

Revisión de literatura sobre el tratamiento de aguas residuales en asentamientos no planificados

Carlos Odilio Marin Marin y Martín Emilio Junior Villafañe Rangel

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

Isabel Cristina Dominguez Rivera

PhD in Agriculture, Food and Rural Development - emphasis in Water management

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental en la realización de este trabajo de grado. A mi director de tesis, por su constante apoyo, orientación y valiosas sugerencias, a mi familia y amigos, por su incondicional apoyo emocional y por motivarme a seguir adelante en los momentos más difíciles. Este trabajo es una muestra del amor, esfuerzo y dedicación que he puesto en mi educación y en alcanzar mis metas. Gracias a todos de corazón.

Carlos Odilio Marin Marin

Este trabajo de grado está dedicado a mis queridos padres Martín, Vilmaris y a mí adorada abuela Doris, quienes han sido los pilares sobre los cuales siempre me he apoyado, gracias por toda la ayuda y acompañamiento en este proceso. A mi director de tesis que sin su acertada orientación esto no hubiera sido posible, a mis preciados amigos que tuve el placer de conocer en la universidad, quienes me apoyaron y acompañaron en este proceso. Por último, a todas las personas que me brindaron su apoyo a lo largo de la carrera, quienes creyeron en mí y aportaron su granito de arena.

Martín Emilio Junior Villafañe Rangel

Agradecimientos

Agradecemos profundamente a la universidad Industrial De Santander por brindarnos las herramientas necesarias para llevar a cabo nuestra investigación. Gracias a los recursos y tecnología disponibles, pudimos llevar a cabo este proyecto de manera efectiva y eficiente. De igual manera agradecemos a la Facultad de Ingeniería Civil junto con el grupo de investigación en recursos hídricos y saneamiento ambiental por permitirnos realizar este trabajo. Finalmente, expresamos nuestro agradecimiento a la Doctora Isabel Cristina Dominguez Rivera por brindarnos soporte durante este proceso, quien con su dirección, enseñanza y colaboración permitió la culminación de este proyecto de investigación.

Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Metodología	12
1.1 Protocolo de Búsqueda	12
1.2 Criterios de Selección	13
1.3 Análisis de información	13
2. Resultados y Discusión	14
2.1 Identificación de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales más comúnmente empleadas en asentamientos no planificados.....	16
2.2 Descripción y caracterización de las tecnologías más comúnmente empleadas para el tratamiento de aguas residuales en asentamientos no planificados.	17
2.2.1 Filtro anaeróbico.	17
2.2.2 Humedales construidos.	19
2.2.3 Biorreactores.	24
2.2.2.1 Biorreactor anaeróbico compacto.	25
2.2.2.2 Biorreactor de lecho fluidizado circulante (CFBBR).	27
2.2.2.3 Biorreactor de membrana.....	30
2.2.2.4 Biorreactor dinámico de membrana (AnDMBR).	32
2.2.2.5 Reactor anaeróbico con deflectores (ABR).	35
2.3 Síntesis de las características de los sistemas de las experiencias revisadas	38

3. Conclusiones 41

Referencias Bibliográficas 43

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama proceso selección artículos.	15
Figura 2. Representación esquemática de las unidades de tratamiento (PTAR).	18
Figura 3. Humedal artificial tipo.....	20
Figura 4. Esquema del humedal artificial de flujo superficial multietapa (SFCW). Las flechas negras indican los lugares de muestreo de aguas residuales.....	23
Figura 5. La planta compacta de tratamiento de aguas residuales (CSTP); (a) vista superior, (b) cámara 1, (c) cámara 2, (d) cámara 3.....	26
Figura 6. Diagrama de CFBBR.....	28
Figura 7. Reactor esquemático.....	31
Figura 8. Sistema AnDMBR experimental.....	33
Figura 9. Sección transversal del ABR.....	36

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Países con experiencia similares.....	15
Tabla 2. Menciones de los Sistemas de tratamiento residual en los diferentes artículos.....	17
Tabla 3. Síntesis de las características de las experiencias revisadas.	40
Tabla 4. Requerimientos y características de las tecnologías implementadas.....	40

Resumen

Título: Revisión de literatura sobre el tratamiento de aguas residuales en asentamientos no planificados*

Autores: Carlos Odilio Marín Marín y Martín Emilio Junior Villafañe Rangel**

Palabras Clave: Asentamientos no planificados, tratamiento de aguas residuales, tecnologías de tratamiento de aguas residuales, afluentes, efluentes, características de remoción.

Descripción

El tratamiento de aguas residuales en asentamientos no planificados es un desafío importante en muchos países, especialmente en aquellos con un creciente número de personas que viven en áreas urbanas informales. Debido a la falta de infraestructura y servicios básicos en estos lugares, los residuos humanos y domésticos frecuentemente se desechan de manera inadecuada, lo que puede tener graves consecuencias para la salud y el ambiente. Este trabajo explora las tecnologías de tratamiento de aguas residuales utilizadas con mayor frecuencia en lugares conocidos como asentamientos no planificados. Para esto, se realizó una revisión donde se implementó un protocolo para identificar, filtrar, clasificar y analizar artículos disponibles en la literatura científica. Como resultado, se encontraron ocho artículos agrupados en tres diferentes tecnologías de tratamiento de aguas residuales: biorreactores (5), filtros anaeróbicos (1) y humedales artificiales (2). A su vez, se caracterizaron las experiencias asociadas a la implementación de estos sistemas en relación con aspectos como: habitantes servidos, caudales, parámetros de diseño, remociones de contaminantes, entre otros. Esta información contribuye a la ampliación del conocimiento en torno a soluciones eficaces para la búsqueda de alternativas viables para superar la inequidad de acceso a saneamiento en estas comunidades vulnerables.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería civil. Directora Isabel Cristina Dominguez Rivera
PhD in Agriculture, Food and Rural Development - emphasis in Water management

Abstract

Title: Literature review on wastewater treatment in unplanned settlements *

Authors: Carlos Odilio Marín Marín y Martín Emilio Junior Villafañe Rangel**

Keywords: Slums, wastewater treatment, wastewater treatment technologies, influents, effluents, removal characteristics

Description

Wastewater treatment in unplanned settlements is a significant challenge in many countries, especially those with increasing numbers of people living in informal urban areas. Due to the lack of infrastructure and essential services in these places, human and household waste is frequently improperly disposed leading to severe consequences for human health and the environment. This paper explores the most frequently used wastewater treatment technologies in unplanned settlements. For this, a review was carried out where a protocol was implemented to identify, filter, classify, and analyze articles available in the scientific literature. As a result, eight articles grouped into three different wastewater treatment technologies were found: bioreactors (5), anaerobic filters (1), and artificial wetlands (2). Then, the reported experiences regarding implementing these systems were characterized by aspects such as inhabitants served, flows, design parameters, and pollutant removal, among others. This information contributes to expanding knowledge around effective solutions for seeking viable alternatives to overcome the inequality of access to sanitation in these vulnerable communities.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería civil. Directora Isabel Cristina Domínguez Rivera
PhD in Agriculture, Food and Rural Development - emphasis in Water management

Introducción

La falta de acceso a los servicios básicos de saneamiento es un problema que afecta a miles de millones de personas, siendo la situación particularmente grave en las zonas periurbanas y rurales de los países en desarrollo (Singh et al.2015). En la actualidad, se ha determinado que alrededor de 1600 millones de personas habitan en casas inadecuadas y 900 millones en asentamientos informales o campamentos tanto en países pobres como ricos (Naciones Unidas, 2018). Estos asentamientos son una manifestación física y espacial de pobreza urbana y desigualdad en la ciudad, lo cual se ve reflejado en la escasez de los sistemas de alcantarillado, lo que conlleva a que las aguas residuales se viertan en los cuerpos de agua y ecosistemas aledaños, generando así impactos negativos en ecosistemas terrestres o acuáticos, como daño a la flora y fauna, proliferación de bacterias, deterioro de indicadores de contaminación como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos, grasas y coliformes, e impactos en la salud humana (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2012).

En Colombia, el porcentaje de las aguas residuales tratadas es del 52 %, según datos oficiales (Radio Nacional, 2022), por lo que muchos municipios de Colombia no cuentan con sistemas de alcantarillado y carecen de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). En las grandes ciudades del país, miles de personas se han trasladado del campo a las ciudades debido a problemas de desplazamiento, violencia, búsqueda de mejores oportunidades de trabajo, generando así la creación de asentamientos no planificados. La proliferación de estos asentamientos, generalmente ubicados en la periferia de las ciudades, es un problema de ámbito

social, calidad de vida, seguridad y prestación de servicios públicos, entre ellos alcantarillado y saneamiento básico, lo que conlleva a la creación de alcantarillados artesanales, por consiguiente, puede ocasionar riesgo de emergencias sanitarias debido a que pueden ser foco para proliferación de enfermedades (Albuja & Ceballos, 2010).

Ante esta situación, han surgido los Sistemas Descentralizados de Tratamiento de Aguas Residuales (DEWATS). Estos sistemas son considerados como una alternativa rentable y eficiente, especialmente en países pobres, con gran potencial para establecer sistemas de saneamiento ambiental a largo plazo (Singh et al., 2011). Los DEWATS se consideran más rentables que los sistemas centralizados para poblaciones de baja densidad y condiciones cambiantes del sitio (USEPA, 1997).

Este trabajo tiene como objetivo explorar el estado del conocimiento sobre tratamiento descentralizado de aguas residuales en asentamientos no planificados mediante una revisión sistemática de literatura. El trabajo busca revisar experiencias relacionadas con el tratamiento de aguas residuales en asentamientos periurbanos para identificar y caracterizar las tecnologías de tratamiento de aguas residuales más comúnmente empleadas en asentamientos no planificados. Esta información contribuye a la ampliación del conocimiento en torno a soluciones eficaces para la búsqueda de alternativas viables para superar la inequidad de acceso a saneamiento en estas comunidades vulnerables.

1. Metodología

Esta revisión se enfocó en las diferentes tecnologías empleadas para el tratamiento de aguas residuales en asentamientos no planificados en países en desarrollo para lo cual se implementó un protocolo de búsqueda, selección de artículos científicos y análisis de información, como se describe a continuación:

1.1 Protocolo de Búsqueda

A través de Scopus, y usando los términos en inglés de las siguientes palabras clave: “tratamiento aguas residuales”, “asentamientos no planificados”, “asentamientos informales”, “asentamientos incompletos”, “asentamientos periurbanos”, “asentamientos marginales”, entre otras permutaciones, se consolidaron las siguientes ecuaciones de búsqueda utilizadas en la revisión de literatura:

1. Wastewater systems AND slums.
2. Wastewater systems AND periurban.
3. Wastewater systems AND decentralized.
4. Sewage treatment AND slums.
5. Sewage treatment AND periurban.
6. Wastewater systems AND decentralized.
7. Wastewater systems AND unplanned settlement.
8. Wastewater systems AND peri-urban settlement.

En los títulos y resumen de cada artículo obtenido de las ecuaciones de búsqueda, se verificó que al menos alguno de los siguientes términos en inglés de las palabras claves aparecieran: “tecnologías de saneamiento”, “durabilidad”, “eficiencia”, “costo”, “ventajas”, “desventajas”, “tratamiento”, “descargas de aguas residuales”, “factores influyentes”, “impacto ambiental” y “requerimientos”. La búsqueda se limitó a documentos publicados entre el año 2010 al 2022.

1.2 Criterios de Selección

Una vez los artículos fueron seleccionados mediante el protocolo de búsqueda se procedió a realizar la respectiva revisión, sin embargo, aquellos que no tuviesen relación con las tecnologías empleadas en el tratamiento de aguas residuales en asentamientos no planificados fueron descartados. Luego, se leyó el resumen de los artículos con el fin de conocer si estos tenían relación con la temática principal. Posterior a la aplicación del filtro, se realizó la lectura completa del artículo con el fin de determinar qué tipos de tecnologías se han empleado para el tratamiento de aguas residuales y, que estas se hayan aplicado en asentamientos no planificados.

1.3 Análisis de información

Se seleccionaron los artículos que cumplieron con los criterios de búsqueda para llevar a cabo la revisión de literatura y se clasificaron en un archivo Excel donde se tuvo en cuenta el autor, título, objetivos, metodología, resultados, alternativas de tratamiento de aguas residuales

involucradas, aspectos tecnológicos de las alternativas, criterios de selección de las tecnologías para dar respuesta a cada una de las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuáles son las tecnologías más comúnmente empleadas para el tratamiento de aguas residuales en asentamientos no planificados?
- ¿La selección de estas tecnologías se encuentra influenciada bajo las condiciones sociales en los asentamientos no planificados?
- ¿Cuáles son los tipos más comunes para el tratamiento de aguas residuales en asentamientos no planificados?
- ¿Qué tipo de remociones se consiguen en los diferentes tratamientos de las tecnologías?
- ¿Cuáles son los requerimientos de las tecnologías de tratamiento?
- ¿Cuáles son los costos de implementar tecnologías de tratamiento de aguas residuales en asentamientos no planificados?
- ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales implementadas en los asentamientos no planificados?

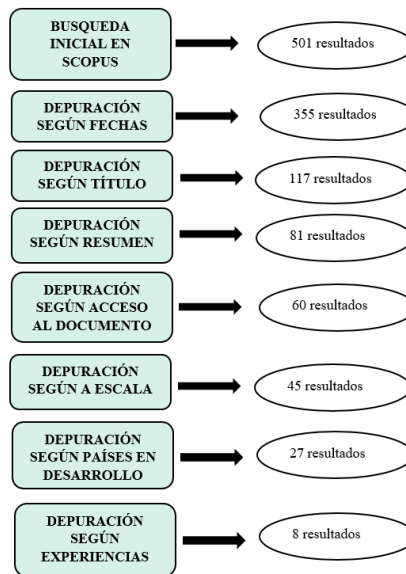
2. Resultados y Discusión

Los resultados de la búsqueda en Scopus con las palabras clave arrojaron 554 resultados. Al revisar los artículos repetidos, se eliminaron 53 documentos, se realizaron depuraciones según la fecha de publicación de los artículos; ya que debían estar comprendidos entre el año 2010 y 2022, también según el título, resumen, acceso al documento, se descartaron los documentos que

reportan estudios hechos a escala laboratorio, dado que, este trabajo se enfoca en experiencias a escala piloto o real. Finalmente se obtuvo un total de ocho documentos los cuales cumplieron con los criterios previos. (ver Figura 1).

Figura 1.

Diagrama proceso selección artículos.



La mayor parte de los artículos encontrados relacionados con experiencias de tratamiento de aguas residuales en asentamientos no planificados se reporta en Brasil (38%) y China (25%) (ver Tabla 1).

Tabla 1.

Países con experiencia similares

Países	N°	Frecuencia
Brasil	3	38%
China	2	25%

Países	N°	Frecuencia
India	1	13%
Indonesia	1	13%
República Dominicana	1	13%
Total	8	100%

La investigación sobre tratamiento de aguas residuales en asentamientos no planificados puede ser de interés en estos países, ya que, Según Yao et al. (2014), la tierra en las zonas periféricas de las grandes ciudades suele ser más económica que en las áreas urbanas, lo que hace que las personas de bajos ingresos puedan acceder más fácilmente a vivienda en estas áreas. Del mismo modo, en Brasil en el año 2019 se reportó un déficit de vivienda de alrededor de seis millones y además de esto el costo de alquiler de vivienda representó el 30% de los ingresos en los hogares, lo que en consecuencia produjo la generación de asentamientos en las zonas periurbanas de las grandes ciudades (G1, 2021). Esto nos indica que hay una tendencia en los habitantes de los países en desarrollo de buscar un lugar más accesible económicamente para poder vivir.

2.1 Identificación de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales más comúnmente empleadas en asentamientos no planificados.

Una vez analizados los ocho artículos se identificaron las diferentes tecnologías de tratamiento de agua residual descentralizados para asentamientos periurbanos (ver Tabla 2).

Tabla 2.*Menciones de los Sistemas de tratamiento residual en los diferentes artículos*

Tecnologías	N°	Frecuencias
Filtro anaeróbico	1	13%
Humedales Artificiales	2	25%
Biorreactores	5	62%
Total	8	100%

La categoría de biorreactores agrupa sistemas que son diversos en cuanto a la configuración, componentes, procesos, capacidades, entre otras, Esta categoría incluye el biorreactor anaeróbico compacto, de lecho fluidizado circulante, de membrana anaeróbico con deflectores y dinámico de membrana. En la categoría de humedales se encontraron los humedales de flujo subsuperficial horizontal y de múltiples etapas. Por último, se tiene el filtro anaeróbico, el cual hace parte de un tren de tratamiento de aguas residuales.

2.2 Descripción y caracterización de las tecnologías más comúnmente empleadas para el tratamiento de aguas residuales en asentamientos no planificados.

A continuación, se describen las tres categorías de tecnologías encontradas para el tratamiento de aguas residuales en asentamientos no planificados de países en desarrollo.

2.2.1 Filtro anaeróbico.

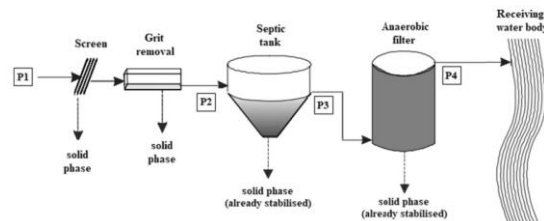
El filtro anaeróbico consiste en una estructura de reactor anaeróbico con deflectores equipada con material adicional que forma un filtro sobre el cual pueden crecer bacterias, esto aumenta la superficie de contacto de las aguas residuales con la biomasa activa y mejora el

tratamiento de las mismas (Brault et al., 2019). El tratamiento de los sólidos disueltos y no sedimentables se produce por contacto con este excedente de masa bacteriana activa debido a que las bacterias se adhieren a las partículas sólidas y a las paredes del reactor y también el material filtrante como grava, rocas, cenizas o piezas de plástico que proporcionan un área de superficie adicional para el asentamiento de las bacterias (Brault et al., 2019).

Rodrigues et al. (2021), realizaron una investigación con el fin de determinar el potencial de los filtros anaeróbicos para cumplir con estándares de vertimiento en Viçosa (Brasil). Además, también tenían el objetivo de estudiar la influencia del dimensionamiento de los sistemas de tratamiento, la rutina de operación y limpieza adoptada, y por último los aportes pluviales a la red de alcantarillado en el desempeño de las PTAR (Rodrigues et al., 2021). Para esto, se estudiaron tres PTAR descentralizadas (Cohelas I, Cohelas II y Romão dos Reis). Los tres sistemas incluyen un tren que consta de tanques sépticos seguidos de filtros anaerobicos. Además, estos constan con estructuras de tratamiento preliminar como pantallas y desarenadores (ver Figura 2). Adicionalmente, las PTAR Coelhas I y II contaban con trampas de grasas.

Figura 2.

Representación esquemática de las unidades de tratamiento (PTAR).



Nota. Tomado de: Rodrigues et al. (2021).

Estos sistemas realizan un tratamiento simplificado y descentralizado de las aguas residuales de los barrios de bajos ingresos ubicados en las regiones periurbanas del municipio. Las plantas servían 494, 476 y 275 personas (Rodrigues et al., 2021).

Estas plantas generalmente carecían de programas de monitoreo de efluentes o empleados dedicados exclusivamente al mantenimiento y operación de las unidades de tratamiento, lo cual presentó inconvenientes debido a que los factores de rutina de limpieza y dimensionamiento de las unidades de tratamiento afecta el desempeño de los sistemas (Rodrigues et al., 2021). Lo anterior se evidenció en este estudio debido a que a las PTAR cuyas limpiezas se realizaban con frecuencia presentaban los mejores resultados en cuanto al cumplimiento de la legislación y el desempeño esperado según la literatura técnica (Rodrigues et al., 2021).

Los parámetros físicos y químicos de los efluentes fueron monitoreadas mensualmente entre mayo de 2017 y agosto de 2018, a la entrada y salida de las tres PTAR. Los resultados de este monitoreo indican caudales tratados entre 16.4 y 22.5 m³/d con eficiencias de remoción para: DBO entre 78% - 93%; DQO entre 55% y 89% y SST entre 28% y 79%.

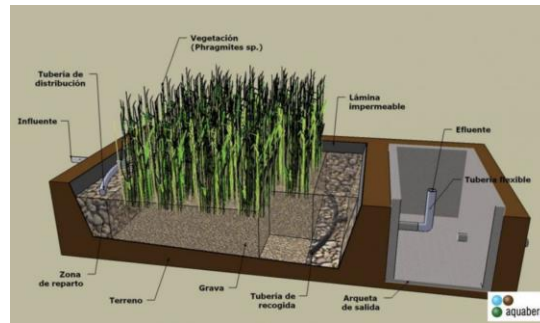
2.2.2 Humedales construidos.

Los humedales construidos (CWs) simulan la dinámica de los sistemas naturales. Estos sistemas consisten en capas porosas de piedra, grava o arena y lechos de plantas (ver Figura 3). La capa porosa realiza una función de filtrado y captura de algunos sólidos en suspensión mediante la sedimentación. Los lechos de plantas absorben algunos contaminantes y promueven el desarrollo de invertebrados y microorganismos que tratan aún más el agua a medida que fluye degradando los contaminantes orgánicos (Brault et al., 2019). Los nutrientes también son absorbidos por

microorganismos y plantas. El fondo generalmente está cubierto con un revestimiento impermeable para controlar el flujo de aguas residuales y proteger el área circundante (Brault et al., 2019).

Figura 3.

Humedal artificial tipo.



Nota: Tomado de: Aquaberri. Tecnologías naturales de depuración y tratamiento de aguas. Humedales Artificiales. Bogotá D.C. CO. Documento [Consultado 23, julio, 2022]. Disponible en <http://aquaberri.com/>

Los humedales construidos se pueden clasificar por criterios hidráulicos (flujo superficial o subterráneo), la forma de crecimiento de las macrófitas (plantas sumergidas, flotantes y con hojas flotantes) y la dirección del flujo (horizontal y vertical) (Brault et al., 2019).

El funcionamiento de los humedales depende de la capacidad de los microorganismos y las plantas para purificar el agua y, al mismo tiempo, aprovechar las ventajas de los soportes inorgánicos que funcionan como filtros y material adsorbente (Jaya y Brijesh, 2021). En ese contexto, un sistema simple funciona basado en procesos físicos y bioquímicos complejos que controlan la volatilización, adsorción, sedimentación, fitorremediación, fitoacumulación y degradación microbiana de las aguas residuales (Jaya y Brijesh, 2021).

El rendimiento relativamente alto de los humedales construidos es conocido por algunos de los parámetros que definen la calidad del agua, como la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), y el agotamiento de coliformes totales y fecales (García-Ávila et al., 2019; Grinbejesrga, 2020). La eficiencia de un CW depende de su diseño, las especies de plantas utilizadas, la naturaleza del sustrato, el clima, la naturaleza de los contaminantes y las condiciones de operación, principalmente del tiempo de retención hidráulica (Xi et al., 2020).

Con base en sus características de construcción y flujo, los CW se clasifican como Flujo Superficial (SF), Flujo Subsuperficial Horizontal (HSSF), Flujo Subsuperficial Vertical (VSSF), o la combinación de estos en Sistemas Híbridos (HS), que han demostrado una mayor eficiencia que humedales individuales (Vargas et al., 2020).

Ahora bien, a nivel mundial el reconocimiento de las ventajas de implementar los humedales artificiales ha llevado a un aumento progresivo en su uso (Vargas et al., 2020). Estos sistemas son considerados una alternativa innovadora, eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales. Estas tecnologías de tratamiento de aguas residuales se utilizan tanto en países desarrollados como en países en desarrollo, en grandes ciudades o pequeñas comunidades (Vargas et al., 2020).

En las experiencias consultadas de implementación de sistemas de saneamiento en asentamientos no planificados de países en desarrollo se encontraron dos tipos de humedales construidos: i) humedal de flujo superficial de múltiples etapas (SFCW), y ii) humedal horizontal de flujo subsuperficial (HSSF-CW). Estos humedales estaban precedidos de tanques sépticos, en donde a las aguas residuales se les aplica un pretratamiento antes de ingresar a los CWs. Las experiencias tuvieron lugar en China (Xi et al., 2019) y República Dominicana (Vargas et al.,

2020), ofreciendo una solución de saneamiento para comunidades de 75 y 130 personas, respectivamente.

Para el caso de República Dominicana (Vargas et al., 2020), se implementó un HSSF-CW, considerando ventajas como facilidad de construcción, bajo costo, ausencia de olores, baja probabilidad de proliferación de insectos y alto valor estético. En el caso de China, se implementó un Humedal de Múltiples Etapas, considerando que se puede obtener una mayor efectividad en la remoción de N y P (Castañer, 2020).

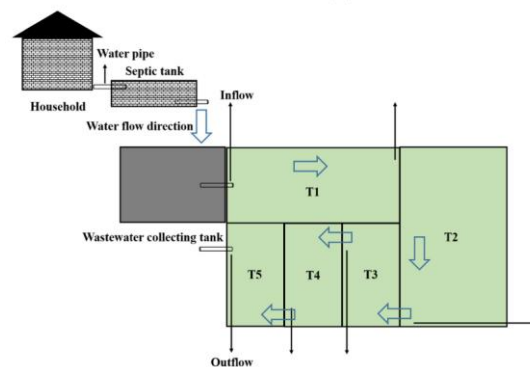
La decisión de la implementación del sistema de República Dominicana formó parte de las acciones del Plan Yaque para reducir la contaminación de las aguas superficiales por aguas residuales domésticas en la cuenca del río Yaque del Norte (Acosta Guzmán, 2017).

En cuanto a los aspectos técnicos, el CW en el caso de República Dominicana (Vargas et al., 2020), estaba acompañado por dos tanques sépticos de 6.00 y 4.84 m³, respectivamente. Las dimensiones del CW fueron l=10m; ancho=7m; h=0.6 m, estaba impermeabilizado con una geomembrana de 300 micras de espesor, soportado por grava de 2.2 cm, con macrófitas del tipo *Vetiveria zizanioides* L. El caudal de aguas residuales fue de 7.5 m³/d y el tiempo de operación y monitoreo del estudio fue de 18 meses. El terreno en el que fue emplazado el sistema fue donado por uno de los vecinos de la comunidad, y el costo de construcción fue de USD 267 por habitante, un precio por encima de los indicadores establecidos para la construcción de los CWs (2.14-120 USD por habitante (Su et al., 2019)). Este proyecto fue ejecutado por Yaque del Norte River Basin, Inc. (Plan Yaque) y financiado por Charles River Watershed Association (CRWA); The Nature Conservancy (TNC); Fondo Agua Yaque del Norte (FAYN); Ministerio de ambiente y recursos naturales; alcaldía de Jarabacoa; y fondos de mineros de Jarabacoa.

En el caso de la experiencia de China (Xi et al., 2019), el CW estaba antecedido de un tanque séptico y un colector de aguas, este tuvo un funcionamiento diferente al del caso de Vargas, ya que las aguas residuales producidas por la comunidad tenían un caudal de $12 \text{ m}^3/\text{d}$, el CW estaba compuesto por cinco etapas, en donde las aguas residuales fluían por acción de la gravedad pasando por las etapas T1, T2, T3, T4 y T5, respectivamente (ver Figura 4). Cada etapa tuvo la misma composición: 40 cm de profundidad, suelo de arroz local como sustrato, la planta principal (*Myriophyllum elatinoides*) presenta una densidad de $2 \text{ kg}/\text{m}^2$. Las diferentes etapas T1, T2, T3, T4 y T5 difieren en las áreas, ya que son de 170, 194, 84.5, 44.8 y 69.7 m^2 respectivamente, para un área total de 563.1 m^2 . En términos de funcionamiento, se tiene que la primera etapa difiere al resto puesto que en el flujo del afluente y en la etapa T1 se formaron ambientes anaeróbicos que se correlacionaron positivamente con nitratos y fósforos totales, mientras que en las etapas T2, T3, T4 y T5 formaron ambientes aeróbicos que correlacionaron positivamente con oxígeno disuelto y potencial redox (Xi et al., 2019).

Figura 4.

Esquema del humedal artificial de flujo superficial multi-etapa (SFCW). Las flechas negras indican los lugares de muestreo de aguas residuales.



Nota: Tomado de: Xi et al. (2019).

Las dos experiencias difieren en gran medida en el tipo de remociones obtenidas. Por ejemplo, en la experiencia de China, cada etapa del CW obtenía diferentes remociones, esto en gran medida por las concentraciones, ya que a medida que el afluente fluía por cada etapa las concentraciones disminuían, a excepción del OD y el NO_3 que aumentaron en la primera etapa, esto debido a las bacterias nitrificantes presentes en el ambiente aeróbico (se produce nitrato durante la nitrificación y se acumula hasta que se completa la desnitrificación (Ding et al., 2012; Li et al., 2017)).

Las remociones obtenidas en la experiencia de China fueron TN de 90.36%, NH_4 de 91.35%, NO_3 de 95.16% y TP de 96.14%, mientras que, en la experiencia de República Dominicana, se tuvo una remoción de DQO de 93%, DBO de 95%, PO_4 entre 11%-70% y coliformes fecales de 98% respectivamente.

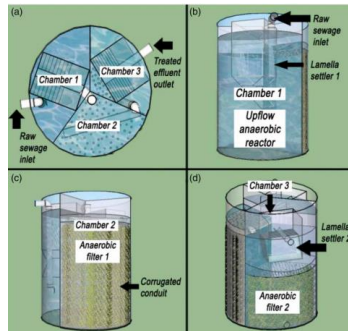
2.2.3 Biorreactores.

Un biorreactor es un recipiente o sistema que mantiene un entorno biológicamente activo, en el cual se lleva a cabo un proceso químico que involucra organismos o sustancias bioquímicamente activas derivadas de dichos organismos, este proceso puede ser aeróbico o anaeróbico (Facultad de Ciencias Químicas Universidad Veracruzana, s.f.). Los biorreactores son muy útiles en el tratamiento de las aguas residuales, ya que en estas se emplean reacciones químicas y biológicas que transcurren bajo condiciones controladas en el interior de los reactores. A continuación, se describen los estudios donde se implementaron biorreactores para el tratamiento de aguas residuales en asentamientos no planificados.

2.2.2.1 Biorreactor anaeróbico compacto. La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Compacta (CSPT) se divide en tres cámaras (ver Figura 5): En la cámara 1: Se tiene reactor biológico anaeróbico de medio suspendido y flujo ascendente, en la parte superior posee un compartimiento de sedimentación lamelar con nueve placas inclinadas a 60° con la horizontal y separadas 5.0 cm. El compartimiento superior cuenta con placas deflectoras que evitan la entrada de escorias y funcionan como separador trifásico (sólidos, líquidos y gases) y su TRH de diseño fue de 37.6 horas (Lisboa et al., 2022). La cámara 2 es un filtro anaeróbico ascendente, el medio filtrante se compone de piezas de conducto corrugado de 32 mm de diámetro y en piezas de 30 mm de largo, posee una placa perforada cerca de la parte superior de la cámara para evitar el paso del conducto de llenado a la siguiente etapa de tratamiento y el TRH de diseño de la cámara fue de 21.1 horas (Sousa y Chernicharo, 2005; Chernicharo y Sousa, 2013). Por último, está la cámara 3; es un segundo filtro anaerobio seguido de un decantador lamelar secundario, en su parte inferior se encuentra un filtro anaeróbico ascendente, que contiene también el mismo conducto corrugado utilizado en la cámara 2, en la parte superior posee decantador lamelar de placas paralelas; este tiene diez placas inclinadas a 60° con respecto a la horizontal y separadas 3.0 cm y el TRH de diseño de la cámara fue de 21.6 horas (Lisboa et al., 2022).

Figura 5.

La planta compacta de tratamiento de aguas residuales (CSTP); (a) vista superior, (b) cámara 1, (c) cámara 2, (d) cámara 3.



Nota: Tomado de: Lisboa et al. (2022).

El diseño del sistema incorporó conceptos de reactores UASB, filtros anaeróbicos y sedimentación lamelar (Lisboa et al., 2022); gracias a esto y por su ligereza y poco volumen ocupado es considerado compacto. La CSTP estaba hecha de fibra de vidrio y fue diseñada para cinco habitantes produciendo 160 L/hab.d de aguas residuales y disposición anual de lodos (Lisboa et al., 2022).

Esta investigación fue financiada por Financiadora Brasileña de Estudios y Proyectos (FINEP), no se tuvo apoyo por parte de la comunidad debido a que solo fue implementada en una vivienda unifamiliar de cuatro habitantes en una colonia agrícola en Vicente Pires, Distrito Federal, Brasil, como no se tenía alcantarillado este se gestionó mediante un tanque séptico y un sistema de drenaje. La CSTP fue monitoreada por los autores durante un periodo de 19 meses en los cuales solo se le hizo limpieza a los 14 meses de funcionamiento y operó con un caudal de 0.511 m³/d y un TRH de 198 horas.

Para el monitoreo, se utilizaron cuatro puntos de muestreo; en la entrada a la recámara (afluente), en las descargas de las cámaras 1, 2 y 3 respectivamente. Los análisis de las muestras

tomadas se hicieron dos veces por semana. La eficiencia de eliminación de DQO fue de 81%, DBO de 83%, NO₂ de 13%, NO₃ de 64%, TP de 18%, TS de 51%, TVS de 55%, TSS de 87% y sólidos sedimentables (SetS) de 100%¹.

Una de las ventajas de la CSTP fue que, aunque se mantuvo abierta, no hubo problemas de olores, esto se confirmó por las consultas periódicas con los residentes y vecinos locales. También se destaca por su facilidad de mantener, operar, instalar y además no necesitó de un suministro eléctrico (Lisboa et al., 2022). En cuanto a las desventajas, se tiene que no se pueden instalar equipos de recolección de gas debido a la complejidad del sistema, por tanto, no se puede medir la emisión de metano (Lisboa et al., 2022).

2.2.2.2 Biorreactor de lecho fluidizado circulante (CFBBR). El CFBBR es un proceso de tratamiento biológico de crecimiento adjunto, en el que se cultiva una biopelícula sobre partículas portadoras que se fluidifican mediante circulación de líquido o aireación. El proceso utiliza dos columnas: una columna aeróbica y una columna anóxica. Mediante el uso de estas dos columnas que tratan las aguas residuales de forma continua y secuencial, los nitratos y nitritos generados por la nitrificación en la columna aeróbica se recirculan a la columna anóxica para la desnitrificación, logrando la eliminación biológica completa del nitrógeno en un solo proceso (Patel et al., 2006).

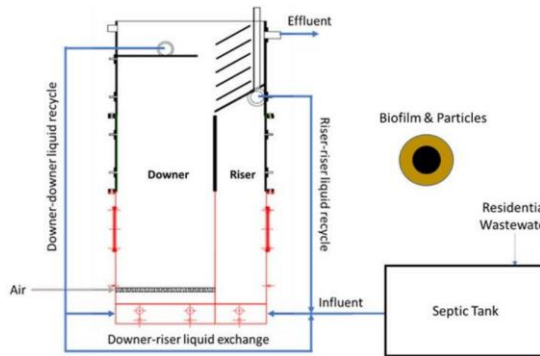
Las dimensiones de la bajada aeróbica (Downer) fueron de 0.4x0.8x3.0 m y la subida anóxica (Riser) de 0.4x0.4x2.0 m, tenían puertos de muestreo a lo largo de los lados de la columna para recolectar muestras de agua y partículas. Estas partículas portadoras estaban compuestas de

¹ Cada resultado de la caracterización fisicoquímica representa la mediana, y se presenta solamente el primer y el último punto de muestreo

un plástico a base de polipropileno (Liu et al., 2021). El diagrama completo del sistema CFBBR se muestra a continuación (ver Figura 6).

Figura 6.

Diagrama de CFBBR.



Nota: Tomado de: Liu et al. (2021).

Esta experiencia se hizo a escala piloto con subvenciones del Proyecto de planificación tecnológica de la ciudad de Guangzhou y el Laboratorio Clave de Investigación y Desarrollo de Energías Nuevas y Renovables de Guangdong.

El CFBBR se inició agregando las partículas portadoras a cada columna y se llenó la mitad del volumen con lodo activado de la planta de tratamiento de aguas residuales de Datansha en Guangzhou, China. La otra mitad se llenó con efluente de la fosa séptica de un edificio residencial, se fluidizó mediante aireación y la circulación del líquido, este proceso continuó por cuatro días sin más alimentación influyente con el objetivo de generar la biopelícula (Liu et al., 2021). Después esta fase el sistema se operó con un caudal de $0.64 \text{ m}^3/\text{d}$ para continuar con el crecimiento de la biopelícula; el objetivo principal era establecer una población suficiente de nitrificantes en la biopelícula antes de aumentar al caudal total del influente (Liu et al., 2021).

Esta experiencia constó de tres fases de operación en total: Para la primera fase de operación, solo se alimentaba al sistema con el efluente del tanque séptico. Durante la segunda y tercera fase se presentaron altas concentraciones de amoníaco ($\text{NH}_4\text{-N}$), haciendo necesario aumentar el TRH de operación y añadir glucosa y agua como fuente exógena de DQO para aumentar la eficiencia de eliminación de nitrógeno (Liu et al. 2019). El sistema se hizo funcionar con y sin DQO suplementario con TRH entre 16 y 21 horas, tratando aproximadamente 1-1.27 m^3/d . Las fases 1-3 se ejecutaron por períodos de 28, 70 y 83 días, respectivamente (Liu et al., 2021).

El Riser y Downer funcionaron en el régimen de fluidización convencional; la subida por líquido-sólido donde la corriente de líquido ascendente suspende y arrastra un lecho de partículas sólidas, mientras que la bajada por fluidización trifásica donde las partículas son fluidificadas por la corriente líquida y por las burbujas de gas (Nelson et al., 2017); se hizo para lograr condiciones aeróbicas ($\text{OD} > 1 \text{ mg/L}$) en la columna descendente y condiciones anóxicas ($\text{OD} < 0.5 \text{ mg/L}$) para facilitar la nitrificación y desnitrificación en la columna ascendente (Liu et al., 2021).

Se llevó a cabo un reciclaje de líquido con el fin de ayudar a la desnitrificación desde el Downer al Riser suministrando nitratos a las bacterias desnitrificantes en el Riser (Liu et al., 2021). El esquema de flujo general se puede ver en la Figura 6, con el afluente ingresando al Riser con los reciclados RR y DR. Luego, el líquido fluye desde el tubo ascendente hasta el tubo descendente internamente, donde se recircula en las líneas DD o DR o sale a través del puerto de efluentes final (Liu et al., 2021).

Los autores reportan que el biorreactor de lecho fluidizado circulante (CFBBR) logra altos niveles de eliminación de nutrientes biológicos (Liu et al., 2021). Presenta buenas eficiencias de eliminación de DQO entre 80%-92%, DBO entre 87%-98% y TN entre 42%-82%.

Dentro de las ventajas se reportó su diseño pequeño y compacto, adecuado para el tratamiento de aguas residuales en áreas urbanas descentralizadas. Además, un mayor control del nitrógeno efluente en comparación con sistemas como tanques sépticos, campos de drenaje y lagunas (Liu et al., 2021).

Aunque es una experiencia a escala piloto, se espera que, con un TRH de 4 horas, el sistema a escala real podría potencialmente tratar $600 \text{ m}^3/\text{d}$, lo que equivaldría a una población de 2,000 personas. Para los costos de implementación y operación, también se realizó un estimado para una planta teórica que opera a gran escala con un caudal de $10,000 \text{ m}^3/\text{d}$ cuyo costo de operación y mantenimiento es de 830,500 USD por año (Liu et al., 2021).

2.2.2.3 Biorreactor de membrana. El biorreactor de membrana (MBR) es una tecnología que combina el proceso de degradación biológica por lodos activados con una separación directa sólido-líquido gracias a la filtración por membrana (Alonso, 2020). La microfiltración es un proceso de filtración en el que se utilizan membranas porosas para separar las partículas en suspensión con diámetros entre 0.1 y $10 \mu\text{m}$. (Gluzman, 1999).

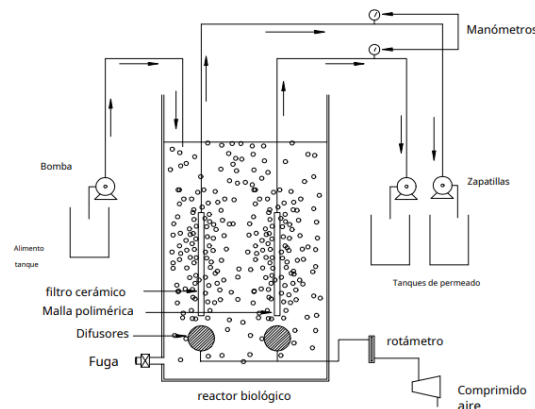
Tewari et al. (2012) reportan la implementación de un MBR para tratar las aguas residuales de un complejo residencial ubicado cerca de Delhi, en Gual Pahari, Haryana, con una población entre 15 a 150 personas; esto debido a que la población varió durante los 160 días del estudio. El biorreactor fue operado y monitoreado por un habitante de la comunidad que colaboró con la investigación.

Se probaron en paralelo dos módulos de filtro de bajo costo construidos con malla polimérica (nylon de $30 \mu\text{m}$ y área de filtración de 0.075 m^2) y filtro cerámico (basado en cenizas volantes de 2 a $6 \mu\text{m}$ y área de filtración de 0.07 m^2) en un biorreactor de membrana sumergida

(MBR) que emplea condiciones aeróbicas y anóxicas por lotes (Tewari et al., 2012). El MBR tuvo para cada módulo, un manómetro montado en la línea de permeado para medir la presión transmembrana (TMP). Debajo de cada módulo de filtro se colocó un difusor de aire (ver Figura 7) con una ranura de 1 mm de longitud por donde se suministró aire comprimido en el rango de 12.5–16.5 L/min (Tewari et al., 2012).

Figura 7.

Reactor esquemático.



Nota: Tomado de: Tewari et al. (2012).

El afluente se tamizó con un tamiz de 0.5 mm para eliminar las partículas suspendidas grandes, el influente tamizado se alimentó al reactor a una velocidad controlada que se sincronizó con la extracción del permeado y se utilizaron bombas peristálticas tanto para la alimentación del afluente como para la eliminación del permeado (Tewari et al., 2012).

La malla polimérica mostró un rápido aumento de TMP acompañado de una disminución del flujo, después de unos 30 días de funcionamiento, las condiciones iniciales se restauraron enjuagando el módulo con agua de grifo para eliminar los sólidos en suspensión adheridos a esta.

Por otro lado, los filtros cerámicos utilizados, aunque, podían operar durante períodos más largos sin limpieza, tenían tendencia a desarrollar grietas si la TMP experimentaba un aumento repentino, por lo que es necesario garantizar un programa de limpieza apropiado para garantizar que no se alcance este límite y en el caso anterior para que no se presente una disminución de flujo (Tewari et al., 2012).

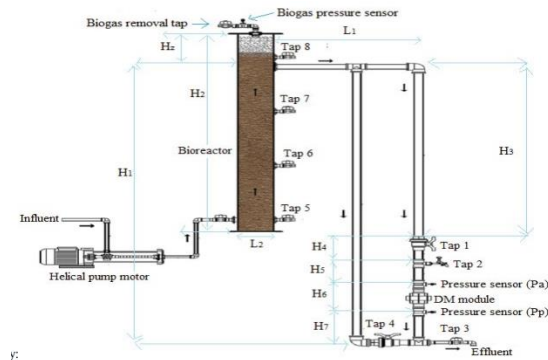
Durante el transcurso de la operación MBR, el tiempo de retención hidráulica promedio (TRH) fue de 20 h, la eficiencia promedio de eliminación de DQO fue del 74%, la remoción promedio del NH_4 fue del 80%, la eliminación promedio de PO_3 fue del 48%. Estos resultados se obtuvieron a pesar de que el MBR solo funcionó de lunes a viernes, los fines de semanas y festivos se continuó con la aireación para así evitar la putrefacción (Tewari et al., 2012).

Una de las ventajas de la implementación de membranas en sistemas descentralizados es su bajo costo de fabricación ya que está hecha con material de desecho, lo cual presenta un paso hacia la sostenibilidad y, por lo tanto, es importante en los países en desarrollo (Tewari et al., 2012).

2.2.2.4 Biorreactor dinámico de membrana (AnDMBR). El sistema AnDMBR está conformados por un biorreactor anaeróbico y un módulo de membrana exterior para filtración (ver Figura 8) (Chimuca et al., 2020).

Figura 8.

Sistema AnDMBR experimental.



Nota: Tomado de: Chimuca et al. (2020).

El biorreactor está hecho de fibra de vidrio y el módulo de membrana está hecho de cloruro de polivinilo PVC (Chimuca et al., 2020). El material de soporte (malla) para formar la membrana dinámica es de polipropileno, un material comercial económico y ampliamente disponible (Chimuca et al., 2020).

La membrana dinámica (MD) es una capa de torta formada a partir de una base de material de soporte que puede ser una malla hecha de tela filtrante tejida o no tejida; material económico, con poros relativamente grandes de aproximadamente 30–200 μm (Guan et al., 2018; Alibardi et al., 2014). Debido al tamaño de poro, estos materiales no actúan como material de filtración, sino como material de soporte. La capa de torta formada que constituye la MD es rica en microorganismos activos y está organizada en biopelículas, partículas de lodo y flóculos biológicos, sobre estos microorganismos activos se depositan moléculas orgánicas e inorgánicas, metales y nutrientes con los forman nuevos compuestos químicos como la estruvita y el amoníaco y el fosfato de potasio (Ma et al., 2013; Hu et al., 2018).

Las dimensiones y parámetros del AnDMBR fueron: Altura total 3.2 m, área del biorreactor 0.0314 m² y un volumen de 53.4 L y el módulo de la membrana tuvo un diámetro de 0.07 m y un área de 0.003846 m² y tamaño promedio de los poros de 90 μm (Chimuca et al., 2020). El sistema opera sin bombas de recirculación de concentrado ni succión de permeado, con un caudal de 0.07m³/d y TRH de 18 horas.

(Chimuca et al., 2020) investigaron un sistema AnDMBR para el tratamiento de aguas residuales domésticas a temperatura ambiente (19-30) °C en escala piloto en una urbanización de 72 viviendas en el municipio de Campina Grande, Brazil. Esto se hizo para evaluar el desempeño del sistema en la remoción de materia orgánica y huevecillos de helmintos, para el posible uso del efluente en la agricultura. Este estudio fue apoyado por la Coordinación de Perfeccionamiento del Personal de Educación Superior (CAPES) y el Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) y no se tiene información acerca de la participación de la comunidad.

El proyecto se dividió en dos ciclos: El ciclo 1 inició sin inóculo con el objetivo de verificar el máximo potencial del periodo de permeación; lo que quiere decir que el filtro no recibió un retrolavado hasta no estar completamente obstruido, el de tiempo necesario para cumplir dicho objetivo fue de 91 días. El ciclo 2 duró 49 días, se inició con inóculo al notarse una reducción del 10% en el flujo de permeado se empleó el retrolavado (Chimuca et al., 2020).

Según Chimuca et al. (2020) en un biorreactor anaeróbico de membrana dinámica (AnDMBR) es posible realizar la retención completa de biomasa en el sistema anaeróbico mediante el control del tiempo de retención celular (TRC) independientemente del tiempo de retención hidráulica (TRH). Sin embargo, Rosenberger et al. (2002) afirman que, si bien la producción excesiva de lodos puede suprimirse por completo manipulando la TRH y la relación alimento/microorganismos, una pequeña cantidad de lodos debe eliminarse regularmente debido a

la acumulación de sustancias inorgánicas en el reactor, que pueden alcanzar niveles que son tóxicos para los microorganismos. Por lo tanto, según Chimuca se debe hacer una limpieza periódica de la MD para restaurar el flujo de permeado a valores cercanos al flujo inicial ya que, el retrolavado transporta las partículas adheridas a la estructura del poro al líquido y elimina parcialmente la capa de torta formada en la superficie de la membrana. La frecuencia y el caudal de retrolavado están relacionados con las condiciones de operación y características del efluente a tratar (Ahmar et al., 2019; Guan et al., 2018), esto debido a que el bloqueo de poros del material de soporte en los sistemas de biorreactores MD es causado principalmente por flóculos biológicos, que son en su mayoría bacterias cubiertas con sustancias similares a gel.

El sistema logró una buena eficiencia promedio de remoción de materia orgánica, con un valor de DQO total de 86%, pudiendo remover 91% de sólidos en suspensión, produciendo un efluente con baja turbidez (18.0 NTU) (Chimuca et al., 2020). Los resultados también muestran que la MD contribuyó a la producción de efluentes con una concentración de huevos de helmintos que cumple con las recomendaciones de la OMS para riego sin restricciones. Además, el sistema produjo una cantidad significativa de biogás y la mayor parte salió disuelto con el efluente debido a la sobresaturación (Chimuca et al., 2020).

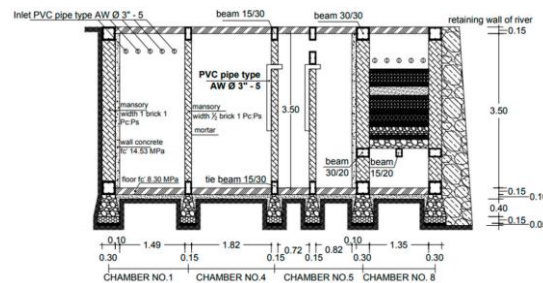
En las ventajas de esta tecnología se incluye el alto flujo de filtración, el bajo costo del módulo de membrana y su facilidad de lavado. Adicionalmente, por ser un método biológico anaerobio, se evita el alto consumo de energía en comparación con un sistema aerobio.

2.2.2.5 Reactor anaeróbico con deflectores (ABR). Un reactor anaeróbico con deflectores (ABR) es un tanque séptico mejorado con una serie de deflectores bajo los cuales las aguas residuales se ven obligadas a fluir a través de varias cámaras, tratando así sólidos disueltos

y no sedimentables poniéndolos en estrecho contacto con la masa bacteriana activa que se acumula en las paredes del reactor (Brault et al., 2019). Entre más tiempo de contacto con los resultados de la biomasa activa y las cámaras de flujo ascendente se proporciona una mejor eliminación y digestión de la materia orgánica (Brault et al., 2019). A continuación, se muestra un ejemplo de la configuración típica de los ABR existentes en Bareng, Malang (ver Figura 9).

Figura 9.

Sección transversal del ABR.



Nota: Tomado de: Yulistyorini et al. (2019).

Uno de los ABR evaluados mediante la investigación de Yulistyorini et al. (2019), estaba conformado por nueve cámaras, donde se trata un caudal promedio de 25 m³/d con un TRH de 95 horas, las dimensiones de la viga principal y de apoyo son 30 cm de ancho y 30 cm de alto, y 15 cm de ancho y 30 cm de alto respectivamente, está soportado por la resistencia del hormigón de 14.53 MPa. La estructura del muro utilizando 1 ladrillo de espesor con relación de mortero entre cemento y arena es de 1:1 (Yulistyorini et al., 2019).

Yulistyorini et al. (2019) investigaron 23 de las 89 plantas de tratamientos ABR distribuidos en cinco distritos en la ciudad de Bareng, Malang (Indonesia). La mayoría de estos sistemas fueron construidos en barrios marginales con alta densidad de población (100-500

personas/ha), en comunidades de bajos ingresos, en asentamientos no planificados y en áreas residenciales no planificadas (Djonoputro et al., 2011).

Con respecto a la relación costo-beneficio de los ABR, se informó que un ABR (que atiende a 320 personas), construido en el subdistrito de Bareng de la zona urbana de Malang, costó aproximadamente 23,440 USD en 2012, de los cuales la comunidad local participó recaudando un total de 379 USD para el proyecto (Yulistyorini et al., 2019). Los datos y muestras de esta experiencia fueron tomados entre Marzo y Abril del 2018 y se analizaron en el Laboratorio Jasa Tirta (Malang, Indonesia).

Este sistema tuvo una eficiencia de eliminación de DBO de 74%, TSS de 66%, NH_4 de 43% y TP de 21% respectivamente. La concentración de OD en el efluente fue superior a 3 mg/L, lo que es adecuado para la vida acuática y especialmente para la cría de peces (Yulistyorini et al., 2019). En general, las unidades ABR en operación dentro de este programa, reportaron un bajo rendimiento para el control de nutrientes (N y P) y patógenos (Aqaneghad et al., 2016; Pillay et al., 2008) por lo que es probable que los cuerpos de agua que reciben efluentes de las unidades ABR sufran de contaminación del agua provocada por la presencia de nitrógeno y fósforo (Yulistyorini et al., 2019).

Dentro de las ventajas de las unidades ABR tenemos los bajos costos de operación y mantenimiento, las remociones de materia orgánica y sólidos, y la capacidad de soportar a las cargas orgánicas e hidráulicas (Reynaud et al., 2014).

2.3 Síntesis de las características de los sistemas de las experiencias revisadas

Para culminar con la sección de descripción y caracterización de las tecnologías más comúnmente empleadas para el tratamiento de aguas residuales en asentamientos no planificados, se realizó una síntesis que muestra la información de interés de cada tecnología (ver Tabla 3) y también se realizó un resumen con los requerimientos y características de estas tecnologías presentes en los ocho artículos trabajados (ver Tabla 4).

Se puede evidenciar que los tanques sépticos son el tratamiento preliminar más ampliamente usado como parte de los trenes de tratamiento que involucran las tecnologías estudiadas.

Las experiencias que servían a más habitantes y, por tanto, operaron con caudales mayores fueron los reactores ABR de Indonesia y los filtros anaeróbicos de Viçosa de Brasil. Sin embargo, estos sistemas no alcanzaron las mayores remociones de DQO, DBO, NH_4 y TSS. En estas experiencias, el filtro anaeróbico y el reactor anaeróbico con deflectores tuvieron un bajo rendimiento en el control de nutrientes.

La tecnología que obtuvo los mejores porcentajes de remoción en cuanto a DBO, TN, NO_3 y NH_4 fue el biorreactor de lecho fluidizado circulante. Sin embargo, esta tecnología no se puede catalogar como la mejor entre las revisadas, debido a que fue un piloto y no operó a condiciones reales.

Los humedales construidos, a pesar de requerir grandes espacios para su construcción, son muy económicos y fáciles de mantener ya que no requieren equipos, además de esto, en comparación con las otras tecnologías revisadas, mostraron las mayores remociones de DQO,

DBO, TN, TP y de coliformes, lo que indica que son una buena alternativa para este tipo de asentamientos.

En cuanto a costos, el biorreactor de lecho fluidizado fue el que reportó mayores costos en su implementación, sin embargo, fue un estimado y no un valor real, pero este costo se podría justificar debido a que al ser un sistema automatizado su mantenimiento requerirá de menor inversión.

También se puede inferir que los humedales y el filtro anaeróbico pueden implementarse en zonas en donde no se cuente con suministro eléctrico y donde se tengan suficiente área disponible para su emplazamiento. Por el contrario, los biorreactores tienen más requerimientos para su implementación ya que la mayoría necesitan de energía eléctrica, bombas de suministro, aireación, pues al ser relativamente pequeños, pueden acumular malos olores y confinarse haciendo que aumente la putrefacción de la materia orgánica. Así mismo, estos sistemas necesitan de constante monitoreo para garantizar su buen funcionamiento.

Tabla 3.*Síntesis de las características de las experiencias revisadas.*

Parámetros	Filtro anaeróbico			Humedales			Biorreactores			
	Rodrigues (2021)			Vargas (2020)	Xi (2019)	Lisboa (2022)	Liu (2021)	Tewari (2012)	Chimuca (2020)	Yulistyorini (2019)
Tecnología	Filtro anaeróbico			Humedal horizontal de flujo subsuperficial	Humedal de flujo superficial de múltiples etapas	Biorreactor anaeróbico compacto	Biorreactor de lecho fluidizado circulante	Biorreactor de membrana	Biorreactor dinámico de membrana	Reactor anaeróbico con deflectores
	Ch I	Ch II	Rmo							
Habitantes servidos	494	476	275	75	120	4	DNR	15-150	DNR	100-500
Caudal (m ³ /d)	18.97	22.5	16.4	7.5	12	0.511	0.64-1.27	DNR	0.072	25
Área Total (m ²)	DNR	DNR	DNR	70	563.1	DNR	DNR	DNR	DNR	DNR
TRH (Horas)	12	12	12	DNR	456	198	18.5	20	18	95
Pretratamiento	Desarenador			Tanque séptico	Tanque séptico	Tanque séptico	Tanque séptico	Tanque séptico	DNR	DNR
Remociones										
DQO	55%	56%	89%	93%	DNR	81%	80%-92%	74%	86%- 87%	DNR
DBO	78%	80%	93%	95%	DNR	83%	87%,-98%	DNR	DNR	74%
TSS	28%	38%	79%	DNR	DNR	11-70%	0.0%-60%	DNR	87%-90%	66%
TN	DNR	DNR	DNR	DNR	90.36%	DNR	42%-82%	DNR	20.1%-20.4%	DNR
NO ₃	DNR	DNR	DNR	DNR	DNR	64%	95.16 %	DNR	0.00%	DNR
NH ₄	DNR	DNR	DNR	DNR	91.35%	DNR	93%-97%	80%	DNR	43%
TP	DNR	DNR	DNR	DNR	96.14%	18%	DNR	48%	16.3%-16.4%	21%
PO ₄	DNR	DNR	DNR	11%-70%	DNR	DNR	DNR	DNR	DNR	DNR
Coliformes	DNR	DNR	DNR	98%	DNR	DNR	DNR	DNR	DNR	DNR
pH efluente	7.5	7.4	7.5	DNR	7.01	6.72	7.0-7.4	DNR	7.2	DNR
Subproductos	DNR	DNR	DNR	DNR	DNR	Metano	DNR	DNR	Biogás	DNR
Costo (USD/persona)	DNR	DNR	DNR	267	DNR	DNR	415.25	DNR	DNR	73.25

Tabla 4.*Requerimientos y características de las tecnologías implementadas.*

Tecnología	Requerimientos						Tratamiento preliminar
	Suministro eléctrico	Bombas	Sistema de aireación	Mantenimiento	Grandes espacios >100 m ²		
Filtros anaeróbicos.	No	No	No	Sí	Sí	Sí	
Humedal de flujo superficial de múltiples etapas	No	No	No	Sí	Sí	Sí	
Humedal horizontal de flujo subsuperficial	No	No	No	Sí	No	Sí	

Tecnología	Suministro eléctrico	Bombas	Requerimientos			Grandes espacios >100 m ²	Tratamiento preliminar
			Sistema de aireación	Mantenimiento			
Biorreactor anaeróbico compacto	No	No	No	Sí	No	No	
Biorreactor de lecho fluidizado circulante	Sí	Sí, peristáltica	Sí	Sí	No	Sí	
Biorreactor de membrana	Sí	Sí, peristáltica	Sí	Sí	No	No	
Biorreactor dinámico de membrana	Sí	Sí, motobomba	No	Sí	No	No	
Reactor anaeróbico con deflectores	No	No	No	Sí	No	No	

3. Conclusiones

En los asentamientos no planificados de países en desarrollo, se encontró que las tecnologías de tratamiento más comúnmente empleadas son los biorreactores en primer lugar, con un 62% de frecuencia de aparición en la investigación, seguido por los humedales construidos con un 25% y por último los filtros anaeróbicos con un 13%.

Las tecnologías encontradas se ven influenciadas a menudo por factores sociales en el orden en que las condiciones que se presentan en ciertos lugares no sólo están determinadas por la geografía del sector, sino también por el nivel de inversión, su capacidad de desarrollo, por lo que se debe hacer un estudio previo en el asentamiento no planificado en el que se quiera solucionar el problema generado por las aguas residuales para determinar cuál es la tecnología más factible para su implementación.

Debido a la falta de información en la mayoría de los artículos no fue posible abordar adecuadamente los temas económicos y sociales. Esto debido a que los artículos se enfocaron principalmente en el componente técnico y puesta en marcha de las tecnologías.

La mayoría de las tecnologías cumplen con los valores esperados de remociones, sin embargo, las remociones de algunas tecnologías están por debajo de los límites establecidos en las normas locales de los países en donde fueron implementados, por lo que se requiere hacer ajustes en estos sistemas.

En esta revisión se concluye que los humedales y filtros anaeróbicos son de menor complejidad para ser implementados en zonas descentralizadas, mientras que los biorreactores requieren más recursos y accesorios tales como energía eléctrica, bombas, aireación y monitoreo constante.

Por último, hace falta más investigación con respecto a los tratamientos de aguas residuales en asentamientos no planificados, ya que solo se encontraron ocho artículos con información de interés. Se recomienda investigar en otras bases de datos ya que en esta investigación solo se buscaron artículos en la base de datos Scopus. También, debido a que las investigaciones son en países diferentes entre sí, no se tiene uniformidad en los datos tomados de cada investigación, por lo que no se presentan las mismas regulaciones y, por ende, toman diferentes indicadores lo que hizo más complejo el análisis de los datos.

Referencias Bibliográficas

- Ahmar Siddiqui, M., Dai, J., Guan, D., & Chen, G. (2019). Exploration of the formation of self-forming dynamic membrane in an upflow anaerobic sludge blanket reactor. *Separation and Purification Technology*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.065>.
- Albuja, S., & Ceballos, M. (Revista Migraciones Forzadas (RMF)). Desplazamiento urbano y migración en Colombia. Recuperado el 25 de Enero de 2022, de <https://www.fmreview.org/urbandisplacement/albuja-ceballos>.
- Alibardi, L., Cossu, R., Saleem, M., & Spagni, A. (2014). Development and permeability of a dynamic membrane for anaerobic wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.045>.
- Alonso, L. (2020). Biorreactores de Membrana (MBR), Biorreactores de Electro Membrana (eMBR) y Biorreactores de Membrana Dinámica Autoformante (SFDMBR) [Título profesional, Universidad de Valladolid]. Repositorio Documental de la Universidad de Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/45063/TFG-I-1754.pdf;jsessionid=82BFDDDD770DF0A5365542B90E4A4EF9A?sequence=1>.
- Aqaneghad, M., & Moussavi, G. (2016). Electrochemically enhancement of the anaerobic baffled reactor performance as an appropriate technology for treatment of municipal wastewater in developing countries. *Sustainable Environment Research*, 26(5), 203-208.
- Brault, J.-M., Buchauer, K., & Gambrill, M. (2022). Wastewater treatment and Reuse. <https://doi.org/10.1596/37317>.

- Chimuca, J. F. J., de Sousa, J. T., Lopes, W. S., Leite, V. D., & do Canto, C. S. A. (2020). Decentralized treatment of domestic sewage in dynamic membrane bioreactor. *Desalination and Water Treatment*, 197, 76–89. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25981>.
- Déficit habitacional do Brasil cresceu e chegou a 5,876 milhões de moradias em 2019, diz estudo. G1. (2021, March 4). Recuperado el 31 de Enero de 2023, de <https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/03/04/deficit-habitacional-do-brasil-cresceu-e-chegou-a-5876-milhoes-de-moradias-em-2019-diz-estudo.ghtml>.
- De León O., (2012), Agua potable y saneamiento en República Dominicana, (en español), en: Diagnóstico del agua en las Américas, Laclette JP, Zúñiga P. (Eds.), Red Interamericana de Academias de Ciencias (IANAS), México, México, 421-435.
- Ding, Y., Song, X., Wang, Y., & Yan, D. (2012). Effects of dissolved oxygen and influent COD/N ratios on nitrogen removal in horizontal subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 46, 107–111. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.002>.
- Djonoputro, E. R., Blackett, I., Weitz, A., Lambertus, A., Siregar, R., Arianto, I., & Supangkat, J. (2011). Opsi Sanitasi yang Terjangkau untuk Daerah Spesifik. *Water and Sanitation Program: Guidance Note*. *Environment*, Volume 709, 2020, 136235, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136235>.
- Facultad de Ciencias Químicas Universidad Veracruzana. Unidad 2. Biorreactores y su Aplicación - Bioingeniería. (s.f.). Recuperado el 26 de Enero de 2023, de <https://sites.google.com/site/bioingenieriauv15/unidad-2-biorreactores-y-su-aplicacion>.
- García-Ávila F., Patiño-Chávez J., Zhinín-Chimbo F., Donoso-Moscoso S., Flores del Pino L., AvilésAñazco A., (2019), Performance of *Phragmites Australis* and *Cyperus Papyrus* in

- the treatment of municipal wastewater by vertical flow subsurface constructed wetlands, *International Soil and Water Conservation Research*, 7, 286-296. DOI: 10.1016/j.iswcr.2019.04.001.
- Gluzman, R. (1999). Membrane technology. In *Canadian Consulting Engineer* (Vol. 40).
- Grinberga L., (2020), Water quality assurance with constructed wetlands in Latvia, In: *Water resources quality and management in Baltic Sea countries*, Springer Water, Negm A.M., Zelenakova M., Kubiak-Wójcicka K. (Eds.), Springer International Publishing, Cham, 87-103. DOI: 10.1007/978-3-030-39701-2_5.
- Guan, D., Dai, J., Watanabe, Y., & Chen, G. (2018). Changes in the physical properties of the dynamic layer and its correlation with permeate quality in a self-forming dynamic membrane bioreactor. *Water Research*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.041>.
- Hu, Y., Wang, X. C., Ngo, H. H., Sun, Q., & Yang, Y. (2018). Anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for wastewater treatment: A review. In *Bioresource Technology* (Vol. 247). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.101>.
- Islam, M. M., Sokolova, E., & Hofstra, N. (2018). Modelling of river faecal indicator bacteria dynamics as a basis for faecal contamination reduction. *Journal of hydrology*, 563, 1000-1008.
- Li, P., Wang, Y., Zuo, J., Wang, R., Zhao, J., & Du, Y. (2017). Nitrogen removal and N₂O accumulation during hydrogenotrophic denitrification: Influence of environmental factors and microbial community characteristics. *Environmental Science and Technology*, 51(2). <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00071>.

- Lisboa, A. D. da S., Silva, L. A., Ginoris, Y. P., & de Souza, M. A. A. (2022). Combined compact anaerobic reactors and lamella settlers for decentralized sewage treatment. *Water Practice and Technology*, 17(1), 191–203. <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.097>.
- Liu, A., Nelson, M. J., Wang, X., Li, H., He, X., Zhao, Z., Zhong, H., Nakhla, G., & Zhu, J. (2021). Decentralized wastewater treatment in an urban setting: a pilot study of the circulating fluidized bed bioreactor treating septic tank effluent. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 42(12), 1911–1921. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1683614>.
- Ma, J., Wang, Z., Xu, Y., Wang, Q., Wu, Z., & Grasmick, A. (2013). Organic matter recovery from municipal wastewater by using dynamic membrane separation process. *Chemical Engineering Journal*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.12.085>.
- Martínez-Santos, M., Lanzén, A., Unda-Calvo, J., Martín, I., Garbisu, C., & Ruiz-Romera, E. (2018). Links between data on chemical and biological quality parameters in wastewater-impacted river sediment and water samples. *Data in Brief*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.05.068>.
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Gestión integral del recurso hídrico. (2012).
- Naciones Unidas. (2018). Millones de Personas viven sin techo o en Casas inadecuadas, UN Asalto a la dignidad y la vida. Recuperado el 25 de Enero de 2023, from <https://news.un.org/es/story/2018/07/143772>.
- Nelson, M. J., Nakhla, G., & Zhu, J. (2017). Fluidized-Bed Bioreactor Applications for Biological Wastewater Treatment: A Review of Research and Developments. *Engineering*, 3(3), 330–342. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.021>.

- Patel A, Zhu JX, Nakhla G. Eliminación simultánea de carbono, nitrógeno y fósforo de las aguas residuales municipales en un biorreactor de lecho fluidizado circulante. *Chemosphere* 2006;65(7):1103–12.
- Pillai, J. S., & Brijesh Nair, A. N. (2021). Performance of vertical flow constructed wetlands planted with indigenous species for decentralized wastewater treatment and biomass production in Kerala, India. *Nature Environment and Pollution Technology*, 20(2), 541–550. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2021.v20i02.010>.
- Pillay, S., Foxon, K. M., & Buckley, C. A. (2008). An anaerobic baffled reactor/membrane bioreactor (ABR/MBR) for on-site sanitation in low-income areas. *Desalination*, 231(1-3), 91-98.
- Radio Nacional de Colombia. (2022). El 47 % de las aguas residuales no son tratadas en Colombia. Recuperado el 25 de Enero de 2023, de <https://www.radionacional.co/actualidad/medio-ambiente/aguas-residuales-en-colombia-47-por-ciento-no-son-tratadas>.
- Response to Congress on Use of Decentralized Wastewater Treatment Systems, USEPA, 1997, Office of wastewater management, Washington D.C.
- Reynaud, N. S. (2014). Operation of Decentralised Wastewater Treatment Systems (DEWATS) under tropical field conditions (Doctoral dissertation, Technical University Dresden).
- Riyadi, A., Rachmansyah, A., & Yanuwidi, B. (2018). Water Pollution Index Approaches in Spatial Planning in City Tourism Area (Case Study: Malang Area). *Journal of Indonesian Tourism and Development Studies*, 6(2), 136-142.
- Rodrigues Mesquita, T. C., Pereira Rosa, A., de Oliveira Santos, T. F., Carraro Borges, A., Calijuri, M. L., & de Paula Souza, F. M. (2021). Decentralized management of sewage using septic tanks and anaerobic filters and its potential to comply with required standards in a

- developing country: a case study in Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(36), 50001–50016. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14172-2>.
- Rosenberger, S., Krüger, U., Witzig, R., Manz, W., Szewzyk, U., & Kraume, M. (2002). Performance of a bioreactor with submerged membranes for aerobic treatment of municipal wastewater. *Water Research*, 36(2). [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00223-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00223-8)
- Guan, D., Dai, J., Ahmar Siddiqui, M., & Chen, G. (2018). Comparison of different chemical cleaning reagents on fouling recovery in a Self-Forming dynamic membrane bioreactor (SFDMBR). *Separation and Purification Technology*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.05.059>.
- Singh NK, Kazmi AA, Starkl M (2015) A review on full-scale decentralized wastewater treatment systems: techno-economical approach. *Water Sci Technol* 71(4):468–478.
- Singh, S., Raju, N. J., & Sagar, G. (2011). Process design for decentralized sewage treatment system with total natural resource management. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 3(11).
- Su X., Chiang P., Pan S., Chen G., Tao Y., Wu G., Wang F., Cao W., (2019), Enfoque sistemático para evaluación de tecnologías ambientales y ecológicas para el tratamiento de aguas residuales, *quimiosfera*, 218 , 778-792. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.11.108.
- Tewari, P. K., Singh, R. K., Batra, V. S., & Balakrishnan, M. (2012). Field testing of polymeric mesh and ash-based ceramic membranes in a membrane bioreactor (MBR) for decentralised sewage treatment. *Water SA*, 38(5), 727–730. <https://doi.org/10.4314/wsa.v38i5.11>.

- Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, Ph. and Zurbrügg, C., 2014. *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*. 2nd Revised Edition. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). Dübendorf, Switzerland.
- Vargas, E., Pérez, Y., Hernández, W., Checo, H., García-Cortés, D., & Jáuregui-Haza, U. (2021).) 371-380 *Environmental Innovations: Advances in Engineering*. In *Procedia Environmental Science, Engineering and Management* (Vol. 8, Issue 2). <http://www.procedia-esem.eu>.
- Xi Li, Yuyuan Li, Dianqing Lv, Yong Li, Jinshui Wu. (2020). Nitrogen and phosphorus removal performance and bacterial communities in a multi-stage surface flow constructed wetland treating rural domestic sewage, *Science of The Total*.
- Yao, S., Luo, D., & Wang, J. (2014). Housing development and urbanisation in China. *World Economy*, 37(3), 481–500. <https://doi.org/10.1111/twec.12105>.
- Yulistyorini, A., Camargo-Valero, M. A., Sukarni, S., Suryoputro, N., Mujiyono, M., Santoso, H., & Rahayu, E. T. (2019). Performance of anaerobic baffled reactor for decentralized wastewater treatment in urban Malang, Indonesia. *Processes*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/pr7040184>.