el factor especie ($p < 0.05$), mientras que el factor tiempo y la interacción tiempo*especie no se presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$). (Tabla 1-3). A pesar de que las especies no presentaron cambios estadísticamente significativos en relación al tiempo de exposición con los lixiviados, se evidencia una tendencia de reducción en todas las especies incluida el testigo para la DBO y la DQO luego del tratamiento implementado. La *Mauritia flexuosa* fue la especie que mayor reducción de DBO mostró, con una remoción del 99.2% (3982.42mg/L±40.21 a 31.32mg/L±0.61), especies como la *Colocasia esculenta*, *Carludovica palmata* y *Heliconia sp*, mostraron en la misma tendencia remociones del 98.9% (3982.42mg/L±40.21 a 43.6mg/L±0.61), 98.8% (3982.42mg/L±40.21 a 46.09mg/L±0.61) y 97.9% (3982.42mg/L±40.21 a 84.2mg/L±0.61) respectivamente. El testigo utilizado presento una remoción de 98.3% (4357.5mg/L±85.16 a 69.63mg/L±1.28), para la DQO, la especie *Mauritia flexuosa* fue que mayor reducción de indico, con una remoción del 98.2% (6183mg/L±46.22 a 113.08mg/L±1.19), las especies *Colocasia esculenta* y *Carludovica palmata* presentaron una remoción igual de 97.7% (6183mg/L±46.22 a 141.95mg/L±1.19) y la *Heliconia sp*, mostró remoción del 97.0% (3982.42mg/L±40.21 a 185.5mg/L±0.61), el testigo utilizado presento una remoción de 97.0% (4357.5mg/L±85.16 a 183.61mg/L±1.28).

Resultados similares reportados por Sawaittayothin y Polprasert (2007) indicaron reducciones de DBO del 96% en la especie *Thypha sp.* del mismo modo Akinbile et al., (2012) remociones para la DBO del 99,7% y 78,8% para DQO en la especie *Cyperus haspan*. Reducciones de DBO y DQO obtenidos para *Heliconia sp.*, son similares a los reportados por Peña-Salamanca et al., (2013), quienes reportan reducciones del 60% en DBO y DQO, reducciones similares también son reportadas por Garbo et al., (2017), en *Helianthus annuus*, del 50% en DQO, en tratamiento de lixiviados, estos resultados pueden ser explicados por la capacidad variable de eliminación de la materia orgánica que poseen las especies vegetales. (Suchismita 2016; Mishra et al., 2013; Madera et al., 2015; Montoya et al., 2010).

El análisis de varianza realizado para los factores tiempo y especie para las grasas y aceites indicaron cambios estadísticos altamente significativos para el factor tiempo, especie y la interacción tiempo*especie ($p < 0.05$). (Tabla 1-3). Los contenidos de grasas y aceites, en las especies evaluadas fueron afectados en función del tiempo de exposición al lixiviado ($p < 0.05$). (Tabla 1-4). Las especies evaluadas incluido el testigo presentaron reducciones significativas de grasas y aceites posterior a la exposición inicial del lixiviado; la *Mauritia flexuosa* presento fue la especie con mayor reducción, con una remoción de 69.7% ($50.25\text{mg/L} \pm 0.61$ a $15.25\text{mg/L} \pm 0.61$), mientras que *Carludovica palmata*, *Colocasia esculenta* y *Heliconia sp.*, presentaron remociones del 68.8% ($50.25\text{mg/L} \pm 0.61$ a $15.65\text{mg/L} \pm 0.61$), 68.2% ($50.25\text{mg/L} \pm 0.61$ a $16.0\text{mg/L} \pm 0.61$) y 16.3% ($50.25\text{mg/L} \pm 0.61$ a $42.05\text{mg/L} \pm 0.61$), respectivamente, el testigo presento una remoción de 27% ($50.25\text{mg/L} \pm 0.61$ a $36.65\text{mg/L} \pm 0.61$), actualmente no se reportan datos de remociones de grasas y aceites en especies vegetales sometidas a lixiviados.

Los contenidos DBO, DQO, grasas y aceites, Ni y Zn, en todas las especies evaluadas, redujeron la carga contaminante del lixiviado a valores por debajo de los límites establecidos en la resolución 631 de 2015 (figura 1-1, figura 1-2), del mismo modo, los contenidos de solidos suspendidos en las especies *Mauritia flexuosa*, *Carludovica palmata* y *Colocasia esculenta* redujeron la carga contaminante a valores por debajo de los límites establecidos en la resolución 631 de 2015, (figura 1-1, figura 1-2)

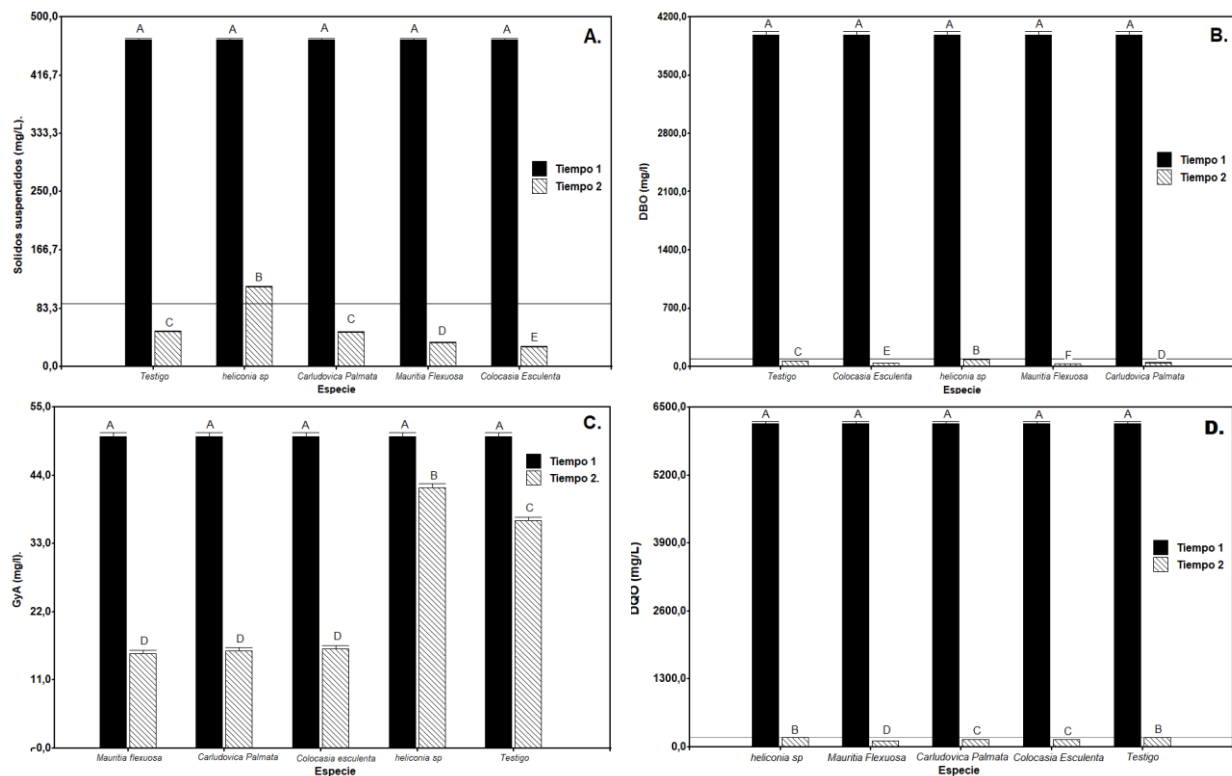


Figura 1-1. Parámetros Físico químicos de lixiviados, en cinco especies vegetales (Testigo, *Carludovica palmata*, *Colocasia esculenta*, *Mauritia flexuosa*, *Heliconia sp.*) en diferentes tiempos (T1 – tiempo inicial y T2 – tiempo final). Los resultados muestran las medias \pm error estándar (E.E). Valores en filas con distintas letras indican diferencias significativas entre tiempos utilizadas para cada especie. (post-hoc L.S.D, $p < 0.01$). $n=4$. **A.** Sólidos suspendidos **B.** DBO **C.** GyA **D.** DQO. Respectivamente.

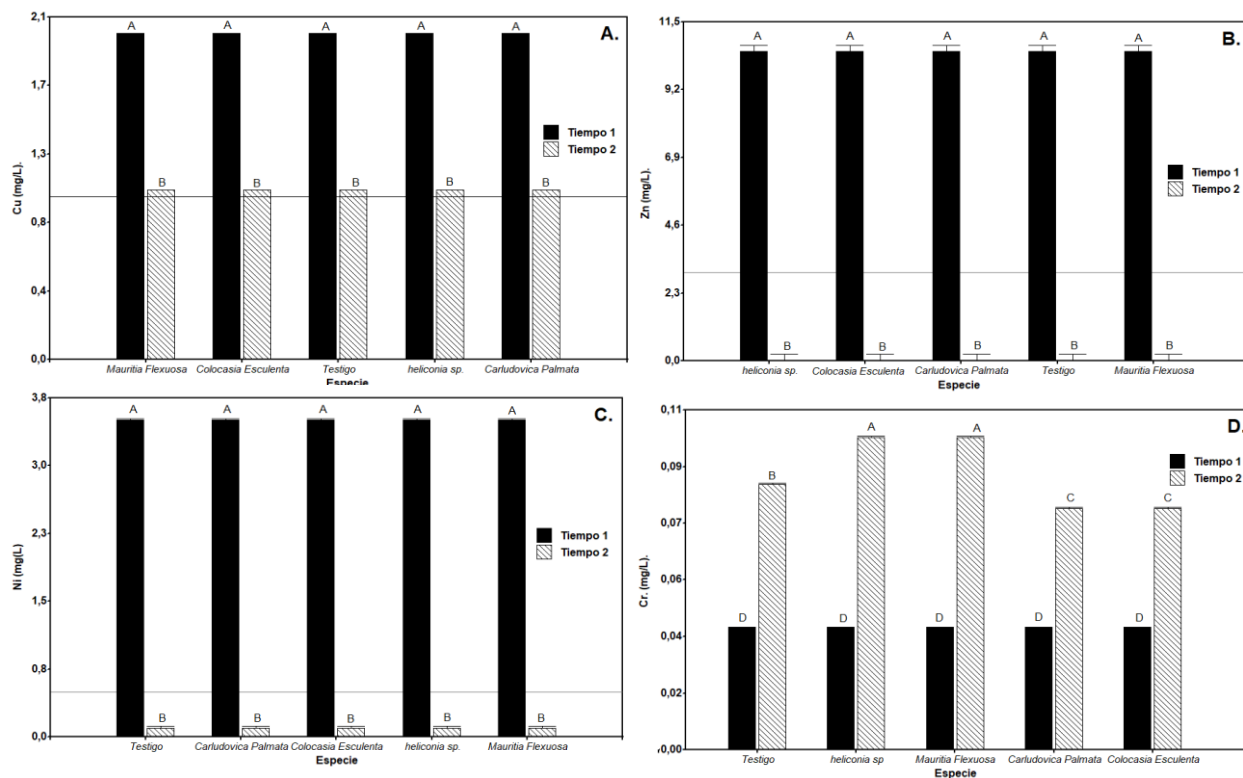


Figura 1-2. Parámetros Físico químicos de lixiviados, en cinco especies vegetales (Testigo, *Carludovica palmata*, *Colocasia esculenta*, *Mauritia flexuosa*, *Heliconia sp*) en diferentes tiempos (Tiempo 1, Tiempo 2). Los resultados muestran las medias \pm error estándar (E.E). Valores en filas con distintas letras indican diferencias significativas entre tiempos utilizadas para cada especie. (post-hoc L.S.D, $p < 0.01$). $n=4$. **A.** Cu **B.** Zn **C.** Ni. **D.** Cr Respectivamente.

3.3. Crecimiento de las especies vegetales nativas

El análisis de varianza realizado para los factores especie y semanas de exposición al lixiviado, en las variables de crecimiento neto de altura y diámetro, indicaron cambios estadísticos significativos para el factor especie, semanas y la interacción especie*semanas de exposición ($p < 0.05$). (tabla 1-5). Los resultados obtenidos indicaron una nula tasa de crecimiento del testigo en comparación con las demás especies evaluadas durante las 6 semanas posteriores a la exposición del lixiviado, la especie *Colocasia esculenta*, presento la mejor tasa de crecimiento promedio de (1,31 cm) siendo estadísticamente igual a las demás especies evaluadas pero diferente de la tasa de crecimiento del testigo; sin embargo, cabe mencionar que las especies no cuentan con un ciclo de desarrollo igual, por lo que comparar su crecimiento es bastante complejo.

Tabla 1-5. Parámetros de crecimiento, en cinco especies vegetales (Testigo, *Carludovica palmata*, *Colocasia esculenta*, *Mauritia flexuosa*, *Heliconia sp*) en diferentes semanas (0,1,2,3,4). Los resultados muestran las medias \pm error estándar (E.E). Valores en filas con distintas letras indican diferencias significativas entre especies utilizadas y semanas evaluadas para cada variable. (post-hoc L.S.D, $p < 0.01$). $n=10$.

p-valores basados en el estadístico de Fisher (f)			
Factor	Nivel	Crecimiento altura	Crecimiento Diámetro
Especie	Testigo	0,0 \pm 0,1458 a	0.0033 \pm 0.0075 a
	<i>Carludovica Palmata</i>	0.9450 \pm 0,1458 b	0.0273 \pm 0.0075 b
	<i>Mauritia Flexuosa</i>	1.0050 \pm 0,1458 b	0.1022 \pm 0.0075 d
	<i>Heliconia Sp</i>	1.0867 \pm 0,1458 b	0.0630 \pm 0.0075 c
	<i>Colocasia Esculenta</i>	1.3167 \pm 0,1458 b	0.0363 \pm 0.0075 b
Semanas	0	0,0 \pm 0,1597 a	0.0 \pm 0.0082 a
	1	1.6700 \pm 0,1597 c	0.0220 \pm 0.0082 a
	2	1.1800 \pm 0,1597 c	0.0640 \pm 0.0082 b
	3	1.3740 \pm 0,1597 c	0.0716 \pm 0.0082 b
	4	0.5360 \pm 0,1597 b	0.0620 \pm 0.0082 b
	5	0.4640 \pm 0,1597 b	0.0590 \pm 0.0082 b

De manera general, las especies evaluadas, exceptuando el testigo, presentaron un incremento en las tasas de crecimiento desde la semana 0 hasta la semana 3, posteriormente se evidenció una disminución de la tasa de crecimiento el altura y diámetro de tallo hasta la semana 5 de evaluación.

Las especies *Carludovica palmata* y *Heliconia sp*, presentaron los mejores comportamientos del incremento de la altura en función del tiempo, las tasas máximas de crecimiento en estas dos especies fueron evidenciadas en la semana 3 posterior a la exposición al lixiviado siendo estadísticamente mayores a las demás especies evaluadas. (figura 1-3), resultados similares de crecimiento son reportados por (Das y Mazumdar K, 2016; Ogata et al., 2015; Iqbal et al., 2013; Klomjek y Nitorisravut, 2005; Koottatep y Polprasert, 1997).

El crecimiento de las especies bajo ambientes tóxicos, como los lixiviados, pueden ser explicados en la medida en la que las plantas presentan capacidades variables en la capacidad de acumular y transformar compuestos orgánicos e inorgánicos a través de procesos de filtración, adsorción y

bioabsorción; esencialmente procesos de hiperacumulación de metales pesados en raíces, tallo y hojas (Peña-Salamanca et al., 2013; Mirza et al., 2011), resultados similares son reportados por (Rezania et al., 2016; Sweta et al., 2015; Ali et al., 2013; Marchand et al., 2010; Memon y Schröder, 2009; Mench et al., 2009; Bulc, 2006; Sheoran y Sheoran, 2006; Mejáre and Bülow, 2001).

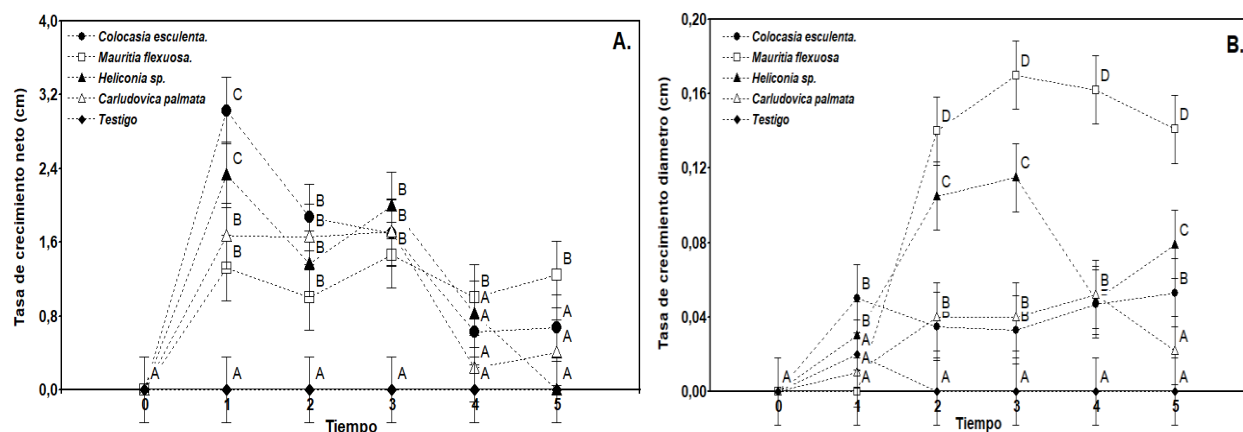


Figura 1-3. Tasa de crecimiento de cinco especies vegetales (Testigo, *Carludovica palmata*, *Colocasia esculenta*, *Mauritia flexuosa*, *Heliconia sp.*) bajo condicione de lixiviado en diferentes semanas de evaluación (0,1,2,3,4,5). Los resultados muestran las medias \pm error estándar (E.E). Valores en filas con distintas letras indican diferencias significativas entre tiempos evaluados para cada especie. (post-hoc L.S.D, $p < 0.01$). $n=10$. **A.** Tasa de crecimiento neto en altura. **B.** Tasa de crecimiento en Diámetro.

Por otro lado, el análisis de componentes principales sobre la matriz de correlación mostro que los 4 primeros componentes aportaron el 93% de la variabilidad total presentando raíces características mayores a la unidad equivalentes a la variabilidad del 93%, al analizar los coeficientes de los vectores característicos asociados concluyo que los paramentos fisicoquímicos más importantes en su orden fueron: ssup, ss, DBO, DQO, GyA para el CP1, mientras que Alcalinidad, Cl-, SO4- fueron para el CP2.

El ACP por especies evaluadas, permitió evidenciar la conformación de tres grupos de especies, el primero en donde se localizan las especies testigo y *heliconia sp.*, asociados a mayores magnitudes de DBO, DQO, SSUP, SS, GyA, el segundo conformado por las especies *Colocasia esculenta* y *Carludovica palmata* relacionadas con menores magnitudes de DBO, DQO, SSUP, SS, GyA, pH,

Pb, Al, Cr, y un tercer grupo conformado por la especie *Mauritia flexuosa* el cual se asocia a menos magnitudes de Cl⁻ y SO₄.

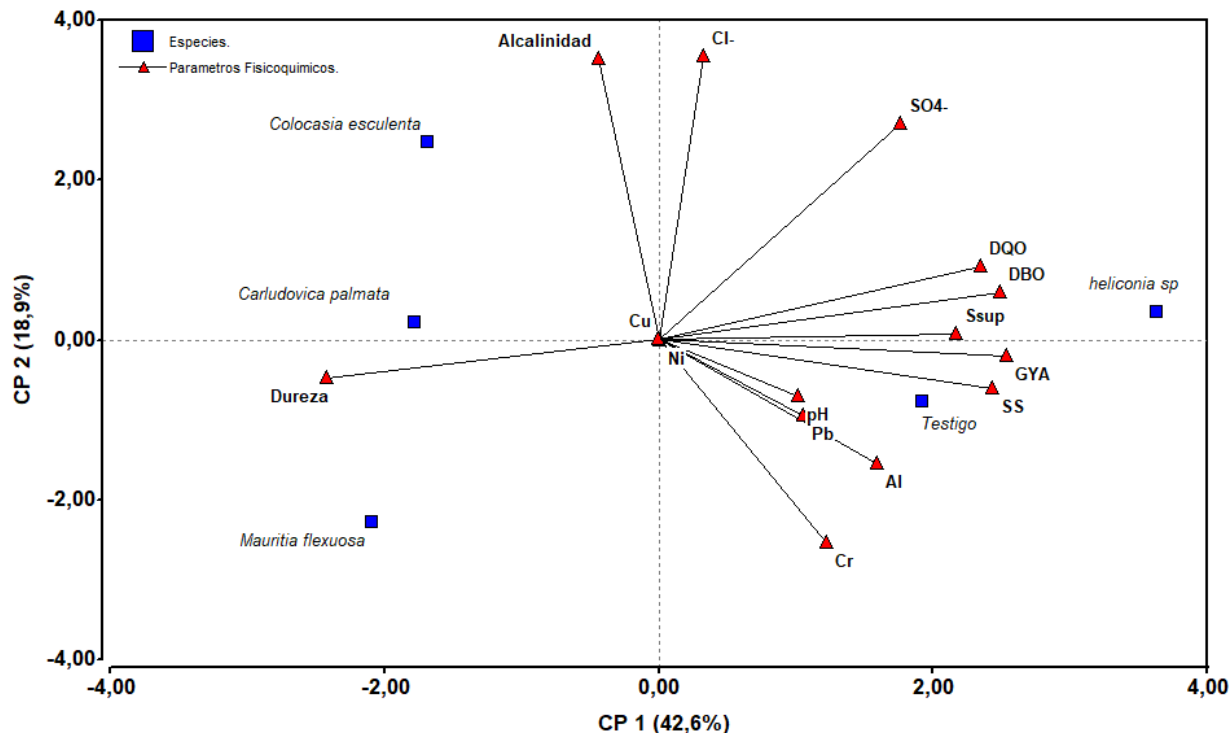


Figura 1-4. Análisis de componentes principales (Grafico Biplot) de 16 Parámetros fisicoquímicos en 5 especies. **pH:** Potencial de hidrogeno, **Ssup:** Sólidos suspendidos, **SS:** Sólidos sedimentables, **Alcalinidad, Dureza, Cl⁻:** Cloruros, **SO₄⁻:** Sulfatos, **Al:** Aluminio, **Zn:** Cinc, **Pb:** Plomo, **Cr:** Cromo, **Ni:** Níquel, **Cu:** Cobre, **DBO:** Demanda biológica de oxígeno, **DQO:** Demanda química de oxígeno, **GyA:** Grasas y Aceites.

4. Participación de los Autores

EGST. Concepción, diseño, toma de datos y escritura del documento.

MFP. Escritura del documento.

CDGCH. Análisis de datos y escritura del documento

CONCLUSIONES

Basados en los resultados experimentales obtenidos se puede decir que las especies *Mauritia flexuosa*, *Carludovica palmata*, *Colocasia esculenta* y *Heliconia sp*, presentaron altos porcentajes de remoción ($p \leq 0,05$) de Al, Zn, Ni, Cu, DBO, DQO y sólidos suspendidos totales, las especies *Mauritia flexuosa*, *Carludovica palmata* y *Colocasia esculenta* presentaron mayores remociones de grasas y aceites. Los contenidos DBO, DQO, grasas y aceites, Ni y Zn, en todas las especies evaluadas, redujeron la carga contaminante del lixiviado a valores por debajo de los límites establecidos en la resolución 631 de 2015. La especie *Colocasia esculenta*, presentó la mejor tasa de crecimiento promedio de 1.31 cm. Las condiciones iniciales de lixiviado no limitaron la capacidad de remoción y crecimiento de las especies evaluadas. En este sentido, los resultados indican que las especies *Mauritia flexuosa*, *Carludovica palmata*, *Colocasia esculenta* y *Heliconia sp* evaluadas en humedales artificiales de flujo horizontal a escala laboratorio en condiciones controladas muestran un alto potencial para la fitorremediación de los lixiviados provenientes del relleno sanitario de Mocoa.

REFERENCIAS.

- Abbas, Z., Arooj, F., Ali, S., Zaheer, I. E., Rizwan, M., & Riaz, M. A. (2019). Phytoremediation of landfill leachate waste contaminants through floating bed technique using water hyacinth and water lettuce. *International journal of phytoremediation*, 1-12.
- Ajayi, T. O., & Ogunbayo, A. O. (2012). Achieving environmental sustainability in wastewater treatment by phytoremediation with water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Journal of Sustainable Development*, 5(7), 80.
- Akinbile, C. O., Ogunrinde, T. A., Che bt Man, H., & Aziz, H. A. (2016). Phytoremediation of domestic wastewaters in free water surface constructed wetlands using *Azolla pinnata*. *International journal of phytoremediation*, 18(1), 54-61.
- Akinbile, C. O., Yusoff, M. S., & Shian, L. M. (2012). Leachate characterization and phytoremediation using water hyacinth (*Eichornia crassipes*) in Pulau Burung, Malaysia. *Bioremediation journal*, 16(1), 9-18.
- Al-Hamadani, Y. A., Yusoff, M. S., Umar, M., Bashir, M. J., & Adlan, M. N. (2011). Application of psyllium husk as coagulant and coagulant aid in semi-aerobic landfill leachate treatment. *Journal of hazardous materials*, 190(1-3), 582-587.
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-881.
- Anning, A. K., Korsah, P. E., & Addo-Fordjour, P. (2013). Phytoremediation of wastewater with *Limncharis flava*, *Thalia geniculata* and *Typha latifolia* in constructed wetlands. *International journal of phytoremediation*, 15(5), 452-464.
- Arbeláez Mesa, M., & García Sierra, J. E. (2010). Estudio de las tecnologías empleadas para el manejo de lixiviados y su aplicabilidad en el medio (Bachelor's thesis, Universidad EAFIT).

- Bashir, M. J., Aziz, H. A., Yusoff, M. S., & Adlan, M. N. (2010). Application of response surface methodology (RSM) for optimization of ammoniacal nitrogen removal from semi-aerobic landfill leachate using ion exchange resin. *Desalination*, 254(1-3), 154-161.
- Brisson, J., & Chazarenc, F. (2009). Maximizing pollutant removal in constructed wetlands: should we pay more attention to macrophyte species selection? *Science of the Total Environment*, 407(13), 3923-3930.
- Bulc, T.G. (2006). Long term performance of a constructed wetland for landfill leachate treatment. *Ecol. Eng.* 26 (4), 365–374.
- Cherian, S., & Oliveira, M. M. (2005). Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities. *Environmental science & technology*, 39(24), 9377-9390.
- Dan, A., Oka, M., Fujii, Y., Soda, S., Ishigaki, T., Machimura, T., & Ike, M. (2017). Removal of heavy metals from synthetic landfill leachate in lab-scale vertical flow constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 584, 742-750.
- Das, S., y Mazumdar, K. (2106). Phytoremediation potential of a novel fern, *Salvinia cucullata*, Roxb. Ex Bory, to pulp and paper mill effluent: Physiological and anatomical response. *Chemosphere*, 163, 62-72.
- Dávila, P. (1990). Listado florístico de las gramíneas de Puebla (Vol. 8). Unam.
- Di Rienzo, J. A., Macchiavelli, R., & Casanoves, F. (2017). Modelos lineales generalizados mixtos aplicaciones en InfoStat.
- Dushenkov, V., Kumar, P. N., Motto, H., & Raskin, I. (1995). Rhizofiltration: the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. *Environmental science & technology*, 29(5), 1239-1245.

- Eapen, S., Suseelan, K. N., Tivarekar, S., Kotwal, S. A., & Mitra, R. (2003). Potential for rhizofiltration of uranium using hairy root cultures of *Brassica juncea* and *Chenopodium amaranticolor*. *Environmental research*, 91(2), 127-133.
- Elfeky, S. A., Imam, H., & Alsherbini, A. A. (2013). Bio-absorption of Ni and Cd on *Eichhornia crassipes* root thin film. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(11), 8220-8226.
- Garbo, F., Lavagnolo, M.C., Malagoli, M., Schiavon, M., y Coss, R. (2017). Different leachate phytotreatment systems using sunflowers. *Waste Management*, 59, 267-275.
- Ghafari, S., Aziz, H. A., Isa, M. H., & Zinatizadeh, A. A. (2009). Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation–flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum. *Journal of hazardous materials*, 163(2-3), 650-656.
- Gomes, M. V. T., de Souza, R. R., Teles, V. S., & Mendes, É. A. (2014). Phytoremediation of water contaminated with mercury using *Typha domingensis* in constructed wetland. *Chemosphere*, 103, 228-233.
- Gould, F. W., & Shaw, R. B. (1983). Grass systematics. *Brittonia*, 35(3), 301-301.
- Greger, M., & Landberg, T. (1999). Use of willow in phytoextraction. *International Journal of phytoremediation*, 1(2), 115-123.
- Greipsson, S. (2011). Phytoremediation. *Nature Education Knowledge*, 3(10), 7.
- Herzig, R., Nehnevajova, E., Pfistner, C., Schwitzguebel, J. P., Ricci, A., & Keller, C. (2014). Feasibility of labile Zn phytoextraction using enhanced tobacco and sunflower: results of five- and one-year field-scale experiments in Switzerland. *International journal of phytoremediation*, 16(7-8), 735-754.

- Iqbal, S., Younas, U., Chan, K.W., Saeed, Z., Shaheen, M.A., Akhtar, N., Majeed, A. (2013). Growth and antioxidant response of *Brassica rapa* var. *rapa* L. (turnip) irrigated with different compositions of paper and board mill (PBM) effluent. *Chemosphere* 91 (8), 1196 e 1202.
- Klomjek, P., Nitorisavut, S. (2005). Constructed treatment wetland: a study of eight plant species under saline conditions. *Chemosphere* 58, 585–593.
- Koottatep, T., Polprasert, C. (1997). Role of plant uptake on nitrogen removal in constructed wetlands located in the tropics. *Water Sci. Technol.* 36, 1–8.
- Liu, J., Dong, Y., Xu, H., Wang, D., & Xu, J. (2007). Accumulation of Cd, Pb and Zn by 19 wetland plant species in constructed wetland. *Journal of hazardous materials*, 147(3), 947-953.
- Kim, S., Baek, K., & Lee, I. (2010). Phytoremediation and microbial community structure of soil from a metal-contaminated military shooting range: Comparisons of field and pot experiments. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 45(3), 389-394.
- Kumar, V., & Chopra, A. K. (2018). Phytoremediation potential of water caltrop (*Trapa natans* L.) using municipal wastewater of the activated sludge process-based municipal wastewater treatment plant. *Environmental technology*, 39(1), 12-23.
- Kumar V, Chopra AK, Singha, J, Thakura RK, Srivastava S, Chauhan RK. (2016). Comparative assessment of phytoremediation feasibility of water caltrop (*Trapa natans* L.) and water hyacinth (*Eichhornia crassipes* Solms.) using pulp and paper mill effluent. *Arch Agric Environ Sci.* 1(1): 13–21.
- Kumari, M., & Tripathi, B. D. (2015). Efficiency of *Phragmites australis* and *Typha latifolia* for heavy metal removal from wastewater. *Ecotoxicology and environmental safety*, 112, 80-86.
- Madera-Parra, C. A., Peña-Salamanca, E. J., Peña, M. R., Rousseau, D. P. L., & Lens, P. N. L. (2015). Phytoremediation of landfill leachate with *Colocasia esculenta*, *Gynerum sagittatum* and

Heliconia psittacorum in constructed wetlands. *International journal of phytoremediation*, 17(1), 16-24.

Mant, C., Costa, S., Williams, J., & Tambourgi, E. (2006). Phytoremediation of chromium by model constructed wetland. *Bioresource Technology*, 97(15), 1767-1772.

Marchand, L., Mench, M., Jacob, D.L., Otte, M.L., (2010). Metal and metalloid removal in constructed wetlands, with emphasis on the importance of plants and standardized measurements: a review. *Environ. Pollut.* 158, 3447–3461.

Maza, V. (2004). Cultivo, cosecha y poscosecha de Heliconias y flores tropicales. Jardín Botánico Joaquín Antonio Uribe de Medellín, Medellín, Colombia.

Meeinkuirt, W., Kruatrachue, M., Tanhan, P., Chaiyarat, R., & Pokethitiyook, P. (2013). Phytostabilization potential of Pb mine tailings by two grass species, *Thysanolaena maxima* and *Vetiveria zizanioides*. *Water, Air, & Soil Pollution*, 224(10), 1750.

Mejáre, M., Bülow, L. (2001). Metal-binding proteins and peptides in bioremediation and phytoremediation of heavy metals. *Trends Biotechnol.* 19, 67–73.

Mench, M., Schwitzguebel, J.-P., Schroeder, P., Bert, V., Gawronski, S., Gupta, S. (2009). Assessment of successful experiments and limitations of phytotechnologies: contaminant uptake, detoxification and sequestration, and consequences for food safety. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 16, 876–900.

Memon, A.R., Schröder, P., (2009). Implications of metal accumulation mechanisms to phytoremediation. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 16, 162–175.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 631 del 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos

puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Bogotá – Colombia.

Mirza, N., Pervez, A., Mahmood, Q., Shah, M. M., Shafqat, M. N. (2011). Ecological restoration of arsenic contaminated soil by *Arundo donax* L. *Ecological engineering*, 37:1949-1956.

Mishra, S., Mohanty, M., Pradhan, C., Patra, H. K., Das, R., & Sahoo, S. (2013). Physico-chemical assessment of paper mill effluent and its heavy metal remediation using aquatic macrophytes— a case study at JK Paper mill, Rayagada, India. *Environmental monitoring and assessment*, 185(5), 4347-4359.

Mokhtar, H., Morad, N., & Fizri, F. F. A. (2011). Hyperaccumulation of copper by two species of aquatic plants. In *International Conference on Environment Science and Engineering* (Vol. 8, pp. 115-118).

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. *Revista EIA*, (14), 75-84.

Moreno, F. N., Anderson, C. W., Stewart, R. B., & Robinson, B. H. (2008). Phytofiltration of mercury-contaminated water: volatilisation and plant-accumulation aspects. *Environmental and Experimental Botany*, 62(1), 78-85.

Nedelkoska, T. V., & Doran, P. M. (2000). Hyperaccumulation of cadmium by hairy roots of *Thlaspi caerulescens*. *Biotechnology and Bioengineering*, 67(5), 607-615.

Niu, Z. X., Sun, L. N., Sun, T. H., Li, Y. S., & Hong, W. A. N. G. (2007). Evaluation of phytoextracting cadmium and lead by sunflower, ricinus, alfalfa and mustard in hydroponic culture. *Journal of environmental sciences*, 19(8), 961-967.

- Novelo, R. I. M., Hernández, E. M., Franco, C. Q., Borges, E. R. C., & Riancho, M. R. S. (2002). Tratamiento de lixiviados con carbón activado. *Ingeniería*, 6(3), 19-27.
- Méndez Novelo, R. I., Castillo Borges, E. R., Sauri Riancho, M. R., Quintal Franco, C. A., Giacomán Vallejos, G., & Jiménez Cisneros, B. (2009). Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(3), 133-145.
- Ogata, Y., Ishigaki, T., Ebie, Y., Sutthasil, N., Chiemchaisri, CH., y Yamada, M. (2015). Water reduction by constructed wetlands treating waste landfill leachate in a tropical region. *Waste Management*, 44, 164-171.
- Ospina-Álvarez, N., Peña-Salamanca, E., & Benítez, R. (2006). Efecto de la salinidad en la capacidad de bioacumulación de plomo en el alga verde *Rhizoclonium riparium* (Roth) Harvey (Chlorophyceae, Cladophorales). *Actual biol*, 28(84), 17-25.
- Othman, E., Yusoff, M. S., Aziz, H. A., Adlan, M. N., Bashir, M. J., & Hung, Y. T. (2010). The effectiveness of silica sand in semi-aerobic stabilized landfill leachate treatment. *Water*, 2(4), 904-915.
- Panich-Pat, T., Upatham, S., Pokethitiyook, P., Kruatrachue, M., & Lanza, G. R. (2010). Phytoextraction of metal contaminants by *Typha angustifolia*: interaction of lead and cadmium in soil-water microcosms. *Journal of environmental protection*, 1(04), 431.
- Peña-Salamanca, E. J., Madera-Parra, C. A., Sánchez, J. M., & Medina-Vásquez, J. (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), 469-482.
- Phusantisampan T, Meeinkuirt W, Saengwilai P, Pichtel J, Chaiyarat R. (2016). Phytostabilization potential of two ecotypes of *Vetiveria zizanioides* in cadmium-contaminated soils: greenhouse and field experiments. *Environ Sci Pollut Res Int*. 23(19): 20027–20038.

- Pena-Salamanca, E. J., Rengifo-Gallego, A. L., & Benitez-Campo, N. (2011). Detoxification mechanisms of heavy metals by algal-bacteria consortia. *Handbook of Marine Macroalgae*, 441-450.
- Priya, E. S., & Selvan, P. S. (2017). Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*)—An efficient and economic adsorbent for textile effluent treatment—A review. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S3548-S3558.
- Saengwilai P, Meeinkuirt W, Pichtel J, Koedrith P. (2017). Influence of amendments on Cd and Zn uptake and accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) in contaminated soil. *Environ Sci Pollut Res Int*. 24(18): 15756–15767.
- Saha, P., Shinde, O., & Sarkar, S. (2017). Phytoremediation of industrial mines wastewater using water hyacinth. *International journal of phytoremediation*, 19(1), 87-96.
- Salt, D. E., Blaylock, M., Kumar, N. P., Dushenkov, V., Ensley, B. D., Chet, I., & Raskin, I. (1995). Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Bio/technology*, 13(5), 468.
- Sánchez, G. (2005). Diagnóstico de la problemática de los residuos sólidos urbanos en el municipio de Ciudad Ixtepec, Oaxaca, tesis para obtener el título en ingeniería ambiental. México.
- Sander, M. L., & Ericsson, T. (1998). Vertical distributions of plant nutrients and heavy metals in *Salix viminalis* stems and their implications for sampling. *Biomass and Bioenergy*, 14(1), 57-66.
- Sawaittayothin, V., & Polprasert, C. (2007). Nitrogen mass balance and microbial analysis of constructed wetlands treating municipal landfill leachate. *Bioresource Technology*, 98(3), 565-570.

- Saxena, P. K., KrishnaRaj, S., Dan, T., Perras, M. R., & Vettakkorumakankav, N. N. (1999). Phytoremediation of heavy metal contaminated and polluted soils. In *Heavy metal stress in plants* (pp. 305-329). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Sheoran, A.S., Sheoran, V. (2006). Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: a critical review. *Miner. Eng.* 19, 105–116.
- Skinner, K., Wright, N., & Porter-Goff, E. (2007). Mercury uptake and accumulation by four species of aquatic plants. *Environmental pollution*, 145(1), 234-237.
- Soda, S., Hamada, T., Yamaoka, Y., Ike, M., Nakazato, H., Saeki, Y., & Sakurai, Y. (2012). Constructed wetlands for advanced treatment of wastewater with a complex matrix from a metal-processing plant: bioconcentration and translocation factors of various metals in *Acorus gramineus* and *Cyperus alternifolius*. *Ecological engineering*, 39, 63-70.
- Sooksawat, N., Meetam, M., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P., & Nathalang, K. (2013). Phytoremediation potential of charophytes: Bioaccumulation and toxicity studies of cadmium, lead and zinc. *Journal of Environmental Sciences*, 25(3), 596-604.
- Sricoth, T., Meeinkurt, W., Saengwilai, P., Pichtel, J., & Taepayoon, P. (2018). Aquatic plants for phytostabilization of cadmium and zinc in hydroponic experiments. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(15), 14964-14976.
- Steer, D., Fraser, L., Boddy, J., & Seibert, B. (2002). Efficiency of small constructed wetlands for subsurface treatment of single-family domestic effluent. *Ecological Engineering*, 18(4), 429-440.
- Swain, G., Adhikari, S., & Mohanty, P. (2014). Phytoremediation of Copper and Cadmium from Water Using Water Hyacinth, "Eichhornia Crassipes". *International Journal of Agricultural Science and Technology*, 2(1), 1-7.

- Sweta, B. K., Singh, R., & Singh, R. P. (2015). The suitability of *Trapa natans* for phytoremediation of inorganic contaminants from the aquatic ecosystems. *Ecol Eng*, 83, 39-42.
- Terry, N., & Banuelos, G. S. (1999). *Phytoremediation of contaminated soil and water*. CRC Press.
- Vymazal, J. (2009). The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological engineering*, 35(1), 1-17.
- Wei, S., Zhou, Q., Srivastava, M., Xiao, H., Yang, C., & Zhang, Q. (2009). *Kalimeris integrifolia* Turcz. ex DC.: An accumulator of Cd. *Journal of hazardous materials*, 162(2-3), 1571-1573.
- Yalçuk, A., & Ugurlu, A. (2019). Treatment of landfill leachate with laboratory scale vertical flow constructed wetlands: plant growth modeling. *International journal of phytoremediation*, 1-10.
- Yang, L. (2008). *Phytoremediation: an ecotechnology for treating contaminated sites*. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 12(4), 290-298.
- Zalesny Jr, R. S., & Bauer, E. O. (2007). Selecting and utilizing *Populus* and *Salix* for landfill covers: implications for leachate irrigation. *International journal of phytoremediation*, 9(6), 497-511.
- Zhou, J. Z., Zhang, X. Q., Xie, W. M., Yang, S. Q., Du, M. X., Dai, K. W., & Han, X. (2018). The enhanced effect of activated sludge attached to the roots of *Pistia stratiotes* on nutrient removal for secondary effluent. *Water Science and Technology*, 77(6), 1683-1688.
- Zohaib Abbas, Fariha Arooj, Shafaqat Ali, Ihsan Elahi Zaheer, Muhammad Rizwan & Muhammad Ahsan Riaz. (2019). Phytoremediation of landfill leachate waste contaminants through floating bed technique using water hyacinth and water lettuce, *International Journal of Phytoremediation*.