



INFORME TÉCNICO DEL CONCEPTO:

**Evaluación de remoción de contaminantes en Aguas Residuales Domésticas
por plantas ornamentales mediante humedales flotantes en el Cantón Militar
de Apiay, Villavicencio (Meta)**

Ana María González Alonso, Omar Hernández Orjuela, Christian José Rojas Reina

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

INGENIERÍA AMBIENTAL

VILLAVICENCIO

2020

Introducción

En países en desarrollo como Colombia, los sistemas de producción están en constante crecimiento producto del aumento de la demanda por el buen desempeño económico de los últimos decenios, afectando gravemente el ámbito ambiental. Esto se evidencia con el incremento de las descargas de ARD e industriales sobre los cuerpos de agua, contaminando las fuentes de agua superficiales y subterráneas, que limitan el aprovechamiento hídrico en los lugares subyacentes a los puntos de vertimiento y generan degradación de diversos ecosistemas (IDEAM, 2016).

Debido a la afectación del recurso hídrico, como consecuencia de la inexistencia de plantas de tratamientos de Aguas residuales (ARs) en la mayoría de los municipios del territorio colombiano, los vertimientos producto de actividades antrópicas, son vertidos directamente a los cuerpos de agua, generando su contaminación. Por consiguiente, es necesario diversificar los tratamientos efectivos para las ARDs e industriales, como parte de las actividades de gestión para la reducción y control de la contaminación, desarrollando tecnologías de tratamiento de bajo costo como la implementación de humedales artificiales, que estén sujetos a diversas alternativas de solución, orientadas a mitigar el impacto ambiental generado por el vertimiento de ARs crudas o parcialmente tratadas hacia diversos cuerpos receptores (IDEAM, 2016).

Los humedales flotantes son instrumentos innovadores, debido a que pueden cumplir con la función de tratar varios tipos de efluentes, mediante la fitorremediación ejercida por la vegetación asociada a la actividad de microorganismos, que pueden degradar algunos metales pesados, material orgánico y nutrientes; esta fitotecnología se convierte en una alternativa de bajo costo para la implementación en zonas que su población sea de baja densidad (Mulamoottil, McBean, & Rovers, 1997). Los sistemas de humedales flotantes han demostrado ser eficientes en la remediación de ARs, los cuales se remueven principalmente la DBO, Sólidos Suspendidos Totales (SST), compuestos nitrogenados y fosfatados, a través de los diferentes procesos de fitorremediación (Beascochea, Muñoz, & Fernández, 2010).

Los humedales artificiales son sistemas construidos por el hombre que imitan la naturaleza y consisten en ser embalses de agua expuesta a la atmósfera y con niveles poco profundos, en ellos se da una interacción entre plantas, medio de soporte, bacterias y agua, de tal forma que los contaminantes son degradados a través de diversos procesos fisicoquímicos y biológicos

(Rodríguez, G.E., L., & L.F., 2009), siendo una solución a bajo costo para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, que sirven como sustento y soporte de plantas con capacidades de remoción de parámetros fisicoquímicos y biológicos, de aguas contaminadas a causa del vertimiento de actividades antrópicas.

Las plantas ornamentales pueden mejorar la infraestructura del sistema de tratamiento, dándole mayor realce estético, y posiblemente otorgar beneficios económicos a la comunidad a través de la producción de flores de corte para su comercialización. Este beneficio económico permitiría recuperar parte de los recursos invertidos en la construcción y mantenimiento del sistema (Marco A. Belmont a, 2004).

Una de las especies que se va implementar en el presente proyecto, es la *Heliconia psittacorum*, proviene de la familia Heliconiaceae; esta planta es una macrófita emergente que posee capacidades de fitorremediación, está presente generalmente en el neotropical con un altitud de 0 a 1.400 metros sobre el nivel del mar (msnm), y crece en temperaturas entre 22 °C y 30 °C (Peña Salamanca, Madera Parra, Sánchez, & Javier, 2013). Esta especie es dominante en la región de la Orinoquía y en el Valle del Cauca, con presencia en bosques de galerías, bosques ribereños en áreas inundables y morichales, con una vida útil promedio 10 meses (Rangel, 1995). Estas plantas poseen ventajas como de eliminar DBO5 y SST con porcentajes superiores de 60%, disminuir nutrientes con porcentajes superiores al 80% al cosechar su biomasa aérea, ser comercializada por incrementar el valor estético del entorno, tienen gran desempeño en la eliminación de metales pesados, donde se han logrado reportar porcentajes de eliminación del 90% y con potencial para emplear en sistemas de humedales artificiales (F.Breen, 1990).

La segunda a especie a implementar, es la *Alpinia Purpurata*, proviene de la familia Zingiberaceae y es conocida como Ginger rojo o platanillo, y es una planta ornamental comercializada por la belleza de sus flores en varias partes del mundo, crece en climas tropicales húmedos con temperaturas entre 20 y 30°C, con altura entre 0,8 a 1,2 m, su inflorescencia por planta al año suele ser de 50 flores y sus raíces son de 20 a 35 cm de largo, también es utilizada en sistemas de humedales artificiales para tratar aguas residuales y prevenir algas (Leal, 2012).

Metodología

Este estudio contó con una metodología del tipo experimental de campo. El tiempo empleado para la realización del presente estudio, fue de 6 meses, lo cual el primer mes se realizó la adaptación de las especies ornamentales; en el segundo mes se dio el inicio a la operación de los sistemas de humedales flotantes en el tratamiento de las ARDs, el tiempo restante fue dedicado en el análisis de los datos obtenidos y en la elaboración del documento final. Para llevar a cabo el estudio se construyeron seis humedales flotantes a escala piloto, con el fin de evaluar la remoción de la DBO₅, SST y Nutrientes como P-PO₄, NT (NTK, NO₃ y NO₂), usando dos plantas ornamentales como agentes de fitorremediación. Además de los anteriores parámetros se midió OD, pH, temperatura, conductividad y el crecimiento de las plantas, con el fin de observar el desempeño de las especies y generar recomendaciones técnicas sobre la posible implementación a escala real en las dos lagunas de estabilización presentes en el Cantón Militar de Apiay.

Para el análisis de los parámetros de estudio se tomó una muestra antes y después del tratamiento, como se expresa en la Tabla 2. A partir de los TRH y el tipo de especie, se desarrollaron 2 rondas divididas en 6 tratamientos por duplicado, por lo que se obtuvo un total de 18 muestras (se incluyeron dos muestras del ARD saliente de las lagunas de estabilización para comparar los sistemas); los procedimientos de muestreo, conservación y manejo de las muestras fueron de acuerdo a lo establecido en las NTC-ISO 5667-2, NTC-ISO 5667-3 NTC 5667-10.

Fase I: Identificación de individuos de plantas ornamentales para los *Construcción de vivero*

En esta actividad se transportaron las plántulas al área de estudio con el fin de que estas se adapten. Se instalaron polisombras con el fin de evitar una insolación directa hacia las plantas ornamentales en etapa de crecimiento, a una altura de 2 metros y una cobertura de 15 m². Para la protección del vivero contra animales, se encerró el área de estudio con cercas de plástico.



Figura 1. Vivero de adaptación. Fuente: González & Hernández, 2020.

Adaptación

Se adquirieron 14 plantas de la especie *Heliconia psittacorum* y 13 plantas de *Alpinia purpurata*, ambas especies con una edad aproximada de 4 meses (momento en el cual el desarrollo foliar permite una mayor resistencia a diversas condiciones), cada una con escasa o nula floración, con una altura entre 20 cm a 55 cm; estas fueron regadas día de por medio directamente al sustrato, con 1 L por planta de la solución de ARD con pretratamiento (Ver figura 2), proveniente de la comunidad del Cantón Militar de Apiay durante 4 semanas, de acuerdo en lo indicado en la Tabla 2. El aumento gradual del ARD contenida en solución, se realizó con el fin de adaptar progresivamente las plantas al ARD, evitando posibles impactos agresivos en el desarrollo de estas.



Figura 2. Fotografía del riego de las plantas ornamentales a partir de las soluciones de ARD y agua potable, con fines de adaptación.

Tabla 1. Aumento Gradual de ARD Contenida en Solución

Semana	Solución
1	30% ARD y 70% agua superficial
2	50% ARD y 50% agua superficial
3	70% ARD y 30% agua superficial
4	100% ARD

Nota. Porcentajes de riego del ARD. Fuente: González & Hernández, 2020.

Medición de características morfológicas.

Inicialmente se enumeraron las plantas y se realizó la medición del crecimiento de las plantas mediante una cinta métrica, registrando los datos en planillas. Las variables que se tuvieron en cuenta fueron:

- 1) Altura promedio de los tallos por planta: Cada planta presentó entre 3 a 6 tallos para las dos especies desde el sustrato hasta la punta de los tallos.
- 2) Número de flores y estado general: Marchitamiento, verdes y amarillamiento.

Las mediciones se realizaron en el inicio de la adaptación, al inicio de la primera ronda de tratamientos/fin de adaptación y al final de la segunda ronda de tratamientos. Después de las 4 semanas de adaptación al clima y al riego del ARD, se identificaron las plantas con mayor desarrollo altura y de mejor estado; posteriormente se transfirieron en los humedales.

Fase II: Desarrollo del prototipo de humedal flotante

Construcción de los humedales flotantes a escala piloto.

Se construyeron seis humedales flotantes a escala piloto. La densidad fue de 4 plantas/0,8 m², para ello se siguió el diseño realizado en el estudio “Diseño y Construcción de Humedales para el Tratamiento de Aguas” realizado por (Arias, 2018), de la Universidad de Aarhus, en Dinamarca en el 2018.

Excavación.

Mediante una retroexcavadora se realizó la excavación para cada uno de los humedales y posteriormente se perfilaron los espacios que ocuparían los humedales flotantes.



Figura 3. Excavación de los humedales.



Figura 4. Posición de los humedales.

Dimensiones.

Para cada uno de los seis humedales flotantes las dimensiones fueron de 1 m de largo, 0,8 m de ancho y 0,7 m de profundidad, con un volumen de 560 L para cada humedal artificial, como se muestra en la siguiente figura.



Figura 5. Dimensiones de los humedales artificiales. Fuente: González & Hernández, 2020.

Recubrimiento.

El recubrimiento de los humedales se realizó por medio de un geotextil calibre 8 mm, con el fin de evitar la infiltración del ARD en el suelo.



Figura 6. Recubrimiento de los humedales artificiales.

Construcción de balsas.

Las seis balsas sirvieron como soportes de las plantas ornamentales y del sustrato; se adquirieron en plástico con dimensiones de 0,53 m de largo, 0,35 m de ancho y 0,22 m de altura. En cada balsa se adaptó 10 botellas plásticas, cada una de 3 litros y con 0,12 m de ancho, siendo los “flotadores”, teniendo las balsas un área total de 0,31 m² cada una. En la parte interna de la base y los costados de la balsa, se adaptó un plástico con el fin de contener la grava, y evitar que el agua a tratar entre por los lados de la balsa. En el medio de la capa de arena arcillosa y grava, se instaló tela quirúrgica (como se muestra en la *Figura 7*), permitiendo la entrada del agua residual pero no la salida del sustrato.

Sustrato.

En la base de las balsas, el sustrato estuvo compuesto primeramente por una capa de grava $\frac{3}{4}$, luego una capa de arena arcillosa y por último tierra abonada.

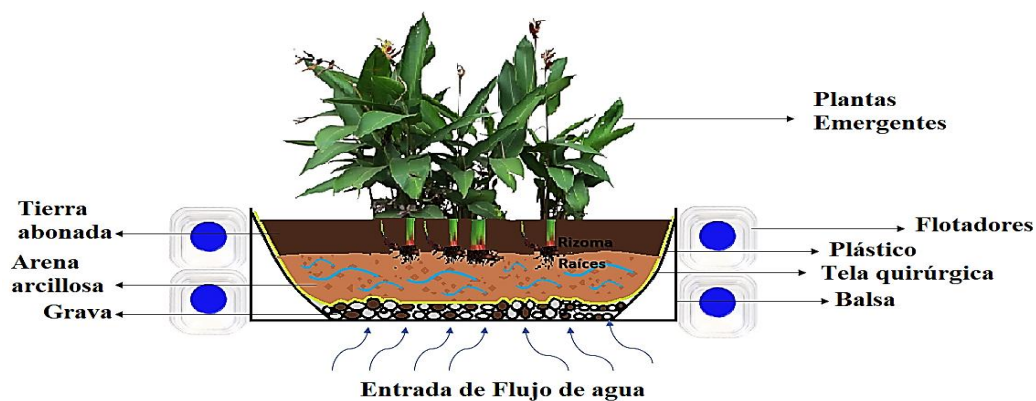


Figura 7. Montaje de la balsa flotante. Fuente: González & Hernández, 2020.

Captación y vaciado del agua residual.

Para el llenado de los humedales, se captó el ARD tomada después del pretratamiento de la PTAR y fue almacenada en un tanque plástico, posteriormente transportada hacia los humedales a escala piloto para el inicio de los tratamientos, lo cual al final de cada TRH, se vació mediante una electrobomba de $\frac{1}{2}$ Hp, y se volvió a llenar los humedales de inmediato para realizar el tratamiento por duplicado; al final de este, la manera del vaciado fue similar.



Figura 8. Transporte del ARD y vaciado de los humedales.

Tiempos de Retención Hidráulica (TRH).

Debido a la escasa información en la implementación de estas especies ornamentales en el tratamiento de ARDs mediante humedales flotantes en la ciudad de Villavicencio, se establecieron unos TRH de 4, 6 y 8 días, cada uno para dos humedales flotantes con diferente especie, con el fin de analizar en cuál tiempo se obtiene mayor remoción de DBO, SST y Nutrientes. (Ver Tabla 2).



Nota. Las que se encuentran al lado izq. *Alpinia purpurata* y al lado derecho *Heliconia psittacorum*.

Figura 9. Humedales superficiales con manto flotante. Fuente: González & Hernández, 2020.

Toma de muestras.

Se realizaron jornadas de muestreo al inicio y al final de los tratamientos, lo cual corresponden a 16 muestras, y a la salida de cada una de las dos lagunas de estabilización, para un total de 18 muestras, durante 1 mes, con el fin de determinar la concentración de entrada y salida de cada parámetro, realizando una toma de 1 Lde ARD. La toma de muestra se realizó a 15 cm de profundidad en cada cuerpo hídrico y se preservaron de acuerdo a lo indicado en la NTC-ISO 5667-3(IDEAM, 2007).

Tabla 2. TRH para el tratamiento por cada humedal y tomas de muestras

Medición y determinación de parámetros de Entrada	Rondas	Toma de muestra de Entrada (Se tomó 1L de muestra para cada Entrada)	Humedal – Especie	TRH (días)	Toma de muestra de Salida (Se tomó 1L de muestra para cada Salida)	Medición y determinación de parámetros de Salida
Temperatura, conductividad, OD, pH, NO, NO ₂ , NO ₃ , P-PO ₄ , DBO ₅ y SST	Primera ronda de tratamiento	Se consideró una entrada general de ARD para todos los HF	H1 <i>H.p.</i>	4	Al finalizar cada TRH de la primera ronda, se realiza la toma de muestras de salida de cada HF y se vacían	Temperatura, conductividad, OD, pH, NO, NO ₂ , NO ₃ , P-PO ₄ , DBO ₅ y SST
			H1 <i>A.p.</i>			
			H2 <i>H.p.</i>	6		
			H2 <i>A.p.</i>			
			H3 <i>H.p.</i>	8		
	H3 <i>A.p.</i>					
	Segunda ronda de tratamiento	Al culminar el vaciado, se llena de inmediato los HF, para lo cual cada HF con el mismo TRH tienen la misma C _e de acuerdo a la finalización de los TRH de 4, 6 y 8 días de la primera ronda.	H1 <i>H.p.</i>	4		
			H1 <i>A.p.</i>			
			H2 <i>H.p.</i>	6		
			H2 <i>A.p.</i>			
H3 <i>H.p.</i> H3 <i>A.p.</i> Lagunas			8			

Nota: H# = Número de Humedal; *H.p.* = *Heliconia psittacorum*; *A.p.* = *Alpinia purpurata*; HF = Humedal Flotante; C_e = Concentración de entrada. Fuente: González & Hernández, 2020.

Determinación de Concentraciones.

Las concentraciones de entrada son de acuerdo a las que poseían el ARD proveniente del pretratamiento. En la entrada como en la salida se determinó concentraciones de DBO₅, SST, P-PO₄, NTK, NO₃yNO₂, de igual forma se realizaron mediciones de pH, OD y conductividad. Los métodos para las mediciones fueron los siguientes:

Tabla 3. *Métodos de Mediciones para los Parámetros*

Parámetro	Método	Descripción
DBO ₅ (mg/L)	Winkler	<p>Se realizaron 3 pruebas de DBO₅ para cada una de las muestras, se tomó 15 ml de ARD que posteriormente fue depositada a cada una de las botellas Winkler, junto la mezcla entre el agua destilada 1L y las sustancias tampón (1 ml por cada sustancia). Se realizó la lectura de OD desde el momento en la realización de la prueba, y pasados 5 días. El valor de DBO₅ se determinó mediante la ecuación (IDEAM, 2020):</p> $\left(\frac{OD_{inicial} - OD_{pasados\ 5\ días}}{\text{Volumen de ARD}} \right) * \text{Volumen de la botella Winkler}$ <p>La determinación de DBO₅ para cada humedal, se realizó mediante el promedio del resultado de DBO₅ de las 3 pruebas por muestra de ARD. Inicialmente se realizó el secado de las cápsulas con el papel filtro mediante el horno a 105 °C por 1 hora, después se pesaron dando como resultado los valores iniciales. Posteriormente se realizó el montaje del procedimiento y se realizó la mezcla de 25 ml de ARD y 75 ml de agua destilada. Se depositó 20 ml de la mezcla anterior sobre el papel filtro. Después de la filtración se llevó el papel filtro nuevamente al horno a 105°C. Pasados 24 horas se saca el papel filtro y es pesado nuevamente (Peso final). El valor a partir de la siguiente ecuación corresponde los SST de la muestra (IDEAM, 2020): $\frac{(\text{Peso final} - \text{Peso inicial})}{\text{Volumen de la muestra}}$</p>
SST (mg/L)	Gravimétrico	<p>Después de la filtración se llevó el papel filtro nuevamente al horno a 105°C. Pasados 24 horas se saca el papel filtro y es pesado nuevamente (Peso final). El valor a partir de la siguiente ecuación corresponde los SST de la muestra (IDEAM, 2020): $\frac{(\text{Peso final} - \text{Peso inicial})}{\text{Volumen de la muestra}}$</p>
Nitratos (NO ₃) (mg/L)	Test Espectrofotométrico	<p>Se tomaron 10 ml de ARD y se aplicó un sachet de Nitrato HR 2, se esperó 20 minutos para la reacción de color. Posteriormente se depositó parte de la mezcla en una cubeta de cuarzo y se midió en el espectrofotómetro a 500 nm de Absorbancia. La concentración fue determinada a partir de una curva Patrón.</p>
Nitritos (NO ₂) (mg/L)		<p>Se tomaron 10 ml de ARD y se aplicó un sachet de Nitrito, se esperó 20 minutos. Posteriormente se depositó parte de la mezcla en una cubeta de cuarzo y se midió en el espectrofotómetro a 500 nm de Absorbancia. La concentración fue determinada a partir de una curva Patrón</p>
Nitrógeno Total		<p>Se tomaron 10 ml de ARD y se aplicó un sachet de Nitrógeno total Kit</p>

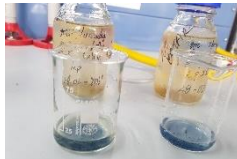


Kjedahl (NTK)
(mg/L)



HACH 2, se esperó 20 minutos. Posteriormente se depositó parte de la mezcla en una cubeta de cuarzo y se midió en el espectrofotómetro a 500 nm de Absorbancia. La concentración fue determinada a partir de una curva Patrón.

Ortofosfatos(P-
PO₄) (mg/L)



Se tomaron 10 ml de ARD y se aplicó un sachet de Fosfato RGT. F10 ml, se esperó 20 minutos. Posteriormente se depositó parte de la mezcla en una cubeta de cuarzo y se midió en el espectrofotómetro a 800 nm de Absorbancia. La concentración fue determinada a partir de una curva Patrón.

Conductividad
(s/m), pH,
Oxígeno disuelto
OD (mg/L)



Multipará
metro
(Lectura
directa)

Se introdujeron las tres sondas del multiparámetro, al recipiente que contenía las muestras de agua residual. Se midieron antes de la prueba de DBO y pasados los 5 días.

Nota. Procedimientos realizados para la medición y determinación de los parámetros de estudio. La determinación de la concentración de NO₃, NO₂, NTK y P-PO₄, se realizó a partir de curvas patrón para cada compuesto (Ver Anexo 7). Fuente: González & Hernández, 2020.

Fase III: Análisis de Resultados

En esta fase se analizó los porcentajes de remoción de contaminantes a partir de los humedales flotantes a escala piloto, con las diferentes especies implementadas y diferentes TRH.

Análisis de remoción.

El porcentaje obtenido fue la concentración removida por las plantas ornamentales. Este porcentaje se midió a partir de la siguiente ecuación, que es aplicada para la determinación de los parámetros de DBO₅, SST, P-PO₄ y NT.

$$\% \text{ Remoción} = \frac{(C_e - C_s)}{C_e} * 100$$

C_e = Concentración Entrada en mg/L; C_s = Concentración de salida en mg/L

Tabulación y análisis estadístico de datos.

La base de datos de los resultados se realizó por medio de **Microsoft Excel** y posteriormente se realizó un análisis descriptivo y correlación lineal por medio de **SPSS statistics**, que permitió analizar y comparar el comportamiento de las variables en la remoción de contaminantes a partir de las plantas ornamentales.

Resultados y Análisis de Resultados

De acuerdo a los resultados obtenidos después del procesamiento de las muestras tomadas en las dos rondas de tratamientos, fue necesario analizar los parámetros fisicoquímicos del ARD con y sin tratamiento; adicional a esto se realizó un control del crecimiento de las plantas implementadas en el proyecto. La investigación en campo se realizó durante la época seca en la ciudad de Villavicencio, a partir de los 15 días de enero hasta mediados del mes de marzo, por consiguiente, la influencia de las precipitaciones sobre las plantas y la concentración del ARD, no afectaron los resultados y los análisis de estos. Las jornadas de toma de muestras de agua, se realizaron en un intervalo de 11:00 a.m. a 11:30 a.m., esto para evitar una variación significativa en los datos de remoción obtenidos.

Adaptación y control del crecimiento de las plantas.

Al inicio del período de adaptación, las 14 plantas de la especie *Heliconia psittacorum* presentaban una altura promedio de 37,35 cm; la menor altura fue de 30,75 cm y la mayor fue de 42,25 cm, con un total de 7 flores. En las 13 plantas de la especie *Alpinia purpurata*, la altura promedio general fue de 38,45 cm, donde la menor altura presentada fue de 30,64 cm y la mayor de 45,75 cm, con un total de 6 flores. Ambas especies estaban en buen estado (Hojas y tallos verdes).

Al final del período de adaptación, las plantas 5 y 12 de *Heliconia psittacorum* y la planta 8 de *Alpinia purpurata*, presentaron menor crecimiento a comparación de las otras plantas y fueron las mismas que se identificaron al inicio de tener menor altura, además se observó mayor número de hojas con manchas amarillas a comparación de los otros ejemplares que presentaron mayor crecimiento, siendo un indicio a que estas plantas no se adaptaron principalmente a las soluciones del agua residual, por lo cual fueron excluidas en la implementación a los humedales flotantes. Cabe resaltar que se usó un plaguicida durante las 4 semanas de adaptación, concluyendo que el amarillamiento no es atribuible a plagas.

Tabla 4. Medición inicial de las plantas ornamentales: Los valores que se encuentran en **negrita roja**, corresponden a los datos de las plantas que registraron menor altura al inicio del período de adaptación. Fuente: González & Hernández, 2020.

Inicio de la Adaptación (<i>Heliconia psittacorum</i>)				Inicio de la Adaptación (<i>Alpinia purpurata</i>)			
Planta	Altura promedio de tallos por planta (cm)	Flores	Estado general de la planta	Planta	Altura promedio de tallos por planta (cm)	Flores	Estado general de la planta
1	37,25	1	Hojas y tallos verdes	1	44	0	Hojas y tallos verdes
2	38,00	1		2	45,25	3	
3	38,25	1		3	37	2	
4	38,50	0		4	37,25	1	
5	33,50	1		5	41,5	0	
6	41,00	0		6	42,45	0	
7	40,25	0		7	45,75	0	
8	36,75	0		8	30,64	0	
9	42,25	0		9	32,5	0	
0	35,75	2		10	33,75	0	
11	40,75	1		11	35,2	0	
12	30,75	0		12	43,25	0	
13	33,75	0		13	42,18	0	
14	36,25	0					
Promedio General (cm)	37,35	-	-	Promedio General (cm)	39,68	-	-
Total de flores	-	7		Total de flores	-	6	



Figura 10. Amarillamiento de hojas de la especie *Alpinia purpurata*. Fuente: González & Hernández, 2020.

Para la implementación de los dos tipos de macrófitas, se transfirieron las plantas con alturas promedio similares, con el fin de evitar incurrir en otra variable dentro de la experimentación. Los datos de la altura promedio general de las especies, corresponden únicamente a las plantas seleccionadas e implementadas en los humedales flotantes, las cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5. Control del crecimiento y estado de las plantas implementadas en los humedales

		Crecimiento de las plantas		
Tipo de Planta		Inicio de adaptación	Fin de adaptación/Inicio de tratamiento	Final de tratamiento
<i>Heliconia psittacorum</i>	Altura promedio general (cm)	37,49	39,46	40,86
	Número de flores	7,00	14,00	20,00
	Estado general	Hojas y tallos verdes	Amarillamiento de hojas en 3 plantas	Amarillamiento de hojas en 3 plantas
<i>Alpinia purpurata</i>	Altura promedio general (cm)	39,54	40,75	41,66
	Número de flores	6,00	12,00	15,00
	Estado general	Hojas y tallos verdes	Amarillamiento de hojas en 6 plantas	Amarillamiento de hojas en 5 plantas

Nota. Datos obtenidos en el control del crecimiento de la plata. Fuente: González & Hernández, 2020.

La especie *Heliconia psittacorum* demostró un mejor estado general a diferencia de la *Alpinia purpurata*, debido a que tuvo menor cantidad de plantas con presencia de amarillamiento, de acuerdo a la Tabla 5. La *Alpinia purpurata* al final de la adaptación/inicio de tratamiento, presentó 6 plantas con ocurrencia de amarillamiento y al final de tratamiento se redujo a 5.

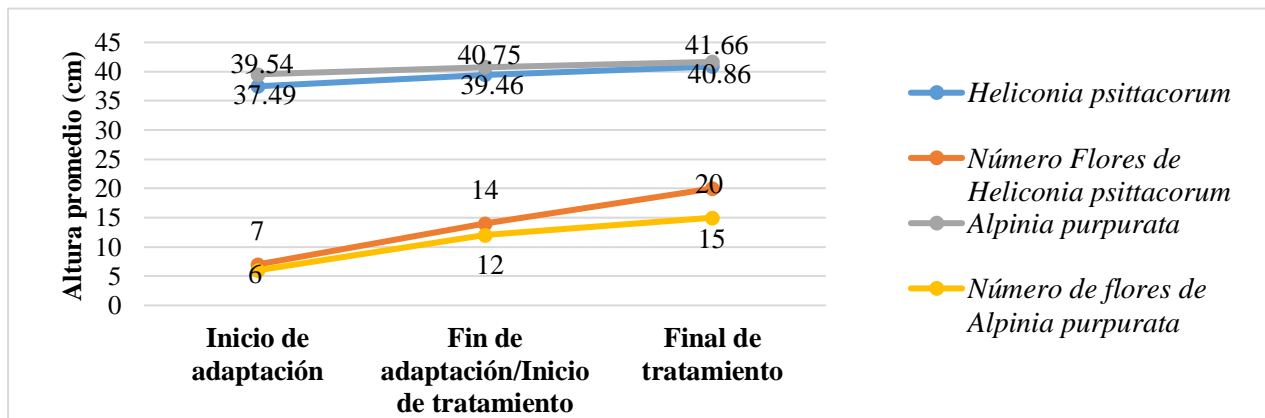


Figura 11. Gráfica del crecimiento promedio de las plantas de cada medición. Fuente: González & Hernández, 2020.

En la *Figura 11*, se puede observar que la altura de la especie *Alpinia purpurata*, siempre fue mayor al de la *Heliconia psittacorum*, sin embargo, presentó menor crecimiento que la otra especie, debido a que la diferencia de altura promedio general desde el inicio de la adaptación hasta el fin del tratamiento para la ginger roja fue de 2,12 cm y para la *Heliconia psittacorum* fue de 3,37 cm. De igual forma, a lo largo del período que comprende desde el inicio hasta el fin de los tratamientos, la *Heliconia psittacorum* presentó un mayor crecimiento promedio general de 1,4 cm, comparada con el crecimiento de 0,91 cm de la que la especie *Alpinia purpurata*, y presentó mayor número de flores con un total de 20 al final de tratamiento.

Influencia del pH, conductividad y temperatura en el ARD utilizada

Los valores de pH del agua residual obtenidos en las dos rondas de tratamientos, oscilan entre 7,4 a 7,9, así determinando con la escala de pH, que los resultados arrojados presentan un efluente ligeramente básico. En ARDs e industriales los rangos de pH están comprendidos entre 6,5 y 8,5 las variaciones de estos intervalos normalmente son debidos a vertidos incontrolados de origen industrial(Crombet, Abalos, Rodríguez, & Pérez, 2016). Tomando como referencia la normativa colombiana(RAS, 2000), los resultados obtenidos se encuentran en los rangos óptimos para el desarrollo de los microorganismos, puesto que puede generar un aumento en el proceso de reproducción, y así tener un proceso de remoción más efectivo.

Las condiciones climáticas, principalmente la incidencia de luz solar y temperatura ambiente, influyen en la temperatura del agua. Algunos estudios muestran que los valores de temperatura en el agua residual son indicadores tanto para el crecimiento de las plantas como para la eficiencia de remoción y que el rango de temperatura que necesitan las bacterias para el desarrollo de la actividad metabólica para la degradación de la materia orgánica, oscila entre 20° a 30° C. Las 18 muestras tomadas durante la investigación, registraron un rango de temperatura de 20° a 26°C, en el cual durante la primera ronda de tratamiento la temperatura oscilo entre 20°C a 24°C y en la segunda ronda entre 24°C a 26°C,lo cual tiene una relación con los resultados de oxígeno disuelto; la cantidad de oxígeno que puede disolverse en el agua (OD), está íntimamente relacionada con la temperatura; si el agua se encuentra en temperaturas elevadas, es menor la presencia de oxígeno(Beltrán, 2013).

De acuerdo a la revisión bibliográfica, la conductividad para el vertimiento puntual de ARD sin fines de reúso, es una variable que no está regulada en la normatividad colombiana.

Tabla 6. Resultados de conductividad en la entrada y salida de los humedales flotantes

	TRH (días)	Humedal-Especie	Promedio entrada	Promedio de salida
Primera ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	187,06	182,20
		H1 <i>A.p.</i>		185,11
	6	H2 <i>H.p.</i>		258,00
		H2 <i>A.p.</i>		261,70
	8	H3 <i>H.p.</i>		221,71
		H3 <i>A.p.</i>		213,30
Segunda ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	175,06	211,01
		H1 <i>A.p.</i>		213,02
	6	H2 <i>H.p.</i>		275,66
		H2 <i>A.p.</i>		286,32
	8	H3 <i>H.p.</i>		212,33
		H3 <i>A.p.</i>		332,70

Nota. *H.p.* (*Heliconia psittacorum*), *A.p.* (*Alpinia purpurata*). Fuente: González & Hernández, 2020.

Los valores promedios de la conductividad en la primera ronda, se evidenciaron un promedio superior en las dos especies para el TRH de 6 días y en la segunda ronda se presentó un incremento notorio en el TRH de 8 días, esto suele suceder, ya que en el proceso fotosintético de las plantas abastecen gran cantidad de agua, haciendo que las sales presentes en el agua se concentren y así incrementen la conductividad (Monge, 2020), adicionalmente hay que considerar el período de verano en que se desarrolló el estudio.

Comparación de porcentajes de remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

En la siguiente tabla, se aprecia que los porcentajes de remoción de DBO₅ en la segunda ronda de tratamientos fueron mayores que los de la primera ronda, esto se relaciona al aumento de las concentraciones de entrada en la réplica, y que las balsas tuvieron más tiempo de permanecía en el agua residual, de acuerdo a lo indicado por el estudio realizado por (Thangavel & Subhuram, 2004), esto permite una mayor fijación y crecimiento de los microorganismos (biopelícula) en la estructura de soporte, permitiendo un mayor consumo de oxígeno para la degradación de sustancias orgánicas.

Tabla 7. Resultados de DBO₅ en la entrada y salida de los humedales flotantes

	TRH (días)	Humedal-Especie	Concentración de Entrada DBO ₅ mg/L	Concentración de Salida de DBO ₅ mg/L	% de remoción de DBO ₅
Primera ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	85,49	75,98	11,13
		H1 <i>A.p.</i>		71,87	15,93
	6	H2 <i>H.p.</i>		72,14	15,62
		H2 <i>A.p.</i>		55,76	34,78
	8	H3 <i>H.p.</i>		72,32	15,40
		H3 <i>A.p.</i>		68,04	31,83

Segunda ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	101,22	86,63	14,42
		H1 <i>A.p.</i>		83,48	17,53
	6	H2 <i>H.p.</i>	95,00	79,63	16,18
		H2 <i>A.p.</i>		60,66	36,14
	8	H3 <i>H.p.</i>	116,42	89,40	23,21
		H3 <i>A.p.</i>		77,05	33,82

Nota. *H.p.* (*Heliconia psittacorum*), *A.p.* (*Alpinia purpurata*). Fuente: González & Hernández, 2020.

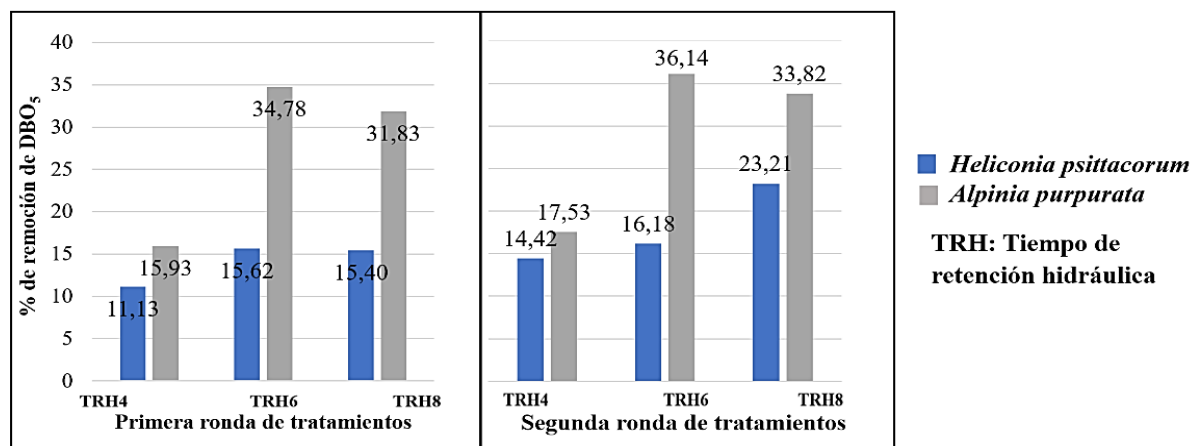


Figura 12. Gráfica de la comparación de porcentajes de remoción de DBO₅ en ambos tratamientos. Fuente: González & Hernández, 2020.

La especie *Alpinia purpurata* a comparación de la *Heliconia psittacorum*, demostró mayor remoción de DBO₅ en ambas rondas durante todos los TRH, cabe mencionar que, durante el trasplante de las plantas de las macetas a las balsas, se observó que la “ginger roja” contaba un sistema radicular más denso que la “Heliconia”, esto pudo influenciar las diferencias en remoción de DBO₅ y de los otros contaminantes en estudio. Los niveles más bajos de remoción se obtuvieron a los 4 días en ambas rondas y ambas especies. La remoción máxima tanto para la primera ronda y segunda ronda de tratamientos, fue de 34,78% y de 36,18% respectivamente, a los 6 días.

En el TRH de 8 días la especie *Alpinia purpurata* presentó una disminución con respecto a los 6 días en la primera y segunda ronda de tratamientos, de 2,95% y de 2,22%, correspondientemente. El decrecimiento puede indicar que durante este TRH los microorganismos en conjunto de las plantas, agotaron los nutrientes y el oxígeno disponible en el agua, por ende, tiende a disminuir el porcentaje de remoción (Brock, 1993) o existe la presencia de protozoos (considerados patógenos) que consumen el oxígeno para su crecimiento, sin embargo no tienen la capacidad de depurar materia orgánica (Martínez, 2014).

Para el caso de la *Heliconia psittacorum*, en la primera ronda y segunda ronda de tratamientos, los resultados más bajos de remoción se dieron para un TRH de 4 días, con porcentajes de 11,13% y 14,42%, con una diferencia de 3,29%. En el TRH de 6 días, el porcentaje fue de 15,62% siendo el más alto durante la primera ronda, pero menor que los obtenidos por la *Alpinia purpurata*, por una diferencia de 19,16%; a los 8 días el porcentaje fue de 15,40% siendo menor al obtenido en los 6 días con una diferencia de 0,22%, y con respecto a la otra especie en comparación, fue de 16,43%. Para la segunda ronda de tratamientos, los valores de remoción de la *Heliconia psittacorum* tuvieron un crecimiento exponencial. Para esta ronda el TRH de 6 días no fue el de mayor remoción (16,18%) como el obtenido en la primera ronda, a diferencia de este, el porcentaje de más alta remoción se presentó en el día 8 con un 23,21%, esto indica que la planta tuvo una estabilización en su relación con los microorganismos e incorporo los nutrientes para el crecimiento de su biomasa y floración, a comparación de la *Alpinia purpurata*.

La razón del porque la segunda ronda de tratamiento obtuvo mayores porcentajes de remoción, se infiere a que a lo largo del período, se presentó un mayor crecimiento conjunto entre las plantas y los microorganismos, siendo un indicativo que durante la primera ronda la estabilización de esta relación fue muy temprana, limitando que estos seres vivos desarrollen una simbiosis progresiva en cada uno de los humedales, dando como resultados menores resultados de consumo de oxígeno disuelto para la biodegradación de sustancias orgánicas, presentes en el ARD.

A partir de la experiencia en humedales flotantes, se encuentra el estudio con la especie *Juncus californianos* realizado por (Chavés & Mojica, 2015), donde el resultado de remoción de DBO₅ fue de 31%, lo cual son valores inferiores a comparación del máximo obtenido en el presente estudio a partir de la especie *Alpinia purpurata* con una eficiencia de 36,14% , pero fueron superiores a los obtenidos por la *Heliconia psittacorum* con un porcentaje de 23,21%; la diferencia puede ser influenciada por la especie utilizada, y por el tipo de agua a tratar, lo cual en el estudio en comparación, el agua provenía de escorrentía urbana, presentando valores máximos de concentración de entrada de 4 mg/L de DBO₅, considerándose como bajos.

Existe otros estudios en humedales artificiales, como el realizado por (Rodríguez & Vargas, 2018), que consistió en la implementación de humedales subsuperficiales de flujo horizontal a partir de la especie *Heliconia psittacorum*, obteniendo porcentajes de remoción de

DBO₅ de 86,50%, siendo mayor en un 50,36% al generado por la especie *Alpinia purpurata* y superior en un 63,21% por el obtenido por la *Heliconia psittacorum* en el presente estudio; esta superioridad se debe a que los humedales de flujo subsuperficial utilizan un volumen de sustrato mayor al utilizado en los humedales flotantes, lo cual permiten una mayor retención y degradación de contaminantes presentes en el agua residual, sin embargo el uso de esa biotecnología en cuerpos hídricos de grandes volúmenes, es muy costosa a comparación de los humedales flotantes debido al coste de mantenimiento del sistema, y de la compra y transporte de grandes cantidades de sustrato para rellenar el humedal a utilizar (Beascochea, Muñoz, & Fernández, 2010).

De acuerdo a todos los tratamientos de este estudio, las concentraciones de salida de DBO que se obtuvieron se encuentran en un rango entre 40,44 mg/L hasta 89,40 mg/L, cumpliendo con los valores de límites permisibles expuestos en la resolución 0631 de 2015, ya que no se superan los 90 mg/L.

Comparación de porcentajes de remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST)

En la siguiente tabla, se evidencia desde una comparación general, que los porcentajes de remoción de SST tienen un comportamiento similar a los obtenidos para la remoción de la DBO₅ observados en la Tabla 8, ya que los valores obtenidos en la segunda ronda de tratamientos fueron superiores a los de primera ronda, siendo directamente proporcional ambos parámetros, esto puede relacionarse de acuerdo a lo afirmado por (Martínez, 2014), que el crecimiento físico y químico de las plantas, efectúa la captura de oxígeno desde las hojas y tallos, hasta las raíces y sustrato, donde se encuentran los microorganismos que consumen el oxígeno atmosférico y el oxígeno disuelto en el agua, para la degradación de materia orgánica suspendida en el agua residual

Tabla 8. Resultados de la SST en la entrada y salida de los humedales flotantes

	TRH (días)	Humedal-Especie	Concentración de Entrada SST mg/L	Concentración de Salida SST mg/L	% de remoción de SST
Primera ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	3000	1900	36,67
		H1A <i>A.p.</i>		1650	45,00
	6	H2 <i>H.p.</i>		1400	53,33
		H2 <i>A.p.</i>		1300	56,67
	8	H3 <i>H.p.</i>		1425	52,50
		H3 <i>A.p.</i>		1450	51,66
Segunda ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	4000	2385	40,37
		H1 <i>A.p.</i>		2020	49,50

6	H2 <i>H.p.</i>	6695	2500	62,66
	H2 <i>A.p.</i>		2550	61,91
8	H3 <i>H.p.</i>	3230	1450	55,10
	H3 <i>A.p.</i>		1400	56,65

Nota. *H* (Humedal), *H.p* (*Heliconia psittacorum*), *A.p.* (*Alpinia purpurata*). Fuente: González & Hernández, 2020.

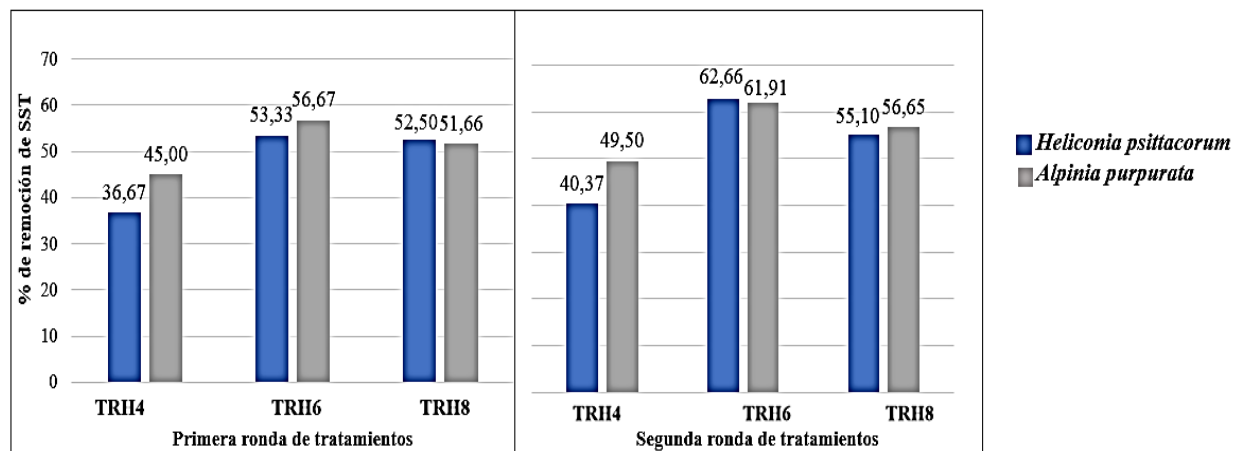


Figura 13. Gráfica de la comparación de porcentajes de remoción de SST en ambos tratamientos.

Fuente: González & Hernández, 2020.

En la primera ronda de tratamientos en los TRH de 4 y 6 días, la especie *Alpinia purpurata* demostró mayor remoción de SST comparada con la *Heliconia psittacorum* con una diferencia de 8,33% y 3,34%, respectivamente a cada día de tratamiento; para el día 8, la *Heliconia psittacorum* tuvo un porcentaje de remoción superior al de *Alpinia purpurata*, con una diferencia de 0,84% y presentó una pérdida insignificante de eficiencia de 0,83% en relación al día 6 que fue el tratamiento con mayor remoción para ambas especies. Los porcentajes de remoción en la segunda ronda de tratamiento, tuvieron un comportamiento similar al de la primera ronda, indicando que en el día 6 se removió mayor materia orgánica por parte de las plantas y microorganismos, con valores de 62,66% y 61,91%, para *Heliconia psittacorum* y *Alpinia purpurata* respectivamente. La variación en la eficiencia de remoción de los sólidos pudo verse influenciado por desprendimiento del sustrato, ya que la *Alpinia purpurata* demostró una mayor remoción de SST, pero se evidenció una alteración en el TRH 8 días de la primera ronda, y en el TRH de 6 días de la segunda ronda, la “*Heliconia*” presentó mayor remoción de SST.

Los altos valores de remoción en la segunda ronda esta netamente relacionado con la carga de materia orgánica encontrada en la concentración de entrada siendo superior a la analizada en la primera ronda, esto indica a partir de acuerdo al artículo científico realizado por (Zurita, De Anda, & White J, 2011), que la materia tiene una relación con los nutrientes, lo cual

beneficia el crecimiento de las plantas ya que permite incorporar materia a su biomasa y promueve el crecimiento de la biopelícula, mejorando la eficiencia en la degradación de contaminantes. A partir revisión bibliográfica sobre estudios experimentales con sistemas de humedales flotantes maduros, los porcentajes de remoción de SST oscilan entre el 54% al 92% (*Floating Island International* ®, 2011). Los porcentajes de mayor remoción obtenidos en los tratamientos de los humedales flotantes en el TRH de 6 días en la primera ronda por la especie *Alpinia purpurata* y en el TRH 6 y 8 días en la segunda ronda por ambas especies, se encuentran dentro este rango, resaltando la efectividad e importancia del sistema en la mejora de la calidad del agua residual.

Las concentraciones obtenidas de SST después de los tratamientos en los humedales flotantes, se encuentra en un rango entre 1300 mg/L y 2500 mg/L, los cuales superan el límite permisible de vertimiento de ARs (100 mg/L) establecido en la Resolución 0631 de 2015, considerándose los valores por encima de este límite como peligrosos para la conservación de ecosistemas.

Determinación de la Concentración de Entrada de los Nutrientes

Para la determinación de las concentraciones de NTK y P-PO₄ de las muestras de entrada de la segunda ronda de tratamientos, se presentaron algunas complicaciones en el procesamiento de las muestras en el laboratorio, debido a la contingencia a consecuencia de la pandemia de COVID-19, por ende se procedió a la determinación de una sola muestra de entrada para la segunda ronda de tratamientos; para esto se realizó la variación y desviación estándar o típica entre los valores de concentración de entrada DBO₅ de esta ronda.

σ^2 = Varianza poblacional; σ = Desviación estándar; x = dato; \bar{x} = media (104,21)

N = tamaño de la muestra

$$\sigma^2 = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{N}$$

$$\sigma^2 = \frac{(101,22 - 104,21)^2 + (95,00 - 104,21)^2 + (116,21 - 104,21)^2}{3}$$

$$\sigma^2 = 80,94; \sigma = 8,99$$

El resultado de la desviación estándar de 8,99 indica que los datos de concentración de DBO₅ no están tan dispersos de la media, este procedimiento permite simular un comportamiento similar a la concentración de entrada de los nutrientes.

Comparación de porcentajes de remoción de P-PO₄

En la siguiente tabla se aprecia que los porcentajes de remoción de P-PO₄ en la segunda ronda de tratamientos fueron mayores que los de la primera ronda, esto se debe a un mayor crecimiento de la biopelícula en la estructura de soporte, permitiendo un mayor consumo de oxígeno para la degradación de P-PO₄, sin embargo, si se mantiene los humedales flotantes en períodos prolongados con la misma concentración de entrada del ARD, la remoción será menor.

Tabla 9 Resultados de P-PO₄ en la entrada y salida de los humedales flotantes

	TRH (días)	Humedal-Especie	Concentración de Entrada (P-PO ₄) mg/L	Concentración de Salida (P-PO ₄) mg/L	% de remoción de (P-PO ₄)
Primera ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	2,64 *	2,56 *	39,56
		H1 <i>A.p.</i>		2,52 *	32,96
	6	H2 <i>H.p.</i>		3,54 *	-8,72
		H2 <i>A.p.</i>		3,36 *	-2,34
	8	H3 <i>H.p.</i>		1,62 *	29,14
		H3 <i>A.p.</i>		1,92 *	27,44
Segunda ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	3,23 *	0,36	88,77
		H1 <i>A.p.</i>		1,74	46,35
	6	H2 <i>H.p.</i>		2,82 *	12,87
		H2 <i>A.p.</i>		2,49 *	22,95
	8	H3 <i>H.p.</i>		2,29 *	39,64
		H3 <i>A.p.</i>		2,27 *	29,90

Nota. H (Humedal), H.p (Heliconia psittacorum), A.p. (Alpinia purpurata);(*) son las concentraciones que tuvieron que ser diluidas al 50% para poder ser determinadas por la curva patrón. Fuente: González & Hernández, 2020.

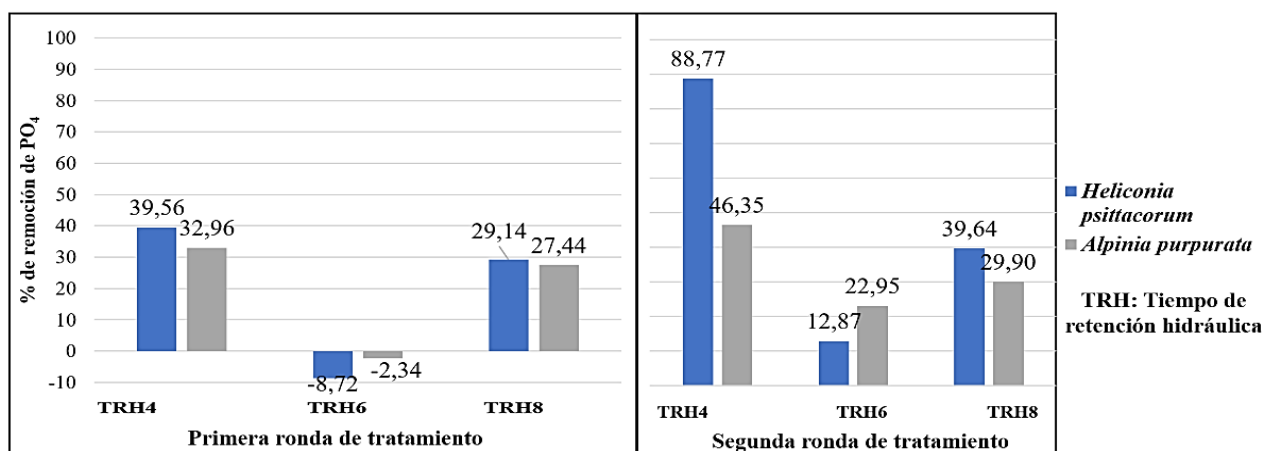


Figura 14. Gráfica de la comparación de porcentajes de remoción P-PO₄ en ambos tratamientos.

Fuente: González & Hernández, 2020.

El humedal que presentó mayor remoción fue el de TRH de 4 días en la segunda ronda de tratamientos con la *Heliconia psittacorum* alcanzado una eficiencia de 88,77%, en comparación a la otra especie (*Alpinia purpurata*) que obtuvo menor remoción (46,35%), siendo inferior en un 42,42%. La alta remoción a los 4 días se debe que el P-PO₄, a menor TRH se presenta una mayor concentración en suspensión en el ARD, lo cual es más eficiente la degradación y absorción de este compuesto, a partir de la vegetación y la biopelícula. Los porcentajes de remoción más bajos se presentaron en los humedales con TRH de 6 días en ambas rondas de tratamiento, de los cuales la *Heliconia psittacorum* presentó la eficiencia más baja de -8,72%, seguidamente por la *Alpinia purpurata* con -2,34%, ambos resultados ocurrieron en la primera ronda de tratamiento. Los valores negativos indican un aumento de la concentración de los ortofosfatos en el ARD, esto puede ser influenciado por diversas causas como: desprendimiento del sustrato que pudo aumentar la concentración del compuesto en el ARD o la muerte de las especies en los humedales, liberando fósforo; sin embargo, estas mismas especies durante el TRH de 6 días en la segunda ronda, evidenciaron una mejoría en la remoción llegando a 12,87% para la *Heliconia psittacorum* y 22,95% para la *Alpinia purpurata*, indicando que estas plantas presentaron complicaciones en la asimilación de los fosfatos durante la primera ronda, afectando la remoción de este nutriente, que los presentaron en el TRH de 8 días por ambas especies durante las dos rondas de tratamiento.

De acuerdo al estudio realizado por (Pérez M. E., 2009), se evidenció que los humedales con TRH muy largos, tendrá menor remoción debido a que los compuestos fosfatados se sedimentan, lo cual corresponde a lo evidenciado en este estudio. También indica que los humedales con TRH entre 5 a 10 días, la remoción del fósforo rara vez excederá de 1 a 3 mg/L, lo cual de acuerdo a las concentraciones de salida evidenciadas en la Tabla 13, se mantienen dentro de este rango a excepción de los humedales con TRH de 6 días de la primera ronda que presentaron un aumento de la concentración de P-PO₄ de 0,54 mg/L para *Heliconia psittacorum* y 0,36 mg/L para la especie *Alpinia purpurata* por encima del rango establecido por (Pérez M. E., 2009).

Comparación de porcentajes de remoción de NT

Las concentraciones que se encuentran en la siguiente tabla, corresponden a la sumatoria entre el NTK, nitritos y nitratos, para dar como resultado el nitrógeno total para cada muestra de ARD. La concentración de entrada de la segunda ronda de tratamiento para este caso, a diferencia de los

procedimientos de DBO₅ y SST, se utilizó una sola concentración para todos los humedales en dicha ronda. Los porcentajes en la mayoría fueron negativos, indicando un aumento del NT en el ARD tratada por los humedales flotantes. Los resultados de cada compuesto de NT, se pueden evidenciar en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados de NT, NTK, NO₃, NO₂

	TRH (días)	Humedal-Especie	Concentración inicial (NTK) mg/L	Concentración final (NTK) mg/L	Concentración inicial (NO ₂) mg/L	Concentración final (NO ₂) mg/L	Concentración inicial (NO ₃) mg/L	Concentración final (NO ₃) mg/L	Concentración Inicial de Nitrógeno Total (NTK+NO ₂ +NO ₃) mg/L	Concentración Final de Nitrógeno Total (NTK+NO ₂ +NO ₃) mg/L	Porcentaje de remoción
Primera ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	83,64	87,27	0,015	0,029	6,62	90,27	93,93	-4,04	
		H1 <i>A.p.</i>		85,45		0,011			10,91	96,37	-6,76
	6	H2 <i>H.p.</i>		94,55		0,004			10,52	105,07	-16,39
		H2 <i>A.p.</i>		85,45		0,010			8,31	93,78	-3,88
	8	H3 <i>H.p.</i>		116,36		0,010			24,16	140,53	-55,67
		H3 <i>A.p.</i>		163,64		0,004			6,62	170,26	-88,61
Segunda ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	103,64	81,82	0,010	0,010	10,90	114,56	93,13	18,71	
		H1 <i>A.p.</i>		126,36		0,008			11,04	137,41	-19,95
	6	H2 <i>H.p.</i>		80,00		0,013			36,36	116,38	-1,59
		H2 <i>A.p.</i>		122,73		0,007			25,58	148,32	-29,47
	8	H3 <i>H.p.</i>		70,00		0,005			7,66	77,67	32,20
		H3 <i>A.p.</i>		131,82		0,004			10,52	142,34	-24,26

Tabla 11. Resultados de NT en la entrada y salida de los humedales flotantes

	TRH (días)	Humedal-Especie	∑ Concentración de Entrada de Nitrógeno Total (NTK+NO ₂ +NO ₃) mg/L	∑ Concentración de Salida de Nitrógeno Total (NTK+NO ₂ +NO ₃) mg/L	(%) Porcentaje de remoción
Primera ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	90,27	93,93	-4,04
		H1 <i>A.p.</i>		96,37	-6,76
	6	H2 <i>H.p.</i>		105,07	-16,39
		H2 <i>A.p.</i>		93,78	-3,88
	8	H3 <i>H.p.</i>		140,53	-55,67
		H3 <i>A.p.</i>		170,26	-88,61
Segunda ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	114,56	93,13	18,71
		H1 <i>A.p.</i>		137,41	-19,95
	6	H2 <i>H.p.</i>		116,38	-1,59
		H2 <i>A.p.</i>		148,32	-29,47
	8	H3 <i>H.p.</i>		77,67	32,20
		H3 <i>A.p.</i>		142,34	-24,26

Nota. H (Humedal), *H.p.* (*Heliconia psittacorum*), *A.p.* (*Alpinia purpurata*). Fuente: González & Hernández, 2020.

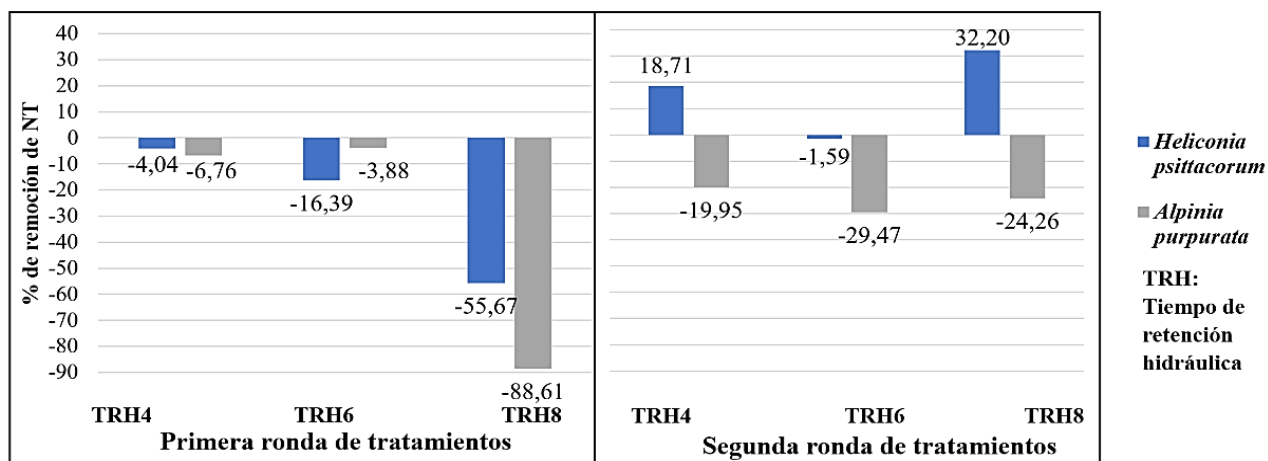


Figura 15. Gráfica de la comparación de porcentajes de remoción de NT en ambos tratamientos.

Fuente: González & Hernández, 2020.

A partir de la anterior gráfica, se aprecia que, durante la primera ronda de tratamientos, todos los resultados de remoción fueron negativos siendo el TRH de 8 días el de menor remoción, con -55,67% para *Heliconia psittacorum* y -88,61% de *Alpinia purpurata*; de igual forma, también se puede apreciar que a mayor TRH, así mismo aumentó la concentración de NT en el ARD. En la segunda ronda de tratamientos se presentó, mejoría en la remoción del contaminante en comparación a la primera ronda por parte de los humedales que contenían la especie *Heliconia psittacorum*, que obtuvo una remoción máxima de 32,20% en el TRH de 8 días; para la especie *Alpinia purpurata* durante la segunda ronda los porcentajes de remoción se mantuvieron negativos, aumentando la concentración de NT para los TRH de 4 y 6 días con respecto a la primera ronda, sin embargo, en el humedal con TRH de 8 días, disminuyó 64,35%.

La mayoría de los resultados presentados, indicaron una deficiente remoción de los NT, lo cual el aumento inusual de la concentración de salida con respecto a la concentración de entrada del nutriente NT, indicando que la presencia de los humedales aumentaron las concentraciones iniciales, siendo atribuido posiblemente al nitrógeno que contenía el sustrato y que fue liberado en el ARD al momento de la operación de los tratamientos, sin embargo, también es importante mencionar que en los sistemas de humedales se pueden encontrar bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico, siendo otra posible causa de que el nitrógeno fuera mayor al final de cada TRH, lo cual este nitrógeno es asimilado después por plantas para su crecimiento.

A partir del NTK obtenido, se pudo observar el nitrógeno capaz de ser nitrificado, en el cual durante la primera ronda se evidenció de acuerdo al Anexo 9, una nitrificación promedio

general por parte de la especie *Heliconia psittacorum* y *Alpinia purpurata* de 13,92% y 8,62%, respectivamente, en el que se destaca una mayor nitrificación en el TRH de 8 días en un 29,43% para la “*Heliconia*” y para “ginger roja” de 13,05% en el TRH de 4 días. Durante la segunda ronda de tratamiento la nitrificación promedio para *Heliconia psittacorum* fue de 17,79% y para *Alpinia purpurata* de 15,16%, se resalta los mayores porcentajes de nitrificación en el TRH de 6 días con valores de 36,37% y 25,58%, correspondientemente; en ambas rondas se refleja la superioridad de nitrificación que corresponde a la *Heliconia psittacorum*, esto se debe posiblemente que esta especie permite una mayor fijación de microorganismos en su sistema radicular, efectuando una alta nitrificación a diferencia de la especie *Alpinia purpurata*, además en general, los valores más altos de nitrificación corresponden a los períodos más largos de TRH.

En la remoción de NT, la especie *Heliconia psittacorum* en la segunda ronda y la *Alpinia purpurata* en el TRH de 8 días de la misma ronda, se demostró mejoría en la remoción del NT, indicando que el nitrógeno presente en el sustrato puede ser estabilizado en períodos más largos, debido a que la biopelícula requiere de altos valores de TRH para el crecimiento y asimilación del compuesto (You, Hsu, Chuang, & Ouyang, 2003). En casos de estudio en la remoción de NT, se ha encontrado que la depuración en lugares de climas tropicales con plantas emergentes, las eficiencias pueden alcanzar valores superiores de 30% ya que en temperaturas tropicales se facilita el crecimiento microbiano para la degradación y asimilación de contaminantes, y varía la eficiencia de acuerdo al tipo de macrófita (Tanner, Sukias, Park, Yates, & Headley, 2011), lo cual el único porcentaje que se encuentra en este rango fue el obtenido por la especie *Heliconia psittacorum*.

Los altos porcentajes de remoción del NT obtenidos por la *Heliconia psittacorum* se debe porque permiten una mejor absorción de este nutriente, ya que se ve reflejado en su crecimiento y floración evidenciado en la Tabla 7, siendo este mayor que el alcanzado por la especie *Alpinia purpurata*. Es importante resaltar que el nitrógeno es un compuesto importante para el desarrollo de la vida vegetal, desde el crecimiento de los rizomas hasta la floración y depende de la capacidad de absorción de cada planta para asimilarlo, sin embargo, en exceso puede convertirse en contaminante, disminuyendo la capacidad depuradora del sistema y disminuyendo el OD presente del agua, produciendo un impacto negativo en la vida acuática (Kadlec & Wallace, 2009).

Comparación de eficiencias en la remoción de contaminantes entre los humedales flotantes y las lagunas de estabilización en un TRH de 8 días

Para la comparación de eficiencias entre los humedales flotantes que contenían las macrófitas consideradas en el presente estudio, y las lagunas de estabilización que contenían la especie de tipo flotante *Lemma sp.* y solo una de ellas (Laguna B) poseía 8 unidades de pasto vetiver, se relacionaron los contaminantes removidos por m² en la segunda ronda de tratamientos (a excepción de los SST para ambos sistemas y el NT para la especie *Alpinia purpurata*) en el TRH de 8 días; es importante recalcar que las concentraciones de los nutrientes tanto de entrada como de salida de las lagunas se realizaron de manera general, sin especificar el tipo de laguna. Para la comparación de la eficiencia de remoción de manera proporcional, fue necesario relacionar las cargas superficiales y cargas orgánicas volumétricas de cada sistema en función de sus áreas y de las concentraciones de los contaminantes de entrada y salida, permitiendo una comparación directa de los porcentajes de contaminante removido por área (m²); los cálculos pertinentes se encuentran en el Anexo 10.

Comparación de eficiencias entre los sistemas para la remoción de DBO₅

En la siguiente tabla, se puede observar que las lagunas presentan una mayor carga superficial, es decir mayor volumen de ARD por área a los que se evidencia en los humedales flotantes, por lo que induce que la carga orgánica volumétrica (COV) tuvo el mismo comportamiento. El valor de las concentraciones de entrada de DBO₅ para las lagunas de estabilización fue de (0,116 kg/m³), siendo el mismo que se utilizó en la entrada de los humedales flotantes en la segunda ronda con TRH de 8 días, debido a que se tomó la muestra de agua de entrada al mismo tiempo del llenado de ambas lagunas.

Tabla 12. Porcentajes de remoción de DBO₅ por m² en el TRH de 8 días

	TRH (días)	Especie	Carga superficial (m ³ /m ² .d)	COV Entrada (Kg DBO ₅ / m ³ . día)	COV Salida (Kg DBO ₅ / m ³ . día)	% de remoción de DBO ₅ /m ²
Segunda ronda	8	H3 <i>H.p.</i>	0,0087	0,008	0,0062	22,5
		H3 <i>A.p.</i>			0,0053	33,75
Laguna (A)		<i>Lemma sp</i>			10,36	48,30
Laguna (B)	8	<i>Lemma sp</i> - 8 unidades de Pasto vetiver	0,246	20,04	7,43	62,92

Nota. H (Humedal), H.p (*Heliconia psittacorum*), A.p. (*Alpinia purpurata*). Fuente: González & Hernández, 2020.

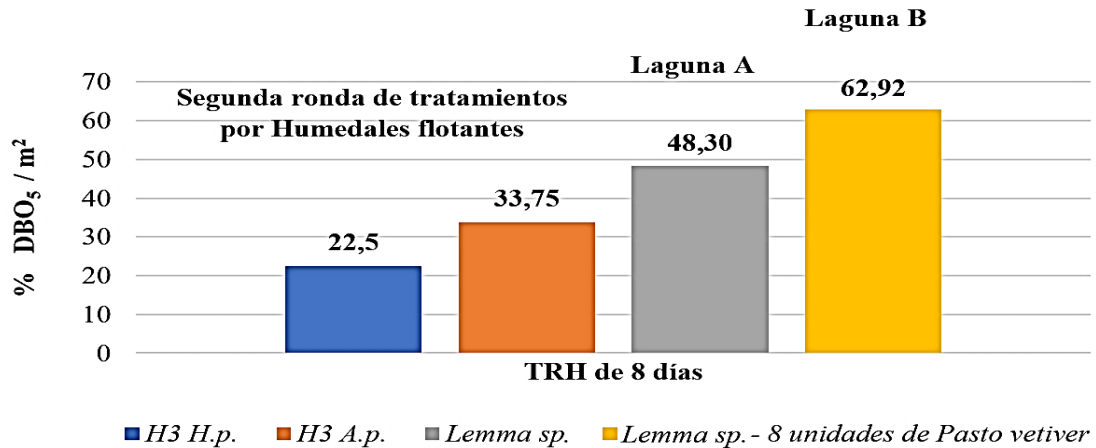


Figura 16. Gráfica de Porcentaje de remoción DBO₅/m² en el TRH de 8 días, lagunas de estabilización vs humedales flotantes. Fuente: González & Hernández, 2020.

Los resultados de remoción observados en la anterior gráfica, corresponden a la DBO₅ removida por m² de cada sistema; de acuerdo a lo anterior, se evidencia que la Laguna B presenta mayor porcentaje de remoción que la Laguna A, con una diferencia de 14,62%, esto se debe a que además de compartir la misma especie *Lemma sp.* con la Laguna A, poseía unidades de pasto vetiver lo cual se atribuye al aumento en la remoción de la DBO₅. Cabe resaltar que el porcentaje de DBO₅ de la Laguna B, puede verse afectado por sus problemas de adaptación. La Laguna A con presencia de *Lemma sp.*, presentó una mayor remoción comparada con los tratamientos de humedales flotantes en el TRH de 8 días, sin embargo, en teoría, el uso de esta especie con *Alpinia purpurata* o con *Heliconia psittacorum*, alcanzarían remociones hasta de 82,05% y 70,80%, siendo mayor en un 19,13% y 7,88 respectivamente, en comparación a la remoción obtenida en la Laguna B con presencia de Pasto vetiver en la remoción de DBO₅.

Comparación de eficiencias entre los sistemas para la remoción de SST.

Los resultados obtenidos en la remoción de SST por las lagunas de estabilización fueron deficientes debido a que se encontró altas concentraciones de SST después del tratamiento, por ende, los porcentajes de remoción fueron negativos, lo cual no fue necesario calcular los SST removidos por m².

Tabla 13. Porcentajes de remoción de SST por m² en el TRH de 8 días

	TRH (días)	Humedal-Especie	Concentración de Entrada SST mg/L	Concentración de Salida SST mg/L	% de remoción de SST
Segunda ronda	8	H3 <i>H.p.</i>	3230	1450	55,10
		H3 <i>A.p.</i>		1400	56,65
Laguna A		<i>Lemma sp.</i>		401050	-12316,40
Laguna B		<i>Lemma sp.</i> - 8 unidades de pasto vetiver		353150	-10833,40

Nota. H (Humedal), H.p (*Heliconia psittacorum*), A.p. (*Alpinia purpurata*). Fuente: González & Hernández, 2020.

La deficiencia demostrada en la remoción por las especies contenidas en las lagunas supera en un 12416,40% (Laguna A) y 10933,43% (Laguna B) la concentración de entrada, esto se debe a que, durante el procesamiento de las muestras para la realización de las pruebas de SST, se encontró que la muestra de agua contenía una microalga que daba tonalidad verde al agua residual (Figura 20), generando la deficiencia del sistema en la remoción de SST, lo cual indica que hay una alta presencia de esta microalga que se debe al exceso de nutrientes en las lagunas y que pueden reducir la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, afectando la actividad microbiana para la degradación de materia orgánica (Diersing, 2009). El resultado porcentual en la remoción de SST obtenido en el tratamiento en la Laguna B, fue superior al de la Laguna A esto puede verse influenciado por la presencia de las 8 unidades de vegetación emergente (pasto vetiver), ya que la sombra que genera permite una reducción del crecimiento de algas, tal como lo afirma (Martínez, 2014), en su estudio.



Figura 17. Tonalidad verde por presencia de algas; muestras tomadas de las lagunas de estabilización. Fuente: González & Hernández, 2020.

En los humedales flotantes, durante los tratamientos no se encontró presencia de algas, esto debido a que las balsas ocupan gran parte del área del humedal, impidiendo en mayor medida la entrada de los rayos del sol incentivan el desarrollo de la fotosíntesis y su crecimiento en los cuerpos hídricos; por lo que los resultados de remoción de SST en los humedales flotantes fueron superiores al obtenido en las lagunas de estabilización.

Comparación de eficiencias entre los sistemas para la remoción de P-PO₄

La siguiente tabla se observa que las lagunas presentan una mayor carga orgánica por m³ tanto en la entrada como en la salida, que la obtenida por los humedales flotantes. El valor de las concentraciones de entrada de P-PO₄ para las lagunas de estabilización fue de (0,00323 kg/m³), siendo el mismo que se utilizó en la entrada de los humedales flotantes en la segunda ronda en todos los TRH.

Tabla 14. Porcentajes de remoción de P-PO₄ por m² en el TRH de 8 días

	TRH (días)	Especie	COV Entrada (Kg P-PO ₄ / m ³ . día)	COV Salida (Kg P-PO ₄ / m ³ . día)	% de remoción de P-PO ₄ /m ²
Segunda ronda	8	H3 H.p.	0,00022	0,00013	40,90
		H3 A.p.		0,00015	31,81
Lagunas	8	<i>Lemma sp</i>			
		<i>Lemma sp</i> - 8 unidades de pasto de pasto vetiver	1,11	0,76	31,53

Nota. H (Humedal), H.p (Heliconia psittacorum), A.p. (Alpinia purpurata). Fuente: González & Hernández, 2020.

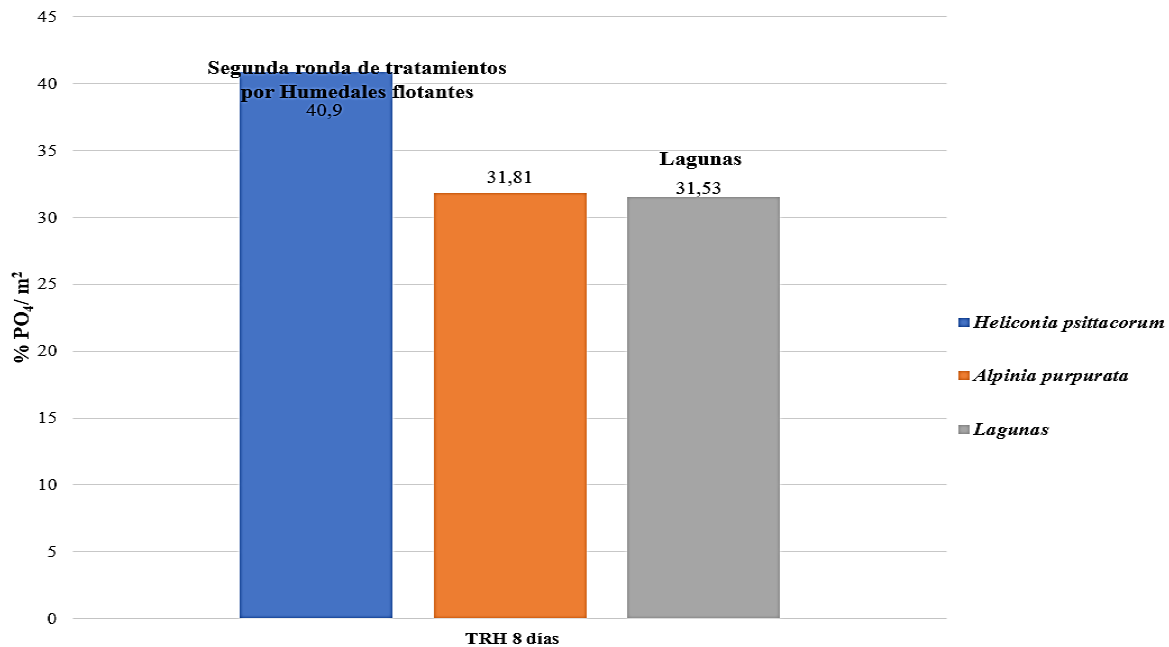


Figura 18. Porcentaje de remoción de P-PO₄/m² en el TRH de 8 días, lagunas de estabilización vs humedales flotantes. Fuente: González & Hernández, 2020.

A partir de la Figura 21, se aprecia que el humedal con la especie *Heliconia psittacorum* obtuvo la mayor remoción de P-PO₄/m² en el TRH de 8 días, en comparación al humedal de la especie *Alpinia purpurata* y de las lagunas, siendo superior en un 9,09% y 9,37%, respectivamente. El porcentaje de las lagunas que corresponden a las dos lagunas de estabilización (Laguna A y Laguna B), son las que se identificaron en la comparación de DBO₅ y SST, sin embargo para este caso, por diversos limitantes se determinó una sola salida de ARD para estas dos lagunas, que poseen la especie *Lemma sp.* y sola una de ellas posee pocas unidades de pasto vetiver, siendo irrealizable la comparación específica entre la remoción influenciada por el pasto vetiver y la de los humedales con las especies vegetales, por ende en términos generales, ambas especies consideradas en los humedales flotantes, obtuvieron una remoción superior a la realizada por las lagunas de estabilización.

Comparación de eficiencias entre los sistemas para la remoción de NT

Para esta comparación no se tuvo en cuenta las concentraciones de salida proveniente del tratamiento realizado por la especie *Alpinia purpurata*, debido a que los resultados fueron negativos lo cual no es factible comparar con los obtenidos por la laguna, ya que este sistema si se obtuvo una remoción positiva.

Tabla 15. Porcentajes de remoción de NT por m² en el TRH de 8 días

	TRH (días)	Especie	COV Entrada (Kg NT/ m ³ . día)	COV Salida (Kg NT/ m ³ . día)	% de remoción de NT/m ²
Segunda ronda	8	H3 H.p.	0,0079	0,0053	32,91
Lagunas	8	<i>Lemma sp</i> - <i>Lemma sp</i> - 8 unidades de <i>Pasto vetiver</i>	39,39	30,34	22,97

Nota. H (Humedal), H.p (*Heliconia psittacorum*). Fuente: González & Hernández, 2020.

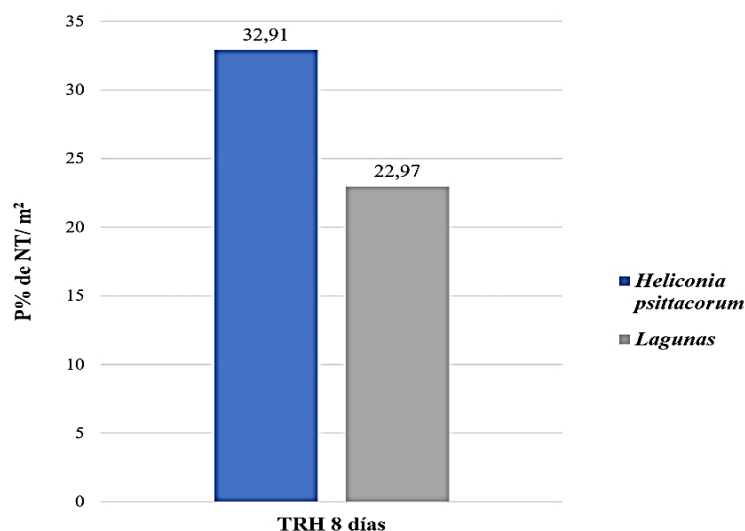


Figura 19. Porcentaje de remoción de NT/m² en el TRH de 8 días, lagunas de estabilización vs humedal flotante. Fuente: González & Hernández, 2020.

El humedal flotante con la especie *Heliconia psittacorum* presentó mayor remoción que las lagunas de estabilización, siendo superior en 9,94%, esto puede indicar que a los humedales flotantes en condiciones similares, obtengan mayor remoción de NT/m², debido a que las raíces de las macrófitas, el sustrato y la estructura flotante, permiten una mayor fijación de la biopelícula a comparación de los sistemas no plantados, lo cual hacen más eficiente la degradación y consumo de materia orgánica, que los microorganismos que están contenidos en materia en suspensión y no están dentro de una comunidad de microorganismos.

Los porcentajes de remoción de nutrientes por m² (P-PO₄ y NT) obtenidos por las lagunas de estabilización, fueron inferiores a comparación de los resultados alcanzados por los humedales flotantes, de acuerdo a lo evidenciado en la práctica de campo, que dentro de las lagunas se

presenta una alta proliferación de microalgas, ya que estas crecen más rápido y consumen gran parte de los nutrientes disminuyendo la remoción para las especies vegetales (Núñez, y otros, 2011), sin embargo, esta microalga tiene una vida muy corta y en su descomposición liberan gran parte de los nutrientes ya consumidos, incorporándolos nuevamente al sistema y saturando la capacidad de depuración, aumentando la concentración de estos compuestos (Lathrop, Carpenter, Panuska, & Craig, 1998).

Para la posible implementación de los humedales flotantes en la laguna de estabilización, existen estudios como el realizado por (INECOL, 2016) y (Carvajal, Zapattini, & Quintero, 2018), que demuestra la viabilidad en la optimización de las eficiencias en la depuración de volúmenes significativos de agua ARD, a partir de la implementación entre lagunas de estabilización y humedales artificiales superficiales. De igual forma, el uso híbrido entre dos especies diferentes, tipo flotante y de tipo emergente, también es óptimo en la remoción de contaminantes, lo cual no afecta la absorción de ninguna planta ni la disponibilidad de nutrientes tal como ocurrió en el estudio realizado por (Núñez, y otros, 2011).

Análisis estadístico

Para este análisis se tuvo en cuenta los porcentajes de remoción de los cuatro contaminantes considerados en el presente estudio, a partir de los humedales flotantes con su respectiva especie.

Tabla 16. Estadísticos descriptivos Heliconia psittacorum

<i>Heliconia psittacorum</i>		% de remoción de DBO ₅	% de remoción de SST	% de remoción de P-PO ₄	% de remoción de NT
Primera Ronda	Varianza	6,42	88,14	645,40	726,78
	Desviación	2,53	9,39	25,40	26,96
	Media	14,05	47,50	19,99	-25,37
Segunda Ronda	Varianza	21,64	128,50	1482,01	289,31
	Desviación	4,65	11,34	38,50	17,01
	Media	17,94	52,71	47,09	16,44

Fuente: González & Hernández, 2020 a partir del software IBM SPSS statistics

Como se aprecia en la tabla, al considerar la variación de los distintos porcentajes de remoción correspondientes a *Heliconia psittacorum* y teniendo en cuenta los promedio, se considera que tanto para DBO₅ y SST la variación no es tan alta; sin embargo, sí aumenta de la primera ronda a la segunda. Por otro lado, para los porcentajes de remoción P-PO₄ y NT, la variación es alta para ambas rondas.

Tabla 17. Estadísticos descriptivos *Alpinia purpurata*

<i>Alpinia purpurata</i>		% de remoción de DBO ₅	% de remoción de SST	% de remoción de P-PO ₄	% de remoción de NT
Primera Ronda	Varianza	102,80	34,27	360,58	2314,58
	Desviación	10,14	5,85	18,99	48,11
	Media	27,51	51,11	19,35	-33,08
Segunda Ronda	Varianza	102,82	38,80	144,41	22,73
	Desviación	10,14	6,23	12,02	4,77
	Media	29,16	56,02	33,07	-24,56

Fuente: González & Hernández, 2020 a partir del software IBM SPSS statistics

Al igual que en la tabla anterior, se puede apreciar que, para la *Alpinia purpurata*, los porcentajes de remoción DBO₅ y SST son bajos en ambas rondas, manteniéndose estables, en cambio para P-PO₄ y NT, la variación baja de la primera a la segunda ronda. Mediante los gráficos de dispersión por cada una de las rondas tanto para *Heliconia psittacorum* como *Alpinia purpurata*, permiten notar, qué relación guardan los porcentajes de remoción con respecto al TRH, asimismo se presentan las tablas que recopilan los resultados de las correlaciones entre las diferentes variables y TRH; con lo ya mencionado anteriormente se establece que el humedal con mayor eficiencia en la remoción de los cuatro contaminantes estudiados, es el que contiene la especie *Heliconia psittacorum* en el TRH de 4 días de la segunda ronda de tratamiento, con un porcentaje de remoción de 40,56%, seguidamente del TRH de 8 días de la misma ronda, con un porcentaje de remoción de 37,53% (ver tabla 18).

Tabla 18. Porcentajes de remoción de contaminantes

	TRH (días)	Humedal-Especie	% de remoción de DBO ₅	% de remoción de SST	% de remoción de P-PO ₄	% de remoción de NT	Eficiencia de remoción de contaminantes
Primera ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	11,13	36,67	39,56	-4,04	20,83
		H1 <i>A.p.</i>	15,93	45,00	32,96	-6,76	21,78
	6	H2 <i>H.p.</i>	15,62	53,33	-8,72	-16,39	10,96
		H2 <i>A.p.</i>	34,78	56,67	-2,34	-3,88	21,31
	8	H3 <i>H.p.</i>	15,40	52,50	29,14	-55,67	10,34
		H3 <i>A.p.</i>	31,83	51,66	27,44	-88,61	5,58
Segunda ronda	4	H1 <i>H.p.</i>	14,42	40,37	88,77	18,71	40,57
		H1 <i>A.p.</i>	17,53	49,50	46,35	-19,95	23,36
	6	H2 <i>H.p.</i>	16,18	62,66	12,87	-1,59	22,53

8	H2 A.p.	36,14	61,91	22,95	-29,47	22,88
	H3 H.p.	23,21	55,10	39,64	32,20	37,54
	H3 A.p.	33,82	56,65	29,90	-24,26	24,03

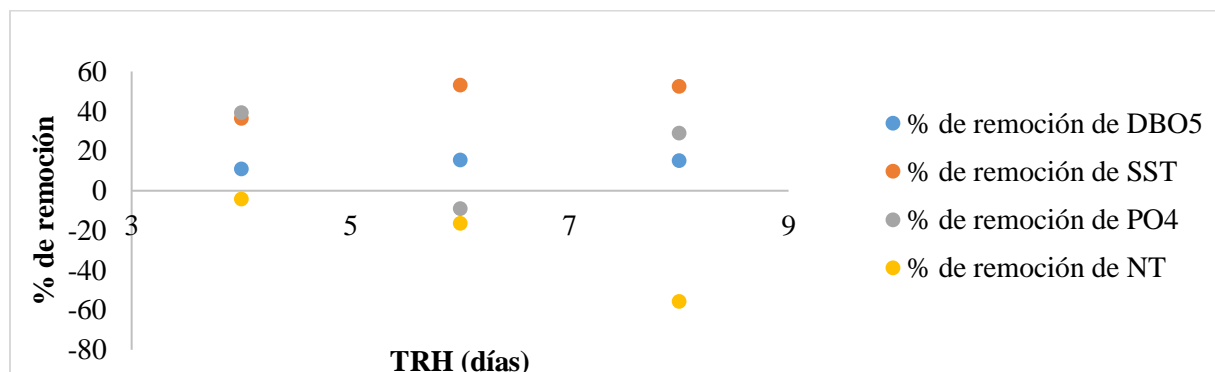


Figura 20. Diagrama de dispersión % de remoción *Heliconia psittacorum* primera ronda. Fuente: González & Hernández, 2020.

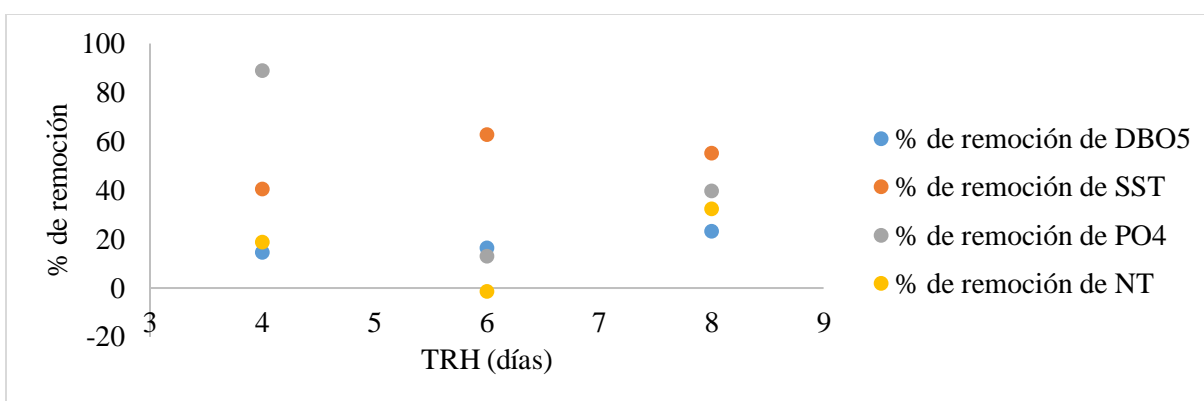


Figura 21. Diagrama de dispersión % de remoción *Heliconia psittacorum* segunda ronda. Fuente: González & Hernández, 2020.

Tabla 19. Correlaciones para *Heliconia psittacorum*

Primera ronda- <i>Heliconia psittacorum</i>		TRH (días)	Segunda ronda- <i>Heliconia psittacorum</i>		TRH (días)
TRH (días)	Correlación de Pearson	1	TRH (días)	Correlación de Pearson	1
% de remoción de DBO ₅	Correlación de Pearson	0,843	% de remoción de DBO ₅	Correlación de Pearson	0,945
% de remoción de SST	Correlación de Pearson	0,843	% de remoción de SST	Correlación de Pearson	0,65

% de remoción de P-PO ₄	Correlación de Pearson	-0,205	% de remoción de P-PO ₄	Correlación de Pearson	-0,638
% de remoción de NT	Correlación de Pearson	-0,958	% de remoción de NT	Correlación de Pearson	0,397

Fuente: González & Hernández, 2020 a partir del software IBM SPSS statistics.

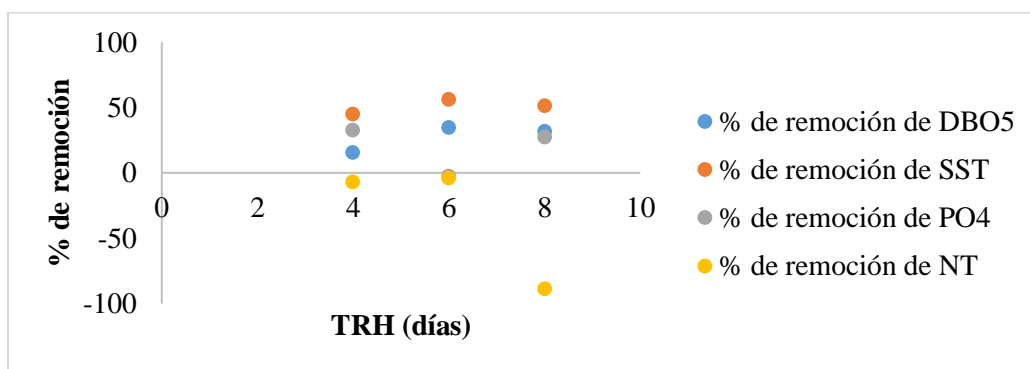


Figura 22. Diagrama de dispersión % de remoción *Alpinia purpurata* primera ronda. Fuente: González & Hernández, 2020.

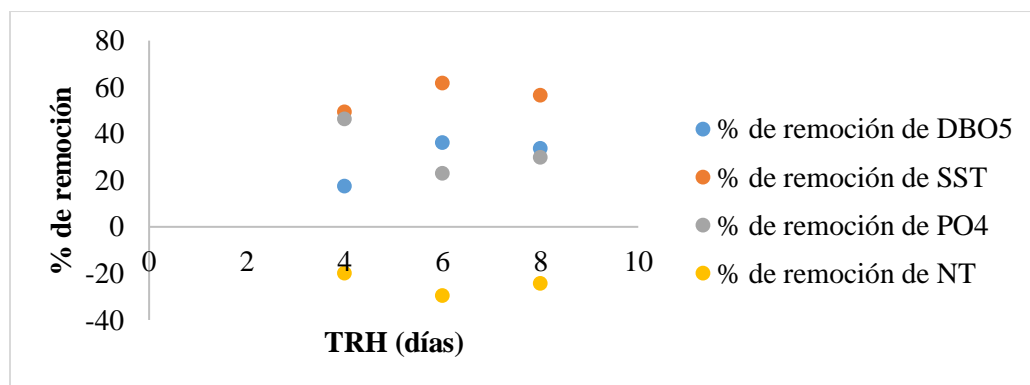


Figura 23. Diagrama de dispersión % de remoción *Alpinia purpurata* segunda ronda. Fuente: González & Hernández, 2020.

Tabla 20. Correlaciones para *Alpinia purpurata*

Primera ronda- <i>Alpinia purpurata</i>		TRH (días)	Segunda ronda- <i>Alpinia purpurata</i>		TRH (días)
TRH (días)	Correlación de Pearson	1	TRH (días)	Correlación de Pearson	1
% de remoción de DBO ₅	Correlación de Pearson	0,784	% de remoción de DBO ₅	Correlación de Pearson	0,803

% de remoción de SST	Correlación de Pearson	0,569	% de remoción de SST	Correlación de Pearson	0,574
% de remoción de P-PO ₄	Correlación de Pearson	-0,145	% de remoción de P-PO ₄	Correlación de Pearson	-0,684
% de remoción de NT	Correlación de Pearson	-0,851	% de remoción de NT	Correlación de Pearson	-0,452

Fuente: González & Hernández, 2020 a partir del software IBM SPSS statistics.

Para una interpretación rápida y eficiente de los coeficientes de correlación presentados en estas tablas, es importante señalar que se analizó la relación entre TRH (X) y cada uno de los porcentajes de remoción (Yi), por lo tanto, se aprecian cuatro índices de correlación de Pearson, tanto para *Heliconia psittacorum* como para *Alpinia purpurata* por cada una de las rondas. Teniendo en cuenta los porcentajes obtenidos en las interpretaciones de las correlaciones de Pearson, se evidencio altos valores para los porcentajes de remoción DBO₅, SST en los TRH de las dos especies, donde varían entre 0,7 y 0,9, esto quiere decir que hay una relación positiva entre las variables mencionadas anteriormente, ya que a mayor TRH se tendrá una mayor remoción de materia orgánica, como se observó en los resultados experimentales, por lo contrario los valores negativos en PO₄, NT, no tienen relación, puesto que no hay un incremento en la remoción al aumentar el TRH.

Recomendaciones

Para el análisis de ARD con presencia de microalgas, se recomienda en la determinación de P-PO₄, NTK, NO₃ y NO₂, filtrar las muestras de agua hasta notar un color traslucido en el agua residual, ya que la influencia del coloramiento verdoso a causa de las microalgas puede causar interferencias en la determinación de los nutrientes.

A pesar que los humedales flotantes demostraron alta remoción de los SST, no cumplen con el límite permisible de (100 mg/L) expuesto en la resolución 0631 de 2015, por lo cual se recomienda para la posible ejecución de los humedales flotantes sobre las lagunas de estabilización, la implementación de filtros o sedimentador en la salida del ARD de las lagunas de estabilización.

Para la implementación de humedales flotantes, se recomienda el mantenimiento de las plantas emergentes cortando las hojas y tallos en mal estado con el fin de evitar que se vuelvan

vulnerables a plagas, asimismo eliminar plantas parasitas que puedan influir en la reducción de nutrientes para el crecimiento de las plantas emergentes.

De acuerdo a los resultados obtenidos entre la dos especies ornamentales, la *Heliconia psittacorum* presentó mayor porcentaje de remoción durante la segunda ronda de tratamientos en el TRH de 4 días seguidamente el de 8 días, con una diferencia no tan significativa, sin embargo, se recomienda desde un concepto ambiental para la posible implementación a escala real, el uso del humedal flotante con la especie *Heliconia psittacorum* en un TRH de 8 días, ya que permite una mayor fijación de la biopelícula al humedal flotante y un mejor porcentaje de degradación de remoción de SST y DBO₅.

Bibliografía

- Arias, C. (2018). Capítulo II: Diseño y Construcción de Humedales para el Tratamiento de Aguas. En G. Vidal, & S. Hormazába, *Humedales Construidos: Diseño y Operación* (pág. 59). Aarhus, Dinamarca: Universidad de Concepción. Obtenido de http://www.eula.cl/giba/wp-content/uploads/2018/09/HUMEDALES-CONSTRUIDOS-_DISE%C3%91O-Y-OPERACI%C3%93N.pdf
- Beascoechea, E., Muñoz, J., & Fernández, D. (2010). *Manuel de Fitodepuración: Nuevos filtros verdes de macrófitas en flotación para la Cuenca del Mediterránea*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid-EDITA.
- Beltrán, R. (2013). *Guía de Métodos de Biorremediación para la recuperación de suelos contaminados con Hidrocarburos. Tesis de postgrado*. Bogotá: Universidad Libre. Obtenido de <https://repository.unilivre.edu.co/bitstream/handle/10901/10607/TRABAJO%20FINAL%20cd.pdf?sequence=1>
- Brock, T. &. (1993). *Microbiología* (Sexta ed. ed.). Ciudad de México, México: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.
- Carvajal, A., Zapattini, C., & Quintero, C. (2018). Humedales Artificiales, una alternativa para la depuración de Aguas Residuales en el Municipio de Mizque, Bolivia. *DisTecD. Diseño y Tecnología para el Desarrollo*, 88-108.
- Chavés, C. A., & Mojica, J. P. (2015). *Estudio de humedales flotantes para la mejora de calidad de agua de escorrentía. caso: edificio de parqueaderos de la Pontificia Universidad Javeriana. Tesis de pregrado*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/21397/ChavesTequiaCamiloAndres2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Crombet, S., Abalos, A., Rodríguez, S., & Pérez, N. (2016). Evaluación del tratamiento anaerobio de las aguas residuales de una comunidad universitaria. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(1), 49-56.
- Diersing, N. (Mayo de 2009). NOAA. Recuperado el 29 de Mayo de 2020, de Phytoplankton Blooms: The Basics: <https://projects.iq.harvard.edu/files/climate/files/phytoplankton.pdf>
- F.Breen, P. (1990). A mass balance method for assessing the potential of artificial wetlands for wastewater treatment. *Water Research*, 24, 689-697.
- Floating Island International ®. (Agosto de 2011). *Floating Treatment Wetlands to Mitigate Lake Eutrophication: Enhanced Circulation and Nutrient Uptake Expand Fish Habitat*. Obtenido de <http://midwestfloatingisland.com/wp-content/uploads/2015/05/Floating-Treatment-Wetlands-to-Mitigate-Lake-Eutrophication-Enhanced-Circulation-and-Nutrient-Uptake-Expand-Fish-Habitat.pdf>

- IDEAM. (2007). *Protocolo de muestreo extraído de apartes de: Toma de muestras de aguas superficiales*. República de Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- IDEAM. (2016). *Metodología para la evaluación aproximada de la carga contaminante*. Bogotá: IDEAM.
- IDEAM. (14 de Mayo de 2020). *Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 días, Incubación y Electrometría*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Bioqu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/ca6e1594-4217-4aa3-9627-d60e5c077dfa>
- IDEAM. (24 de Mayo de 2020). *Sólidos suspendidos totales en agua secados a 103-105°C*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Suspendidos+Totales+en+aguas.pdf/f02b4c7f-5b8b-4b0a-803a-1958aac1179c>
- INECOL. (10 de Octubre de 2016). Humedales flotantes, una solución para la descontaminación de los lagos mexicanos. *iagua*, págs. <https://www.iagua.es/noticias/mexico/conacyt/16/10/28/humedales-flotantes-solucion-descontaminacion-lagos-mexicanos>.
- Kadlec, R., & Wallace, S. (2009). *Treatment wetlands* (Vol. 2). Boca Raton, Florida, Estados Unidos: CRC Press, Taylor & Francies Group.
- Lathrop, R., Carpenter, J., Panuska, P., & Craig, S. (1998). Phosphorus loading reductions needed to control blue-green algal blooms in Lake Mendota. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55(5), 1169-1178.
- Leal, R. (2012). *Plantas exóticas: heliconias Comunidad Bogotá Cachivera*. Mitú, Vaupés, Colombia.
- Marco A. Belmont a, *. E. (28 de 10 de 2004). *Sciencedirec*. Obtenido de <https://scihub.tw/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857404001533>
- Martínez, P. A. (2014). *Evaluación y diseño de un humedal construido para la depuración de aguas residuales domésticas*. Tesis doctoral. Murcia, España: Universidad de Murcia.
- Monge, M. (14 de Abril de 2020). *iagua*. Obtenido de Interpretación de un análisis de agua: <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/interpretacion-analisis-agua-riego>
- Mulamoottil, G., McBean, E. A., & Rovers, F. (1997). *Constructed Wetlands for the Treatment of Lanfill Leachates*. Boca Raton: Lewis Publishers.
- Núñez, M., Cárdenas, C., Ramírez, Y., Rincón, S., Saules, L., & Morales, E. (2011). Removal of nitrogen and phosphorus by *Typha dominguensis* and *Lemna* sp. in laboratory scale constructed wetlands. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 34(3). Obtenido de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702011000300007

- Núñez, M., Cárdenas, C., Yoleivis, R., Rincón, S., Saules, L., & Morales, E. (Diciembre de 2011). Removal of nitrogen and phosphorus by *Typha dominguensis* and *Lemna* sp. in laboratory scale constructed wetlands. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 34(3). Obtenido de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702011000300007
- Peña Salamanca, E. J., Madera Parra, C. A., Sánchez, J. M., & Javier, M. V. (Diciembre de 2013). Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *Heliconia Psittacorum*. *Academica Colombiana de Ciencia*, XXXVII(145). Obtenido de http://sci-hub.tw/http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082013000400004
- Pérez, M. E. (2009). *Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango. Tesis Doctoral*. Centro de Investigación de Materiales Avanzados. Chihuahua: CIMAR.
- Rangel, J. O. (1995). *Flora Orinoquense*. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Obtenido de http://bdigital.unal.edu.co/7325/1/FLORA_ORINOQUENSE.pdf
- RAS. (2000). *Título E: Tratamiento de aguas residuales*. Bogotá D.C.: Ministerio de Desarrollo Económico: Dirección de Agua potable y saneamiento básico.
- Rodríguez, J., G.E., L, G., & L.F., y. (25 de Mayo de 2009). Estudio de comparación de tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales. *Tecnologías y Ciencia del Agua*, 1(1). Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-24222010000100005&lng=es&nrm=iso
- Rodríguez, S. D., & Vargas, Y. (2018). *Evaluación del potencial de humedales artificiales piloto, implementados con la especie Heliconia Psittacorum, en la remediación de aguas residuales domésticas de bajo caudal para zonas rurales del piedemonte llanero. Tesis de pregrado*. Villavicencio: Universidad Santo Tomás.
- Tanner, C., Sukias, J., Park, J., Yates, C., & Headley, T. (2011). Floating treatment wetlands: a new tool for nutrient management in lakes and waterways. *Helmholtz Centre for Environmental Research*, 1(1), 11-115.
- Thangavel, P., & Subhram, C. (2004). Phytoextraction: Role of hyper accumulators in metal contaminated soils. *Indian National Science Academy*, 1, 109-130.
- You, S., Hsu, C., Chuang, S., & Ouyang, C. (2003). Nitrification efficiency and nitrifying bacteria abundance in combined AS RBC and A20 systems. *Water Research*, 37, 2281-2290.
- Zurita, F. B., De Anda, M., & White J, J. (2011). Seeking a way to promote the use of constructed wetlands for domestic wastewater treatment in developing countries. *Water Science and Technology*, 63(4), 654-659.

