

ARTICLE / INVESTIGACIÓN

Fitorremediación de cinco productos farmacéuticos registrados como contaminantes emergentes en medio acuoso empleando la especie Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*)

Phytoremediation of five pharmaceutical products registered as emerging contaminants in an aqueous medium using the species Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*)

Checa-Artos Miriam^{1,2*}, Barcos-Arias Milton^{1,3}, Sosa-Del Castillo Daynet¹, Vanegas María Eulalia⁵, Ruiz-Barzola Omar^{1,4}

DOI: [10.21931/RB/2023.08.01.18](https://doi.org/10.21931/RB/2023.08.01.18)

¹ Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ciencias de la Vida, Centro de Investigaciones Biotecnológicas del Ecuador, Guayaquil, Ecuador.

² Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador.

³ Facultad de Ingenierías. Universidad Espíritu Santo. Samborondón, Ecuador.

⁴ Departamento de Estadística, Universidad de Salamanca, USal, Salamanca, España.

⁵ Centro de Estudios Ambientales, Departamento de Química Aplicada y Sistemas de Producción, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

Corresponding author: mchecha@espol.edu.ec

Resumen: La contaminación de los sistemas acuáticos de agua dulce constituye un problema ambiental recurrente en el ámbito mundial, que se agudiza cada vez más con la presencia frecuente de nuevos compuestos químicos, tal es el caso de los contaminantes emergentes, dentro de los cuales se incluyen los productos farmacéuticos. El objetivo de esta investigación fue estimar la capacidad de la especie jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) para remover del medio acuoso cinco fármacos altamente recetados y de venta libre como ciprofloxacina, ibuprofeno, sulfametaxazol, diclofenaco y acetaminofén. El trabajo se llevó a cabo en condiciones de invernadero a una temperatura de 25 0C y a un pH de 6,5; con una toma de muestras cada 24 h a diferentes concentraciones (3, 6, 9,12) mg/L. Para el análisis de las muestras se utilizó Espectrofotometría UV-VIS con lectura directa de las absorbancias de cada uno de los fármacos. Se empleó la metodología de superficies de respuesta para el análisis estadístico de los datos, lo que permitió determinar los modelos para establecer tiempos y concentraciones óptimas maximizando la absorción de cada producto farmacéutico, así como obtener las pendientes de crecimiento para definir hacia donde se puede proyectar el óptimo. Los principales resultados en este estudio indican que *E. crassipes* removió 95% de diclofenaco en soluciones acuosas con una concentración de 3 mg/L en un tiempo de 24 h, seguido de ciprofloxacina y acetaminofén con una remoción máxima de 91,18% y 71% a las 96 h, respectivamente. Mientras que los más bajos porcentajes de remoción se obtuvo para ibuprofeno y sulfametaxazol con 57,56% y 36%, respectivamente. En el presente estudio, se comprobó la alta capacidad de remoción *E. crassipes* de los cinco productos farmacéuticos en condiciones controladas, evidenciando una gran posibilidad de aplicación en el campo de la fitorremediación de contaminantes emergentes en medio acuoso, lo cual constituye un importante aporte en este ámbito de la investigación.

Palabras clave: Fitorremediación, contaminantes emergentes, jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), superficie de respuesta.

Abstract: Contamination of freshwater aquatic systems is a recurring environmental problem worldwide, which is becoming increasingly acute with the frequent presence of new chemical compounds, such as emerging pollutants, including pharmaceutical products. The objective of this research was to estimate the ability of the water hyacinth species (*Eichhornia crassipes*) to remove from the aqueous environment five highly prescribed and over-the-counter drugs such as ciprofloxacin, ibuprofen, sulfamethoxazole, diclofenac, and acetaminophen. The work was carried out under greenhouse conditions at a temperature of 25 0C and a pH of 6.5; with a sampling every 24 h at different concentrations (3, 6, 9.12) mg/L. For the analysis of the samples, UV-VIS Spectrophotometry was used with direct reading of the absorbances of each one of the drugs. The response surface methodology was used for the statistical analysis of the data, which allowed determining the models to establish optimal times and concentrations maximizing the absorption of each pharmaceutical product, as well as obtaining the growth slopes to define where it can be projected the optimum. The main results in this work indicate that *E. crassipes* removed 95% of diclofenac in aqueous solutions with a concentration of 3 mg/L in 24 h, followed by ciprofloxacin and acetaminophen with a maximum removal of 91.18% and 71% at 96 h, respectively. At the same time, the lowest removal percentages were obtained for ibuprofen and sulfamethoxazole at 57.56% and 36%, respectively. In the present study, the high *Eichhornia crassipes* removal capacity of the five pharmaceutical products under controlled conditions was verified, evidencing a great possibility of application in the phytoremediation of emerging contaminants in an aqueous medium.

Key words: Phytoremediation, emerging contaminants, water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), response surface.

Citation: Checa-Artos M, Barcos-Arias M, Sosa-Del Castillo D, Vanegas M E, Ruiz-Barzola O. Fitorremediación de cinco productos farmacéuticos registrados como contaminantes emergentes en medio acuoso empleando la especie Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*) Revis Bionatura 2023;8 (1)18. <http://dx.doi.org/10.21931/RB/2023.08.01.18>

Received: 26 September 2022 / **Accepted:** 15 October 2022 / **Published:** 15 March 2023

Publisher's Note: Bionatura stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Introducción

Los contaminantes emergentes (CE) tales como los productos farmacéuticos (PFs) y sus metabolitos, productos de cuidado personal (PCP), compuestos disruptores endocrinos (CDE) entre otros, son motivo de preocupación debido a su incidencia en la salud humana y en los ecosistemas acuáticos, cuya presencia se ha detectado en niveles traza en aguas residuales, aguas superficiales y subterráneas e inclusive en agua potable¹⁻⁴.

Las principales fuentes de CE del agua dulce generalmente se originan en las descargas de aguas residuales municipales, de la industria, de las prácticas domésticas, de la agricultura y la ganadería⁵⁻⁷.

Es importante señalar que, a pesar de los avances tecnológicos, los sistemas actuales de tratamiento de aguas residuales no son eficientes para eliminar estos CE⁸. Asimismo, aun no existen suficientes regulaciones que brinden pautas en el tratamiento de CE en el ámbito local y mundial^{9,10}.

En los últimos 20 años, se han llevado a cabo diferentes investigaciones en la mayoría de países del mundo, en las cuales se establece la presencia frecuente de PFs y de demás CE^{4,11,12}. En este contexto, un estudio realizado en Ecuador en el año 2013 por (13), determinó la presencia de algunos PFs como venlafaxina, carbamazepina, sulfametoxazol y benzoilcgonina, en los ríos San Pedro-Guayllabamba-Esmeraldas.

Cabe destacar que, los productos farmacéuticos incluidos en la presente investigación, figuran como los más altamente recetados y de venta libre en todos los continentes, excepto Oceanía^{12,14-17}. Lo que encuentra relación con su aparición frecuente en aguas superficiales, subterráneas, aguas residuales y agua potable^{1,18-26}.

La presencia de fármacos en los ambientes acuáticos y sus riesgos consecuentes, son cada vez más evidentes porque las tecnologías de identificación de estos contaminantes han mejorado sustancialmente^{19,27-30}. Asimismo, el riesgo ambiental como es la resistencia a antibióticos, alteración endócrina y carcinogenicidad, se ha incrementado debido a que las industrias relacionadas con la salud humana y veterinarias han incrementado la producción de PFs, lo que implica un mayor consumo y por tanto mayores descargas a los ecosistemas acuáticos^{2,22,23,27,31-36}.

El derecho de los seres humanos al acceso y consumo de agua segura es un precepto sine qua non para la convivencia en nuestro planeta, esto significa que el suministro de agua potable debe estar garantizado, así como también, la eliminación de aguas residuales a través de la implementación de sistemas eficientes de tratamiento de CE previo a su descarga a las fuentes hídricas, o al uso posterior que se destine como para el riego de cultivos o de áreas verdes^{20,22,37}.

En este sentido, los ecosistemas acuáticos se enfrentan a un alto nivel de estrés y agotamiento, debido a la frecuente y creciente entrada de diversos tipos de contaminantes incluidos los CE³⁸, por lo que se vuelve imprescindible la investigación de sistemas alternativos para prevenir y mitigar la contaminación de las fuentes hídricas.

Los métodos actuales más adoptados para la eliminación de PFs del agua como los antibióticos, incluyen la adsorción avanzada de carbono, la oxidación avanzada, la tecnología de membranas y la degradación fotocatalítica³⁹⁻⁴². Sin embargo, la fitorremediación está siendo em-

pleada como método alternativo principal para reducir los antibióticos de las fuentes de agua debido a su bajo costo, amplio espectro, manejo simple y libre de subproductos contaminantes^{36,40}.

La especie *Eichhornia crassipes* es una planta acuática flotante cuyas raíces intervienen en la absorción de todo tipo de contaminantes del agua como metales pesados, compuestos orgánicos, pesticidas, PFs, entre otros⁴³⁻⁴⁵. Estas características de la especie han permitido que se instalen sistemas de tratamiento de aguas residuales en varios países como en la India y otros países asiáticos³⁸. Asimismo, la combinación adecuada de *Eichhornia crassipes* con otras plantas acuáticas como la alga de pato y las algas verde azules produce una reducción de contaminantes superior a la *E. crassipes* por sí sola⁴⁶.

Con estos antecedentes, se seleccionó la especie jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), debido a sus características morfológicas y fisiológicas, así como también por la versatilidad de la especie para remover del medio acuoso diferentes tipos de contaminantes orgánicos, inorgánicos e inclusive algunos CE como los PFs^{43,44,47-50}.

En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo principal contribuir con una técnica probada bajo condiciones controladas para la fitorremediación de acetaminofén, ciprofloxacina, diclofenaco, sulfametoxazol e ibuprofeno, utilizando jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*).

Materiales y métodos

Recolección y acondicionamiento de la especie jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*)

El experimento se realizó en el Centro de Investigaciones Biotecnológicas del Ecuador (CIBE) de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), las plántulas de *E. crassipes* se recolectó de un estero ubicado en la vía Durán – Tambo a 14 msnm, luego de lo cual se lavó a fondo sus raíces con agua de grifo y se acondicionó su permanencia en un pozo artificial durante 30 días. Posteriormente, las plántulas fueron trasladadas al invernadero para la experimentación bajo condiciones controladas. Este es un procedimiento basado en lo desarrollado por (43).

Diseño del experimento

Para el estudio se obtuvo cinco PFs (sulfametoxazol, ciprofloxacina, acetaminofén, ibuprofeno y diclofenaco) de la marca SIGMA-ALDRICH al 99,9% de pureza. De cada PFs se preparó soluciones acuosas por triplicado, utilizando metanol ultrapuro de la marca Merck a cuatro concentraciones diferentes (3, 6, 9 y 12) mg/L, manteniendo la temperatura de 25°C y un pH de 6,5 durante todo el experimento. Se estableció cuatro tiempos de muestreo (24, 48, 72 y 96) h. Se trabajó con un volumen de 2 litros de solución de cada concentración del fármaco, luego se introdujo las plántulas de *E. crassipes* de un peso aproximado de 60 g. Concluido el tiempo de exposición, se tomó alícuotas de cada unidad experimental para su posterior análisis, para lo cual se utilizó la técnica de espectrofotometría de luz UV visible para medir la absorbancia de cada uno de los fármacos.

Se utilizó el diseño factorial, con , con dos puntos internos donde los factores fueron concentración () y tiempo (); los niveles considerados se indican en la figura 1.

En la determinación del porcentaje de remoción (%) de

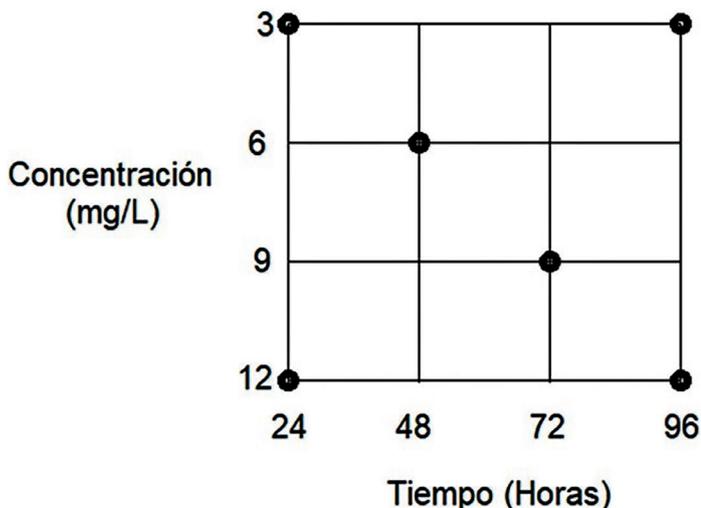


Figura 1. Esquema del diseño experimental con *Eichhornia crassipes*.

los PFs de estudio, que constituye la variable de respuesta se aplicó la fórmula 1:

$$\% = \frac{\text{Concentración inicial} - \text{Concentración final}}{\text{Concentración inicial}} \times 100 \quad (1)$$

Análisis de datos

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el software estadístico R versión 3.6.0 y RStudio versión 1.1.453 y se empleó la técnica de superficies de respuesta para encontrar los modelos que ayuden a determinar tiempos y concentraciones óptimas donde se maximizó la absorción de cada fármaco, así como la obtención de las pendientes de crecimiento para determinar hacia donde se deberá buscar el óptimo, en los casos donde no se los encontró.

Resultados

Modelo General

El modelo general de la superficie de respuesta está representado en la ecuación (1).

$$Y = b_0 + b_1C + b_2T + b_3C^2 + b_4T^2 + b_6C * T \quad (1)$$

La matriz resultante no permitió obtener un modelo polinómico de grado 2 para ambos factores en forma simultánea, por lo que se desarrolló un modelo con forma cuadrática para un factor, mientras se mantuvo la linealidad en el otro factor, conforme a las ecuaciones (2), (3). El modelo general de la superficie de respuesta está representado por la ecuación:

- Donde,
- = porcentaje de remoción
 - = intercepto
 - = coeficientes del modelo
 - = Concentración
 - = Tiempo

Con la finalidad de describir gráficamente de mejor forma el fenómeno, en todas las ecuaciones se mantuvo los coeficientes de los efectos simples o de orden uno, los efectos cuadráticos y la interacción, aun cuando en algunas

ocasiones no hayan resultado significativos.

En el modelo obtenido para sulfametaxazol (Figura 2A), los coeficientes de las variables C, T, T² no fueron significativos, ver la ecuación (4).

Si se examina el modelo considerando al tiempo como un factor cuadrático que le da curvatura al modelo, se presenta que el coeficiente de la interacción entre los factores de tiempo y concentración no es significativo, en comparación a los otros coeficientes.

Eichhornia crassipes fue menos eficiente removiendo sulfametaxazol en comparación con el resto de fármacos en estudio, dado que se evidencia porcentajes bajos de remoción de este fármaco a medida que se aumenta la concentración y el tiempo (48 y 72 h). Asimismo, se observa que el mayor porcentaje de remoción de 36,05% se da con la concentración más baja de 3 mg/L a las 24 h, este porcentaje de remoción es el más bajo en comparación con los restantes cuatro fármacos de estudio.

En el caso de la ciprofloxacina (Figura 2B), se visualiza que el modelo no presenta concavidad, dado que el coeficiente del término cuadrático es pequeño, de acuerdo con la ecuación (5).

El valor óptimo de remoción al 91,18% se da con una concentración de 3 mg/L y un tiempo de 96 h, lo que demuestra la eficiencia de *Eichhornia crassipes* en la remoción de este fármaco en medio acuoso. Se puede observar que el porcentaje de remoción disminuye en relación con el aumento de la concentración.

En el modelo estudiado para el ibuprofeno (Figura 2C), se presenta un modelo que obtiene la mayor información, acorde a la ecuación (6).

En este caso, se evidencia que el valor óptimo de porcentaje de remoción 65,04% se ha obtenido con una concentración de 12 mg/L en un tiempo de 60 h, estos resultados indican una eficiencia aceptable de *Eichhornia crassipes* en la remoción de este PF. A su vez, se observa que a mayor tiempo y a menor concentración se obtienen porcentajes de remoción bajos. Es decir, en el nivel de concentración más bajo se obtiene el porcentaje de remoción mínimo.

C^2	T^2
$Y = b_0 + b_1C + b_2T + b_3C^2 + b_4T * C \quad (2)$	$Y = b_0 + b_1C + b_2T + b_3T^2 + b_4C * T \quad (3)$

En el modelo estudiado para el diclofenaco (Figura 2D), los valores de la variable T, T² y C T son significativos, ver la ecuación (7).

En este rango de estudio, se observa que el diclofenaco inicia con un porcentaje de remoción de 95,01%, con una concentración de 3 mg/L en un tiempo de 24 h, lo que señala una alta eficiencia de *Eichhornia crassipes* en la remoción de diclofenaco. Como se visualiza en la figura 2D, dicho porcentaje presenta un descenso pronunciado, es decir, a medida que aumenta el tiempo se produce el proceso inverso y el porcentaje de remoción comienza a reducirse. Mientras que, por el contrario, con una concentración de 12 mg/L, el porcentaje de remoción inicia de 23,32% y a medida que se aumenta el tiempo, el porcentaje de remoción va aumentando.

En las condiciones estudiadas para el acetaminofén (Figura 2E), los valores de las variables de la concentración y la interacción de esta con el tiempo no son significativos para el estudio, ver la ecuación (8).

En el rango estudiado para el acetaminofén, se observa que existen dos casos, el primero muestra que con una concentración de 3 mg/L y a medida que aumenta el tiempo, se alcanza un porcentaje máximo de remoción de 71,09%. Para el segundo caso con una concentración de 12 mg/L y a medida que aumenta el tiempo se alcanza un máximo de remoción de 70,57%. Estos resultados indican una buena capacidad removedora de este fármaco por parte de *Eichhornia crassipes* a diferentes concentraciones. Adicionalmente, se observa que para alcanzar el valor óp-

timo es necesario usar una concentración baja (3 mg/L) y aumentar el tiempo.

Discusión

Los resultados obtenidos demostraron la capacidad de *Eichhornia crassipes* para remover los cinco fármacos estudiados en medio acuoso, en un periodo experimental de 96 h a diferentes concentraciones consideradas en esta investigación (3, 6, 9 y 12 mg/L).

La especie *E. crassipes* presentó un porcentaje de remoción relativamente bajo de sulfametaxazol de 36,05% en soluciones del fármaco con una concentración de 3 mg/L a las 24 h (Figura 2A). En el estudio realizado por (51), se obtuvo del 70% al 90% de remoción de sulfametoxazol, a las 96 h de exposición con *Typha latifolia*, lo que indica que dicha especie es más eficiente en la remoción de este fármaco que *E. crassipes*.

En la Figura 2B, se observa que el valor óptimo de remoción de ciprofloxacina de 91,18%, se obtuvo con una concentración de 3 mg/L a las 96 h de exposición. En el estudio llevado a cabo por (40), se encontró que la absorción de ciprofloxacina de *E. crassipes* fue de hasta 84,38% y la raíz fue el principal tejido de absorción.

Asimismo, en el caso del ibuprofeno, *E. crassipes* presentó un valor óptimo en el porcentaje de remoción 65,04% con una concentración de 12 mg/L en un tiempo de 60 h (Figura 2C). Estos resultados son comparables con la investigación de (49), que reportó que *Typha* eliminó casi el 60% de ibuprofeno en las primeras 24 h, logrando una re-

$$\% \text{ de remoción} = 44.24 - 0.7534 C - 0.3033 T + 0.0024 T^2 - 0.0005 C * T \quad (4)$$

$$\% \text{ de remoción} = 94.35 - 0.9461 C - 0.0398 T + 0.0004 T^2 + 0.0007 C * T \quad (5)$$

$$\% \text{ de remoción} = -39.86 + 1.0694 C + 2.8956 T - 0.0249 T^2 + 0.0110 C * T \quad (6)$$

$$\% \text{ de remoción} = 172.26 - 12.74 C - 2.1989 T - 0.0010 T^2 + 0.1987 C * T \quad (7)$$

$$\% \text{ de remoción} = 83.06 + 0.9396 C - 1.1035 T + 0.0102 T^2 - 0.0104 C * T \quad (8)$$

FÁRMACO	C ²	T ²
SULFAMETOXAZOLE (SMX)	$Y = 44.24 - 3.07 C - 0.0142 T + 0.1542 C^2 - 0.0005 C * T$	$Y = 44.24 - 0.7534 C - 0.3033 T + 0.0024 T^2 - 0.0005 C * T$
CIPROFLOXACINA (Cx)	$Y = 94.35 - 1.2874 C + 0.0029 T + 0.0228 C^2 + 0.0007 C * T$	$Y = 94.35 - 0.9461 C - 0.0398 T + 0.0004 T^2 + 0.0007 C * T$
ACETAMINOFEN (AC)	$Y = 83.06 - 8.8664 C + 0.1223 T + 0.6537 C^2 - 0.0104 C * T$	$Y = 83.06 + 0.9396 C - 1.1035 T + 0.0102 T^2 - 0.0104 C * T$
IBUPROFENO (IB)	$Y = -39.86 + 24.97 C - 0.0917 T - 1.59 C^2 + 0.0111 C * T$	$Y = -39.86 + 1.0694 C + 2.8956 T - 0.0249 T^2 + 0.0110 C * T$
DICLOFENACO (DF)	$Y = 172.26 - 11.78 C - 2.3189 T - 0.0640 C^2 + 0.1987 C * T$	$Y = 172.26 - 12.74 C - 2.1989 T - 0.0010 T^2 + 0.1987 C * T$

Tabla 1. Modelo de superficie de respuesta, obtenidos para cada uno de los fármacos de estudio con *Eichhornia crassipes*. Este es un modelo con forma cuadrática para un factor, mientras se mantuvo la linealidad en el otro factor.

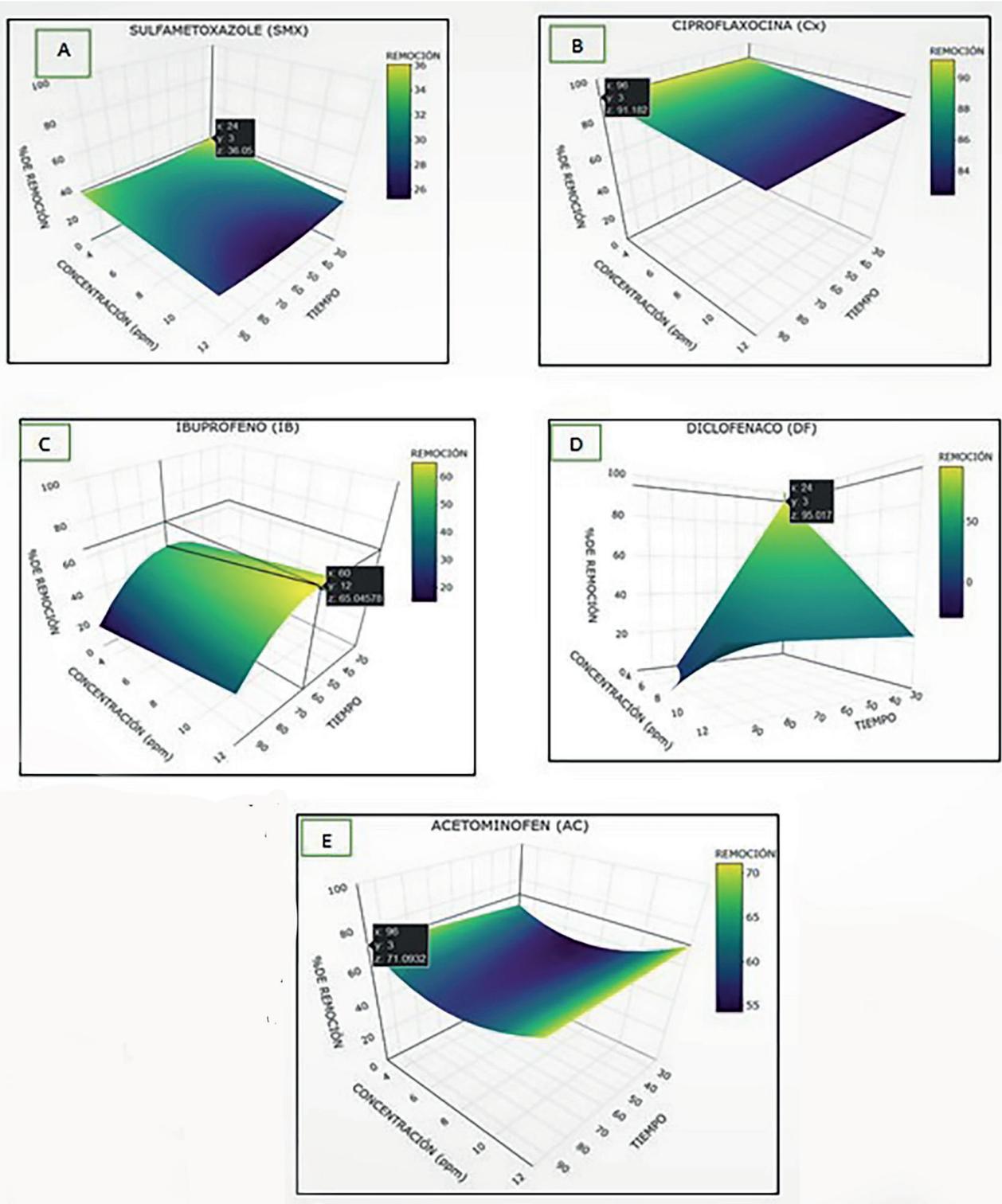


Figura 2. Resultados obtenidos con la técnica superficie de respuesta para la remoción con *Eichhornia crassipes* de los fármacos A) sulfametoxazol (SMX), B) ciprofloxacina (CX), C) ibuprofeno (IBU), D) diclofenaco (DF) y E) acetaminofén (AC) en medio acuoso.

moción superior al 99%, en una solución de ibuprofeno con una concentración inicial de 20 mg/L, en un periodo de 21 días. Asimismo, un estudio realizado por (52), reportó que *Phragmites australis* eliminó completamente el ibuprofeno del medio líquido después de 21 días.

Por un lado, se observa que se alcanzó un porcentaje de remoción de 95.01% de diclofenaco, a una concentración de 3mg/L en un tiempo de 24 h (Figura 2D), mientras

que, con una concentración alta de 12mg/L, el porcentaje de remoción inicia con 23,32% y a medida que aumenta el tiempo, el porcentaje de remoción se incrementa. Según (52), *Phragmites australis* removió 18% de diclofenaco en soluciones con concentraciones de 30 mg/L, en un periodo de 14 días, lo que demuestra que *E. crassipes* se comporta de forma más eficiente en la remoción del fármaco en mención.

Se presentan dos casos en cuanto al acetaminofén (Figura 2E), el primero muestra que *E. crassipes* con una concentración de 3 mg/L y a medida que aumenta el tiempo se obtuvo un porcentaje máximo de remoción de 71,09%. Para el segundo caso, con una concentración de 12 mg/L y a medida que aumenta el tiempo se estableció un máximo de remoción de 70,57%.

En este escenario, es importante señalar que *Eichhornia crassipes*, tiene un comportamiento similar a algunas especies de plantas acuáticas, *Ipomoea aquatica*, *Azolla caroliniana*, *Lemna minor*, *Phragmites australis*, *Typha latifolia*, *Salix atrocinerea* y *Scirpus validushan*, que han demostrado capacidad para remover ciprofloxacina, ibuprofeno, diclofenaco, sulfametaxazol y acetaminofén de las aguas residuales, que han logrado una alta eficacia de remoción de entre el 70% y 90%^{44,53-55}.

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten establecer que *E. crassipes* presentó un comportamiento eficiente en la remoción de los cinco fármacos de estudio, lo que demuestra que esta técnica de fitorremediación probada a nivel laboratorio puede ser prometedora a mayor escala, lo cual guarda coherencia con lo reportado por la literatura científica.

Conclusiones

En esta investigación, se comprobó la eficiencia de la especie *Eichhornia crassipes* con un importante porcentaje de remoción de los cinco PFs estudiados bajo condiciones controladas en medio acuoso.

Los mejores resultados se registraron cuando *Eichhornia crassipes* removió DF en un 95% de una solución con una concentración de 3 mg/L en un tiempo de 24 h. De la misma manera, el porcentaje de remoción máxima de 91,18% y 71% respectivamente de CX y AC, se obtuvo en soluciones con una concentración de 3 mg/L y a las 96 h de exposición, así como el IB, que alcanzó una remoción máxima del 57,56% en soluciones con una concentración de 7.5 mg/L en el tiempo de 24 h.

Por otro lado, el SMX reportó un porcentaje menor de remoción alcanzando un 36 % que se estableció en soluciones con una concentración de 3 mg/L, a las 24 h de exposición. Este resultado tiene relevancia al comparar con otras especies reportadas en la literatura, que en similares condiciones de experimentación alcanzaron menores porcentajes de remoción de este fármaco.

Como se puede evidenciar en esta investigación, a través de la metodología superficie de respuesta se estableció los máximos porcentajes de remoción de los cinco PFs en condiciones controladas. Asimismo, con esta base, se puede proyectar futuras investigaciones para buscar los tiempos y concentraciones óptimos.

Esto, a su vez, dará un impulso para la transferencia de tecnología, de tal forma que las plantas de tratamiento de aguas residuales existentes pueden volverse más eficientes desde el punto de vista tecnológico y económico, al contar con una alternativa sostenible como es la fitorremediación de PFs en medio acuoso, potenciando las instalaciones con un enfoque de economía circular.

Agradecimientos

Al Centro de Investigaciones Biotecnológicas de la Escuela Superior Politécnica del Litoral por haber facilitado las instalaciones del invernadero y sus laboratorios para el de-

sarrollo de los experimentos. Así mismo, se le agradece el financiamiento proveniente de la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC) a través del proyecto DUIC_XIV_2016_037.

Referencias bibliográficas

1. Fekadu, S., Alemayehu, E., Dewil, R. & Van der Bruggen, B. Pharmaceuticals in freshwater aquatic environments: A comparison of the African and European challenge. *Sci. Total Environ.* 654, 324–337 (2019).
2. Bagnis, S. et al. Characterization of the Nairobi River catchment impact zone and occurrence of pharmaceuticals: Implications for an impact zone inclusive environmental risk assessment. *Sci. Total Environ.* 703, 134925 (2020).
3. Desbiolles, F., Malleret, L., Tiliacos, C., Wong-Wah-Chung, P. & Laffont-Schwob, I. Occurrence and ecotoxicological assessment of pharmaceuticals: Is there a risk for the Mediterranean aquatic environment? *Sci. Total Environ.* 639, 1334–1348 (2018).
4. Sharma, B. M. et al. Health and ecological risk assessment of emerging contaminants (pharmaceuticals, personal care products, and artificial sweeteners) in surface and groundwater (drinking water) in the Ganges River Basin, India. *Sci. Total Environ.* 646, 1459–1467 (2019).
5. Archer, E., Wolfaardt, G. M. & van Wyk, J. H. Pharmaceutical and personal care products (PPCPs) as endocrine disrupting contaminants (EDCs) in South African surface waters. *Water SA* 43, 684–706 (2017).
6. Quesada, H. B. et al. Surface water pollution by pharmaceuticals and an alternative of removal by low-cost adsorbents: A review. *Chemosphere* 222, 766–780 (2019).
7. Ravikumar, Y., Yun, J., Zhang, G., Zabel, H. M. & Qi, X. A review on constructed wetlands-based removal of pharmaceutical contaminants derived from non-point source pollution. *Environ. Technol. Innov.* 26, 102504 (2022).
8. Yang, Y., Ok, Y. S., Kim, K. H., Kwon, E. E. & Tsang, Y. F. Occurrences and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in drinking water and water/sewage treatment plants: A review. *Sci. Total Environ.* 596–597, 303–320 (2017).
9. Küster, A. & Adler, N. Pharmaceuticals in the environment: Scientific evidence of risks and its regulation. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 369, (2014).
10. Caviedes, Diego., Delgado, D. Environmental normativity to regulate the presence of residual pharmaceutical products in aquatic environments. *Rev. Jurídica* 16, 121–130 (2017).
11. Kermia, A. E. B., Fouial-Djebbar, D. & Trari, M. Occurrence, fate and removal efficiencies of pharmaceuticals in wastewater treatment plants (WWTPs) discharging in the coastal environment of Algiers. *Comptes Rendus Chim.* 19, 963–970 (2016).
12. Klein, E. Y. et al. Global increase and geographic convergence in antibiotic consumption between 2000 and 2015. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 115, E3463–E3470 (2018).
13. Voloshenko-Rossin, A. et al. Emerging pollutants in the Esmeraldas watershed in Ecuador: Discharge and attenuation of emerging organic pollutants along the San Pedro-Guayllabamba-Esmeraldas rivers. *Environ. Sci. Process. Impacts* 17, 41–53 (2015).
14. Ebele, A. J., Abou-Elwafa Abdallah, M. & Harrad, S. Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the freshwater aquatic environment. *Emerg. Contam.* 3, 1–16 (2017).
15. Gogoi, A. et al. Occurrence and fate of emerging contaminants in water environment: A review. *Groundw. Sustain. Dev.* 6, 169–180 (2018).
16. Kalia, V. C. Pharmaceutical and personal care product contamination: a global scenario. *Pharmaceuticals and Personal Care Products: Waste Management and Treatment Technology* (Elsevier Inc., 2019). doi:10.1016/b978-0-12-816189-0.00002-0
17. KwarciaK-Kozłowska, A. Removal of pharmaceuticals and personal care products by ozonation, advance oxidation processes, and membrane separation. *Pharmaceuticals and Personal Care Products: Waste Management and Treatment Technology* (Elsevier Inc., 2019). doi:10.1016/b978-0-12-816189-0.00007-x

18. Kibuye, F. A. et al. Fate of pharmaceuticals in a spray-irrigation system: From wastewater to groundwater. *Sci. Total Environ.* 654, 197–208 (2019).
19. Miller, T. H., Bury, N. R., Owen, S. F., MacRae, J. I. & Barron, L. P. A review of the pharmaceutical exposome in aquatic fauna. *Environ. Pollut.* 239, 129–146 (2018).
20. Shraim, A. et al. Analysis of some pharmaceuticals in municipal wastewater of Almadinah Almunawarah. *Arab. J. Chem.* 10, S719–S729 (2017).
21. Guerra, P., Kim, M., Shah, A., Alaei, M. & Smyth, S. A. Occurrence and fate of antibiotic, analgesic/anti-inflammatory, and antifungal compounds in five wastewater treatment processes. *Sci. Total Environ.* 473–474, 235–243 (2014).
22. Semerjian, L., Shanableh, A., Semreen, M. H. & Samarai, M. Human health risk assessment of pharmaceuticals in treated wastewater reused for non-potable applications in Sharjah, United Arab Emirates. *Environ. Int.* 121, 325–331 (2018).
23. Zhang, Y. et al. Wastewater-based epidemiology in Beijing, China: Prevalence of antibiotic use in flu season and association of pharmaceuticals and personal care products with socioeconomic characteristics. *Environ. Int.* 125, 152–160 (2019).
24. Yang, Y., Ok, Y. S., Kim, K.-H., Kwon, E. E. & Tsang, Y. F. Occurrences and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in drinking water and water/sewage treatment plants: A review. *Sci. Total Environ.* 596–597, 303–320 (2017).
25. Sui, Q. et al. Occurrence, sources and fate of pharmaceuticals and personal care products in the groundwater: A review. *Emerg. Contam.* 1, 14–24 (2015).
26. Peña-Álvarez, A. & Castillo-Alanís, A. Identificación y cuantificación de contaminantes emergentes en aguas residuales por microextracción en fase sólida-cromatografía de gases-espectrometría de masas (MEFS-CG-EM). *TIP* 18, 29–42 (2015).
27. Szekeres, E. et al. Investigating antibiotics, antibiotic resistance genes, and microbial contaminants in groundwater in relation to the proximity of urban areas. *Environ. Pollut.* 236, 734–744 (2018).
28. Guo, Y., Qi, P. S. & Liu, Y. Z. A Review on Advanced Treatment of Pharmaceutical Wastewater. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 63, (2017).
29. Buonocore, E., Mellino, S., De Angelis, G., Liu, G. & Ulgiati, S. Life cycle assessment indicators of urban wastewater and sewage sludge treatment. *Ecol. Indic.* 94, 13–23 (2018).
30. Rasheed, T., Bilal, M., Nabeel, F., Adeel, M. & Iqbal, H. M. N. Environmentally-related contaminants of high concern: Potential sources and analytical modalities for detection, quantification, and treatment. *Environ. Int.* 122, 52–66 (2019).
31. Riva, F., Zuccato, E., Davoli, E., Fattore, E. & Castiglioni, S. Risk assessment of a mixture of emerging contaminants in surface water in a highly urbanized area in Italy. *J. Hazard. Mater.* 361, 103–110 (2019).
32. Wang, J. & Wang, S. Removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) from wastewater: A review. *J. Environ. Manage.* 182, 620–640 (2016).
33. Rivera-Jaimes, J. A. et al. Study of pharmaceuticals in surface and wastewater from Cuernavaca, Morelos, Mexico: Occurrence and environmental risk assessment. *Sci. Total Environ.* 613–614, 1263–1274 (2018).
34. Hossain, A. et al. Occurrence and ecological risk of pharmaceuticals in river surface water of Bangladesh. *Environ. Res.* 165, 258–266 (2018).
35. Wilkinson, J. L., Hooda, P. S., Barker, J., Barton, S. & Swinden, J. Ecotoxic pharmaceuticals, personal care products, and other emerging contaminants: A review of environmental, receptor-mediated, developmental, and epigenetic toxicity with discussion of proposed toxicity to humans. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 46, (2016).
36. Liu, C., Tan, L., Zhang, L., Tian, W. & Ma, L. A Review of the Distribution of Antibiotics in Water in Different Regions of China and Current Antibiotic Degradation Pathways. *Front. Environ. Sci.* 9, 1–24 (2021).
37. Liu, Y. et al. Toxic effects of diclofenac on life history parameters and the expression of detoxification-related genes in *Daphnia magna*. *Aquat. Toxicol.* 183, (2017).
38. Ali, A., Naeem, M., Singh, S. & Alzuaibr, F. M. Phytoremediation of contaminated waters: An eco-friendly technology based on aquatic macrophytes application. *Egypt. J. Aquat. Res.* (2020). doi:10.1016/j.ejar.2020.03.002
39. Patel, M. et al. Pharmaceuticals of emerging concern in aquatic systems: Chemistry, occurrence, effects, and removal methods. *Chemical Reviews* 119, (2019).
40. Yan, Y. et al. Phytoremediation of antibiotic-contaminated wastewater: Insight into the comparison of ciprofloxacin absorption, migration, and transformation process at different growth stages of *E. crassipes*. *Chemosphere* 283, 131192 (2021).
41. Chen, Q. et al. Optimization of photocatalytic degradation conditions and toxicity assessment of norfloxacin under visible light by new lamellar structure magnetic ZnO/g-C₃N₄. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 225, 112742 (2021).
42. He, Y. et al. Evaluation of attenuation of pharmaceuticals, toxic potency, and antibiotic resistance genes in constructed wetlands treating wastewater effluents. *Sci. Total Environ.* 631–632, 1572–1581 (2018).
43. Khare, A. & P. Lal, E. Waste Water Purification Potential of *Eichhornia crassipes* (Water Hyacinth). *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 6, 3723–3731 (2017).
44. Lin, Y. L. & Li, B. K. Removal of pharmaceuticals and personal care products by *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes*. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 58, 318–323 (2016).
45. Mahbub, M. et al. Chemosphere Highly effective water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) waste-based functionalized sustainable green adsorbents for antibiotic remediation from wastewater. *Chemosphere* 304, 135293 (2022).
46. Ansari, A. A., Naeem, M., Gill, S. S. & AlZuaibr, F. M. Phytoremediation of contaminated waters: An eco-friendly technology based on aquatic macrophytes application. *Egypt. J. Aquat. Res.* (2020). doi:10.1016/j.ejar.2020.03.002
47. Carlini, M., Castellucci, S. & Mennuni, A. Water hyacinth biomass: Chemical and thermal pre-treatment for energetic utilization in anaerobic digestion process. *Energy Procedia* 148, 431–438 (2018).
48. Bote, M. A., Naik, V. R. & Jagadeeshgouda, K. B. Review on water hyacinth weed as a potential bio fuel crop to meet collective energy needs. *Mater. Sci. Energy Technol.* 3, 397–406 (2020).
49. Madikizela, L. M., Ncube, S. & Chimuka, L. Uptake of pharmaceuticals by plants grown under hydroponic conditions and natural occurring plant species: A review. *Sci. Total Environ.* 636, 477–486 (2018).
50. Saha, P., Shinde, O. & Sarkar, S. Phytoremediation of industrial mines wastewater using water hyacinth. *Int. J. Phytoremediation* 19, 87–96 (2017).
51. Cui, H. Options for the Phytoremediation of Polar Pharmaceuticals: Uptake and Removal of Metformin and Iopromide by *Typha latifolia* L. (2016).
52. He, Y. et al. Metabolism of Ibuprofen by *Phragmites australis*: Uptake and Phytodegradation. *Environ. Sci. Technol.* 51, 4576–4584 (2017).
53. Cardinal, P. et al. Macrophytes may not contribute significantly to removal of nutrients, pharmaceuticals, and antibiotic resistance in model surface constructed wetlands. *Sci. Total Environ.* 482, 294–304 (2014).
54. Yan, Y. et al. Migration of antibiotic ciprofloxacin during phytoremediation of contaminated water and identification of transformation products. *Aquat. Toxicol.* 219, 105374 (2020).
55. He, Y. et al. Improving removal of antibiotics in constructed wetland treatment systems based on key design and operational parameters: A review. *J. Hazard. Mater.* 407, 124386 (2021).