

Humedales artificiales flotantes y su valor paisajístico en ríos urbanos-Ciudad de Panamá

Denise Delvalle de Borrero² , Katherine Fuentes¹  & Juan Medina¹ 

¹Licenciatura en Ingeniería Ambiental - Universidad Tecnológica de Panamá,
²Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotecnia-Universidad Tecnológica de Panamá

denise.borrero@utp.ac.pa; katherinefuentes2996@gmail.com;

jmr2095@gmail.com

DOI: 10.33412/pri.v13.1.2871



Resumen: *Los humedales artificiales son tecnologías que aprovechan la capacidad de depuración de las plantas y su capacidad para mejorar la calidad y el estado de los cuerpos de agua, conocida como fitorremediación. Las aplicaciones en el tratamiento de agua de distintas procedencias son amplias. Dentro de esta gama de aplicaciones destacan los Humedales Artificiales Flotantes (HAF) como soluciones innovadoras con un potencial de tratamiento mayor al de otros métodos convencionales de fitorremediación. Este artículo presenta las posibles ventajas de su implementación en ríos urbanos, especialmente en la ciudad de Panamá. Los HAF como micro ecosistemas se recomiendan como alternativa verde para el tratamiento de estos ríos con la consecuente mejora de la calidad de vida de los habitantes y el entorno.*

Palabras claves: Cuerpos de agua, contaminación, fitorremediación, humedal artificial flotante, paisajismo.

Title: Landscaping value of Constructed floating wetlands for urban rivers -Panama City.

Abstract: *Constructed wetlands are technologies that take advantage of the purification capacity of vegetation and the ability to improve the quality and condition of water bodies, which is known as phytoremediation. The applications in the treatment of water from different sources are wide. Within this range of applications, Floating Artificial Wetlands (HAF) stand out as innovative solutions with a higher treatment potential than other conventional phytoremediation methods. This work presents the possible advantages of its implementation in urban rivers, especially in Panama City. HAFs, resemble micro ecosystems and are recommended as green alternatives for the treatment of polluted rivers with the consequent improvement of life quality for inhabitants and the environment.*

Key words: water bodies, pollution, phytoremediation, constructed floating wetlands, landscaping.

Tipo de artículo: Artículo de Impacto

Fecha de recepción: 16 de octubre de 2020.

Fecha de aceptación: 31 de enero de 2022.

1. Introducción

Es un hecho que las poblaciones se ubican a las márgenes de los ríos y en las costas, el ser humano necesita agua para sobrevivir, cultivar y prosperar. La demanda de agua dulce se incrementa de manera proporcional al aumento de la población; y los recursos hídricos se afectan por la captación excesiva, la contaminación de origen antropogénico y el cambio climático [1]. Hoy en día la calidad de las fuentes puede verse afectada por falta de regulaciones para protección del recurso. Muchas industrias descargan a los afluentes y contaminan ríos que a su vez sirven de fuente a las potabilizadoras que abastecen a las ciudades.

El recurso hídrico en Panamá es, por ahora, abundante. En el país existen alrededor de 500 ríos, de los cuales 350 drenan en el Pacífico y 150 drenan en el Mar Caribe; divididos en 67 sistemas lacustres, insertados en 52 cuencas hidrográficas (18 en la vertiente del Caribe y 34 en la vertiente del Pacífico) [2]. Sus usos pueden cuantificarse en uso doméstico (56%), seguido por las actividades agrícolas (43%) e industriales (0.9%) [3].

Según informaciones recogidas del Ministerio de Ambiente de Panamá (MiAmbiente), cerca del 60% de los ríos de la Provincia de Panamá muestra índices de contaminación en las partes medias y zonas bajas de sus respectivas cuencas [4]. Entre estos, los 8 ríos ubicados en la ciudad de Panamá se encuentran contaminados debido a la falta de educación ambiental, al crecimiento de la población, mala planificación urbana, deficiente manejo de los desechos e incumplimiento de normas ambientales. Estos cuerpos de agua representan un riesgo para la salud y la calidad de vida de los residentes aledaños [4], [5].

La *fitorremediación* (FR) es una tecnología empleada para reducir las concentraciones de contaminantes mediante el uso de plantas. Algunos procesos implican la absorción, precipitación, filtración, almacenaje y detoxificación de contaminantes. La FR se aplica en el tratamiento de diversos tipos de aguas residuales domésticas y efluentes industriales. La técnica se emplea en conjunto con estructuras construidas como: humedales artificiales, lechos de juncos y sistemas de plantas flotantes [6], [7].

Por definición, los humedales artificiales son sistemas de tratamiento de agua, diseñados para eliminar contaminantes mediante procesos físicos y bioquímicos, que incluyen sedimentación, degradación microbiana, acción de plantas (*fitorremediación*), asimilación, filtración, precipitación, absorción y volatilización [8]. Estos sistemas se diseñan de manera que simulan escenarios de zonas húmedas naturales. Los sistemas más populares encontrados en la literatura incluyen aquellos de flujo libre superficial, de flujo horizontal y flujo vertical. Existen también, otros sistemas como los humedales híbridos (o de flujo combinado) y los humedales artificiales flotantes (HAF),

conocidos como islas flotantes que son los que nos ocupan en adelante como posibles soluciones a la contaminación de ciertos ríos urbanos.

Los HAF son variantes innovadoras de humedales artificiales, que consisten en el cultivo de plantas terrestres o acuáticas usando el principio de la hidroponía. Estos sistemas tienen cuatro funciones principales: ser hábitat para peces y aves, purificar el agua, ser barreras para proteger la zona litoral y promover el paisajismo.

La aplicación de HAF se ha extendido en varios países de América, Asia y Europa [6], [9]–[11]. En algunos países en desarrollo, con clima tropical, han sido utilizados con éxito para tratar aguas residuales domésticas, efluentes industriales, aguas residuales agrícolas, aguas de ríos y lagos, efluentes de lodos, escorrentía e, incluso, aguas residuales de hospitales y laboratorios [12]. La efectividad es clima-dependiente: es mayor en los trópicos y subtrópicos que en climas más templados [13]. Además, se prevé que el aumento de la temperatura, producto del cambio climático, puede incrementar la tasa de remoción de contaminantes en humedales [8].

Los sistemas de HAF han demostrado ser ecológicos y sostenibles y su uso permite la protección de la vida silvestre sin impactos significativos, por lo cual son aplicables como medidas de restauración de ecosistemas degradados por intervención antropogénica.

El objetivo de trabajo es resaltar la utilidad de humedales artificiales en situaciones de fuerte contaminación como lo pueden ser aquellos ríos urbanos que recorren secciones enteras de la ciudad. En este sentido, la instalación de humedales artificiales flotantes puede ayudar a mejorar la calidad del agua específicamente en el punto de remoción de contaminantes, eliminación de los olores. Finalmente vuelve atractivas las riveras de los ríos.

2. Metodología

Para la redacción de este artículo se revisaron artículos científicos, bases de datos y páginas institucionales, en busca de información relacionada a humedales artificiales flotantes o a la calidad de las aguas superficiales. Con base en esta revisión, presentamos una perspectiva de sus ventajas y desventajas, para evaluar la viabilidad de su implementación en algunos sectores de la Ciudad de Panamá que se ven afectados desde el punto de vista estético, económico y de salubridad por aguas contaminadas.

2.1 Características del área de posible aplicación de HAF en ciudad de Panamá

La precipitación promedio anual en la República de Panamá es de 1917 mm, esto induce a que los ríos de la Ciudad se desborden, causen inundaciones y arrastren desechos a su paso, descargándolos en la Bahía de Panamá [14].

La Ciudad de Panamá tiene una población que rebasa los 430 mil habitantes con un consumo de agua de 370 litros por persona por día y una tasa de generación de residuos de 1.2 kg por habitante por día. Parte de las aguas servidas generadas, así como también aguas de procesos industriales, descargan

directamente en los cuerpos de agua o son colectadas por el sistema de colectoras del Proyecto Saneamiento de la Bahía [15].

Los 8 ríos de la Ciudad de Panamá son: Cárdenas, Curundú, Matasnillo, Matías Hernández, Abajo, Juan Díaz, Tapia y Tocumen [16]. Muchos de estos ríos producen gran acumulación de basuras en sus canales, lechos y orillas; como los ríos Matías Hernández y Juan Díaz, que son cintas transportadoras de desechos que descargan en el Océano Pacífico.

Para los ríos urbanos de gran caudal como el Río Juan Díaz y el Río Matthias Hernández se están implementando medidas como las barreras flotantes para detener sobre el cauce las basuras flotantes, retirarlas y llevarlas al vertedero. Aunque este no es el tratamiento ideal, aun no existen programas y recursos para reciclaje de plásticos en nuestro país.

MiAmbiente ha reportado que los ríos de la ciudad presentan Índices de Calidad del Agua (ICA) en los rangos de aguas contaminadas y altamente contaminadas para la cuenca baja. Este indicador se calcula a partir de parámetros como coliformes fecales, pH, sólidos disueltos totales, oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno en 5 días, temperatura, turbidez, nitratos y fosfatos [17]. Un vivo ejemplo de ello es el Río Matasnillo, que atraviesa áreas importantes como áreas residenciales y área bancaria de la ciudad de Panamá.

Existen normativas, en Panamá que establecen una servidumbre de hasta 20 metros entre las construcciones y la orilla o borde de un río. Sin embargo, la invasión inmobiliaria, en conjunto con las actividades económicas que aportan descargas no tratadas al río es uno de los factores de mayor impacto. Esta situación afecta negativamente la calidad de agua de los afluentes, la estética paisajística y el valor de mercado de los terrenos. Además, la acumulación de desechos y la mala calidad de las aguas representa un peligro para la salud de las comunidades aledañas y de los ecosistemas.

2.2 Construcción y funcionamiento de los HAF

Los materiales más utilizados para la construcción de HAF son materiales sintéticos, e incluyen: tuberías fabricadas de materiales como el cloruro de polivinilo (PVC), el Polietileno (PE) y el polipropileno (PP), mallas o redes, planchas de poliestireno (PS), y las botellas plásticas de polietileno tereftalato (PET) selladas con sus tapas. La composición de estos materiales (polímeros plásticos) es considerada como contaminante potencial y posiblemente tóxico en actividades acuícolas y agrícolas, según lo reconoció Naciones Unidas, en el año 2015; como resultado, el uso de estos materiales para la construcción de humedales se ha reducido paulatinamente, pese a características deseables como la capacidad de flotación, la baja densidad, el bajo costo y su relativa durabilidad. En contraste, se recomienda el uso de materiales biodegradables y de origen natural como el bambú, el corcho, el balsa u otras maderas livianas.

Los diseños HAF se basan en la construcción una balsa flotante con agujeros donde se colocan las plántulas en contacto con el agua. La estructura sirve como sustento o apoyo a la vegetación para mantenerla a flote y permitir que sus raíces prosperen dentro de la columna de agua (Figura 1).



Figura 1. Balsas flotantes, tomado de MacDonald et al. [18].

2.3 Selección de las especies para construcción del HAF

En los HAF, las plantas (*macrófitas*) se apoyan de un medio flotante, donde las raíces crecen directamente en el agua, similar a los sistemas hidropónicos. La figura 2 muestra los cuatro tipos de plantas que se utilizan en humedales: plantas emergentes, de hojas flotantes, flotantes y plantas sumergidas.

Algunas especies de plantas se utilizan con el fin de eliminar, destruir o secuestrar contaminantes del medio acuático, mediante el método conocido como *fitorremediación*. En los humedales artificiales, las plantas absorben y metabolizan los compuestos presentes en los desechos. Las especies utilizadas para estos tratamientos se seleccionan en función de sus propiedades como *evapotranspiración*, producción de enzimas, tasa de crecimiento y cosecha, profundidad y longitud de sus raíces y capacidad para bioacumular contaminantes.

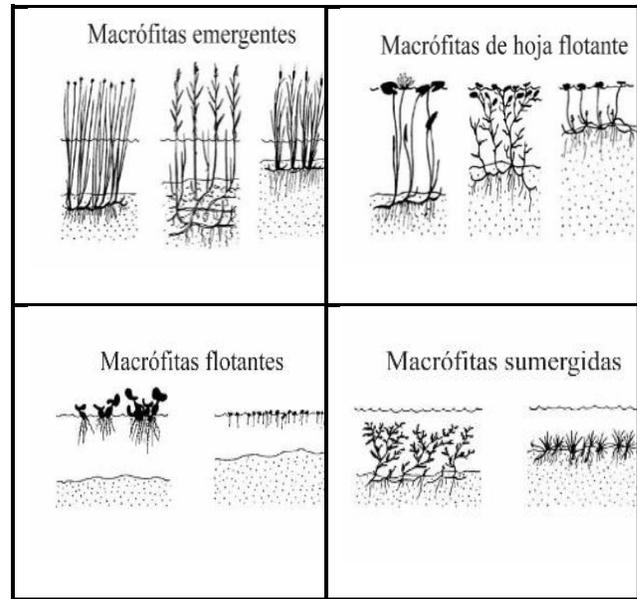


Figura 2. Tipos de macrófitas utilizadas en los HAF. Fuente [18].

La selección de especies vegetales también está relacionada al diseño del HAF, contaminante a tratar, disponibilidad y cantidad de especies, área de tratamiento e interés estético o comercial. Diversos estudios han reportados el uso de plantas (Tabla 1) para la remoción de nutrientes [7], [19], *fitodesalinización* [20], tratamientos secundarios previos a las descargas a los ríos [21], efluentes industriales y metales pesados [22]–[25].

El uso de especies nativas es sugerido debido a la facilidad de estas especies para adaptarse al medio, poseen valor ecosistémico (producción de semillas y frutos, refugio de animales, interacciones simbióticas u otras) y control natural (depredación por especies locales). En cambio, el uso de especies introducidas puede representar problemas ecológicos debido a la competencia por espacio y recursos, desplazamiento de flora y fauna autóctona y poco valor ecosistémico. Panamá, a pesar de contar con un inventario de flora extenso, requiere del estudio de especies con capacidades para la *fitorremediación*. Estos análisis no requieren gran esfuerzo ni mucha inversión y pueden apoyarse en las líneas base de investigación existentes.

Algunas especies de las familias Cyperaceae, Juncaceae, Pontederiaceae y Alismataceae han sido colectadas en el territorio panameño, según registros del Herbario de la Universidad de Panamá. En estas familias se incluyen numerosas especies que han demostrado su capacidad para la depuración de aguas; algunas, han sido utilizadas en otros países.

Tabla 1. Plantas utilizadas en la construcción de HAF

Planta (Familia: <i>Especies</i>)	Tipo de tratamiento	Autor, Fuente / año
Amaranthaceae: <i>Amaranthus retroflexus</i> [20]	Medicamento (Metformina)	Siahouei, R. et al., Caspian Journal of Environmental Sciences. 2020.
Araceae: <i>Lemna gibba</i> [26]	Aguas residuales (1,4-dioxano)	Osama, R. et al., Ecotoxicology and Environmental Safety. 2021.
<i>Pistia stratiotes</i> [22], [23]	Arsenito (As _{III})	de Campos, F. et al., Ecological Indicators. 2019.
	Metales (iones de Cu, Fe y Hg)	Kumar, V. et al., Environmental Sustainability. 2019.
Alismataceae: <i>Alisma lanceolatum</i> [24]	Efluentes industriales (metales pesados)	Mustafa, H. & Hayder, G., Ain Shams Engineering Journal. 2021.
Cyperaceae: <i>Carex apressa</i> [27]	Escorrentía	Schwamberger, P., International journal of GEOMATE. 2017.
<i>Carex cuprina</i> [24]	Metales pesados	Mustafa, H. & Hayder, G., Ain Shams Engineering Journal. 2021
<i>Cyperus alternifolius</i> [20]	Atrazina, flúor	Siahouei, R. et al., Caspian Journal of Environmental Sciences. 2020.
Iridaceae: <i>Iris versicolor</i> [7]	Nitrógeno y sedimentos	McAndrew, B. et al., J. Nitrogen and Sediment 2016.
Juncaceae: <i>Juncus effusus</i> [7]	Nitrógeno y sedimentos	McAndrew, B. et al., J. Nitrogen and Sediment 2016.
Poaceae: <i>Brachiaria mutica</i> [28]	Aguas residuales	Ijaz, A. et al., Ecological Engineering. 2015.
<i>Bambusa vulgaris</i> [20]	Fitodesalinización	Siahouei, R. et al., Caspian Journal of Environmental Sciences. 2020.
<i>Phragmites australis</i> [25], [29]	Metales pesados	Huang, X., et al., BioMed Research International. 2017.
	Fenol	Saleem, H., et al., Saudi Journal of Biological Sciences. 2019
Pontederiaceae: <i>Eichhornia crassipes</i> [19]	Eutrofización	Auchterlonie, J. et al., South African Journal of Chemical Engineering. 2021.
Salviniaceae: <i>Salvinia molesta</i> [21]	Secundario: agua residual doméstica	Mustafa, H. & Hayder, G., Ain Shams Engineering Journal. 2021.

2.4 Eficiencia, rendimiento y monitoreo

La utilidad de los humedales artificiales, como es el caso de los humedales verticales y horizontales, es reconocida para el

tratamiento de aguas residuales domésticas con tratamiento o sin pretratamiento. Estas estructuras son eficientes para la reducción

de materia orgánica y nitratos (humedales de flujo horizontal); así como para la eliminación de amonio (humedales de flujo vertical).

Los HAF poseen ventajas y características que superan a los otros tipos de humedales para la *biorremediación* de aguas contaminadas. Entre éstas, sus bajos costos y alto rendimiento por área, que pueden ser contrastados contra el requerimiento de espacio de los humedales de tipo superficial y lo altos costos de construcción de los humedales de flujo horizontal y vertical. Otras ventajas de los HAF son: funcionan con luz solar, son fáciles de operar, requieren poco mantenimiento, son efectivos para remover coliformes fecales y tienen un gran potencial para la reutilización del agua y los nutrientes en sistemas lacustres.

Los sistemas de HAF se caracterizan por el desarrollo de plantas con largas raíces y rizomas que atraviesan la columna de agua. Esto brinda una mayor superficie para la colonización por bacterias (formación de biopelículas), microalgas, zooplancton y pequeños invertebrados [30]. Como resultado, el rendimiento por unidad de área es mayor comparado a otros sistemas de tratamiento.

La eficiencia de los HAF depende de características de diseño como tiempo de retención hidráulica, tiempo de carga, pH y temperatura; también depende de factores ambientales (clima, carga de contaminantes, *biodisponibilidad* de nutrientes, presencia de microorganismos, etc.) y factores propios de cada planta (edad, consumo de nutrientes, tasa de crecimiento, tasa de fotosíntesis, tipo de raíces, etc.).

Algunos estudios han demostrado que los HAF son capaces de reducir los sólidos totales un 81%, el nitrógeno total hasta un 34% y el fósforo total hasta un 19%; las tasas de remoción son altas en los rangos de temperaturas medias (22°C) a altas (35°C) [6]. Es por ello por lo que, considerando el clima de ciudad Panamá esta puede ser una alternativa interesante para remediar la calidad de un río urbano.

De igual forma, es posible aumentar el rendimiento en la remoción o transformación de contaminantes de un cuerpo de agua reforzando el sistema con tecnologías sencillas como la recirculación del efluente, aireación artificial, manejo de mareas, integración de lombrices de tierra, y otros organismos vivos [31]. Estos son métodos de bajo costo que pueden incluso combinarse con paneles solares para hacerlos autosostenibles.

En la tabla 2 se compara los costos y beneficios de los humedales artificiales y otros dos métodos de tratamientos de agua [32]. Los resultados demuestran que, aunque similares en efectividad, la mejor alternativa es el humedal, debido a que la superficie requerida y los costos generales de equipo, construcción, operación y mantenimiento son menores. Al obtener rendimientos similares o superiores con menor uso de recursos y energía, resulta más rentable que otros métodos de purificación; por lo que, también es altamente recomendado para países con limitaciones económicas o con problemas de adquisición de terrenos cercanos a la población, donde no resulta apta la construcción de otros tipos de estructuras [30].

Tabla 2. Comparación del rendimiento de humedales y otros métodos. Fuente: [32]

Características		Lodos activados	Laguna facultativa	Humedal
Superficie (m ² /hab.)		4-7	12-14	2.5-9
Costo de equipos		M	MP	MP
Salario del personal		M	P	P
Costo de construcción		M	P	MP
Costo de mantenimiento		M	P	P
Remoción (%)	DQO	50-85	50-85	55-80
	DBO	60-96	60-96	60-98
	SST	50-90	50-90	60-98
	N total	60-70	60-70	30-70
	P total	10-40	10-40	20-60
	Coliformes fecales	99-99.9	99-99.9	99-99.9
M=Mucho, P=Poco, MP=Muy Poco				

El seguimiento de los parámetros físicos y químicos del agua es importante para determinar la efectividad y rendimiento del sistema de HAF. Las líneas base existentes pueden servir como indicativo para medir la mejora de la calidad de agua post adaptación de los cultivos flotantes. Medir el consumo de nutrientes y contaminantes es esencial para determinar la eficiencia del humedal, así como el comportamiento de los cultivos (adaptación, crecimiento, toxicidad del medio, etc.). Se requiere el compromiso de las instituciones gubernamentales ambientales para la vigilancia y monitoreo tanto del HAF como de los cuerpos de agua. Es por ello por lo que se recomienda el seguimiento consecutivo de este índice en aquellos ríos en los que sean ubicados los sistemas de HAF. La mejora de la calidad puede ser calculada mediante la comparación de mediciones aguas arriba y aguas abajo del humedal flotante.

El marco legal de referencia para los parámetros que es necesario contemplar en Panamá y que describen el grado de calidad de las aguas superficiales, lo brinda el Decreto Ejecutivo No. 75 de 4 de junio de 2008 "Por el cual se dicta la norma primaria de calidad ambiental y niveles de calidad para las aguas continentales de uso recreativo con y sin contacto directo" [33].

En cuanto a la metodología de análisis de los parámetros contaminantes, se utiliza generalmente la metodología para el cálculo del ICA como descrita en el Informe de Monitoreo de la Calidad de Agua en las Cuencas Hidrográficas de Panamá [4]. Los análisis de laboratorio requieren de los métodos estandarizados compilados en el libro "Standard Methods for

Examination of Water and Wastewater” una guía utilizada para armonizar las pruebas de laboratorio a nivel mundial.

3. Conclusión

El saneamiento de los ríos es indispensable para minimizar los riesgos a la salud y mejorar la calidad de vida urbana. En la ciudad, la totalidad de los cuerpos de agua se encuentra contaminada, esta condición afecta ecosistemas, salud y paisajes y el valor económico del servicio ecosistémico que pudiera brindarse a la población en general, de ser recuperados estos ambientes y paisajes.

Panamá se caracteriza por ser un país con gran riqueza hídrica. Sin embargo, a excepción de la construcción de plantas de tratamiento y el uso generalizado de lagunas de estabilización, no se cuenta con otros sistemas de tratamiento de aguas residuales ni con propuestas alternativas dirigidas a la recuperación de los recursos hídricos.

El rápido desarrollo del país y el crecimiento demográfico justifica la implementación de programas tecnológicos que protejan los recursos y la biodiversidad. Los HAF constituyen una alternativa ecológica, sostenible y eficaz para, puntualmente, iniciar un programa de recuperación de ríos urbanos y lagos.

A pesar de tratarse de sistemas desconocidos para Panamá, no representan un reto económico, político, social o legal para su implementación. El humedal flotante no requiere construcciones complejas, su fabricación es barata y rápida, de poco mantenimiento, con un funcionamiento sencillo. El sistema es compatible con los cuerpos de agua (ríos urbanos, quebradas, lagos) de la ciudad de Panamá. Los humedales tienen buena aceptación pública ya que son estéticos y reverdecen el entorno en que se instalen convirtiéndose en pequeños ecosistemas para la vida silvestre.

Se desconocen impactos negativos que se generen de la implementación de HAF. Los HAF pueden ser diseñados por profesionales de las ingenierías, jardineros y arquitectos paisajistas para embellecer los cuerpos de agua. Panamá posee, además, la ventaja de contar con las condiciones climáticas apropiadas y con una amplia variedad de flora disponible para su implementación.

Finalmente, se puede afirmar que la aplicación potencial de los sistemas HAF constituye una alternativa conveniente y una alternativa no aprovechada aún para un tratamiento de los cuerpos hídricos de la ciudad de Panamá. La selección de las especies purificadoras y sus combinaciones es muy flexible y se adapta de acuerdo con los parámetros de contaminación del agua a tratar. Las plantas especialistas con características fisiológicas específicas que pueden aprovecharse para una remediación son especies autóctonas y de fácil manejo.

4. Recomendaciones

Una vez expuestas las ventajas de los humedales artificiales flotantes, recomendamos que se consideren como alternativas a los tratamientos más costosos de aguas superficiales contaminadas como ríos, lagos y quebradas afluentes de ríos. Los humedales flotantes pueden ser combinados y adicionados a los métodos convencionales de tratamiento de aguas contaminadas,

mejorando su rendimiento al mismo tiempo que reducen la tasa de evaporación del espejo del agua.

Es necesario conducir estudios piloto con especies de las familias mencionadas en la Tabla 1 en algún río urbano contaminado y de bajo caudal como el río Matasnillo, para comprobar la eficacia de la medida. De igual manera, establecer puntos dentro de la ciudad donde su implementación ayude significativamente a mejorar el paisaje.

Consideramos importante promover el estudio más profundo de las propiedades depurativas de la flora panameña en cuanto a la *fitorremediación* a través de proyectos piloto en secciones escogidas de los ríos urbanos que pueden ser llevados desde la academia como apoyo a la labor del Ministerio de Ambiente. A partir de estas experiencias, se pueden elaborar guías con las especies típicas de nuestra flora y establecer programas de capacitación para el tratamiento de varios contaminantes presentes en el agua, incluidos los metales pesados.

Es importante divulgar y poner a consideración de las autoridades municipales y alcaldías las bondades de la instalación de humedales flotantes y la creación de puestos de trabajo para el personal que construya, establezca y mantenga el HAF. Eventualmente, se puede considerar incrementar su popularidad como alternativa verde a través de incentivos fiscales; ya que, además de mejorar la calidad de las aguas y la creación de ecosistemas en miniatura beneficiara la fauna y redundará en beneficios para el valor económico y paisajístico de sitios donde se apliquen.

Referencias

- [1] E. D. y K. B. José Fábrega, Elsa Flores, Manuel Zárate, Miroslava Morán, Denise Delvalle, Argentina Ying, Marilyn Diéguez, “Calidad del Agua en las Américas Riesgos y Oportunidades,” in *IANAS La Red Interamericana de Academias de Ciencias*, no. February, 2019, pp. 501–532.
- [2] A. website, “AQUASTAT - FAO’s Information System on Water and Agriculture,” *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*. 2016.
- [3] UNESCO, *Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. 2017.
- [4] Autoridad Nacional del Ambiente, “Informe de Monitoreo de la Calidad del Agua en las Cuencas Hidrográficas de Panamá: Compendio de Resultados Años 2002-2008.” p. 636, 2009.
- [5] U. Molina, “http://impresa.prensa.com/panorama/Verificaran-calidad-rios-quebradas_0_4723777597.html,” *La Prensa online*, Panama, 2017.
- [6] N. Skoulikidis, Th. N. Pavlineri, and V. A. Tsihrintzis, “Constructed Floating Wetlands: state-of-the-art and potential application in a Greek fluvial ecosystem,” *Πανελλήνιο Συμπόσιο Ωκεανογραφίας & Αλιείας*, pp. 2010–2013, 2015.
- [7] B. McAndrew, C. Ahn, and J. Spooner, “Nitrogen and sediment capture of a floating treatment wetland on an urban stormwater retention pond-The case of the rain project,” *Sustain.*, vol. 8, no. 10, 2016.
- [8] S. Salimi and M. Scholz, “Impact of future climate scenarios on peatland and constructed wetland water quality: A mesocosm experiment within climate chambers,” *J. Environ. Manage.*, vol. 289, p. 112459, Jul. 2021.
- [9] M. Licata, M. Cristina Gennaro, T. I. Tuttolomondo, C. Leto, and S. La Bella, “Research focusing on plant performance in constructed wetlands and agronomic application of treated wastewater – A set of experimental studies in Sicily (Italy),” 2019.
- [10] T. Saeed, B. Paul, R. Afrin, A. Al-Muyeed, and G. Sun, “Floating constructed wetland for the treatment of polluted river water: A pilot

- scale study on seasonal variation and shock load," *Chem. Eng. J.*, vol. 287, pp. 62–73, 2016.
- [11] L. Zhu, Z. Li, and T. Ketola, "Biomass accumulations and nutrient uptake of plants cultivated on artificial floating beds in chinas rural area," *Ecol. Eng.*, vol. 37, no. 10, pp. 1460–1466, 2011.
- [12] D. Q. Zhang, K. B. S. N. Jinadasa, R. M. Gersberg, Y. Liu, W. J. Ng, and S. K. Tan, "Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries - A review of recent developments (2000-2013)," *Journal of Environmental Management*, vol. 141. Academic Press, pp. 116–131, Aug-2014.
- [13] M. Wang, D. Q. Zhang, J. W. Dong, and S. K. Tan, "Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate — A review," *Journal of Environmental Sciences (China)*, vol. 57. Chinese Academy of Sciences, pp. 293–311, Jul-2017.
- [14] ETESA, "Pronóstico de Precipitación para el mes de noviembre Monitoreo de los Fenómenos de Variabilidad Climática." Panamá, p. 12, 2018.
- [15] Programa Saneamiento de Panamá, "Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Ciudad de Panamá." [Online]. Available: <https://saneamientodepanama.gob.pa/planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-de-la-ciudad-de-panama/>.
- [16] M. M. M. José R. Fábrega D. and y P. L. Argentina Ying, Casilda Saavedra, Berta Olmedo, *Aguas Urbanas. Panamá*. 2015.
- [17] Ministerio de Ambiente, *Informe de la calidad del agua en las cuencas hidrográficas de Panama. 2009-2012*. 2019.
- [18] D. MacDonald, C. Walker, T. Lucke, R. Flipp, K. Covey, and P. Shadforth, "Floating wetland treatment systems in residential development: assessing the benefits for residents, local authorities, and developers," *Strat. Sociol. économiqes/Economic Sociol. Asp.*, pp. 1–4, 2016.
- [19] J. Auchterlonie, C. L. Eden, and C. Sheridan, "The phytoremediation potential of water hyacinth: A case study from Hartbeespoort Dam, South Africa," *South African J. Chem. Eng.*, vol. 37, pp. 31–36, Jul. 2021.
- [20] R. A. Siahouei, M. Zaeimdar, R. Moogouei, and S. A. Jozi, "Potential of cyperus alternifolius, amaranthus retroflexus, closia cristata and bambusa vulgaris to phytoremediate emerging contaminants and phytodesalination; insight to floating beds technology," *Casp. J. Environ. Sci.*, vol. 18, no. 4, pp. 309–317, 2020.
- [21] H. M. Mustafa and G. Hayder, "Cultivation of *S. molesta* plants for phytoremediation of secondary treated domestic wastewater," *Ain Shams Eng. J.*, Apr. 2021.
- [22] V. Kumar, J. Singh, A. Saini, and P. Kumar, "Phytoremediation of copper, iron and mercury from aqueous solution by water lettuce (*Pistia stratiotes* L.)," *Environ. Sustain.*, vol. 2, no. 1, pp. 55–65, 2019.
- [23] F. V. de Campos, J. A. de Oliveira, A. A. da Silva, C. Ribeiro, and F. dos Santos Famese, "Phytoremediation of arsenite-contaminated environments: is *Pistia stratiotes* L. a useful tool?," *Ecol. Indic.*, vol. 104, no. May, pp. 794–801, 2019.
- [24] H. M. Mustafa and G. Hayder, "Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, no. 1. Ain Shams University, pp. 355–365, 01-Mar-2021.
- [25] X. Huang, F. Zhao, G. Yu, C. Song, Z. Geng, and P. Zhuang, "Removal of Cu, Zn, Pb, and Cr from Yangtze Estuary Using the *Phragmites australis* Artificial Floating Wetlands," *Biomed Res. Int.*, vol. 2017, pp. 1–10, 2017.
- [26] R. Osama, H. M. Awad, S. Zha, F. Meng, and A. Tawfik, "Greenhouse gases emissions from duckweed pond system treating polyester resin wastewater containing 1,4-dioxane and heavy metals," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 207, p. 111253, Jan. 2021.
- [27] P. Schwammberger, C. Walker, and T. Lucke, "Using floating wetland treatment systems to reduce stormwater pollution from urban developments," *Int. J. GEOMATE*, vol. 12, no. 31, pp. 45–50, 2017.
- [28] A. Ijaz, G. Shabir, Q. M. Khan, and M. Afzal, "Enhanced remediation of sewage effluent by endophyte-assisted floating treatment wetlands," *Ecol. Eng.*, vol. 84, no. August, pp. 58–66, 2015.
- [29] H. Saleem, M. Arslan, K. Rehman, R. Tahseen, and M. Afzal, "Phragmites australis — a helophytic grass — can establish successful partnership with phenol-degrading bacteria in a floating treatment wetland," *Saudi J. Biol. Sci.*, vol. 26, no. 6, pp. 1179–1186, Sep. 2019.
- [30] K. Rehman, A. Ijaz, M. Arslan, and M. Afzal, "Floating treatment wetlands as biological buoyant filters for wastewater reclamation," *Int. J. Phytoremediation*, vol. 21, no. 13, pp. 1273–1289, 2019.
- [31] H. Wu *et al.*, "A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation," *Bioresour. Technol.*, vol. 175, pp. 594–601, 2015.
- [32] M. E. Haro González and N. O. Aponte Hernández, "Evaluación de un humedal artificial como tratamiento de agua residual en un asentamiento irregular," Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
- [33] Gaceta Oficial Asamblea Legislativa, *Decreto Ejecutivo No. 75 de 4 de junio de 2008*. Panamá: Gaceta Oficial de la Republica de Panama, 2008, p. <https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/26078/116>.