



# Evaluación de la eficiencia de *Pontederia crassipes* en la remoción de cianuro de aguas residuales de la industria termoquímica

## Evaluation of the efficiency of *Pontederia crassipes* in the removal of wastewater cyanide from the thermochemical industry

Yeraldin Bermúdez-Ramírez<sup>1</sup> ; Luis Eduardo Beltrán-García<sup>2\*</sup> ; Diana Fúquene-Yate<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A. Bogotá, Colombia; e-mail: ybermudez@udca.edu.co

<sup>2</sup>Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Facultad de Ciencias Ambientales y de la Sostenibilidad. Bogotá, Colombia; e-mail: luis.ebeltran@udca.edu.co

<sup>3</sup>Universidad Piloto de Colombia, Facultad de Ciencias Ambientales. Bogotá, Colombia; e-mail: diana-fuquene@unipiloto.edu.co

\*autor de correspondencia. e-mail: luis.ebeltran@udca.edu.co

**Cómo citar:** Bermúdez-Ramírez, Y.; Beltrán-García, L.E.; Fúquene-Yate, D. 2024. Evaluación de la eficiencia de *Pontederia crassipes* en la remoción de cianuro de aguas residuales de la industria termoquímica. Novum Ambiens. 2(1):e2490. <http://doi.org/10.31910/novamb.v2.n1.2024.2490>

Artículo de acceso abierto publicado por Novum Ambiens, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

**Recibido:** 26 de junio de 2023

**Aceptado:** 5 de junio de 2024

**Editado por:** Oscar Luis Pyszcsek

### RESUMEN

La industria termoquímica es una de las actividades antrópicas que más genera aguas residuales cianuradas, constituyéndose en un riesgo para la salud de poblaciones y de los ecosistemas aledaños, debido a la alta toxicidad y efectos nocivos de este residuo. Por ello, estas industrias se valen de procesos físicos y químicos para tratar sus aguas residuales antes de disponerlas nuevamente al ambiente; sin embargo, dichos procesos se consideran, muchas veces, invasivos para los ecosistemas. En este contexto, la fitorremediación es una alternativa ecológica para el tratamiento de dichos efluentes, por lo que la presente investigación busca evaluar la eficiencia de remoción de cianuro por el buchón de agua *Pontederia crassipes*, para tratar aguas residuales de la industria termoquímica, a través de ensayos experimentales con distintas condiciones. Los resultados arrojaron eficiencias de remoción de cianuro hasta del 70 %, transcurrido 5 días, usando sistemas cerrados; también, se obtuvo una remoción total de cianuro de hasta 13 mg/L. Estos resultados demuestran que la fitorremediación con *Pontederia crassipes* podría ser una alternativa eficiente para el tratamiento de aguas residuales de la industria termoquímica.

Palabras clave: Buchón de agua; Contaminantes del agua; Ecotecnología; Fitorremediación; Tratamiento de aguas residuales.

### ABSTRACT

The thermochemical industry is one of the anthropogenic activities that generate the most cyanide wastewater, constituting a risk to the health of populations and surrounding ecosystems due to the high toxicity and harmful effects of this waste. Therefore, these industries use physical and chemical processes to treat their wastewater before disposing of it back into the environment; however, such processes are often considered invasive to ecosystems. In this context, phytoremediation is an ecological alternative for the treatment of such effluents. Therefore, this research seeks to evaluate the efficiency of cyanide removal by *Pontederia crassipes* to treat wastewater from the thermochemical industry through experimental tests with different conditions. The results showed cyanide removal efficiencies of up to 70% after five days and using closed systems. Also, a total cyanide removal of up to 13mg/L was obtained. These results show that phytoremediation with *Pontederia crassipes* could be an efficient alternative for wastewater treatment in the thermochemical industry.

Keywords: Common water hyacinth; Ecotechnology; Phytoremediation; Water Pollutants; Wastewater treatment.

## INTRODUCCIÓN

La fitorremediación se considera una ecotecnología capaz de remover sustancias tóxicas del suelo, agua y aire, por medio del uso de especies vegetales, capaces de bioacumular dichas sustancias en sus estructuras biológicas, lo que la convierte en una práctica más sostenible y rentable (Farraji *et al.* 2016). El buchón de agua *Pontederia crassipes* Mart. es una de las especies vegetales más estudiada para dichos fines, gracias a sus características biológicas, entre las que resaltan, rápida reproducción, capacidad adaptativa, amplio rango de tolerancia y biomasa (Carreño Sayago, 2020), convirtiéndola en candidata para tratamientos biológicos de aguas residuales.

En la revisión documental de Martelo & Lara (2012), se evidencia que las primeras exploraciones con plantas se realizaron en la década de los 70, para tratar las aguas residuales de viajes espaciales, a cargo de la NASA. A partir de este momento, diversos autores comenzaron a experimentar la depuración de aguas residuales con macrófitas flotantes, para bajar los niveles de materia orgánica y remover nutrientes, como el nitrógeno y fósforo; posteriormente, se iniciaron los ensayos con metales pesados.

En Colombia, el primer documento registrado sobre procesos de fitorremediación data de 1996, donde se evaluó la efectividad de la especie *P. crassipes* para depurar hierro de aguas residuales, en el valle Sinuano, en Montería y se encontró que, a mayores concentraciones, la remoción disminuye (Martelo & Lara 2012).

A nivel mundial, se han realizado pruebas piloto en laboratorios y a escalas macro con humedales artificiales, para tratar diversas sustancias tóxicas del agua, tales como metales pesados, entre ellos, plomo, cromo, mercurio, hierro y compuestos de cianuro, donde se han obtenido porcentajes de remoción hasta del 98 %. Ejemplo de lo anterior, son estudios, como los de Ebel *et al.* (2007), quienes evaluaron la tolerancia y la capacidad de eliminación de cianuro de sodio por *P. crassipes*, a través de la medición de la transpiración relativa y ensayos en cámaras ambientales (tipo de sistema cerrado), encontrando, que la especie es capaz de eliminar hasta el 100 % de la concentración inicial (5,8 mg/L) de cianuro, transcurridas 32 horas; también, hallaron que el cianuro se volatiliza y que a partir de concentraciones de 10 mg/L de CN, las plantas comienzan a desecarse y morir.

Kumar *et al.* (2016), se centraron en los métodos naturales usados para remediar aguas producidas por la minería con presencia de cianuro, obteniendo que las especies capaces de producir biomasa en menor tiempo pueden ser las más eficientes en procesos de reducción del cianuro. Saha *et al.* (2018) realizaron ensayos experimentales con *Pontederia crassipes*, simulando humedales artificiales (tipo de sistema abierto), con recipientes plásticos, para remover cianuro de aguas residuales producidas por las industrias de acero, en donde concluyeron, que esta especie puede eliminar hasta el 95 % de cianuro del agua, luego de 3 días, a concentraciones de 5 mg/L; además, encontraron que esta especie también es capaz de reducir la demanda biológica de oxígeno DBO, la demanda

química de oxígeno DQO, el amoníaco, sólidos totales disueltos STD y la dureza del agua.

Según Srivastava & Duvvuru (2010) existen más de 500 géneros y 100 familias de especies de plantas cianogénicas, que tienen la capacidad de convertir aminoácidos en glucósidos cianogénicos, que son una forma de azúcar simple unido a una molécula de cianuro, cuando ocurre una lesión en la planta, como mecanismo de defensa; estos glucósidos cianogénicos son usados por la planta como fuente de nitrógeno y precursor para la síntesis de aminoácidos y proteínas durante el crecimiento. Asimismo, los autores mencionan que, en los casos de fitorremediación, la adsorción de cianuro no siempre está relacionada con la asimilación, que es un proceso metabólico complejo, en el que actúan enzimas que catabolizan o degradan los contaminantes a un compuesto capaz de ser almacenado por la planta; sino que, también, ocurren procesos de acumulación.

Los autores Herrera *et al.* (2019), encontraron que ciertas macrófitas fueron capaces de adaptarse a ambientes contaminados por actividades de origen antrópico, desarrollando la capacidad de absorber y acumular sustancias tóxicas, como hidrocarburos, herbicidas, pesticidas y hasta metales pesados, a través de transportadores específicos, que están presentes en las raíces. Los mecanismos usados para ello son: la filtración, la sedimentación de sólidos, la incorporación de nutrientes a la planta y para el caso específico de los metales pesados, la formación de un complejo entre el metal y los aminoácidos presentes en las células.

Conforme a estos resultados, la presente investigación pretende evaluar la eficiencia de remoción de cianuro del buchón de agua para tratar aguas residuales de la industria termoquímica. Este estudio permitirá que las industrias, tanto termoquímicas como mineras, metalúrgicas, químicas, farmacéuticas y agroindustriales, tengan una alternativa más sustentable y ecológica para tratar sus aguas residuales con contenidos de cianuro y así disminuir los riesgos de intoxicación humana y garantizar la protección de los ecosistemas acuáticos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Programa de monitoreo.** Se dejó una muestra de agua residual previamente recolectada en observación, por un periodo de tres días, en los que se midieron parámetros fisicoquímicos de pH, temperatura y concentración de cianuro, para identificar posibles cambios físicos en el agua residual y posibles pérdidas o disminución de la concentración de cianuro, no atribuibles a la especie. Para ello, la muestra puntual recolectada se depositó en un beaker de 1.000 ml de capacidad, midiendo a diario la concentración de cianuro, mediante el método titulación 4500-CN -. D. Durante este mismo periodo de observación, se realizaron las curvas de calibración del método, utilizando KCN (cianuro de potasio) a distintas concentraciones y se estableció el patrón de color. De la misma manera, se obtuvo el valor del blanco, promediando los valores de titulante, empleado para hacer virar de color agua destilada.

Determinación de la concentración de cianuro por el método titulación 4500-CN -. D. Para determinar la concentración de cianuro por el método de titulación 4500-CN -.D del estándar métodos, se replicó la metodología de Nava-Alonso *et al.* (2007); para ello, se tomaron muestras de agua de cada uno de los ensayos, incluyendo réplicas y controles (0,08 L aprox. por cada beaker) y se destilaron, para obtener muestras transparentes, que facilitaron la lectura del punto de viraje de color. Para hacer las lecturas de la concentración de cianuro por este método, se adicionó a una bureta una solución volumétrica de titulante con una concentración conocida (en este caso, nitrato de plata  $\text{AgNO}_3$  al 0,6%) y debajo de esta, se colocó un vaso de precipitado con la muestra a analizar (el agua residual), mezclada con ocho gotas de indicador yoduro de potasio (al 5 %). Para titular, se adicionó  $\text{AgNO}_3$  por goteo a la muestra, hasta que viró su color (de transparente a amarillo claro opaco) y luego se empleó la ecuación:

$$[\text{CN}] \frac{\text{Mg}}{\text{L}} = (A - B) \times 20$$

En donde, A son los mL de  $\text{AgNO}_3$  usados para titular 10 mL de la muestra de agua a medir y, B los mL de  $\text{AgNO}_3$  empleados para titular 10 mL de agua destilada (blanco); basado en el documento de Nava-Alonso *et al.* (2007).

#### Recolección de especie vegetal y acondicionamiento para montajes.

La especie *Pontederia crassipes* se recolectó en el humedal Juan Amarillo (Tibabuyes), ubicado entre las localidades de Suba y Engativá de Bogotá; se recolectaron especies en etapa de crecimiento y de reproducción, es decir, individuos con presencia entre 4 y 7 hojas, entre 4 y 7 peciolos y algunos con un estolón, ya que, según Carreño Sayago (2020), durante esta etapa, la especie puede asimilar y absorber contaminantes inorgánicos del agua y obtener nutrientes de ellos. La recolección de los individuos se realizó manualmente con ayuda de un balde; posteriormente, se transportaron en el mismo recipiente hasta el laboratorio ambiental de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, donde se realizó el proceso de acondicionamiento, sumergiendo los individuos en agua limpia dentro de recipientes plásticos, por un periodo de 15 días, con las siguientes condiciones: dos recipientes con 5 L de agua y de 6 a 8 individuos de la especie por cada uno, reposados sobre un mesón del laboratorio cercano a una ventana con algunas limitaciones de entrada directa de luz solar, sin adición de nutrientes ni de agua.

Muestreo de agua. Para la recolección del agua residual se empleó el muestreo puntual, siguiendo el manual para la toma, la preservación y el transporte de muestras de agua para análisis de laboratorio, del Instituto Nacional de Salud (2020), en la industria. Allí, se midieron parámetros fisicoquímicos al agua y ambientales, para, posteriormente, compararlos con los del laboratorio y así evaluar posibles efectos.

Montaje experimental 1. Se realizó el primer montaje experimental con plantas dentro de beakers, que simulaban un humedal artificial con sistema abierto, replicando la metodología de Saha *et al.* (2018). Para este montaje se evaluaron dos ensayos; el primero, usando el agua residual diluida al 30 % (560 ml de agua residual

y 240 ml de agua destilada) (esta dilución teniendo en cuenta la mínima concentración de cianuro detectable por el método de titulación 4500-CN -. D (1 mg/L)) y, el segundo, agua residual al 100 % (800 ml de agua residual). El agua residual al 100 % y diluida se depositó en beakers de 1 L de capacidad y a cada uno se le adicionó un individuo de la especie; por cada ensayo, se montaron tres réplicas y un control, que contenía agua residual en las mismas proporciones de dilución, pero sin especie vegetal, para evaluar si se presentaban pérdidas de cianuro no atribuibles al buchón de agua. Este montaje se dejó sobre el mesón cerca a la ventana (donde se acondicionaron los individuos), por 3 días consecutivos, que fue el tiempo reportado por los autores Ebel *et al.* (2007), como de mayor porcentaje de remoción de la especie *P. crassipes* y, posteriormente, se midió la concentración de cianuro, por el método de titulación 4500-CN -. D.

Montaje experimental 2. Para este montaje experimental se tomó como referencia la metodología de Wachirawongsakorn *et al.* (2015). Para ello, se recolectaron más individuos del buchón de agua y se usó agua destilada contaminada con KCN (cianuro de potasio), en sistemas abiertos y ajustando el pH, con NaOH (hidróxido de sodio), con el fin de intentar disminuir el porcentaje de volatilización de cianuro, atribuido por los autores Ebel *et al.* (2007), a un pH por debajo de 11. Para este, se usó agua destilada (800 ml), contaminada con 20 mg/L de KCN y se ajustó el pH del agua, con NaOH hasta 12, tanto para el ensayo como para el control; estas soluciones preparadas se depositaron en beakers de 1 L de capacidad y se dejaron sobre el mesón cerca a la ventana (donde se acondicionaron los individuos); al ensayo se adicionó un individuo del buchón de agua y al control, no. Este montaje se monitoreó por tres días consecutivos y a diario se evaluaban cambios físicos en la planta y se medían las concentraciones de cianuro, por el método de titulación 4500-CN -. D.

Montaje experimental 3. Para este montaje se recolectaron más individuos de buchón de agua y se modificaron las variables: cantidad de agua residual a tratar (más agua), cantidad de individuos vegetales (más individuos), tiempo (un día más de montaje) y concentración de cianuro (con distintas diluciones), para intentar aumentar el porcentaje de remoción de cianuro por la especie; asimismo, se probaron sistemas cerrados, como en la metodología de Ebel *et al.* (2007). En él, se evaluaron tres ensayos: el primero, contenía agua residual diluida al 50 % (2,5 L de agua residual y 2,5 L de agua destilada); el segundo, al 20 % (1 L de agua residual y 4 L de agua destilada) y, el tercero, al 10 % (500 ml de agua residual y 4,5 L de agua destilada). Las diluciones de los ensayos se depositaron en recipientes plásticos de 6 L de capacidad; a cada uno se le adicionó tres individuos del buchón de agua y se sellaron con papel vinipel. Para los controles negativos de este montaje se efectuó una relación volumétrica, en la que se usó, para el control del ensayo 1: 500 ml de agua destilada y 500 ml de agua residual; control del ensayo 2: 800 ml de agua destilada y 200 ml de agua residual y, control del ensayo 3: 900 ml de agua destilada y 100 ml de agua residual; estas diluciones se depositaron en beakers de 1 L de capacidad y se sellaron con papel vinipel. Las concentraciones de cianuro fueron medidas una vez al día, por el método titulación 4500-CN -.D, durante 4 días consecutivos.

Reproducción de especies vegetales para montaje 4. Para este montaje se usaron individuos reproducidos en el proceso de acondicionamiento de la especie para el montaje 3. Durante la fase de crecimiento (12 días aprox.), se le añadieron al agua 0,4 mg/100 ml de macronutrientes, con la intención de acelerar su crecimiento.

Montaje experimental 4 – Metodología con sistema cerrado. En este montaje se modificaron las variables: estado de la planta (se usaron individuos más jóvenes reproducidos en el laboratorio), cantidad de agua (3 L menos que en el anterior montaje), cantidad de individuos (uno más que en el montaje anterior) y tiempo (5 días en total), en sistemas cerrados, para intentar aumentar el porcentaje de remoción, replicando las condiciones de ensayo de Saha *et al.* (2018). Para este, se empleó una dilución de agua residual al 20 % (que fue la dilución con mayor porcentaje de remoción de cianuro en el montaje anterior), que contenía 400 ml de agua residual y 1,6 L de agua destilada; se pasó a un recipiente plástico con capacidad para 3 L; se agregaron 4 individuos de la especie al recipiente y se selló con papel vinipel. Para el control se empleó una relación volumétrica y se usó 200 ml de agua residual y 800 ml de agua destilada, que se depositaron en un beaker de 1 L de capacidad y se selló con papel vinipel. Las concentraciones de cianuro fueron medidas por el método de titulación 4500-CN -.D, una vez al día.

Montaje experimental 5 – Metodología con sistema cerrado. Para el último montaje se replicó la metodología de sistema cerrado de Ebel *et al.* (2007) y se modificaron las variables de la concentración de cianuro (mayor dilución), usando la que mejor resultado arrojó en los ensayos de los autores referentes: más individuos de la especie (5 en total por ensayo), más agua residual a tratar (3 L en total) y tiempo (un día menos que en el montaje anterior), con la intención de continuar buscando las condiciones (variables), que favorezcan una mayor remoción de cianuro. Para ello, se usó una dilución de agua residual al 15 %, que contenía 450 ml de agua residual y 2.550 ml de agua destilada; se agregó a un recipiente plástico con capacidad para 3 L; se adicionaron 5 individuos de la especie al recipiente y se selló con papel vinipel. Para el control se empleó la relación volumétrica y se usó 150 ml de agua residual y 850 ml de agua destilada, que se depositaron en un beaker de 1 L y se selló con papel vinipel. Las concentraciones de cianuro se leyeron una vez por día, por el método titulación 4500-CN -.D, durante 4 días consecutivos.

Obtención de porcentajes de remoción de cianuro por la especie *P. crassipes*. Se elaboró una tabla (Tabla 5), en donde se registraron los valores en mg/L de la concentración inicial y final, obtenida en cada uno de los ensayos y montajes, junto con la concentración inicial y final, de sus respectivos controles; adicionalmente, se registró el porcentaje correspondiente a la remoción de cianuro que realizó la especie al finalizar los experimentos; para obtener este último valor se empleó el siguiente cálculo:

$$\frac{([\text{deCN absorbidapor la especie}] \times 100)}{[\text{inicial de CN en el ensayo}]}$$

Para garantizar que se tomará solo la concentración de cianuro removida por la especie, a la concentración de cianuro removida en total, se le restó la concentración de cianuro total, que evidenció una posible pérdida o volatilización en los controles respectivos.

Obtención de concentraciones máximas de absorción de cianuro por *P. crassipes*. Se elaboró una segunda tabla, donde se registraron los valores de la concentración de cianuro absorbida por *P. crassipes* en mg/L, por rangos de horas, durante la diferencia de tiempo en los muestreos y lecturas; para ello se realizó el cálculo matemático:

$$\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{CN absorbido por la planta} \\ \equiv ([\text{inicial de CN en la muestra}] - [\text{final de lamuestra}]) \\ - ([\text{inicial de CN control}] - [\text{final de CN control}])$$

Para cada ensayo y distintos montajes, con la intención de identificar la concentración experimental de cianuro que absorbió la especie *P. crassipes*, sin las posibles volatilizaciones o pérdidas durante el muestreo.

Eficiencias de remoción. Con los resultados obtenidos en el apartado anterior se procedió aplicar la fórmula matemática:

$$E = \frac{(S_o - S)}{S_o} \times 100$$

Usada por Malacatus *et al.* (2017), en su trabajo, para determinar la eficiencia de remoción de cianuro en cada uno de los tratamientos y ensayos; donde E, es la eficiencia de remoción (%);  $S_o$ , la carga contaminante de entrada (Kg/L) y S, la carga contaminante de salida (Kg/L). Para el análisis de datos y análisis gráfico de los resultados se usaron funciones de Excel.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Programa de monitoreo. La primera muestra de agua residual recolectada para los análisis y evaluación del comportamiento de la concentración de cianuro presentó una disminución o pérdida total de 6 mg/L CN (Tabla 1), transcurridos los 3 días de monitoreo establecidos. El valor de SST (Sólidos Sedimentales Totales) compilado en la tabla 1 (0,4 Kg/L), indicó una alta concentración de residuos sólidos en el agua residual que, según Roto (s.f.), se pudo deber a partículas de polvo adheridas a las piezas de acero que se lavaron en estas aguas y, las cuales, se pudieron desprender.

Respecto a los parámetros ambientales medidos en la empresa donde se encontraba el agua recolectada (Tabla 1) y del laboratorio donde se realizaron los distintos ensayos, no se evidenció una diferencia significativa que pudiera afectar o influir en los resultados.

Frente a las observaciones físicas realizadas a la muestra de agua residual durante los tres días que fue sometida al programa de monitoreo, se observó la formación de sales o cristales en el agua, las cuales, incrementaban cuando el agua se secaba, producto de la exposición directa al aire; según Capote *et al.* (2015), esta formación de sales o cristales se debe a la precipitación por incremento de  $\text{CO}_3$ .

Para el blanco (necesario en la ecuación, que permite obtener el valor de la concentración de cianuro), se estableció como valor 0,3 mL y este se usó como patrón de color de viraje.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos de la primera muestra de agua residual recolectada para programa de monitoreo.

pH	SST	Temperatura	[ ] inicial de CN en la muestra	[ ] final de CN en la muestra
10,5	400 ml/L	15,9 °C	34 ml/L	28 mg/L

Condiciones de individuos vegetales y acondicionamiento. Todos los individuos de buchón de agua recolectados en el humedal, para los montajes 1 (simulación de humedales artificiales con sistema abierto), 2 (simulación de humedal artificial con sistema abierto), 3 (simulación de humedales artificiales con sistema cerrado) y 5 (simulación de humedal artificial con sistema cerrado) poseían entre 4 y 7 hojas, entre 5 y 7 peciolos y raíces de, aproximadamente,

0,4 – 0,6 m (Figura 1). Adicionalmente, todos los individuos de buchón de agua presentaban signos de clorosis en algunas hojas (color amarillo), producto de las condiciones donde fueron recolectados. La temperatura ambiente promedio del laboratorio durante este periodo de acondicionamiento fue 17,6 °C, con una humedad del 58 %.

Figura 1. Condiciones de individuos de buchón de agua *Pontederia crassipes* recolectados para los montajes 1, 2, 3 y 5.

Las plantas reproducidas en el laboratorio, usadas en el montaje 4 (simulación de humedal artificial con sistema cerrado), poseían entre 4 y 5 hojas y entre 3 y 4 peciolos y sus raíces median entre 0,1 y 0,16 m. Los macronutrientes que se añadieron para que crecieran más rápido no funcionaron y, por el contrario, generaron signos de marchitez en algunas hojas y peciolos. Esto se puede deber, según Novoa *et al.* (2018), a que, aunque se evidencie un aumento exponencial en el crecimiento y acumulación de nutrientes en las plantas fertilizadas, la concentración interna de nutrientes disminuye, debido a la dilución por el crecimiento, lo que sugiere un estrés ocasionado por un exceso de nutrientes.

Caracterización del agua residual recolectada para los distintos montajes. El agua residual que se recolectó durante el primer muestreo se usaba para el lavado de las piezas de acero luego de la cementación y durante el temple; esta llevaba 1 mes, aproximadamente, conservada en un recipiente abierto, ya que estaba destinada a su disposición final (secado), luego de usarse por un año. Los parámetros fisicoquímicos que presentaba el agua de este primer muestreo (Tabla 2), incluyeron una turbidez mayor a (1000 NTU), por encima del valor máximo detectable por el equipo (turbidímetro), pese a que, a simple vista, el agua presentaba un color gris oscuro; un pH de 10, indicando una alta alcalinidad, que puede ocasionar la formación de las sales o cristales y un valor de sólidos suspendidos totales de 350 mg/L.

El agua residual recolectada durante el segundo muestreo había sido reemplazada hacia dos meses, aproximadamente, por lo que, a diferencia de la primera muestra que se tomó, la turbidez y los sólidos en suspensión, era menor; también, se conservaba en un recipiente abierto y era usada aún para lavar las piezas. Las características más relevantes del agua de este segundo muestreo (Tabla 2), incluían una concentración de cianuro inicial de 107 mg/L, más alta que la del primer muestreo, que era de 34 mg/L; un pH más alcalino y una conductividad menor, que es directamente proporcional a la concentración de SST que, también, fue menor que la del primer muestreo. En cuanto a la dureza del agua de ambos muestreos está clasificada en la escala de Merck, como un tipo de agua muy dura.

Porcentajes de remoción de cianuro por *P. crassipes* en los distintos ensayos y montajes experimentales. Los resultados plasmados en la tabla 3 revelaron en el montaje 4, las siguientes condiciones: 2 L de agua residual diluida al 20 %, 4 individuos de la especie reproducidos en el laboratorio para tratar el agua y simulación de humedales artificiales, con sistema cerrado por 5 días, presentó el mayor porcentaje de remoción de cianuro por parte de la especie *P. crassipes*, con un 70 % de remoción; seguido a este, el segundo montaje con mayor porcentaje de remoción fue el 5, que poseía las siguientes condiciones: 3 L de agua a tratar, en una dilución de agua residual al 15 % y 5 individuos del buchón de agua, en

un montaje cerrado por 4 días y arrojó un 57 % de remoción; por último, el tercer montaje con mayor porcentaje de remoción fue el ensayo 2 del montaje 3, en las siguientes condiciones: 5 L de agua a tratar diluida al 20 %, 3 individuos de la especie, en simulación de humedal artificial con sistema cerrado por 4 días, que arrojó un 55 % de remoción de cianuro. En cuanto a los montajes con sistema abierto (montaje 1 y 2), el ensayo 1 del montaje 2, presentó el mayor

porcentaje de remoción de cianuro, con un 23 %, a diferencia de los ensayos 1 y 2 del primer montaje, que también se usaron sistemas abiertos y solo se obtuvo hasta un 6 % de remoción; en el ensayo 2 se estabilizó el pH para evitar la volatilización de cianuro, por lo que se logró aumentar el porcentaje de remoción, por parte de la especie.

Tabla 2. Caracterización del agua residual recolectada en los muestreos 1 y 2.

Muestreo	Turbidez	Conductividad	pH	SST	Dureza	[ ] de cianuro
1	> 1000 NTU	160,9 mS/cm	10,17	350 mg/L	>600 mg/L CaCO <sub>3</sub>	34 mg/L
2	68,3 NTU	152,7 mS/cm	11,16	1,5 mg/L	>500 mg/L CaCO <sub>3</sub>	107 mg/L

Tabla 3. Compilación de resultados para los distintos montajes y porcentajes de remoción de cianuro por buchón de agua *Pontederia crassipes*.

Montaje	Ensayo	09 agosto		12 agosto		% de remoción de cianuro
		[ ] inicial CN Muestra	[ ] final CN Muestra	[ ] inicial CN Control	[ ] final CN Control	
1	1	19,2 mg/L	18 mg/L	19,2 mg/L	19,4 mg/L	6,25
	2	27,4 mg/L	23 mg/L	27,4 mg/L	24,4 mg/L	5,1
		21 septiembre		23 septiembre		
2	1	20 mg/L	8 mg/L	20 mg/L	12,6 mg/L	23
		11 octubre		14 octubre		
3	1	40,6 mg/L	30 mg/L	40 mg/L	38,6 mg/L	23
	2	19,4 mg/L	6 mg/L	20 mg/L	17,4 mg/L	55
	3	11 mg/L	2,6 mg/L	10,6 mg/L	8 mg/L	53
		25 octubre		29 octubre		
4	1	19,4 mg/L	4,6 mg/L	18,6 mg/L	17,4 mg/L	70
		16 noviembre		19 noviembre		
5	1	14 mg/L	3,4 mg/l	14 mg/L	11,4 mg/L	57

Nota. Las diferencias entre las concentraciones iniciales de los controles y las muestras de algunos ensayos se deben a la relación volumétrica que se empleó para los controles; sin embargo, con la fórmula matemática descrita en la metodología, se resta el valor total volatilizado de cianuro de los controles al valor total de remoción de cada muestra/ensayo, para obtener el porcentaje de remoción de la especie.

En cuanto al porcentaje de cianuro volatilizado, los resultados arrojan que en los montajes donde se manejaron sistemas abiertos (montaje 1 y 2), las pérdidas por volatilización alcanzaban hasta el 68 % del total de cianuro removido y, pese a estabilizarse el pH de la muestra (montaje 2), como indicaban los autores Ebel *et al.* (2007), para evitarlo, la

volatilización solo disminuyó hasta un 7 %; por otra parte, los montajes que se manejaron con sistemas cerrados (montaje 3, 4 y 5), evidenciaron una disminución en la volatilización, de hasta un 80 % (Tabla 4).

Se observó que, adicionalmente, los montajes con sistema cerrado (montaje 3, 4 y 5), en los que se realizaron los ensayos por uno y dos días más que los ensayos con sistema abierto (montajes 1 y 2), la remoción de cianuro por parte de la especie fue mayor, hasta un 31 % en promedio.

Concentraciones de cianuro absorbidas por *Pontederia crassipes* en los distintos ensayos y montajes experimentales. En cuanto a los resultados de la concentración máxima de cianuro, que fue capaz de absorber la especie en los distintos ensayos y condiciones que se probaron, se encontró que *Pontederia crassipes* fue capaz de absorber y/o retener hasta 13,6 mg/L del cianuro total, presente en el agua residual tratada; esta concentración se logró con las condiciones del ensayo del montaje 4: 2 L de agua residual diluida al 20%, 4

individuos de la especie, reproducidos en el laboratorio, para tratar el agua y simulación de humedales artificiales con sistema cerrado por 5 días.

El segundo ensayo con mayor concentración de cianuro removido fue el ensayo 2 del montaje 3, que poseía las siguientes características de montaje: 5 L de agua a tratar diluida al 20 %, 3 individuos de la especie, en simulación de humedal artificial con sistema cerrado por 4 días y logró absorber/retener 10,8 mg/L CN. El tercer ensayo con mejores resultados fue el primero del montaje 5, con las siguientes características: 3 L de agua a tratar, en una dilución de agua residual al 15 % y 5 individuos de la especie en un montaje cerrado por 4 días, que logró remover 8 mg/L de cianuro (Tabla 4).

Tabla 4. Concentración de cianuro absorbida por el buchón de agua *Pontederia crassipes* en los distintos montajes por rangos de tiempo.

Montaje	Ensayo	24 h	48 h	72 h	96 h	Total
1	1		1,2 mg/L CN			1,2 mg/L CN
	2		1,4 mg/L CN			1,4 mg/L CN
2	1	3,4 mg/L CN	1,2 mg/L CN			4,6 mg/L CN
3	1	6,6 mg/L CN	2,8 mg/L CN	0,6 mg/L CN*		10 mg/L CN
	2	5,4 mg/L CN	4 mg/L CN	1,4 mg/L CN		10,8 mg/L CN
	3	3,8 mg/L CN	3,2 mg/L CN	0,8 mg/L CN*		7,8 mg/L CN
4	1	6,2 mg/L CN	2,6 mg/L CN	4,6 mg/L CN	0,2 mg/L CN	13,6 mg/L CN
5	1	6 mg/L CN	0,4 mg/L CN	1,6 mg/L CN		8 mg/L CN

Nota. Las casillas que contienen un asterisco (\*) indican que durante ese rango de tiempo los controles volatilizaron mayor concentración de cianuro que la removida por la especie.

Los resultados de la tabla 4 también revelaron que *P. crassipes* realiza la mayor absorción/remoción de cianuro del agua dentro de las primeras 24 horas y a partir de, aproximadamente, el tercer día de experimento (montajes 3, 4 y 5), comienza a disminuir, de manera radical; simultáneo, se observó que luego de los mismos tres días de experimento, las plantas de todos los ensayos y montajes presentaban un deterioro extremo y se cree ya habían alcanzado su límite máximo de absorción o acumulación de este contaminante, razón por la cual, la concentración de cianuro removida, luego de este tiempo, era baja.

Eficiencias de remoción de cianuro por *Pontederia crassipes* de los distintos ensayos y montajes experimentales. Los resultados de los porcentajes de eficiencia de remoción que alcanzó la especie con los distintos ensayos y condiciones probadas evidencian que *P. crassipes* fue eficiente en la remoción de hasta un 70 % del cianuro total presente en el agua, bajo las siguientes condiciones de montaje: 2 L de agua residual diluida al 20 %, 4 individuos del buchón de agua reproducidos en el laboratorio para tratar el agua y simulación de humedales artificiales con sistema cerrado por 5 días.

Según los resultados de la tabla 5, se observa que los ensayos que presentaron mayores eficiencias de remoción de cianuro, seguidas del montaje 4, fueron el ensayo 1 del montaje 5 y el ensayo 2 del montaje 3, con 57 y 56 %, respectivamente, que se realizaron simulando humedales artificiales con sistema cerrado, por lo cual, se puede inferir, que el buchón de agua es más eficiente cuando se somete a condiciones que le exigen tomar los nutrientes necesarios del ambiente donde se encuentra (en este caso, del agua residual).

En cuanto a los montajes 1 y 2 que se realizaron simulando humedales artificiales con sistema abierto, las plantas alcanzaron una eficiencia de remoción hasta del 23 %, menor que la de los sistemas cerrados.

Se evidenció una mayor eficiencia de remoción de cianuro por parte del buchón de agua en los ensayos con sistema cerrado (3, 4 y 5), que los ensayos con sistema abierto (1 y 2); esto, pese a que la especie, al no poseer una fuente de alimento externa (como en los sistemas abiertos), debía recurrir a metabolizar los compuestos del agua en la que se encontraba (caso de los sistemas cerrados – montajes 3, 4 y 5).

Tabla 5. Eficiencias de remoción de cianuro por *Pontederia crassipes* en los distintos montajes.

Montaje	Ensayo	So	S	Eficiencia de remoción de cianuro
1	Ensayo 1	19,2 mg/L CN	18 mg/L CN	6,25%
	Ensayo 2	27,4 mg/L CN	26 mg/L CN	5,40%
2	Ensayo 1	20 mg/L CN	15,4 mg/l CN	23%
3	Ensayo 1	40,6 mg/L CN	31,4 mg/L CN	22,66%
	Ensayo 2	19,4 mg/L CN	8,6 mg/L CN	55,67%
	Ensayo 3	11 mg/L CN	5,2 mg/L CN	52,73%
4	Ensayo 1	19,4 mg/L CN	5,8 mg/L CN	70,10%
5	Ensayo 1	14 mg/L CN	6 mg/L CN	57,14%

Al finalizar todos los distintos montajes y ensayos, el agua residual tratada con las plantas para disminuir la concentración de cianuro adquirió un color púrpura, que se atribuye a la oxidación de nitratos a nitritos, ocasionada por la presencia de la especie y sus posibles mecanismos de supervivencia natural. Adicional a esto, también se evidenció un olor característico a almendras amargas, que era mucho más fuerte en los montajes con sistema cerrado. Los controles de los distintos ensayos no presentaron cambios significativos, mayores a una disminución en la turbidez (color del agua), ocasionada por la precipitación de sólidos suspendidos. Las plantas, por el contrario, en todos los montajes y ensayos presentaron una fuerte degradación, que incluyó un cambio de color, de verde a negro, en hojas y en peciolo y una disminución en su biomasa. Este color fue adquirido a partir de las primeras 24 horas de experimento y era más notorio en las plantas expuestas a mayores concentraciones de cianuro en el agua.

## CONCLUSIONES

Las aguas residuales de la industria termoquímica presentaron una alta carga de cianuro, que se identificó durante el análisis de los muestreos que se realizaron (muestreo 1 y muestreo 2), la cual, proviene del lavado de las piezas de acero, luego de que pasan por un proceso llamado temple, en donde se usa el cianuro para el recubrimiento y reforzamiento de la dureza de las piezas de acero; durante este proceso, las piezas pueden desprender partículas de suciedad adheridas a ellas y residuos que contienen el compuesto químico que no se integró durante el proceso y que, luego, se van acumulando en las aguas residuales contenidas en el recipiente, donde fueron recolectadas las muestras.

La primera muestra de agua residual recolectada para el programa de monitoreo arrojó 0,4 Kg/L de sólidos sedimentados totales, los

cuales, demuestran la presencia de posibles partículas de suciedad desprendidas de las piezas y disueltas o suspendidas en el agua. Se observó, adicionalmente, que en este tipo de agua residual produce una formación de sales o cristales, que se puede deber, según Julián-Soto (2010) y Condorchem (s.f.), a la transformación de compuestos carbonatados en cristales, ocasionada por la elevación de temperatura y posterior enfriamiento (procesos propios de tratamientos termoquímicos). Estas formaciones, también están relacionadas con la dureza del agua y explicaría por qué las dos primeras muestras arrojaron valores que clasifican el agua residual como muy dura, recordando que estas muestras corresponden al agua que se usó durante un año. El agua del segundo muestreo, a diferencia del primero, poseía una dureza y formación de sales o cristales mucho menor, debido a que esta solo llevaba 2 meses de uso.

Pese a la gran diferencia de la concentración inicial de cianuro entre el muestreo 1 y 2 que se presentó, se infiere que, durante el mes que estuvo reposada el agua del primer muestreo, se pudo haber volatilizado una importante concentración de cianuro y, por ello, era mucho menor que la del segundo muestreo, ya que, según Ebel *et al.* (2007), cuando el agua con cianuro posee un pH inferior a 11, se tiende a volatilizar y el pH del agua de los primeros muestreos (agua usada por 1 año), presentaba un pH de 10. Esto no solo puede influir en los resultados y diferencias entre los muestreos de agua, sino que, además, aumenta el riesgo de afectaciones a la salud de los trabajadores, que se encuentran expuestos.

La primera muestra de agua residual recolectada para el programa de monitoreo presentó una disminución en la concentración inicial de cianuro que, según Pérez & Higuera (2008), se debe a la volatilización del compuesto, debido a su alta presión de vapor, cuando se encuentra a valores de pH inferiores a 11.



En cuanto a los montajes experimentales, en el primero que se realizó, se observó que un 11 % del cianuro total removido se había volatilizado y el porcentaje de remoción de la especie era muy bajo, en comparación del que obtuvieron Saha *et al.* (2018), quienes usaron *P. crassipes*, para tratar aguas residuales de la industria de acero y obtuvieron eficiencias de remoción de hasta el 95 %. Esto se puede deber a que, a diferencia de sus resultados, en este primer montaje, se usaron concentraciones de cianuro más altas (27 mg/L) que las que ellos usaron (2,4 mg/L), pese a que el método elegido para determinar el cianuro en la presente investigación no puede detectar con exactitud concentraciones de cianuro tan bajas y tampoco se usó NaOH, para estabilizar el pH y evitar la volatilización, como si hicieron estos autores; sin embargo, para el segundo montaje experimental se optó por estabilizar el pH del agua residual y bajar la concentración de cianuro inicial (a 20 mg/L), para intentar acercarnos al porcentaje de remoción que ellos obtuvieron. En este montaje, al igual que los de Saha *et al.* (2018), también se simuló humedales artificiales con sistemas abiertos y aunque estas nuevas condiciones experimentales aumentaron el porcentaje de remoción de cianuro hasta un 23%, no se logró disminuir el porcentaje de volatilización de cianuro, que seguía siendo alto en comparación con la remoción que estaba haciendo la especie. Se interpreta que esto se pueda deber a que como la concentración inicial de cianuro en los presentes ensayos es mucho más alta que la del autor referente (Saha *et al.* 2018), asimismo, la volatilización puede ser mayor.

Pese a estos primeros resultados y con la intención de seguir probando condiciones experimentales que aumenten la remoción de cianuro por la especie y disminuyan los porcentajes de volatilización, se optó por diseñar ensayos con sistemas cerrados para el tercer montaje, como los de Ebel *et al.* (2007), con el uso de cámaras ambientales (sistema de tratamiento cerrado), obteniendo eficiencias de remoción del 100 %, luego de 32 horas. Con estas nuevas condiciones probadas se logró incrementar el porcentaje de remoción de cianuro por la planta hasta en un 50 % y, también, se logró disminuir el porcentaje de volatilización del compuesto, hasta un 80 %.

Al probar el tratamiento con sistemas cerrados se observó que el proceso es mucho más eficiente, pese a que, a diferencia de los sistemas abiertos, las plantas no poseen otra fuente de nutrientes externa para sobrevivir, más que las presentes en el agua residual. Esta afirmación es soportada por lo mencionado por Acosta-Arce & Agüero-Alvarado (2006), quienes afirman que las malezas acuáticas, como *Pontederia crassipes*, dependen y se adaptan a las condiciones del medio en que se encuentran, pudiendo sobrevivir con los recursos disponibles. Adicionalmente, se interpreta que el agua residual recolectada para este montaje (muestreo 2), también influyó en dichos resultados, ya que poseía una menor cantidad de sólidos suspendidos totales, lo que facilitaría la remoción del cianuro libre y un pH más estable, para evitar la volatilización (> 11), como indican Ebel *et al.* (2007).

En cuanto al montaje 4, la principal modificación realizada en las condiciones, que consistió en el uso de individuos de buchón

de agua más jóvenes y reproducidos en el laboratorio, permitió obtener el mayor porcentaje de remoción de cianuro, evidenciando la existencia de cierta relación entre la remoción de cianuro y el estado de los individuos, lo cual, apoya la afirmación de Carreño Sayago (2020), que el buchón de agua durante su etapa de crecimiento es capaz de asimilar compuestos inorgánicos, como el cianuro y por medio de procesos metabólicos degradarlo, para obtener de él una fuente de nitrógeno. El porcentaje de remoción de cianuro obtenido con este montaje (70 %), se asemeja al que obtuvieron Jaramillo-Salazar *et al.* (2016), luego de tratar aguas cianuradas de una mina de oro con *Pontederia crassipes*, por 30 días, tiempo en el que la planta removió el 77,95 % del cianuro total. Nuevamente, las condiciones de tratamiento con sistema cerrado lograron disminuir los porcentajes de volatilización y aumentar la eficiencia de remoción.

Finalmente, las condiciones probadas con el montaje 5 y pese a que no se usaron individuos reproducidos y más jóvenes, no se obtiene un mayor porcentaje de eficiencia de remoción, pero sí una importante disminución en la volatilización del compuesto, por lo que se infiere que, para tratar aguas residuales cianuradas de la industria termoquímica, lo mejor es trabajar con sistemas cerrados, que no solo disminuyen la volatilización y los errores experimentales, sino que, además, reducen los riesgos de intoxicación humana, en específico, para trabajadores que están potencialmente expuestos a compuestos de cianuro.

Por otra parte, los autores Ebel *et al.* (2007) afirman que, a concentraciones más bajas de cianuro, la remoción aumenta; sin embargo, los resultados de la presente investigación no concuerdan con esta afirmación, ya que no siempre los ensayos trabajados con menor concentración de cianuro arrojaron las más altas remociones. Esto se debió, principalmente, a las condiciones de montaje probadas, por lo que se recomienda experimentar con concentraciones menores a los 5 mg/L de CN y emplear métodos de lectura o detección de esas concentraciones para comparar.

Algo particular que se observó en el agua residual, luego de ser tratada con las plantas, fue la adquisición de un color púrpura y que ninguno de los referentes consultados reportó. Jaramillo-Salazar *et al.* (2016) mencionaron, dentro de sus resultados, que luego de realizar la fitorremediación de aguas cianuradas de la mina de oro con *P. crassipes*, sometieron la especie a una prueba con papel indicador picrato de sodio, en la cual, evidenciaron un cambio de color de amarillo a rojo ladrillo (similar al que obtuvieron las aguas residuales tratadas con la misma especie en esta investigación), indicando la presencia de glucósidos cianogénicos y sus respectivas enzimas hidrolíticas; relacionando esta información con la de Srivastava & Duvvuru (2010), quienes indican que *P. crassipes* pertenece al grupo de especies vegetales capaces de producir glucósidos cianogénicos como mecanismo de defensa y usarlos como fuente de nitrógeno y precursor para la síntesis de aminoácidos y proteínas durante el crecimiento, se puede deducir que, dentro del proceso de asimilación y remoción de cianuro por parte de la especie en los distintos montajes, se liberan este tipo de enzimas, que ocasionan el cambio de color al agua.

Asimismo, se observó que a partir de las primeras 24 horas de ensayos, todos los individuos comenzaban a presentar los primeros signos de desecamiento y aparición de color negro en sus estructuras principales, como hojas y peciolo, evidenciando el daño ocasionado por la retención de cianuro en la planta durante el tratamiento. Al igual que lo indicado por Ramírez (2010), se identificó el olor característico del cianuro similar almendras amargas, producido a lo largo de los ensayos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la fitorremediación de aguas cianuradas de la industria termoquímica con *P. crassipes* podría ser uno de los procesos biológicos alternativos para el tratamiento de las aguas residuales, siempre y cuando, se posean concentraciones de cianuro bajas, se trabajen simulaciones de humedales artificiales con sistemas cerrados y se usen individuos jóvenes para el tratamiento.

El tratamiento a las aguas residuales de la industria termoquímica con *Pontederia crassipes* resultó eficiente en la remoción de cianuro de hasta un 70 %, bajo las siguientes condiciones: agua residual diluida al 20 % con agua destilada, concentración inicial de cianuro de 19,4 mg/L, 4 individuos del buchón de agua reproducidos en el laboratorio y en etapa de crecimiento por cada 2 L de agua a tratar, durante 5 días, simulando humedales artificiales con sistema cerrado.

La concentración máxima experimental de cianuro que fue capaz de absorber la especie *P. crassipes* fue 13 mg/L, en el montaje que poseía las mismas condiciones anteriormente mencionadas. Se evidenció que el uso de individuos más jóvenes de buchón de agua que los recolectados en el humedal potencia la eficiencia de remoción de cianuro, al tomar el cianuro como fuente de nitrógeno para su crecimiento y desarrollo.

Los resultados demostraron que la implementación de sistemas cerrados para el tratamiento de este tipo de agua disminuye significativamente los porcentajes de volatilización, lo que, a su vez, minimiza el riesgo de afectaciones a la salud humana.

Todas las concentraciones experimentales de cianuro probadas en la presente investigación resultaron letales para la planta; se recomienda experimentar con menores concentraciones y disponer de los individuos de buchón de agua como residuos sólidos peligrosos.

## REFERENCIAS

- ACOSTA-ARCE, L.; AGÜERO-ALVARADO, R. 2006. Malezas acuáticas como componentes del ecosistema. *Agronomía mesoamericana*. 17(2):213-219. <https://doi.org/10.15517/am.v17i2.5162>
- CAPOTE, T.J.; MATUTE, S.B.; ROJAS, J.R. 2015. Determinación de la dureza total en agua con EDTA empleando una solución amortiguadora inodora de borato. *Revista del Instituto Nacional de Higiene Rafael Rangel*. 46(1-2):25-37.
- CARREÑO SAYAGO, U. 2020. "Buchón de agua" (*Eichhornia Crassipes*): impulsor de la fitorremediación. Fundación Universitaria Los Libertadores. 94p.
- CONDORCHEM. S.F. Cristalización de sal y agua: Tratamiento de efluentes. Disponible desde Internet en: <https://condorchem.com/es/blog/cristalizacion-de-sal/>
- EBEL, M.; EVANGELOU, M.W.H.; SCHAEFFER, A. 2007. Cyanide phytoremediation by water hyacinths (*Eichhornia crassipes*). *Chemosphere*. 66(5):816-823. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.06.041>
- FARRAJI, H.; ZAMAN, N.; TAJUDDIN, R.; FARAJI, H. 2016. Advantages and disadvantages of phytoremediation: A concise review. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2:69-75.
- HERRERA, D.; MORALES, M.; MORENO, C.; ALZATE, J.; CASTAÑEDA, C. 2019. Biorremediación de aguas residuales mediante *Eichhornia crassipes* y *Lemma minor*. *Microciencia*, 8:56-63.
- INSTITUTO NACIONAL DE SALUD. 2020. Manual de procedimientos para la toma, conservación y envío de muestras al Laboratorio Nacional de Referencia. Disponible desde Internet en: <https://www.ins.gov.co/BibliotecaDigital/Manual-toma-envio-muestras-ins.pdf>.
- JARAMILLO-SALAZAR, M.T.; BUITRAGO-ESCOBAR, D.P.; HENAO-VASCO, S.M.; GALVIS-GARCÍA, J.H. 2016. Manejo de macrófitas acuáticas en la acumulación y transformación de cianuro producto del beneficio del oro en la mina La coqueta. *Boletín Científico Centro de Museos Museo de Historia Natural de Caldas*. 20(1):63-77. <https://doi.org/10.17151/bccm.2016.20.1.6>
- JULIÁN-SOTO, F. 2010. La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias. *Ingeniería, investigación y tecnología*. 11(2):167-177.
- KUMAR, R.; SAHA, S.; DHAKA, S.; KURADE, M.B.; KANG, C.U.; BAEK, S.H.; BYONG-HUN, J. 2016. Remediation of cyanide-contaminated environments through microbes and plants: a review of current knowledge and future perspectives. *Geosystem Engineering*. 1:13.
- MALACATUS, P.; CHAMORRO, E.; ORELLANA, G. 2017. Análisis de eficiencia de remoción de contaminantes de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en extracción de aceite de palma. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*. 2(7):61-68.

- MARTELO, J.; LARA, J. 2012. Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia*. 8(15):221-243.
- NAVA-ALONSO, F.; ELORZA-RODRÍGUEZ, E.; URIBE-SALAS, A.; PÉREZ-GARIBAY, R. 2007. Análisis químico de cianuro en el proceso de cianuración: revisión de los principales métodos. *Revista de Metalurgia*. 43(1):20-28.
- NOVOA, M.A.; MIRANDA, D.; MELGAREJO, L.M. 2018. Efecto de las deficiencias y excesos de fósforo, potasio y boro en la fisiología y el crecimiento de plantas de aguacate (*Persea americana*, cv. Hass). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 12(2):293-307. <https://doi.org/10.17584/rcch.2018vl2i2.8092>
- PÉREZ, J.C.; HIGUERA, O.F. 2008. Comportamiento electroquímico del cianuro. *Ingeniería & Desarrollo*. 24:63-76.
- RAMÍREZ, A.V. 2010. Toxicidad del cianuro. Investigación bibliográfica de sus efectos en animales y en el hombre. *Anales de La Facultad de Medicina*. 71(1):54-61.
- SAHA, P.; MONDAL, A.; SARKAR, S. 2018. Phytoremediation of cyanide containing steel industrial wastewater by *Eichhornia crassipes*. *International Journal of Phytoremediation*. 20(12):1205-1214. <https://doi.org/10.1080/15226514.2017.1375898>
- SRIVASTAVA, A.; DUVVURU, R. 2010. Phytoremediation of Cyanide. En: Ashraf, M; Ozturk, M; Ahmad, M.S.A (Ed.), *Plant Adaptation and Phytoremediation*. Springer. p.399-426. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-9370-7\\_18](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9370-7_18)
- WACHIRAWONGSAKORN, P.; JAMNONGKAN, T.; TALIB, M. 2015. Removal of cyanide-contaminated water by vetiver grasses. *Modern Applied Science*. 9(13):252-262. <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v9n13p252>