

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/index>
www.ucr.ac.cr / ISSN: 2215-2652

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
JULIO/DICIEMBRE 2025 - VOLUMEN 35 (2)



Caracterización de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en Costa Rica

Characterization of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Costa Rica

Ronald Esteban Aguilar Álvarez ¹ , Sofía Rodríguez Rodríguez ² , Jorge Rodríguez Vásquez ³ 

¹ Investigador, Escuela de Ingeniería de Biosistemas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
correo: ronaldesteban.aguilar@ucr.ac.cr

² Estudiante, Escuela de Ingeniería de Biosistemas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
correo: sofiarodriguezr@hotmail.com

³ Estudiante, Escuela de Ingeniería de Biosistemas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
correo: jorgero.va97@gmail.com

Palabras clave:

Área superficial,
biojardineras,
saneamiento, vegetación,
zonas de vida.

Resumen

Ante la necesidad de soluciones descentralizadas para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales y periurbanas, los humedales artificiales emergen como una opción ecológica, de bajo costo y adaptable a condiciones tropicales. Este estudio analiza la ubicación, diseño y características técnicas de humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal en Costa Rica. Mediante visitas realizadas entre marzo de 2022 y junio de 2023, se caracterizaron 81 sistemas construidos desde 2004. La implementación de humedales artificiales ha mostrado una estandarización técnica informal, impulsada por guías locales y la disponibilidad de materiales, lo que ha generado patrones consistentes en sus dimensiones, profundidad, tipo de sustrato y vegetación. El 96 % trata aguas grises y se localiza mayormente en Puntarenas (53 %) y Guanacaste (19 %). La mayoría presenta áreas de 1-15 m² y profundidad promedio de 0,75 m, con impermeabilización mediante plástico de construcción (90 %). El sustrato más empleado es piedra bola tanto en entrada como salida y piedra cuarta en la sección media. Se identificaron 44 especies vegetales, destacando *Canna indica* y *Heliconia sp.*, cuya distribución mostró dependencia con el clima, según análisis de chi-cuadrado. Un visor cartográfico interactivo acompaña el estudio para facilitar el análisis espacial y actualización de datos. Los resultados evidencian un desarrollo limitado y empírico de esta tecnología, sin bases de datos consolidadas ni seguimiento técnico sistemático. Se propone su incorporación como estrategia de saneamiento descentralizado en comunidades no conectadas a sistemas formales, mediante políticas públicas que reconozcan su eficacia y replicabilidad.

Recibido: 25/09/2024

Aceptado: 05/05/2025

Keywords:

Bio-gardens, life zones,
sanitation, surface area,
vegetation.

Abstract

In response to the need for decentralized wastewater treatment solutions in rural and peri-urban areas, constructed wetlands emerge as an ecological, low-cost, and adaptable option for tropical conditions. This study analyzes the location, design, and technical characteristics of horizontal subsurface flow constructed wetlands in Costa Rica. Through field visits conducted between March 2022 and June 2023, 81 systems built since 2004 were characterized. The implementation of constructed wetlands has shown informal technical standardization, driven by local guidelines and material availability, which has generated consistent patterns in their dimensions, depth, substrate type, and vegetation. The findings indicate that 96% of these systems treat greywater and are predominantly located in Puntarenas (53%) and Guanacaste (19%). Most systems feature surface areas of 1-15 m² and an average depth of 0.75 m, with plastic sheeting as the primary waterproofing material (90%). The most common substrate used is cobbles at the inlet and outlet, and crushed rock in the middle section. A total of 44 plant species were identified, with *Canna indica* and *Heliconia sp.* being prominent; their distribution showed a dependence on climate, based on chi-squared analysis. An interactive cartographic viewer accompanies the study to facilitate spatial analysis and data updates. The results reveal a limited and empirical development of this technology, lacking consolidated databases or systematic technical monitoring. The study proposes its integration as a decentralized sanitation strategy in communities not connected to formal systems, through public policies that recognize its effectiveness and replicability.

DOI: 10.15517/ri.v35i2.62017



I. INTRODUCCIÓN

Costa Rica enfrenta retos estructurales y operativos considerables en el tratamiento de sus aguas residuales ordinarias. Según la *Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales 2016–2045*, elaborada por el AyA, el MINAE y el Ministerio de Salud, se generan aproximadamente 966 455 m³ de aguas residuales por día, de los cuales solo el 14,43 % recibe tratamiento adecuado [1]. A nivel doméstico, el 76,42 % de las viviendas utiliza tanques sépticos, muchos de ellos con deficiencias técnicas, mientras que solo el 21,43 % está conectado a sistemas de alcantarillado sanitario, no siempre con tratamiento incluido. Una fracción importante de la población aún depende de soluciones como huecos, pozos negros o letrinas, prácticas que pueden contaminar acuíferos y suponer un riesgo sanitario directo por exposición a aguas residuales sin tratamiento adecuado [1].

La principal infraestructura de tratamiento de aguas residuales del país, Los Tajos, diseñada para atender a más de un millón de habitantes, opera apenas al 16 % de su capacidad, debido al colapso de las redes de alcantarillado y la falta de interconexión entre las obras sanitarias [1], [2]. Esta condición se traduce en una alta carga contaminante descargada a los cuerpos de agua superficiales, lo que ha generado un deterioro ambiental significativo en ríos urbanos y fuentes hídricas receptoras [2].

Dado el rezago en cobertura sanitaria y la limitada eficiencia de las infraestructuras existentes, urge implementar soluciones descentralizadas, de bajo costo y apropiadas al contexto local. En este escenario, los humedales artificiales han demostrado ser una alternativa técnica viable para el tratamiento de aguas residuales. Estos sistemas replican condiciones fisicoquímicas y biológicas que favorecen la remoción de contaminantes mediante procesos de sedimentación, absorción y biodegradación. A diferencia de los humedales naturales, los sistemas construidos pueden ser diseñados con mayor control sobre las variables hidráulicas y operativas, lo que incrementa su eficiencia [3], [4]. Los humedales artificiales consisten en cuatro componentes principales: el agua residual (afluente), el sustrato, la vegetación y los microorganismos asociados. Cada uno desempeña un papel clave en los procesos de depuración [5], [6], [7].

Esta tecnología, desarrollada desde la década de 1950 en Alemania, se ha expandido a nivel mundial por su bajo mantenimiento, mínima dependencia energética y posibilidad de construcción con materiales locales, lo cual resulta especialmente beneficioso en países en desarrollo [8]. Ha sido utilizada para tratar distintos tipos de aguas residuales, como domésticas, industriales, agropecuarias, lixiviados y drenajes contaminados [5], [8]. Sin embargo, su principal limitación es la requerida disponibilidad de terreno, ya que su eficiencia depende del tiempo de retención hidráulico y del área superficial de contacto [9]. Para superar esta limitación, se han implementado estrategias como los sistemas de flujo vertical, que requieren menos superficie; la combinación de humedales en serie para mejorar la remoción por etapas; y la integración con tecnologías compactas como filtros anaerobios o reactores UASB [6], [7], [9].

En el contexto costarricense, desde 2004, se promovió el uso de esta tecnología bajo la denominación de “biojardinera”, en lugar de “humedal artificial”. Este cambio respondió a la necesidad de una mayor aceptación social y estética, aprovechando la familiaridad cultural con los jardines residenciales. Según Maritza Marín Araya, de la Asociación Centroamericana para la Economía, la Salud y el Ambiente (ACEPESA), esta denominación facilitó su aprobación por parte del Ministerio de Salud y la difusión en ámbitos urbanos y rurales. Desde entonces, se han construido más de 150 sistemas en viviendas, hoteles, iglesias y espacios públicos, con apoyo de ACEPESA y universidades públicas [10].

No obstante, la ausencia de una base de datos unificada y estandarizada, junto con la falta de protocolos de monitoreo y seguimiento, impide conocer con precisión el desempeño real y la cobertura de estas soluciones a nivel nacional. Aunque se han documentado algunos casos en tesis, informes institucionales y artículos académicos, la dispersión de dichos registros limita su análisis comparativo. Un esfuerzo reciente por recopilar esta información fue desarrollado en un capítulo nacional sobre humedales artificiales en Costa Rica, el cual logró reunir datos de diez sistemas, incluyendo ubicación, tipo de agua tratada y parámetros de calidad [11]. Sin embargo, no se especifica si estos sistemas fueron evaluados posteriormente en términos de eficacia y mantenimiento. Ante esta situación, resulta pertinente sugerir la creación de una base de datos centralizada que consolide la documentación técnica y operativa de los humedales artificiales en el país. Esto permitiría fortalecer la gestión, facilitar la planificación y replicar experiencias exitosas.

Ante la dispersión de la información sobre humedales artificiales en Costa Rica, se formuló el proyecto “C2451 - Sistematización de los humedales artificiales instalados en Costa Rica y evaluación de sustratos alternativos en el tratamiento de las aguas residuales ordinarias”, impulsado por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica. Su objetivo es consolidar datos técnicos mediante una base de datos estandarizada y un visor cartográfico, que permitan conocer la ubicación, características físicas y aplicaciones de estos sistemas. Este artículo expone los principales hallazgos del proceso de sistematización, con énfasis en la ubicación, tipología y componentes físicos de los humedales artificiales instalados, con el fin de contribuir a su documentación, análisis comparativo y a la toma de decisiones en materia de gestión de aguas residuales en el país.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Diseño general del estudio

Este estudio tuvo un enfoque descriptivo y exploratorio, con características de inventario nacional. Se denomina descriptivo porque se centró en caracterizar el estado actual de los humedales artificiales en Costa Rica, documentando sus atributos físicos, ubicación, diseño y vegetación. A su vez, fue exploratorio al abordar una temática poco sistematizada previamente en el país, permitiendo identificar patrones y vacíos de información para

futuras investigaciones. Se adoptó un enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo), cubriendo el territorio nacional de Costa Rica entre marzo de 2022 y junio de 2023.

B. Estrategia de recopilación de datos

La recolección de datos se realizó mediante métodos combinados: revisión documental, entrevistas estructuradas, observación directa y mediciones en campo. La revisión documental incluyó tesis universitarias, informes técnicos, bases de datos institucionales, como ACEPESA, y publicaciones académicas. Esta etapa permitió identificar sistemas potenciales para visitar y contrastar información básica como la ubicación geográfica, el año de instalación, el tipo de sistema y la institución responsable.

Durante la fase de campo, se planificaron visitas a todas las provincias del país. Se estableció contacto previo con los responsables de cada sistema para coordinar las visitas y se realizaron entrevistas para obtener información clave: ubicación detallada (provincia, cantón, distrito), año de construcción, tipo de agua residual tratada (clasificada como ordinaria o especial). Se identificó el tipo de humedal (flujo libre o subsuperficial vertical u horizontal), se midieron sus dimensiones (largo, ancho y profundidad) con cinta métrica y se determinó visualmente tanto el tipo de material impermeabilizante (arcilla, plástico, concreto, geotextil) como el sustrato predominante (piedra bola, grava, piedra cuarta, arena). La vegetación se documentó mediante observación directa, consulta de guías botánicas y validación con el encargado local. Para la georreferenciación, se utilizó la aplicación Mobile Topographer (v. 9.3.2) [12], que permitió registrar coordenadas en formatos WGS84 y CRTM05, además de la elevación sobre el nivel del mar (m s. n. m.).

C. Validación y control de calidad

Se implementó una triangulación metodológica que combinó tres fuentes principales: documentos técnicos, entrevistas en sitio y observación directa. Esto permitió validar la coherencia y veracidad de los datos recolectados. La existencia y estado operativo de cada sistema fue verificada en campo mediante inspección visual (presencia de caudal, ingreso y egreso de agua, vegetación activa).

Se contrastaron las dimensiones medidas con los valores reportados por usuarios o documentación previa. Todos los datos fueron registrados en formularios estandarizados y acompañados por registros fotográficos georreferenciados. Posteriormente, se realizó una revisión cruzada entre el equipo investigador, depurando registros incompletos, inconsistentes o ambiguos.

D. Registro de datos y organización

Toda la información recolectada fue sistematizada en una base de datos estructurada en Microsoft Excel [13]. Esta base incluyó variables geográficas (provincia, cantón, distrito,

coordenadas WGS84 y CRTM05, elevación), técnicas (año de construcción, dimensiones, tipo de afluente, diseño del sistema, tipo de impermeabilización, tipo de sustrato, especies vegetales) y datos de contacto. Esta base fue utilizada como insumo para los análisis estadísticos y para el desarrollo de un visor cartográfico interactivo.

E. Análisis de datos

El análisis se enfocó en siete aspectos clave sobre la implementación y diseño de humedales artificiales en Costa Rica. Primero, para identificar tendencias temporales, los sistemas se agruparon en tres periodos (2004-2010, 2011-2017, 2018-2022) y se aplicó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney U para detectar diferencias significativas en el número de instalaciones. Luego, se evaluó la distribución geográfica por provincia, aplicando la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para determinar si la distribución observada responde a un patrón aleatorio o planificado.

En tercer lugar, se analizó la adaptación climática mediante la frecuencia de humedales por zonas de vida de Holdridge. Para ello, se aplicó una prueba de chi-cuadrado (χ^2) de independencia con matrices 3×3 , utilizando las categorías de temperatura y precipitación como variables. En cuanto a los aspectos técnicos del diseño, se aplicaron pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk a variables como profundidad media, área superficial y tipo de sustrato. Asimismo, el tipo de material impermeabilizante también fue analizado para verificar si su distribución seguía un patrón aleatorio o de diseño intencional.

Finalmente, se evaluó la adaptabilidad de la vegetación. Se identificaron las especies más frecuentes y se contrastó su presencia con las categorías de temperatura y elevación de Holdridge, mediante pruebas de chi-cuadrado (χ^2) de independencia en matrices 3×3 . Esto permitió analizar si su distribución responde a condiciones ambientales específicas o si presentan adaptación generalizada. El análisis se llevó a cabo utilizando Microsoft Excel [13] y Python [14], adoptando un nivel de significancia estadística de $p < 0,05$.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Cobertura nacional y evolución temporal

En el presente estudio se identificaron un total de 81 humedales artificiales distribuidos en las siete provincias de Costa Rica. El primer sistema registrado fue instalado en el año 2004, mientras que el más reciente corresponde al año 2022. La Fig. 1 ilustra la evolución temporal de la implementación de estos sistemas, representando en el eje horizontal los años de instalación.

Para efectos del análisis estadístico, los datos se agruparon en tres periodos de seis años: 2004-2010, 2011-2017 y 2018-2022. La prueba no paramétrica de Mann-Whitney U reveló una diferencia estadísticamente significativa entre el primer periodo (2004-2010) y el último (2018-2022) en cuanto al número de

humedales implementados ($p = 0,0189$), lo cual evidencia un aumento considerable en su adopción. Sin embargo, al comparar los periodos consecutivos (2011-2017 y 2018-2022), no se detectaron diferencias significativas en la tasa de implementación ($p = 0,4048$), lo que sugiere una estabilización relativa en el ritmo de crecimiento.

Durante el periodo inicial (2004-2010), la adopción fue limitada, con únicamente siete humedales distribuidos en cuatro distritos. A partir de 2012, se observó un crecimiento sostenido: entre 2011 y 2017 se implementaron 25 humedales adicionales, con lo que se alcanzaron 44 instalaciones en 13 distritos. Entre 2018 y 2022, se consolidó este proceso, de manera que se llegó a un total de 81 sistemas distribuidos en 31 distritos del país.

Diversos factores explican la baja implementación durante la primera etapa, de 2004-2010. En ese momento, los humedales artificiales representaban una tecnología emergente y poco conocida en el contexto nacional para el tratamiento de aguas residuales. Existía una limitada disponibilidad de conocimiento técnico especializado, tanto para el diseño como para la construcción y operación de los sistemas. Además, se percibía un alto nivel de incertidumbre técnica debido a la escasa experiencia local y a la falta de lineamientos adaptados a las condiciones específicas del país.

A esto se sumaban las barreras económicas asociadas a los costos iniciales de instalación y el riesgo percibido en torno a una tecnología incipiente [10], [15], [16].

En contraste, el aumento observado a partir del año 2012 puede atribuirse a varios factores facilitadores: 1) la publicación de guías técnicas contextualizadas en los años 2006 [15] y 2010 [17]; 2) la difusión de casos de éxito nacionales en diversos contextos [3], [18]-[24]; 3) la adopción del término “biojardinería”, que facilitó la apropiación social del sistema [10]; 4) el involucramiento activo de universidades públicas (UCR, UNA, ITCR) y organizaciones no gubernamentales en la generación, divulgación y capacitación sobre esta tecnología; y 5) la evidencia acumulada sobre su bajo costo, facilidad de construcción y mantenimiento, lo que lo convierte en una solución accesible para viviendas rurales, desarrollos descentralizados, pequeños hoteles y escuelas.

A diferencia de los sistemas centralizados, que pueden definir un área de cobertura o una población servida específica, se estima que solo el 6,35 % de los 488 distritos de Costa Rica cuenta con al menos un humedal artificial operativo. Al ser un sistema de carácter unitario, este tipo de infraestructura únicamente proporciona tratamiento puntual de las aguas resi-

duales generadas en un sitio específico (*e. g.* hogares, centros educativos, restaurantes u hoteles).

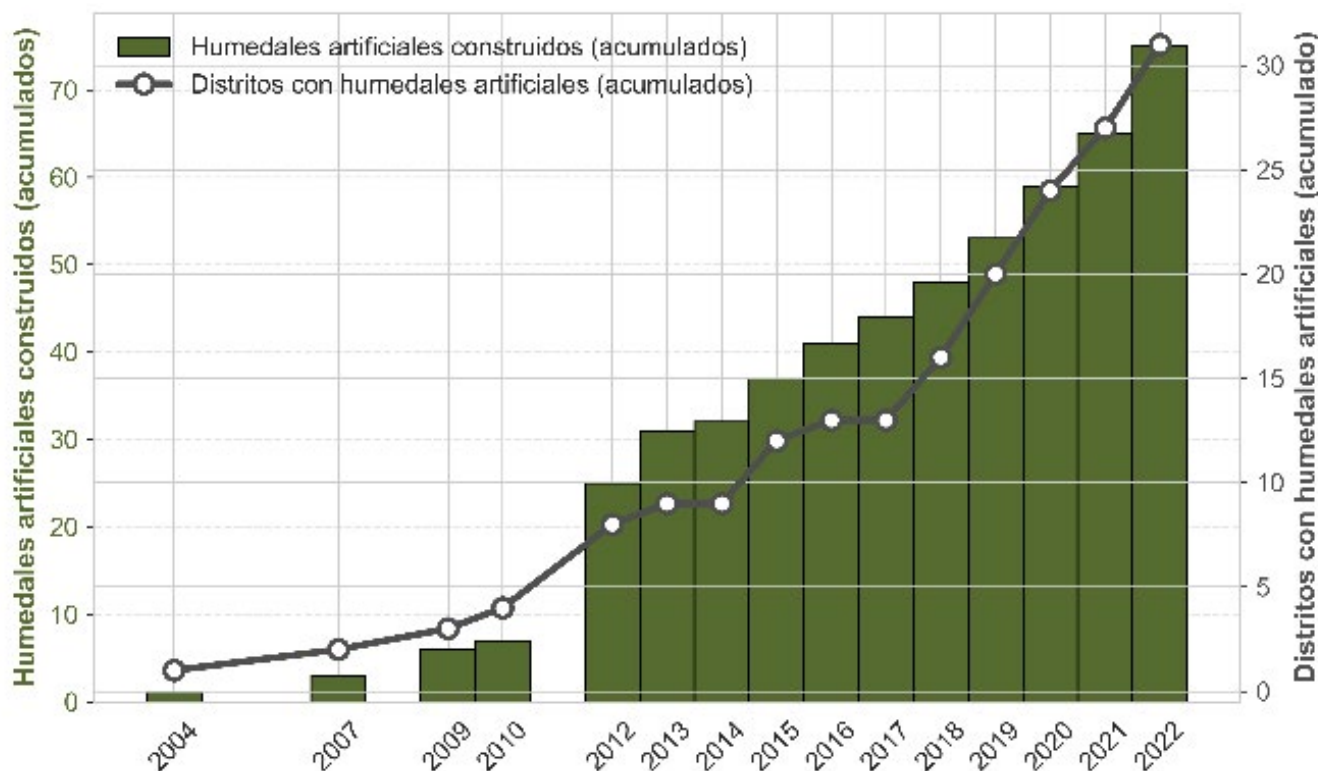


Fig. 1. Implementación de humedales artificiales y su distribución por distritos de Costa Rica del 2004 al 2022.

B. Estrategia de recopilación de datos

Del total de 81 humedales artificiales identificados, se observó que un 20 % no se encontraba en funcionamiento al momento del estudio. Estos sistemas, concebidos como soluciones descentralizadas para el tratamiento de aguas residuales, dependen no solo del humedal propiamente dicho, sino también del adecuado funcionamiento de sus unidades de pretratamiento.

Típicamente, dichas unidades incluyen componentes como rejillas, trampas de grasa y sedimentadores, cuyo objetivo es remover sólidos gruesos, grasas y sedimentos antes de que el agua residual ingrese al humedal [8], [15], [17], [25]. El diseño, construcción y mantenimiento tanto del pretratamiento como del humedal artificial resultan determinantes para asegurar el desempeño efectivo del sistema.

Entre las principales causas que llevaron al abandono o desuso de algunos humedales, se identificaron el fallo funcional de las unidades de pretratamiento y la ausencia de actividades regulares tanto de operación como de mantenimiento en ambos componentes del sistema. Estas razones generan estancamiento del agua residual y, por ende, malos olores [26]. Durante las visitas de campo se corroboraron dichas deficiencias, donde se observaron errores recurrentes como el uso inapropiado de estructuras (por ejemplo, utilizar un sifón invertido en lugar de una trampa de grasa), desniveles hidráulicos negativos entre el pretratamiento y el humedal, así como dimensionamientos inadecuados que

ralentizan el paso del agua residual y comprometen la eficiencia del sistema.

Adicionalmente, se detectaron limitaciones sociales vinculadas al relevo generacional. En varios casos, las personas inicialmente encargadas del mantenimiento ya no se encontraban presentes o no contaban con las capacidades físicas necesarias para realizar dichas tareas. La falta de involucramiento por parte de las nuevas generaciones dentro del hogar ha contribuido al abandono de las labores operativas y, por ende, del sistema de tratamiento en su totalidad.

A pesar de estos desafíos, se evidencia una tendencia creciente hacia la adopción de esta tecnología no convencional basada en soluciones naturales, especialmente en contextos rurales. Su potencial para mejorar el tratamiento de aguas residuales, con bajos costos y relativa facilidad de implementación, continúa posicionándola como una alternativa viable en comunidades con acceso limitado a infraestructura sanitaria convencional.

C.. Distribución geográfica y contexto demográfico

La distribución geográfica de los humedales artificiales en Costa Rica presenta una marcada concentración en las provincias de Puntarenas y Guanacaste, donde se localizan el 53 % y 19 % del total de sistemas identificados, respectivamente. Les siguen las provincias de Alajuela (16 %), Cartago (5 %), San José (4 %), Limón (2 %) y Heredia (1 %), según lo muestra la Fig. 2.

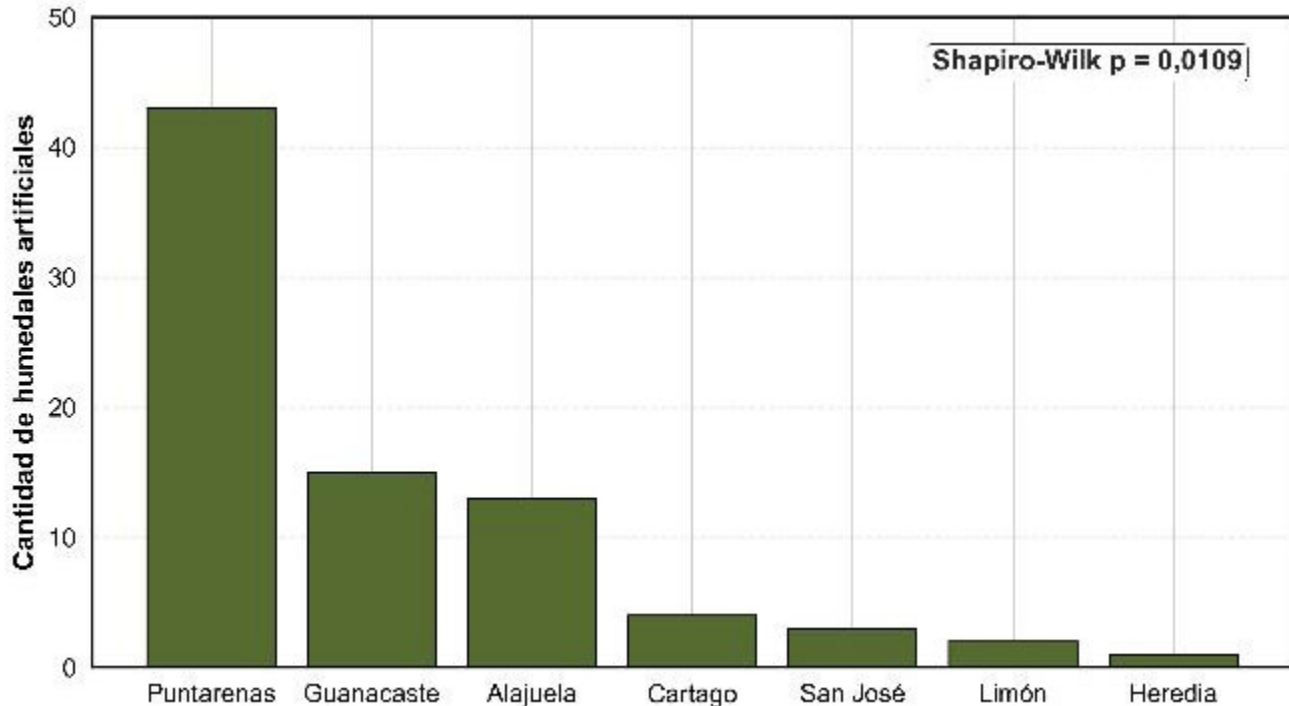


Fig. 2. Ubicación de humedales artificiales en las provincias de Costa Rica.

Esta distribución no es aleatoria. Al aplicar la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, se determinó que la frecuencia de humedales artificiales por provincia no sigue una distribución normal ($p = 0,0109$). Este resultado estadístico sugiere una intencionalidad geográfica en la implementación de esta tecnología, especialmente en provincias costeras y rurales.

Una posible explicación para esta concentración radica en la baja densidad poblacional de Puntarenas y Guanacaste, que registran 44 y 40 habitantes por kilómetro cuadrado, respectivamente, según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) [27]. Estas condiciones rurales dificultan significativamente la implementación de soluciones de saneamiento convencionales. Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) centralizadas implican un alto costo de inversión inicial y la necesidad de redes de recolección extensas, que resultan poco viables en áreas dispersas [28]. A estas limitaciones se suma la poca capacidad de pago de los usuarios rurales y la ausencia de modelos financieros sostenibles o sistemas tarifarios adecuados, lo que agrava la falta de infraestructura estatal. En consecuencia, esta combinación de factores económicos, logísticos y de infraestructura ha propiciado el vertido directo de aguas grises y negras sin tratamiento adecuado en estas zonas [28], [29].

Frente a este déficit, organizaciones no gubernamentales (ONG) y proyectos tanto de investigación como de acción social impulsados por universidades públicas han desempeñado un papel fundamental en la implementación de humedales artificiales. Un ejemplo destacado es el trabajo de ACEPESA en comunidades como Zapote de San Mateo (Alajuela), Corazón de Jesús y Ojo de Agua de Arancibia (Puntarenas), donde se ha promovido la instalación de humedales artificiales adaptados a contextos rurales [30].

Del total de humedales identificados, 79 se ubican en zonas rurales, mientras que únicamente dos se localizan en áreas urbanas: uno en Zapote, San José, y otro en Ulloa, Heredia. La escasa presencia en zonas urbanas responde a dos factores principales: la limitada disponibilidad de espacio en hogares, restaurantes, hoteles, entre otros, y la existencia de redes de alcantarillado sanitario, que disminuyen la necesidad de soluciones descentralizadas como los humedales artificiales.

D. Clasificación por zonas de vida (contexto ecológico)

Los humedales artificiales instalados en Costa Rica han demostrado una destacable capacidad de adaptación a condiciones geográficas y climáticas sumamente diversas, lo que evidencia su resiliencia como opción tecnológica para el tratamiento de aguas residuales en múltiples contextos. Estos sistemas se encuentran en altitudes que van desde los 5,1 m s. n. m., en Sámara de Nicoya, Guanacaste, hasta los 2 215,5 m s. n. m., en el Páramo de Pérez Zeledón, San José.

Según la clasificación ecológica de zonas de vida de Holdridge, los humedales artificiales se distribuyen en 12 zonas distintas del país (CUADRO I). La mayoría de los sistemas se localiza en zonas de bosque muy húmedo premontano (bmh-P),

que agrupan el 29,63 % del total, seguidas por el bosque húmedo premontano con precipitación media (bh-P6), con un 14,81 %, y el bosque húmedo montano tropical (bh-T), con un 7,41 %. Esta variedad de entornos ecológicos pone de manifiesto que los humedales han sido implementados en contextos de alta humedad, así como en zonas de menor precipitación relativa, como el bosque seco tropical con precipitación baja (bs-T2), que representa el 3,7 %.

CUADRO I
PRESENCIA DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN LAS
DIFERENTES ZONAS DE VIDA DE COSTA RICA

Zona de vida	Cantidad	Porcentaje (%)
bh-P	5	6,17
bh-P6	12	14,81
bh-T	6	7,41
bh-T10	2	2,47
bh-T12	9	11,11
bh-T2	2	2,47
bmh-MB	3	3,70
bmh-P	24	29,63
bmh-P6	7	8,64
bmh-T	4	4,94
bp-P	4	4,94
bs-T2	3	3,70
Total	81	100,00

Nota: Las zonas de vida se describen según las siguientes categorías: bh: bosque húmedo; bmh: bosque muy húmedo; bp: bosque pluvial; bs: bosque seco. Las subcategorías de temperatura son P: premontano (zonas bajas) y T: montano (zonas altas). Los números indican niveles crecientes de precipitación, representando niveles de humedad (2, 6, 10, 12).

A nivel internacional, se ha documentado la resiliencia de los humedales artificiales para tratar múltiples tipos de contaminantes bajo diversas condiciones climáticas [31]-[33]. En Costa Rica, las visitas de campo realizadas inicialmente reforzaban la percepción de que estos sistemas podían adaptarse a cualquier zona del país. No obstante, con el fin de validar esta apreciación empírica,

se aplicó una prueba de independencia chi-cuadrado (χ^2) con matrices 3×3 , utilizando las frecuencias de humedales por categoría de temperatura y precipitación según Holdridge. El análisis estadístico arrojó un valor de $\chi^2 = 11,75$ con cuatro grados de libertad, resultando en un p-valor $< 0,05$. Este resultado indica que existe una dependencia estadísticamente significativa entre la presencia de humedales artificiales y las condiciones climáticas de temperatura y precipitación.

Este hallazgo sugiere que la distribución de los humedales no es completamente aleatoria ni enteramente adaptable, como se pensaba en un inicio, sino que puede estar influenciada por condiciones ambientales favorables o por una intencionalidad estratégica en su implementación. La tendencia a ubicar estos sistemas en zonas de alta humedad y temperaturas intermedias podría estar guiada tanto por la eficiencia funcional esperada como por criterios sociales, técnicos o logísticos de quienes promueven estas soluciones.

E. Caracterización técnica de los humedales artificiales

La caracterización técnica de los humedales artificiales en Costa Rica se realizó con base en los 81 sistemas identificados hasta el año 2023. Esta sección ofrece un panorama detallado sobre los elementos constructivos más frecuentes, proporcionando una referencia útil para el diseño, evaluación y replicación de estos sistemas en contextos similares. Los aspectos analizados incluyen el tipo de agua residual tratada, el tipo de humedal artificial, las dimensiones físicas, el material impermeabilizante utilizado, el tipo de sustrato y la vegetación establecida.

1) Tipo de agua residual que trata

A nivel internacional, los humedales artificiales han sido utilizados exitosamente para tratar diversos tipos de contaminantes, tanto domésticos como industriales [31]-[34]. En el caso de Costa Rica, se observa una clara predominancia en el tratamiento de aguas residuales ordinarias, que representan el 96 % del total de sistemas registrados.

De los 81 humedales artificiales identificados, 66 están destinados exclusivamente al tratamiento de aguas grises, provenientes de fuentes como lavamanos, duchas, lavadoras y cocinas. Doce sistemas adicionales tratan aguas combinadas, es decir, grises y negras (que incluyen excretas humanas), mientras que solo tres sistemas procesan aguas residuales clasificadas como especiales, tales como las generadas por laboratorios (e. g., el Sistema de Tratamiento Alternativo para Aguas Residuales [SATAR-UNA], procesos de producción de queso [emprendimiento local en zona rural] o fabricación de cerveza [Cervecería Monteverde]) [11].

Aunque los humedales artificiales tienen la capacidad técnica de tratar aguas negras, su uso en este tipo de aplicaciones sigue siendo limitado. Esto podría atribuirse a factores socioculturales y percepciones de riesgo por parte de los usuarios, tales como el temor a la contaminación, la generación de malos olores o la proliferación de insectos [26], [33], [35]. Como resultado, muchas personas continúan prefiriendo soluciones tradicionales como los tanques sépticos y sistemas de drenaje, incluso en contextos donde un humedal artificial sería técnicamente viable y más sostenible a largo plazo. La distribución de los sistemas según el tipo de agua tratada (Fig. 3.) permite observar el predominio marcado de sistemas destinados exclusivamente al tratamiento de aguas grises.

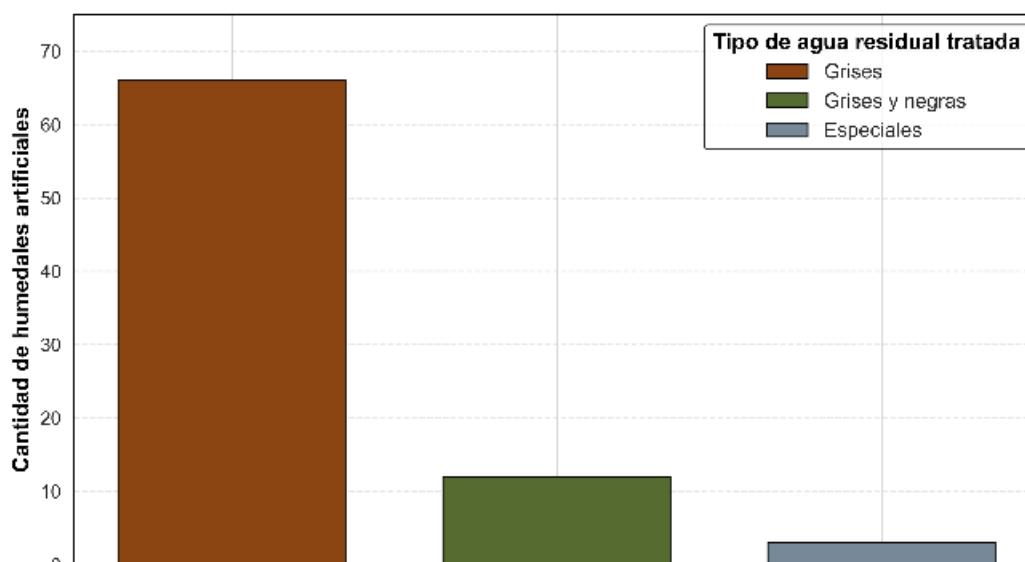


Fig. 3. Tipo de aguas residuales tratadas por los humedales artificiales ubicados en Costa Rica. Los porcentajes se deben interpretar con base en 81 humedales artificiales ubicados.

2) Tipo de humedal artificial

Los 81 humedales artificiales identificados en este estudio corresponden al tipo subsuperficial de flujo horizontal. Esta preferencia responde, en parte, a la necesidad de evitar la proliferación de vectores, como mosquitos, que pueden surgir en los sistemas de flujo libre donde el agua residual permanece expuesta al ambiente [32]. Esta condición es especialmente preocupante en países con alta incidencia de enfermedades transmitidas por vectores, como el dengue. En contraste, los sistemas subsuperficiales conducen el agua por debajo del sustrato, eliminando este riesgo sanitario [7].

Además, los sistemas de flujo horizontal no requieren equipos de bombeo para el vertido del efluente, ya que el movimiento del agua se realiza por gravedad. Esto representa una ventaja operativa en comparación con los sistemas subsuperficiales de flujo vertical, donde el efluente debe ser captado desde la parte profunda del humedal y bombeado hacia su destino final. Los costos asociados al bombeo y el consumo energético requerido pueden ser las principales razones por las cuales no se han implementado

sistemas de flujo vertical en los humedales artificiales registrados en este inventario.

3) Profundidad y tendencias de dimensionamiento

Los humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal en Costa Rica presentan una profundidad promedio de 0,75 m, con un rango que varía entre 0,40 m y 1,20 m (Fig. 4). Estos valores se encuentran en línea con las recomendaciones técnicas presentes en la guía de ACEPESA [14], ampliamente utilizada en el país, la cual sugiere una profundidad estándar de 0,70 m. Este valor también concuerda con lo reportado en la literatura internacional, donde se indica un rango típico de entre 0,5 y 0,7 m para este tipo de sistemas [7].

La aplicación de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para esta variable reveló una distribución no normal ($p = 1,0e-08$), lo cual indica una intencionalidad clara en el diseño, posiblemente orientada por las recomendaciones de dicha guía. Este hallazgo sugiere una estandarización práctica, adoptada probablemente por criterios de simplicidad constructiva, experiencia acumulada y disponibilidad de materiales.

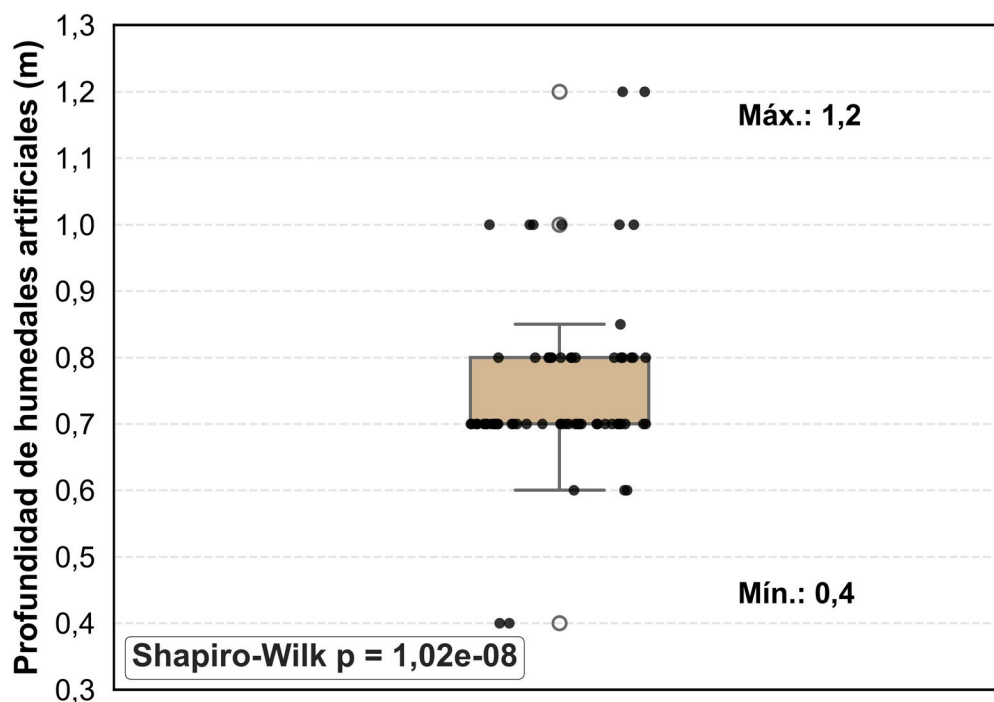


Fig. 4. Variación de valores de profundidad de los humedales artificiales.

En cuanto a la superficie de tratamiento, esta depende de factores como la temperatura del afluente, el caudal y la carga contaminante por remover [32]. A temperaturas más bajas, la cinética de degradación disminuye, lo cual incrementa la superficie requerida para alcanzar niveles aceptables de remoción. En el contexto costarricense, donde las temperaturas son relativamente estables y el tratamiento se centra mayoritariamente en aguas grises, el tamaño de los humedales depende principalmente del caudal generado por viviendas, restaurantes, hoteles, universidades o comunidades. Por ejemplo, el Manual para la construcción y

mantenimiento de biojardineras de ACEPESA recomienda para una vivienda de 10 habitantes (con un consumo de 120 L/persona/día) un humedal de 1,50 m de ancho, 8,00 m de largo (equivalente a 12 m² de superficie) y 0,70 m de profundidad [17].

En este estudio, al aplicar la prueba de Shapiro-Wilk a las áreas superficiales de los humedales artificiales, también se identificó una distribución no normal ($p = 0,0001$), lo cual sugiere una tendencia hacia ciertos tamaños estandarizados. El 70 % de los sistemas inventariados tienen áreas que oscilan entre 1 y 15 m², dimensiones adecuadas para hogares con disponibilidad

limitada de espacio, donde los humedales suelen instalarse en jardines o patios (Fig. 5).

En contraste, los sistemas de mayor tamaño en Costa Rica, que oscilan entre 113 y 810 m², atienden a instalaciones no residenciales. Ejemplos notables incluyen el hotel Diuwak en Puntarenas (113 m²), la Sede de Occidente de la Universidad de Costa Rica (225 m²) y el restaurante El Yugo de Mi Tata (810 m²). Además, el SATAR-UNA consiste en cuatro humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal que, en total, suman

800 m². Esta diversidad en escala dentro del contexto nacional resalta la adaptabilidad de la tecnología. A nivel internacional, la versatilidad de estos sistemas es aún más evidente, con humedales subsuperficiales de flujo horizontal documentados en rangos significativamente mayores, como los reportados en [36], [37] y [38], que alcanzan dimensiones de 69 × 46 m (3,174 m²), 150 × 30 m (4,500 m²) y hasta 320 000 m², respectivamente. Estos ejemplos globales subrayan la flexibilidad de la tecnología para ajustarse a diversas necesidades de tratamiento y contextos de aplicación.

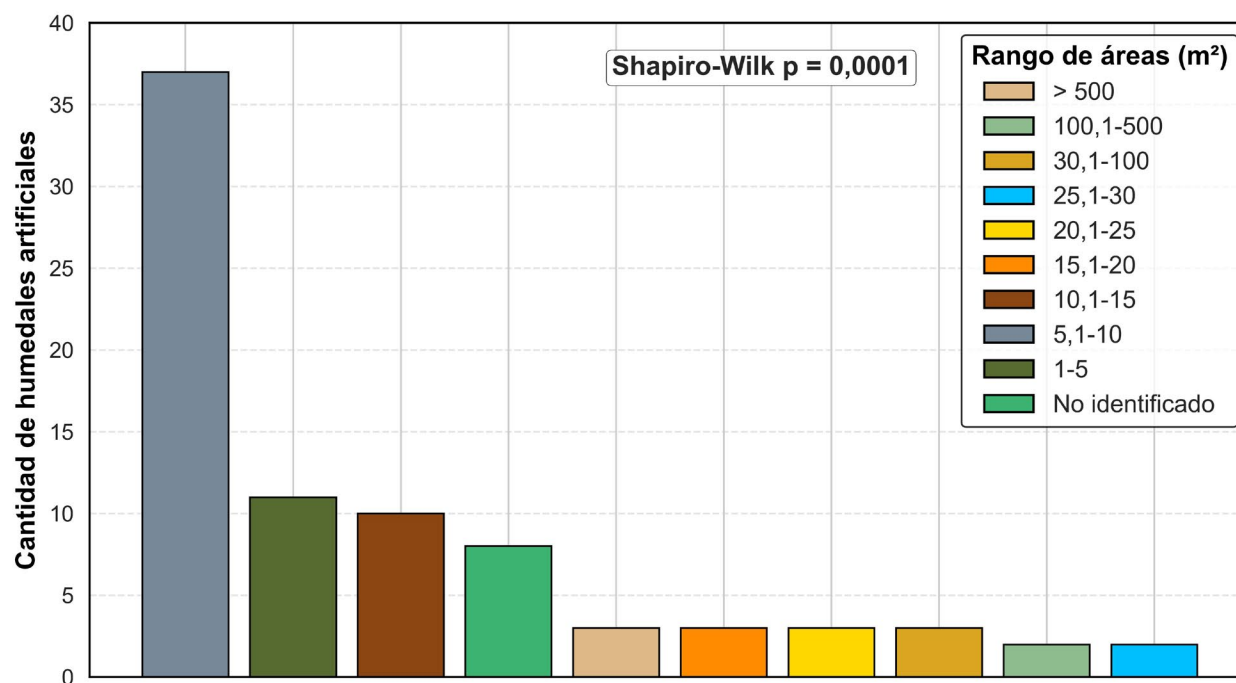


Fig. 5. Área superficial de humedales artificiales.

4) Material impermeabilizante

La impermeabilización de los humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal es esencial para asegurar que el agua residual recorra todo el sistema sin infiltrarse en el subsuelo, evitando así posibles contaminaciones del suelo y del agua subterránea. En este estudio, se identificaron tres materiales principales utilizados para este propósito: plástico de construcción, geomembrana de polietileno y concreto (Fig. 6 y Fig. 7).

Los resultados muestran que el 90 % de los humedales están impermeabilizados con plástico de construcción (Fig. 7(a)). Este material, ampliamente disponible en ferreterías, se caracteriza por su bajo costo y fácil acceso. Por ejemplo, un rollo de 2 m de ancho tiene un costo aproximado de 715 CRC por metro lineal (1 USD ≈ 505 CRC). A pesar de que cumple con la función básica de impermeabilización, su uso presenta limitaciones técnicas importantes.

El plástico de construcción no fue diseñado para resistir las condiciones físicas y químicas del ambiente interno de un humedal, lo que lo hace susceptible a rupturas por acción de raíces u objetos punzantes, así como a la degradación progresiva por

exposición a la humedad, temperaturas variables y compresión del sustrato.

La aplicación de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk evidenció que la selección del material impermeabilizante no sigue una distribución normal ($p = 0,0003$), lo cual sugiere una tendencia deliberada hacia el uso de materiales de bajo costo. Esta decisión puede atribuirse al hecho de que muchos de estos humedales han sido financiados o construidos mediante proyectos de acción social, iniciativas universitarias o donaciones de ONG, en los que la reducción de costos resulta prioritaria sobre la durabilidad del material.

En contraste, solo el 4 % de los humedales utilizan geomembrana de polietileno (de baja o alta densidad), un material especializado que ofrece una barrera de impermeabilización eficaz y duradera (Fig. 7(b)). Este tipo de geomembrana es comúnmente utilizado en reservorios, digestores y otras infraestructuras hidráulicas debido a su resistencia mecánica, estabilidad química y vida útil prolongada [36]. Sin embargo, su elevado precio y el formato en que se comercializa (rollos de grandes dimensiones, por ejemplo, 12 × 50 m) dificultan su adopción en proyectos

comunitarios o de pequeña escala. En el mercado, también se encuentra disponible un plástico especial de 200 micras diseñado específicamente para impermeabilización, que, aunque más económico que la geomembrana de polietileno, sigue siendo considerablemente más costoso que el plástico de construcción, con precios que oscilan entre 350 000 y 1 000 000 CRC por rollo, según el proveedor [40].

Finalmente, apenas un 2 % de los sistemas fueron construidos con estructuras de concreto (Fig. 7(c)). Este material, aunque altamente resistente y duradero, implica costos significativamente mayores tanto en materiales como en mano de obra, lo que explica su uso marginal en comparación con las otras opciones identificadas.

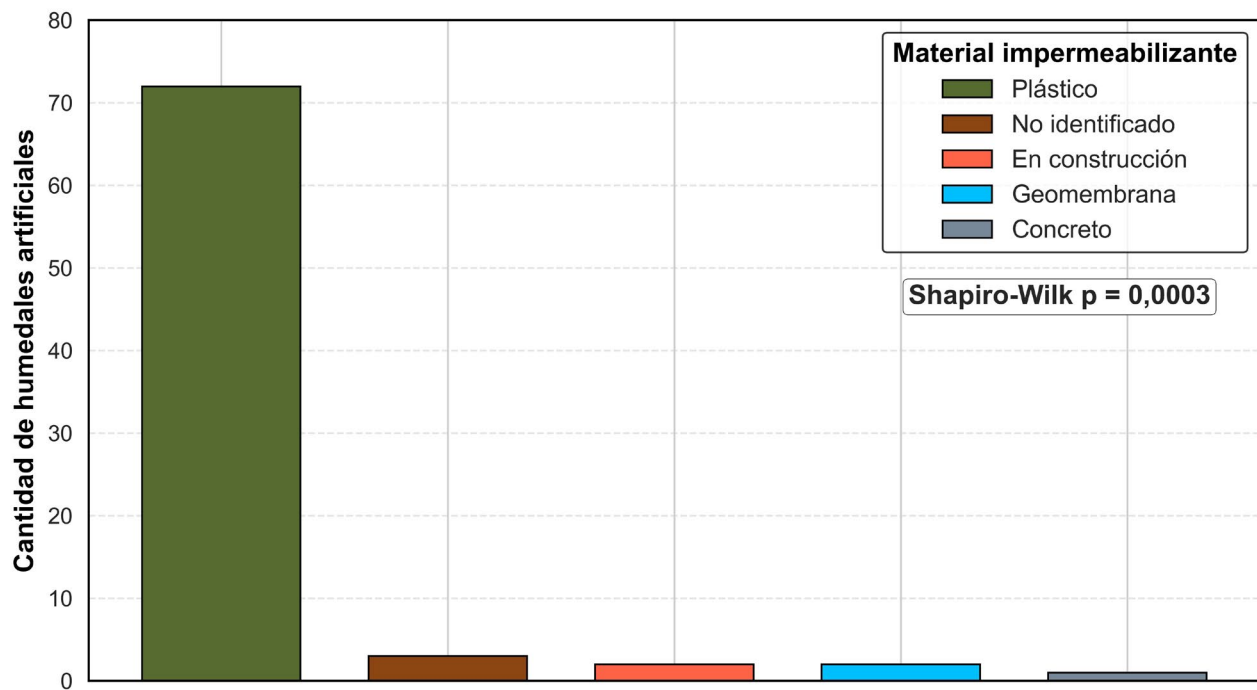


Fig. 6. Tipo de material impermeabilizante utilizado en humedales artificiales.

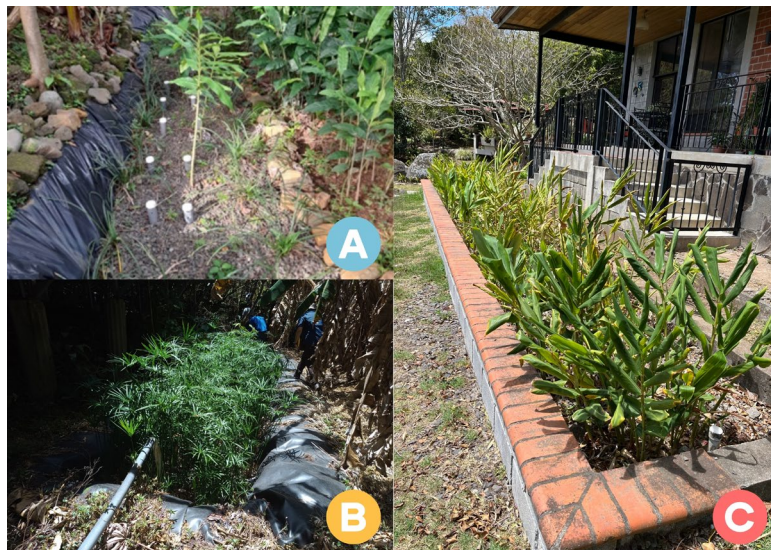


Fig. 7. Comparación de diferentes tipos de impermeabilizantes utilizados en humedales artificiales: (a) plástico de construcción, (b) geomembrana y (c) concreto.

5) Sustrato

En los humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal, el sustrato cumple un papel fundamental en el soporte físico para la vegetación, así como en la retención, filtración y degradación de contaminantes. De acuerdo con guías técnicas para la implementación de humedales artificiales [6], [17], es recomendable utilizar piedra bola en las secciones de entrada y salida, donde se instalan los tubos de ingreso y egreso, respectivamente, mientras que el cuerpo del humedal se rellena comúnmente con piedra cuarta o quintilla.

Esta configuración técnica fue validada por los datos obtenidos en este estudio: prácticamente el 100 % de los humedales artificiales analizados utilizaron piedra bola en los extremos (entrada y salida) y piedra cuarta o quintilla en el interior del sistema (Fig. 8 y Fig. 9). Al aplicar la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk a la variable de tipo de sustrato, se identificó que su selección no sigue una distribución normal ($p = 0,0065$), lo cual

sugiere una preferencia intencionada asociada directamente al tipo de humedal predominante (subsuperficial de flujo horizontal).

La disponibilidad local de materiales también influye en la elección del sustrato. Por ejemplo, en la región de Guanacaste, se identificó el uso de piedra cuarta de origen calizo en aproximadamente el 15 % de los humedales artificiales. Además, un 5 % de los sistemas incluyeron arena como complemento del sustrato principal (Fig. 8). Aunque el uso de arena puede incrementar la eficiencia de tratamiento al ofrecer una mayor área superficial específica y una capacidad superior de filtración [41]-[43], también implica riesgos operativos y no se recomienda su uso. Entre ellos se encuentra el colapso por saturación, que puede obstruir el flujo y comprometer el funcionamiento del sistema.

Durante las visitas a campo se observó, en la mayoría de los casos, un flujo continuo en la tubería de salida, lo cual indica que los sustratos seleccionados han funcionado adecuadamente y no se encuentran saturados. Esto valida la efectividad de la configuración empleada por los usuarios en los sistemas observados.

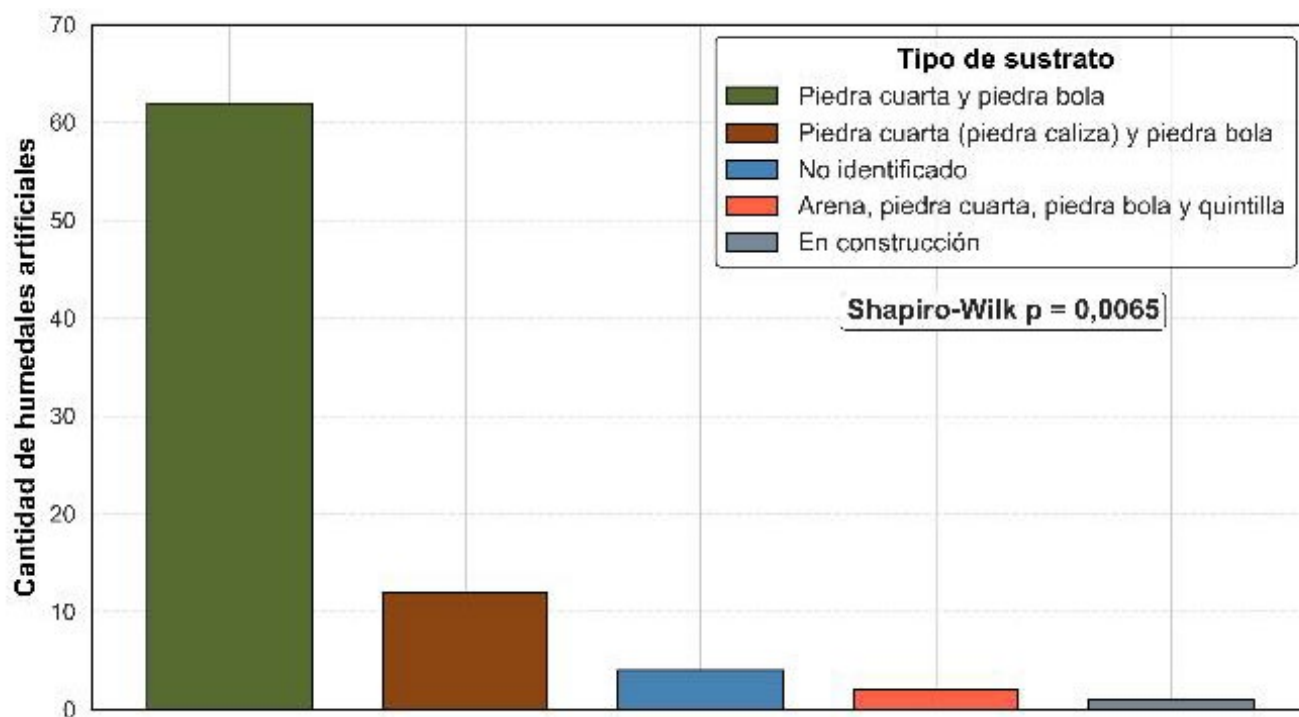


Fig. 8. Tipo de sustrato utilizado en humedales artificiales.

6) Vegetación establecida

El CUADRO II presenta un total de 44 especies vegetales identificadas en los 81 humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal localizados en Costa Rica. Este inventario incluye el nombre común y científico de cada planta, así como su distribución por distrito, cantón y provincia. La frecuencia de aparición de cada especie se indica entre corchetes, permitiendo observar su prevalencia regional.

Las especies más comunes fueron platanilla o sagú (*Canna indica*) y heliconia (*Heliconia* sp.), presentes en 16 de los sistemas. Les siguen la avecilla (*Heliconia psittacorum*),

con 15 observaciones; el ginger rojo o rosado (*Alpinia purpurata*), presente en 12 humedales; y el liriotropo (*Hedychium coronarium*), observado en 9 sistemas. Estas especies están distribuidas en las siete provincias del país y se destacan por su capacidad de adaptación a diferentes condiciones ecológicas y climáticas.

Inicialmente, las observaciones de campo sugerían que especies como *Canna indica* y *Heliconia* sp. podían adaptarse a cualquier región del país. No obstante, para evaluar esta percepción, se aplicó una prueba de chi-cuadrado de independencia (3×3) utilizando categorías de temperatura y elevación, de acuerdo con las zonas de vida de Holdridge.

Los resultados arrojaron valores de $\chi^2 = 10,98$ para *Canna indica* y $\chi^2 = 11,05$ para *Heliconia* sp., ambos con cuatro grados de libertad. En ambos casos, los valores p fueron menores a 0,05, lo que indica una dependencia estadísticamente significativa entre la presencia de estas especies y las condiciones climáticas, refutando así la hipótesis inicial de adaptabilidad uniforme. Por otro lado, se identificó el uso del cypriol (*Cyperus scariosus*) en siete humedales. Esta especie no es recomendable para estos sistemas debido a su denso sistema radicular, el cual puede provocar

obstrucción del sustrato y reducir la conducción hidráulica, afectando la eficiencia del tratamiento del agua residual [44].

El uso de plantas ornamentales en humedales artificiales ofrece múltiples ventajas. Según [45] y [46], estas especies no solo cumplen una función técnica en el proceso de tratamiento, sino que también presentan beneficios sociales y económicos. Su valor estético favorece la aceptación comunitaria del sistema, y algunas especies pueden incluso ser comercializadas como flores de corte, generando ingresos adicionales para los usuarios.



Fig. 9. Ejemplos de sustratos utilizados en humedales artificiales: (a) piedra cuarta y (b) piedra cuarta de tipo caliza.

CUADRO II ESPECIES VEGETALES IDENTIFICADAS EN HUMEDALES ARTIFICIALES EN COSTA RICA Y SU FRECUENCIA DE APARICIÓN POR UBICACIÓN

Ubicación	Nombre común (nombre científico) [frecuencia]
Arancibia, Puntarenas, Puntarenas	Begonia (<i>Begonia</i> sp.) [1], caña india (<i>Cordyline fruticosa</i>) [1], chile (<i>Capsicum annum</i>) [1], gladiolo silvestre (<i>Gladiolus</i> sp.) [1], ixora petit (<i>Ixora coccinea</i>) [1], jalapa (<i>Mirabilis jalapa</i>) [1], lágrimas de San Pedro (<i>Coix lacryma-jobi</i>) [1], morera (<i>Morus alba</i>) [1], orquídea terrestre (<i>Phaius tankervilleae</i>) [1], papaya (<i>Carica papaya</i>) [1], <i>Calathea</i> [1], <i>Dracaena</i> [1], <i>Heliconia rostrata</i> [1], lirio rosado o blanco (<i>Lilium</i> sp.) [1], liriotropo (<i>Hedychium coronarium</i>) [1]; china (<i>Impatiens hawkeri</i>) [2], anturio (<i>Anthurium</i> spp.) [2], <i>Piper</i> sp. (Piperaceae) [2], corazón de Jesús (<i>Caladium bicolor</i>) [2], lotería (<i>Aglaonema</i> sp.) [2], alocasia (<i>Alocasia</i> sp.) [2], cala alcatraz (<i>Zantedeschia</i> sp. y <i>Zantedeschia aethiopica</i>) [2], lotería (<i>Dieffenbachia seguine</i>) [2], caña agria (<i>Costus spicatus</i> y <i>Costus spiralis</i>) [2], ginger rojo o rosado (<i>Alpinia purpurata</i>) [2], platanilla o Sagú (<i>Canna indica</i>) [2], avecilla (<i>Heliconia psittacorum</i>) [3]
Atenas, Atenas, Alajuela	Platanilla o sagú (<i>Canna indica</i>) [1]
Bahía Ballena, Osa, Puntarenas	Azucena de porcelana (<i>Alpinia zerumbet</i>) [1], moisés (<i>Tradescantia spathacea</i>) [1], <i>Heliconia orthotricha</i> [1], cypriol (<i>Cyperus scariosus</i>) [1]
Bribri, Talamanca, Limón	<i>Heliconia</i> (<i>Heliconia</i> sp.) [1]
Buenos Aires, Buenos Aires, Puntarenas	Avecilla (<i>Heliconia psittacorum</i>) [1]

Cabo Velas, Santa Cruz, Guanacaste	Ginger rojo o rosado (<i>Alpinia purpurata</i>) [1] , platanilla o sagú (<i>Canna indica</i>) [1]
Chomes, Puntarenas, Puntarenas	Lirio rosado o blanco (<i>Lilium</i> sp.) [1], heliconia (<i>Heliconia</i> sp.) [1], platanilla o sagú (<i>Canna indica</i>) [1]
Curubandé, Liberia, Guanacaste	Avecilla (<i>Heliconia psittacorum</i>) [1]
Dulce Nombre de Jesús, Vázquez de Coronado, San José	Pincel blanco (<i>Dianella tasmanica</i>) [1] , heliconia (<i>Heliconia</i> sp.) [1], avecilla (<i>Heliconia psittacorum</i>) [1], platanilla o sagú (<i>Canna indica</i>) [1] , <i>Heliconia spathocircinata</i> [1]
El Amparo, Los Chiles, Alajuela	Avecilla (<i>Heliconia psittacorum</i>) [1]
Guápiles, Pococí, Limón	Heliconia (<i>Heliconia rauliniana</i>) [1] , ginger rojo o rosado (<i>Alpinia purpurata</i>) [1]
Juan Viñas, Jiménez, Cartago	Avecilla (<i>Heliconia psittacorum</i>) [1], platanilla o sagú (<i>Canna indica</i>) [1]
La Sierra, Abangares, Guanacaste	Sainillo (<i>Dieffenbachia oerstedii</i>) [1] , caña agria (<i>Costus spicatus</i> y <i>Costus spiralis</i>) [1] , heliconia (<i>Heliconia</i> sp.) [1]
Lepanto, Puntarenas, Puntarenas	Crisantemo (<i>Chrysanthemum</i> sp.) [1] , matrimonio (<i>Zinnia</i> sp.) [1] , ginger rojo o rosado (<i>Alpinia purpurata</i>) [1]
Liberia, Liberia, Guanacaste	Uvilla (<i>Cissus verticillata</i>) [1], heliconia (<i>Heliconia</i> sp.) [1] , avecilla (<i>Heliconia psittacorum</i>) [1]
Mansión, Nicoya, Guanacaste	Liriotropo (<i>Hedychium coronarium</i>)[3], platanilla o sagú (<i>Canna indica</i>) [3], Ginger rojo o rosado (<i>Alpinia purpurata</i>) [2] , avecilla (<i>Heliconia psittacorum</i>) [2], heliconia rostrata [1], heliconia (<i>Heliconia</i> sp.) [1]
Monteverde, Monteverde, Puntarenas	Cala alcatraz (<i>Zantedeschia</i> sp. y <i>Zantedeschia aethiopica</i>) [3] , caña agria (<i>Costus spicatus</i> y <i>Costus spiralis</i>) [2] , cypriol (<i>Cyperus scariosus</i>) [4] , heliconia (<i>Heliconia</i> sp.) [4], banano (<i>Musa acuminata</i> AAA) [1] , plátano (<i>Musa paradisiaca</i> AAB)[1], platanilla o sagú (<i>Canna indica</i>) [1]
Nosara, Nicoya, Guanacaste	Alocasia (<i>Alocasia</i> sp.)[1], lotería (<i>Dieffenbachia seguine</i>) [1], lirio rosado o blanco (<i>Lilium</i> sp.) [1], caña agria (<i>Costus spicatus</i> y <i>Costus spiralis</i>) [1]
Palmar, Osa, Puntarenas	Ginger rojo o rosado (<i>Alpinia purpurata</i>) [2], <i>Caladium</i> [1]
Piedades Norte, San Ramón, Alajuela	Ginger rojo o rosado (<i>Alpinia purpurata</i>) [1] , platanilla o sagú (<i>Canna indica</i>) [1]
Sabana Redonda, Poás, Alajuela	Ginger rojo ó rosado (<i>Alpinia purpurata</i>) [1] , platanilla o sagú (<i>Canna indica</i>) [1]
Sabanilla, Alajuela, Alajuela	Iridaceae (<i>Trimezia</i> o <i>Neomarica</i>) [1], ave del paraíso (<i>Strelitzia reginae</i>) [1], platanilla o sagú (<i>Canna indica</i>) [1]
Sámara, Nicoya, Guanacaste	Platanilla o sagú (<i>Canna indica</i>) [1]
San Isidro, El Guarco, Cartago	Liriotropo (<i>Hedychium coronarium</i>) [1], cypriol (<i>Cyperus scariosus</i>)[1], heliconia (<i>Heliconia</i> sp.) [1]
San Jerónimo, Esparza, Puntarenas	Liriotropo (<i>Hedychium coronarium</i>) [3], lotería (<i>Dieffenbachia seguine</i>) [2], filodendro (<i>Philodendron grandipes</i>) [1], oreja de Elefante (<i>Alocasia longiloba</i>) [1], Arvenses [1], Lotería (<i>Aglaonema</i> sp.) [1], caña agria (<i>Costus spicatus</i> y <i>Costus spiralis</i>) [1], heliconia (<i>Heliconia</i> sp.) [1]
San Juan, Poás, Alajuela	Ginger rojo o rosado (<i>Alpinia purpurata</i>) [2], avecilla (<i>Heliconia psittacorum</i>) [2], sábila (<i>Aloe vera</i>) [1], ave del paraíso (<i>Strelitzia reginae</i>) [1], platanilla o sagú (<i>Canna indica</i>) [1]
Santa Rita, Nandayure, Guanacaste	Guarumo (<i>Cecropia peltata</i>) [1], platanilla o sagú (<i>Canna indica</i>) [1]
Tárcoles, Garabito, Puntarenas	Piña (<i>Ananas comosus</i>) [1], cuna de Moisés (<i>Spathiphyllum wallisii</i>) [1], lirio rosado o blanco (<i>Lilium</i> sp.) [1]
Ulloa, Heredia, Heredia	Cola de zorro (<i>Pennisetum alopecuroides</i>) [1], coquito (<i>Molineria capitulata</i>) [1], avecilla (<i>Heliconia psittacorum</i>) [1]
Yolillal, Upala, Alajuela	Cuna de Moisés (<i>Spathiphyllum wallisii</i>) [1]
Zapote, San José, San José	Heliconia rostrata (<i>Heliconia rostrata</i>) [1], cypriol (<i>Cyperus scariosus</i>) [1], Heliconia (<i>Heliconia</i> sp.) [1], avecilla (<i>Heliconia psittacorum</i>) [1]

Nota: Los corchetes “[]” indican la frecuencia de observación de la especie de planta en la ubicación especificada.

Por ejemplo, “cuna de Moisés (*Spathiphyllum wallisii*) [1]” significa que esta especie fue observada una vez en la ubicación correspondiente.

V. CONCLUSIONES

Este estudio revela que, si bien la implementación de humedales artificiales en Costa Rica data de 2004, su desarrollo ha sido limitado, disperso y carente de un seguimiento técnico sistemático. Predominan los diseños de flujo subsuperficial horizontal, ubicados mayoritariamente en zonas rurales y con una baja proporción destinada al tratamiento de aguas negras. Esto subraya una significativa oportunidad para mejorar la cobertura de saneamiento en áreas no conectadas a redes centralizadas. A pesar de la diversidad ecológica del país, esta tecnología ha demostrado una notable capacidad de adaptación, evidenciada por su presencia exitosa en doce zonas de vida diferentes. Los análisis estadísticos confirman una distribución dependiente de variables climáticas como la temperatura y la precipitación, lo que valida su aplicabilidad en diversos contextos tropicales.

Se observó una estandarización técnica informal, influenciada por guías locales y la disponibilidad de materiales. Esto ha derivado en patrones comunes en dimensiones, profundidad, tipo de sustrato y vegetación. Si bien esta homogeneidad simplifica la implementación, también restringe el aprovechamiento óptimo del potencial de adaptación y eficiencia de los humedales, especialmente donde se requiere un tratamiento más robusto. Específicamente, el uso generalizado de plástico de construcción como material impermeabilizante, aunque económico, presenta riesgos de durabilidad y fallos estructurales, lo cual compromete la sostenibilidad del tratamiento. Además, el bajo porcentaje de tratamiento de aguas negras (14,8 %) sugiere barreras socioculturales o institucionales que demandan atención para ampliar el impacto sanitario y ambiental.

La continuidad de esta investigación debe enfocarse en el diagnóstico de déficits persistentes en los servicios de saneamiento, particularmente en comunidades rurales o periurbanas sin cobertura de alcantarillado. Para ello, es crucial que la investigación incluya una evaluación detallada de la eficiencia de los humedales artificiales existentes en el tratamiento de aguas residuales, para determinar si cumplen con los estándares de depuración y, en caso contrario, investigar las razones de su bajo rendimiento. Además, será fundamental indagar en el desempeño particular de las especies de plantas más frecuentes, analizando aspectos como sus tasas de crecimiento y el desarrollo de sus sistemas radiculares, entre otros.

Los humedales artificiales se consolidan como una alternativa viable, descentralizada, accesible y replicable. Su integración como solución formal requiere una articulación estratégica entre entidades estatales, gobiernos locales y comunidades, fundamentada en evidencia técnica sólida, bases de datos georreferenciadas y experiencias locales exitosas. Fortalecer las políticas públicas que promuevan el uso de estos sistemas, apoyándose en criterios técnicos y datos de desempeño verificables, potenciará su contribución a la gestión sostenible de aguas residuales, la reducción de la carga contaminante y el avance hacia las metas nacionales e internacionales de saneamiento.

Adicionalmente, un visor cartográfico interactivo (enlace: <https://tinyurl.com/2zshehkkx>) constituye una herramienta dinámica para investigadores, técnicos y tomadores de decisiones. Este recurso permite la identificación detallada de las especies de plantas utilizadas, facilitando la visualización y el análisis de la vegetación establecida. Su valor práctico no solo radica en la organización geoespacial de la información, sino también en su potencial para guiar procesos de diseño, restauración ecológica, educación ambiental y planificación territorial, siendo actualizable con nuevos sistemas para enriquecer continuamente la base de datos nacional.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica por financiar, por medio del Fondo Semilla, el presente proyecto “C2451 - Sistematización de los humedales artificiales instalados en Costa Rica y evaluación de sustratos alternativos en el tratamiento de las aguas residuales ordinarias”. Además, se agradece a la Escuela de Ingeniería de Biosistemas por facilitar que el proceso de investigación se desarrollara según lo planeado.

ROLES DE LAS PERSONAS AUTORAS

Ronald Esteban Aguilar Álvarez: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Adquisición de fondos, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Recursos, Supervisión, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Sofía Rodríguez Rodríguez: Curación de datos, Análisis formal, Redacción – revisión y edición.

Jorge Rodríguez Vásquez: Curación de datos, Análisis formal, Redacción – borrador original.

REFERENCIAS

- [1] Acueductos y Alcantarillados, Ministerio de Ambiente y Energía y Ministerio de Salud, Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales 2016- 2045, 1ra ed. San José, Costa Rica, 2016. [En línea]. Disponible en <https://www.aya.go.cr/Noticias/Documents/Politica%20Nacional%20de%20Saneamiento%20en%20Aguas%20Residuales%20marzo%202017.pdf>
- [2] Castro, V. “Costa Rica tiene un gran reto para mejorar el saneamiento de aguas residuales”. Delfino.com. <https://delfino.cr/2024/02/costa-rica-tiene-un-gran-reto-para-mejorar-el-saneamiento-de-aguas-residuales> (accesado en oct. 17, 2024).
- [3] M.F. Cubillo y W. Gómez. “Biojardineras como alternativas para el tratamiento de aguas residuales: experiencia en cinco biojardineras en las comunidades de Barra Honda y La Vigía de Nicoya, Guanacaste”, Revista de Extensión,

- vol. 7, no. 1, pp. 69-87, jun. 2017, doi: 10.15359/udre.7-1.4.
- [4] J. Vymazal, "Removal of nutrients in various types of constructed wetlands", *Science of the Total Environment*, vol. 380, no. 1, pp. 48-65, oct. 2007, doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.09.014.
- [5] M. T. Alarcón, F. Zurita, J. A. Lara-Borrero y G. Vidal, *Humedales de tratamiento: alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina*, 1ra ed. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, 2018.
- [6] *Constructed Wetlands Manual*. UN-HABITAT, Kathmandu, Nepal, 2008.
- [7] G. Dotro, et al., *Treatment Wetlands*, vol. 7. Londres, Reino Unido: IWA Publishing, 2017, doi: 10.2166/9781780408774.
- [8] R. H. Kadlec y S. Wallace, *Treatment wetlands*, 2da ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2008, doi: 10.1201/9781420012514.
- [9] H. Hoffmann, C. Platzer, M. Winker y E. von Muench, *Sub-surface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment: Technology review of constructed wetlands*, 1ra ed. Hesse, Alemania: Deutsche Gesellschaft für, 2011. [En línea]. Disponible en: https://www.susana.org/_resources/documents/default/2-930-giz2011-en-technology-review-constructed-wetlands.pdf
- [10] J. J. Salas. "Biojardineras: los humedales artificiales "ticos" (I)". *iAgua*. <https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/biojardineras-humedales-artificiales-ticos-i> (accesado en oct. 17, 2024).
- [11] R. E. Aguilar Álvarez, "Uso de humedales para la limpieza de aguas contaminadas en Costa Rica", en *Uso de humedales artificiales para la limpieza de aguas superficiales en América Latina y el Caribe*, L. Morales, P. A. García-Chevesich, G. Romero, A. Arenazas, J. Ticona y R. Pizarro, Eds., Arequipa, Perú: Cátedra UNESCO Hidrología de Superficie, 2023, pp. 85-99.
- [12] *Mobile Topographer*. (v. 9.3.2). GeoStru. Consultado: mar.-jun., 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.geostru.eu/mobile-topographer/>
- [13] *Microsoft Excel*. (Microsoft 365). Microsoft Corporation. Consultado: ago., 2024-ago., 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.microsoft.com/es-microsoft-365/excel>
- [14] *Python*. (v. 3.x). Python Software Foundation. Consultado: ene.-jul., 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.python.org>
- [15] E. Rosales Escalante, *Creando jardines para limpiar nuestra agua: Manual para la construcción de biojardineras*. San José, Costa Rica: ACEPESA y Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2006. [En línea]. Disponible en: <https://g.co/kgs/yeFH-KKT>
- [16] E. Rosales-Escalante, "Ecosaneamiento", *Tecnología en marcha*, vol. 18, no. 2, p. 15, 2005. [En línea]. Disponible en: https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/204
- [17] M. Marín, *Manual para la construcción y mantenimiento de biojardineras*, 2da ed. San José, Costa Rica: ACEPESA, 2010.
- [18] E. Rosales-Escalante, "Mejoras sanitarias en instituciones o servicios públicos de La Casona, Coto Brus", *Tecnología en marcha*, vol. 23, no. 5, pp. 41-50, dic. 2011. [En línea]. Disponible en: https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/57
- [19] S. Moncada-Corrales, "Evaluación del diseño de una biojardinería de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises en Zapote, San José", Tesis de Licenciatura, Escuela de Química, Carrera de Ingeniería Ambiental, Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2011.
- [20] C. Alfaro, R. Pérez y M. Solano, "Saneamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales en el Museo de Cultura Popular de la Universidad Nacional", *Rev. Ambientales*, vol. 45, no. 1, pp. 63-71, ene. 2013, doi: 10.15359/rca.45-1.6.
- [21] R. Pérez Salazar, C. Alfaro Chinchilla, J. Sasa Marín y J. Agüero Pérez, "Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales", *Uniciencia*, vol. 27, no. 1, pp. 332-340, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/uniciencia/article/view/4958>
- [22] O. J. Chavarria Valverde, "Evaluación del desempeño en la remoción de la carga orgánica en aguas grises domésticas de una biojardinería mediante la construcción a nivel del laboratorio", Tesis de Licenciatura, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2018.
- [23] D. Arias-Hidalgo, R. Aguilar-Álvarez y D. Reinhold, "Prácticas sostenibles de turismo para el tratamiento de aguas y manejo de residuos sólidos en albergues turísticos de Talamanca", *Tecnología en marcha*, vol. 32, no. 6, pp. 78-88, abr. 2019, doi: 10.18845/tm.v32i6.4231.
- [24] M. J. Chassoul-Acosta, "Ecotecnia para el tratamiento de residuos: experiencia de la subcuenca del río Jabonal, Costa Rica", *Estudios de la Gestión*, no. 10, pp. 97-114, jul. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.uasb.edu.ec/index.php/eg/article/view/2853/3322>
- [25] E. Ortega, Y. Ferrer, J. J. Salas, C. Aragón y Á. Real, *Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones*. Madrid, España: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM), 2010.
- [26] C. B. Agaton y P. M. C. Guila, "Success Factors and Challenges: Implications of Real Options Valuation of Con-

- structed Wetlands as Nature-Based Solutions for Wastewater Treatment”, *Resources*, vol. 13, no. 1, pp. 1-14, ene. 2024, doi: 10.3390/resources13010011.
- [27] Instituto Nacional de Estadística y Censos, *Estimación de Población y Vivienda 2022*. San José, Costa Rica: INEC, jul. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.inec.cr/estimaciones-poblacion-vivienda-2022>
- [28] E. Centeno Mora, N. Cruz Zúñiga y P. Vidal Rivera, “Tratamiento de aguas residuales ordinarias en Costa Rica: perfil tecnológico y perspectivas de sostenibilidad”, *Ingeniería*, vol. 34, no. 1, pp. 7-22, 2024, doi: 10.15517/ri.v34i1.55222.
- [29] F. Ruiz Fallas y Á. Araya García, *Gestión de las Excretas y Aguas Residuales en Costa Rica: Situación Actual y Perspectiva*. San José, Costa Rica: Acueductos y Alcantarillados, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.aya.go.cr/centroDocumetacion/catalogoGeneral/Gesti%C3%B3n%20de%20las%20Excretas%20y%20Aguas%20Residuales%20en%20Costa%20Rica%20%20Situaci%C3%B3n%20Actual%20y%20Perspectiva.pdf>
- [30] Ecoinventos, “Biojardineras que permiten reutilizar las aguas grises o jabonosas para fines domésticos”, Ecoinventos. <https://ecoinventos.com/biojardineras/> (accesado en oct. 17, 2024).
- [31] J. Vymazal, Y. Zhao y Ü. Mander, “Recent research challenges in constructed wetlands for wastewater treatment: A review”, *Ecol. Eng.*, vol. 169, sep. 2021, Art. no. 106318, doi: 10.1016/j.ecoleng.2021.106318.
- [32] R. H. Kadlec y S. Wallace, *Treatment Wetlands*, 2da ed. Boca Ratón, FL, EE. UU.: CRC Press, 2009.
- [33] D. Q. Zhang, K. B. S. N. Jinadasa, R. M. Gersberg, Y. Liu, W. J. Ng y S. K. Tan, “Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries – A review of recent developments (2000–2013)”, *J. Environ. Manage.*, vol. 141, pp. 116-131, 2014, doi: 10.1016/j.jenvman.2014.03.015.
- [34] Z. Lin, M. Li, P. Yan, J. Zhang, H. Xie y H. Wu, “Constructed wetlands for wastewater treatment and reuse: Two decades of experience from China”, *Environ. Res.*, vol. 279, pt. 2, nov. 2025, Art. no. 121781, doi: 10.1016/j.envres.2025.121781.
- [35] C. Webb, “Managing mosquitoes in constructed freshwater wetlands”, en *Workbook for Managing Urban Wetlands in Australia*, S. Paul, Ed., Sydney, Australia: Sydney Olympic Park Authority, 2013, pp. 137-160.
- [36] S. Ahmed, V. Popov y R. C. Trevedi, “Constructed wetland as tertiary treatment for municipal wastewater”, *Proc. Inst. Civ. Eng. Waste Resour. Manag.*, vol. 161, no. 2, pp. 77-84, 2008, doi: 10.1680/warm.2008.161.2.77.
- [37] H. L. Song, X. N. Li, X. W. Lu e Y. Inamori, “Investigation of microcystin removal from eutrophic surface water by aquatic vegetable bed”, *Ecol. Eng.*, vol. 35, no. 11, pp. 1589-1598, nov. 2009, doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.04.005.
- [38] L. Wang, J. Peng, B. L. Wang y L. Yang, “Design and operation of an ecosystem for municipal wastewater treatment and utilization”, *Water Sci. Technol.*, vol. 54, no. 11-12, pp. 429-436, 2006, doi: 10.2166/wst.2006.923.
- [39] Pavco Wavin, “No Tejidos MARV FT2021”. https://pavcowaivingeosinteticos.com/wp-content/uploads/2021/12/Geomembranas_FT2021.pdf (accesado en oct. 17, 2024).
- [40] “Coverttech”, <https://coverttech.odoo.com/> (accesado en jun. 14 2025).
- [41] P. Knowles, G. Dotro, J. Nivala y J. García, “Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors”, *Ecol. Eng.*, vol. 37, no. 2, pp. 99-112, feb. 2011, doi: 10.1016/j.ecoleng.2010.08.005.
- [42] S. D. Wallace y R. L. Knight, *Small-scale constructed wetland treatment systems: feasibility, design criteria, and O&M requirements*. Alexandria, VA, EE. UU.: Water Environment Research Foundation, 2006.
- [43] G. Langergraber, R. Haberl, J. Laber y A. Pressl, “Evaluation of substrate clogging processes in vertical flow constructed wetlands”, *Water Sci. Technol.*, vol. 48, no. 5, pp. 25-34, 2003, doi: 10.2166/wst.2003.0272.
- [44] G. F. Hua et al., “Effects of plant roots on the hydraulic performance during the clogging process in mesocosm vertical flow constructed wetlands”, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 21, no. 22, pp. 13017-13026, nov. 2014, doi: 10.1007/s11356-014-3249-1.
- [45] F. Zurita, J. De Anda y M. A. Belmont, “Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands”, *Ecol. Eng.*, vol. 35, no. 5, pp. 861-869, may. 2009, doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.015.
- [46] D. Konnerup, T. Koottatep y H. Brix, “Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with *Canna* and *Heliconia*”, *Ecol. Eng.*, vol. 35, no. 2, pp. 248-257, feb. 2009, doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.06.015.