RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Karol Daniela Ortiz Vega
FACULTAD	Ingenierías
PLAN DE ESTUDIOS	Maestría en Construcción
DIRECTOR	M.Sc. Miguel Orejuela Duarte
CODIRECTOR	M.Sc. Romel Gallardo Amaya
TÍTULO DE LA TESIS	Desarrollo de una estrategia eficiente y sostenible para la implementación de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises en edificios en Ocaña, Norte de Santander.
TITULO EN INGLES	Development of an efficient and sustainable strategy for implementing greywater treatment and recycling systems in buildings in Ocaña, Norte de Santander.

RESUMEN

El presente documento desarrolla una estrategia integral para implementar sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises mediante la tecnología de nanofiltración en edificios residenciales nuevos de Ocaña, Norte de Santander. Se analiza la viabilidad técnica, social, ambiental y económica, se incluye una propuesta de un sistema piloto y el cálculo del retorno de inversión, concluyendo que es eficiente, adaptable al contexto local y económicamente factible a mediano plazo.

RESUMEN EN INGLES

The present document develops an integrated strategy to implement greywater treatment and reuse systems using nanofiltration technology in new residential buildings in Ocaña, Norte de Santander. It analyzes the technical, social, environmental, and economic feasibility, includes a proposal for a pilot system, and calculates the investment return, concluding that it is efficient, adaptable to the local context, and economically feasible in the medium term.

PALABRAS CLAVES	Aguas grises, Nanofiltración, Reutilización, Edificios residenciales, Sostenibilidad
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Greywater, Nanofiltration, Reuse, Residential buildings, Sustainability

CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 298	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES: 23	CD-ROM:

Desarrollo de una estrategia eficiente y sostenible para la implementación de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises en edificios en Ocaña, Norte de Santander.

Karol Daniela Ortiz Vega

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

M.Sc. Miguel Orejuela Duarte

Magister en proyectos de desarrollo sostenible

M.Sc. Romel Gallardo Amaya

Magister en Geotecnia

2025

Índice

Capítulo 1. Desarrollo de una estrategia eficiente y sostenible para la implementación de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises en edificios en Ocaña, Norte de Santander .. 13

1.1 Planteamiento del Problema 13

1.2 Formulación del problema 16

1.3 Objetivos 16

1.3.1 Objetivo General. 17

1.3.2 Objetivos Específicos 17

1.4 Justificación 21

1.5 Delimitaciones 26

1.5.1 Delimitación Geográfica. 26

1.5.2 Delimitación Temporal. 26

1.5.3 Delimitación Conceptual. 28

1.5.4 Delimitación Operativa. 31

Capítulo 2. Marco Referencial 33

2.1 Marco Histórico 33

2.1.1 Antecedentes 33

2.2 Marco Contextual 39

2.3 Marco Conceptual 41

2.4 Marco Teórico 43

2.5 Marco Legal 57

Capítulo 3. Diseño Metodológico 60

3.1 Tipo de investigación 60

3.2 Seguimiento metodológico del proyecto 61
3.3 Población. 62
3.4 Muestra. 63
3.5 Diseño de instrumentos de recolección de la información y técnicas de análisis de datos . 64
3.6 Análisis de la información 69
Capítulo 4. Resultados 70
4.1 Realizar un diagnóstico integral de la situación actual sobre el conocimiento, actitudes y percepciones de los habitantes y profesionales de la construcción respecto a la reutilización de aguas grises, mediante técnicas de investigación cualitativa y cuantitativa, con el fin de que se identifiquen las necesidades y oportunidades locales. 70
4.1.1 Desarrollo y análisis de la encuesta 74
4.1.2 Desarrollo y análisis de las entrevistas 93
4.2 Analizar el marco regulatorio, las políticas ambientales existentes y los sistemas de tratamiento de aguas grises implementados en diversas regiones, mediante una revisión documental y estudios comparativos, con el fin de que se determinen oportunidades de mejora, incentivos y estrategias que fomenten la reutilización de estas aguas en el sector de la construcción. 111
4.2.1 Marco Regulatorio y políticas ambientales. 113
4.2.1.1 Materia ambiental e hídrica 113
4.2.1.2 Vertimientos y tratamiento de aguas residuales 117
4.2.1.3 Normas técnicas, guías y políticas públicas. 120
4.2.1.4 Referentes internacionales y de artículos científicos 126
4.2.2 Sistemas de tratamiento de aguas grises implementados 131

4.2.2.1 Estado del arte y tendencias en reutilización de aguas grises. 132

4.2.2.2 Factores sociales y percepción pública. 135

4.2.2.3 Viabilidad técnica. 138

4.2.2.4 Viabilidad ambiental.. 143

4.2.2.5 Viabilidad económica. 146

4.3 Definir una estrategia integral que promueva la implementación eficiente y sostenible de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises, mediante la síntesis de la información recopilada y el diseño de propuestas adaptadas al contexto local; enfocado en la reducción del consumo de agua potable y la gestión hídrica sostenible, considerando los aspectos ambientales, sociales y económicos. 151

4.3.1 Selección inicial de tecnologías. 152

4.3.2 Organización y análisis documental 153

4.3.2.1 Humedales artificiales. 154

4.3.2.2 Sistemas físico-biológicos simples. 155

4.3.2.3 Biorreactores de membrana (MBR).. 156

4.3.2.4 Nanofiltración.. 158

4.3.3 Evaluación por criterios 159

4.3.3.1 Dimensión técnica. 161

4.3.3.2 Dimensión económica. 164

4.3.3.3 Dimensión social. 167

4.3.3.4 Dimensión ambiental.. 170

4.3.4 Estrategia de implementación 174

4.3.4.1 Principios clave de la estrategia. 175

4.3.4.1.1 Sostenibilidad hídrica y urbana 175

4.3.4.1.2 Escalabilidad modular 176

4.3.4.1.3 Aceptación social y apropiación comunitaria 176

4.3.4.1.4 Viabilidad técnica e institucional local 177

4.3.5 Fases de implementación de la estrategia integral 178

4.3.5.1 Identificación de actores y articulación institucional 179

4.3.5.2 Diseño y ejecución del proyecto piloto en un edificio. 180

4.3.5.3 Formación técnica y elaboración del manual operativo. 188

4.3.5.4 Escalamiento gradual y promoción de incentivos. 189

4.3.5.2 Seguimiento, evaluación y retroalimentación. 190

Conclusiones 192

Recomendaciones 194

Referencias 196

Apéndices 211

Lista de Figuras

Figura 1. Árbol de problemas 19

Figura 2. Árbol de objetivos 20

Figura 3. Resultados encontrados en análisis bibliométrico. 44

Figura 4. Ubicación geográfica de los edificios encuestados. 72

Figura 5. Conocimiento del término “aguas grises”. 75

Figura 6. Identificación del concepto de aguas grises. 76

Figura 7. Reutilización actual de aguas grises. 77

Figura 8. Percepción del desaprovechamiento de aguas grises. 78

Figura 9. Medidas propuestas para el ahorro hídrico. 80

Figura 10. Actividades propuestas para reutilizar aguas grises. 82

Figura 11. Disposición a utilizar un sistema de tratamiento. 83

Figura 12. Beneficios percibidos del uso de aguas grises. 84

Figura 13. Barreras percibidas para el uso de aguas grises. 86

Figura 14. Percepción sobre preparación de edificaciones. 87

Figura 15. Acciones propuestas para fomentar el uso. 88

Figura 16. Distribución por ocupación principal. 90

Figura 17. Tipo de vivienda de los encuestados. 91

Figura 18. Distribución por estrato socioeconómico. 92

Figura 19. Procedimiento para la determinación de la estrategia de implementación. 153

Figura 20. Principios clave que sustentan la estrategia integral de implementación en Ocaña . 178

Figura 21. Mapa de actores para implementación de sistema de aguas grises. 180

Figura 22. Evolución del Valor Presente Neto 186

Figura 23. Secuencia operativa para el desarrollo del sistema piloto. 187

Lista de Tablas

Tabla 1. Diagrama de Gantt - Etapas de ejecución del proyecto. 27

Tabla 2. Normatividad Colombiana Relacionada. 58

Tabla 3. Modelo metodológico. 61

Tabla 4. Matriz de operación de variables. 67

Tabla 5. Edificios encuestados con su ubicación y antigüedad. 72

Tabla 6. Datos generales de profesionales entrevistados. 94

Tabla 7. Identificación y análisis de normatividad hídrica y ambiental 113

Tabla 8. Identificación y análisis de normatividad sobre vertimientos y tratamiento de aguas residuales 117

Tabla 9. Identificación y análisis de normas técnicas, guías y políticas públicas. 120

Tabla 10. Referentes internacionales y artículos de investigación. 126

Tabla 11. Resumen comparativo de los documentos H1–H5 sobre humedales construidos. 154

Tabla 12. Resumen comparativo de los documentos F1–F5 sobre sistemas físico-biológicos simples. 155

Tabla 13. Resumen comparativo de los documentos M1–M5 sobre biorreactores de membrana (MBR) 157

Tabla 14. Resumen comparativo de los documentos N1–N5 sobre nanofiltración 158

Tabla 15. Matriz comparativa - Dimensión técnica. 162

Tabla 16. Matriz comparativa - Dimensión económica. 165

Tabla 17. Matriz comparativa - Dimensión social. 168

Tabla 18. Matriz comparativa - Dimensión ambiental. 171

Tabla 19. Estimación de costos del sistema de Nanofiltración en un edificio residencial en Ocaña. 183

Tabla 20. Ahorros anuales estimados por reutilización de aguas grises. 183

Tabla 21. Análisis de flujo neto para un periodo de 10 años. 184

Tabla 22. Valor Presente Neto para los 10 años. 185

Lista de Apéndices

Apéndice 1. Entrevista - Guía de preguntas: 212

Apéndice 2. Encuesta – Guion de preguntas 215

Apéndice 3. Matriz de Análisis Documental 219

Apéndice 4. Análisis bibliométrico..... 221

Apéndice 5. Entrevistas realizadas 234

Apéndice 6. Fichas Técnicas H..... 258

Apéndice 7. Ficha Técnica F 268

Apéndice 8. Ficha técnica M 278

Apéndice 9. Ficha técnica N..... 288

Introducción

El aumento poblacional y el desarrollo urbanístico en Ocaña han generado un incremento en la demanda de agua potable y una carga mayor sobre el sistema de alcantarillado sanitario de la ciudad. Por ello, un proyecto enfocado en el desarrollo de estrategias eficientes y sostenibles para la implementación de sistemas de tratamiento y el aprovechamiento de aguas grises en edificios, se plantea como una solución no solo innovadora sino necesaria. Con el fin de promover el uso eficiente del recurso hídrico, fomentar la conciencia ambiental e impulsar el desarrollo de edificaciones sostenibles en la ciudad de Ocaña, se define como objetivo principal desarrollar estrategias integrales para la implementación de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises en edificios residenciales, analizando los avances tecnológicos desde una perspectiva sostenible. Actualmente, la gestión de aguas grises en Ocaña enfrenta varios desafíos, entre ellos la ausencia de regulaciones específicas que promuevan su adopción y la falta de conocimiento sobre las mejores prácticas. La mayoría de los edificios residenciales descargan las aguas grises directamente en el alcantarillado sanitario, contribuyendo al desperdicio de este recurso y aumentando la carga sobre el sistema de alcantarillado.

Teniendo en cuenta lo anterior, este proyecto se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente el ODS 6 “Agua Limpia y Saneamiento”, pues se sitúa en un contexto global donde la gestión sostenible del agua es prioridad, y busca contribuir a su preservación y la reducción de la huella hídrica.

En este proyecto se presenta inicialmente una visión general, incluyendo la descripción del problema de la gestión de aguas grises en Ocaña, objetivos, y su justificación.

Se explora la situación actual del manejo de aguas grises en la ciudad y se identifica la necesidad de desarrollar estrategias sostenibles; realizando posteriormente un análisis de los antecedentes del problema, incluyendo investigaciones previas sobre tecnologías de tratamiento de aguas grises y estudios de caso de otras regiones, así como los avances tecnológicos y prácticas sostenibles implementadas; todo mediante un enfoque metodológico de investigación. Teniendo en cuenta lo anterior se presentan los resultados de las investigaciones realizadas, realizando un diagnóstico de las necesidades y desafíos locales proponiendo estrategias eficientes y sostenibles para la implementación de sistemas de tratamiento de aguas grises en edificios residenciales en Ocaña; para finalmente destacar los principales hallazgos y su impacto potencial en la gestión del agua.

Capítulo 1. Desarrollo de una estrategia eficiente y sostenible para la implementación de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises en edificios en Ocaña, Norte de Santander

1.1 Planteamiento del Problema

Desde sus orígenes, en sistemas básicos de recolección y eliminación de aguas residuales, la gestión de aguas grises ha experimentado una transformación significativa a lo largo de la historia. La urbanización, la revolución industrial y la conciencia ambiental han impulsado cambios en la percepción y manejo del agua. (Guerra, 2019). Con los avances tecnológicos, el tratamiento de aguas grises ha tenido enfoques más sostenibles e innovadores. De las civilizaciones antiguas, como la mesopotámica, egipcia y romana se tiene evidencia del uso de sistemas de acueducto y alcantarillado; indicando la conciencia humana temprana en la importancia del uso del agua. Con la revolución industrial, las ciudades crecieron rápidamente generando desafíos en la gestión de aguas residuales, implementando sistemas de alcantarillado, pero no se contemplaba la reutilización de aguas grises en ese momento, es en el siglo XX que la humanidad desarrolla la conciencia ambiental relacionada con la gestión del agua, debido al notable aumento en la urbanización y la evidencia de alteración del ciclo del agua, así como el aumento del riesgo de inundaciones. (Piazza & Ursino, 2023), lo que ha generado un aumento de la regulación ambiental y el desarrollo de tecnologías de tratamiento de aguas residuales y a finales del mismo siglo la gestión de aguas grises surge como una práctica específica. (Van de Walle, et al., 2023).

El progreso y la implementación del tratamiento de aguas grises han sido lentos, debido en gran parte a la difícil aceptación de los proyectos de construcción (separar tuberías), la percepción del riesgo público y el "factor asco" asociado, y a la innovación limitada en el sector del agua (Van de Walle, et al., 2023). La gestión de aguas grises ha evolucionado significativamente a lo largo de la historia, influenciada por factores como la urbanización, la revolución industrial y la conciencia ambiental. A pesar de los avances tecnológicos, su implementación ha sido lenta debido a la dificultad en aceptar proyectos de construcción, la percepción de riesgo público y la falta de innovación en el sector del agua. (Sadr, y otros, 2020).

En el contexto local de Ocaña, Norte de Santander, se ha evidenciado un crecimiento rápido de la construcción de edificios, pues según datos de la Secretaría de Planeación del Municipio de Ocaña, desde 2021 hasta el presente año se han expedido un promedio de 630 resoluciones, en comparación con el año 2020 donde se expidieron 397 resoluciones; esto ha aumentado también la demanda de agua potable y la presión sobre los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales de la ciudad. Esta situación se agrava por la falta de aprovechamiento de las aguas grises generadas en los edificios, que actualmente se mezclan con las aguas negras en el alcantarillado sanitario, desperdiciando un recurso valioso. (Arévalo Navarro, et al., 2022). Si se añade que Ocaña cuenta con redes de acueducto y alcantarillado diseñadas para un crecimiento poblacional menor; y que el alcantarillado sanitario presenta varias conexiones erradas, es decir, conexiones que corresponden al sistema de alcantarillado pluvial del municipio el panorama es aún más preocupante.

Tras una revisión de la normativa local y consultas con la autoridad ambiental y de planeación urbana, se ha constatado que, si bien existen investigaciones sobre la gestión de aguas grises, no existe un marco normativo ni lineamientos específicos para su tratamiento y reutilización en Ocaña. Esta problemática evidencia la necesidad de desarrollar estrategias eficientes y sostenibles para la implementación de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises en edificios en Ocaña, considerando los desafíos locales y la falta de regulaciones específicas en la materia.

Según consulta realizada con personal de la Empresa de Servicios Públicos de Ocaña ESPO S.A. "E.S.P.", y una investigación de los registros municipales, se ha constatado que actualmente en la ciudad de Ocaña, no se aprovechan las aguas grises generadas en los edificios y estas se mezclan con las aguas negras en el alcantarillado sanitario, lo que resulta en un desperdicio de recursos hídricos y un aumento innecesario en la demanda de agua potable; teniendo en cuenta, además, que la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) con la que cuenta la ciudad está diseñada para tratar 18.80 L/s, y las dos Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAPs) que son El Llanito y El Algodonal, tratan aproximadamente 70.00 L/s y 240.00 L/s, lo que daría una cantidad 310.00 L/s de agua tratados para abastecer la ciudad de Ocaña, es decir, del total de agua utilizada por la población se trata solamente alrededor de un 6.10 %, y el porcentaje restante se vierte sin tratamiento a diferentes puntos de descarga en el rio Tejo (ESPO S.A., 2024).

Evaluando la situación actual, la mayoría de los edificios en Ocaña dependen en gran medida de la red de suministro de agua potable y el sistema de alcantarillado convencional. Las

aguas grises generadas en los edificios se descargan directamente en la red de alcantarillado, contribuyendo al aumento de la carga en el sistema y al desperdicio de estas aguas que pueden ser tratadas y usadas nuevamente. (ESPO S.A., 2024). A pesar de que existen varios referentes investigativos con relación a la recolección, tratamiento y/o reutilización de aguas grises; no existe una descripción general y mucho menos un marco legal o normativo que indique las características que deben tener las aguas grises tratadas para su posterior utilización.

1.2 Formulación del problema

¿Qué aspectos técnicos, sociales y normativos se deben considerar para implementación de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises en edificios en Ocaña, Norte de Santander?

1.3 Objetivos

Es importante tener en cuenta que se realizó tener un análisis con la herramienta de la cadena de valor ya que involucra diversos grupos de interés como las personas, las instituciones y las empresas, los gremios y el país, donde se requiere un enfoque del árbol de problemas (Figura 1), permitiendo abordar el problema desde diversas perspectivas. Los objetivos se elaboraron tomando como base el árbol de problemas y construyendo el árbol de objetivos (Figura 2), siguiendo la guía para la construcción y estandarización de la cadena de valor del Departamento Nacional de Planeación (Departamento Nacional de Planeación, 2018)

1.3.1 Objetivo General.

Desarrollar una estrategia eficiente y sostenible mediante el análisis técnico, económico, social y ambiental, para la implementación de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises en edificios en Ocaña, Norte de Santander, contribuyendo a la reducción del consumo de agua potable y sostenibilidad hídrica urbana.

1.3.2 Objetivos Específicos

Realizar un diagnóstico integral de la situación actual sobre el conocimiento, actitudes y percepciones de los habitantes y profesionales de la construcción respecto a la reutilización de aguas grises, mediante técnicas de investigación cualitativa y cuantitativa, con el fin de que se identifiquen las necesidades y oportunidades locales.

Analizar el marco regulatorio, las políticas ambientales existentes y los sistemas de tratamiento de aguas grises implementados en diversas regiones, mediante una revisión documental y estudios comparativos, con el fin de que se determinen oportunidades de mejora, incentivos y estrategias que fomenten la reutilización de estas aguas en el sector de la construcción.

Definir una estrategia integral que promueva la implementación eficiente y sostenible de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises, mediante la síntesis de la información recopilada y el diseño de propuestas adaptadas al contexto local; enfocado en la

reducción del consumo de agua potable y la gestión hídrica sostenible, considerando los aspectos ambientales, sociales y económicos.

Figura 1.

Árbol de problemas



Fuente: Elaboración Propia ajustando formato DNP, 2019), DNP. (2019). Guía para la construcción y estandarización de la Cadena de valor.

Figura 2.

Árbol de objetivos



Fuente: Elaboración Propia ajustando formato DNP, 2019), DNP. (2019). Guía para la construcción y estandarización de la Cadena de valor.

1.4 Justificación

Todos los avances tecnológicos mencionados reflejan el compromiso continuo de la comunidad científica, investigadores y de ingeniería en la mejora de la gestión de aguas grises. La aplicación de estas tecnologías no solo garantiza el recurso hídrico, sino que también contribuye a la conservación de la energía y la reducción de la huella de carbono. El tratamiento de aguas grises, las cuales representan entre el 30% y 50% de la carga orgánica y entre el 9% y el 20% de la carga de nutrientes de las aguas residuales domésticas, cuenta con un potencial de ahorro hídrico entre el 50% y el 80%. (Van de Walle, et al., 2023). La investigación y la innovación en esta área continúa, lo que promete soluciones aún más efectivas y sostenibles en el futuro; sin embargo, su implementación ha sido lenta debido a barreras técnicas, percepción pública y restricciones en el mercado de tecnologías hídricas. (Van de Walle, et al., 2023). Es por todo lo anterior que, con el desarrollo del proyecto se pretende investigar y proponer estrategias para la implementación eficiente de sistemas de tratamiento de aguas grises en edificios verticales en Ocaña; lo cual implicaría reducir significativamente el consumo de agua potable en los edificios, promover la gestión de aguas grises con el fin de aliviar la carga del sistema de alcantarillado reduciendo el riesgo de desbordamientos y mejorando la gestión de aguas residuales, aprovechar las aguas grises para aplicaciones no potables, como el riego de jardines o el llenado de inodoros, entre otras, reduciendo así la demanda de agua potable y finalmente será una contribución a la construcción sostenible de edificios en Ocaña, alineándola con prácticas más responsables desde el punto de vista ambiental, económico y social.

En Colombia, a pesar de los avances en materia de la prestación de los servicios de acueducto y alcantarillado, existen grandes desafíos en cuanto al manejo eficiente del recurso y

la preservación de las fuentes hídricas. El Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, afirma que cerca del 30% del agua potable se desperdicia en las ciudades, debido a prácticas de uso ineficiente y a fugas en las redes de acueducto. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024). Además, Colombia enfrenta una disponibilidad hídrica desigual, marcada por zonas con alta densidad poblacional que ejercen gran presión sobre las fuentes e infraestructura hídrica, dejando en evidencia una crisis de gestión. (Murillo Bermudez & Silva de Abreu, 2019). Por ello, en Colombia los Objetivos de Desarrollo sostenible (ODS), se muestran como un escenario que permite integrar y alinear las acciones públicas y privadas hacia metas comunes de desarrollo sostenible frente a los desafíos hídricos que enfrenta el país.

Para el plan de gobierno actual, el ODS 6 “Agua Limpia y Saneamiento” se ha convertido en una prioridad, ya que promueve la gestión integral del recurso hídrico y el saneamiento básico. (Departamento Nacional de Planeación, 2018). En consecuencia, el enfoque en los ODS es una base para la formulación de políticas nacionales, así como una oportunidad para promover alianzas público-privadas innovadoras en proyectos locales y, por consiguiente, la implementación de sistemas de tratamiento de aguas grises en edificios de Ocaña. La colaboración entre entidades gubernamentales, empresas privadas y la comunidad académica se fortalece con la aplicación de los principios de los ODS puesto que permite alinear sus objetivos y resultados a metas globalmente reconocidas. Esto, puede favorecer la implementación de sistemas de tratamiento de aguas grises, pues impulsa la adopción de tecnologías sostenibles y promueve políticas locales, fomentando la preservación del agua potable y la reducción de la huella hídrica en Ocaña. Diversos estudios han demostrado que la aceptación pública y el nivel

de conocimiento de las personas tienen una influencia directa sobre la adopción de sistemas de reutilización de aguas grises. (Tidiane, y otros, 2024).

Con base en lo descrito, una alternativa potencial para contribuir a la preservación del agua potable y la reducción de la huella hídrica es el tratamiento y la reutilización de aguas grises en edificios. De igual forma, su implementación promueve una transición hacia ciudades más sostenibles y resilientes; ya que puede generar conciencia e impulsar cambios culturales en cuanto al uso responsable del agua; lo cual se relaciona con el ODS 11 “Ciudades y comunidades sostenibles”. En Colombia, la certificación en edificaciones sostenibles como LEED fomenta prácticas como esta, pues prioriza la reutilización de aguas grises y lluvias para riego, descarga de sanitarios o aseo, las cuales están enmarcadas en estrategias de eficiencia hídrica y energética. (Guerra, 2019).

Dado que este es un proyecto enfocado en el ámbito investigativo, las estrategias para la implementación de sistemas de tratamiento de aguas grises en edificios en Ocaña se definirán con base en un análisis de la literatura científica y técnica disponible sobre el tema. Inicialmente se realizará una revisión exhaustiva de estudios previos relacionados con la gestión de aguas grises, sistemas de tratamiento, y su implementación en entornos urbanos similares al de Ocaña, para luego llevar a cabo una investigación de campo con el fin de recopilar datos específicos sobre las características de las aguas grises locales, la infraestructura existente, las regulaciones ambientales y las condiciones socioeconómicas que puedan influir en la implementación de sistemas de tratamiento, lo anterior permitirá evaluar las estrategias consultadas, y fundamentarlas en la identificación de las necesidades y desafíos locales, así como en la

evaluación de las tecnologías disponibles y su adecuación a las condiciones específicas de la región. Con este enfoque se evitan los atascos tecnológicos y se promueven estrategias adaptativas que respondan a cambios sociales, climáticos o normativos como los propuestos en las vías de adaptación en la gestión del agua urbana. (Sadr, y otros, 2020).

Los factores económicos, ambientales y locales son fundamentales al momento de desarrollar o implementar estrategias para el tratamiento de aguas grises en edificios, dado que estos garantizan la viabilidad técnica, económica, ambiental y social de las soluciones propuestas; por ello es indispensable aclarar a qué se hace referencia con cada uno de ellos:

1. Factores económicos:

Estarán enfocados en el costo de inversión, es decir, el desembolso inicial necesario para la implementación de los sistemas de tratamiento de aguas grises; definiendo la incidencia de su implementación dentro del costo directo de las obras. En el costo de operación y mantenimiento, que son aquellos asociados a la operación y el mantenimiento continuo de los sistemas de tratamiento; la viabilidad financiera, analizando la capacidad de financiamiento y el retorno de la inversión, teniendo en cuenta la rentabilidad y sostenibilidad económica de los sistemas de tratamiento propuesto, y finalmente los beneficios económicos adicionales, tales como la reducción de costos de consumo de agua potable, tratamiento de aguas residuales, entre otros. Estudios previos sugieren que la percepción de alto costo es uno de los factores que más influye en la no adopción de estos sistemas, particularmente en contextos donde la población conoce muy poco los beneficios asociados. (Tidiane, y otros, 2024).

2. Factores ambientales:

Es primordial reconocer la importancia de evaluar los factores ambientales dentro del desarrollo de este proyecto, analizando el impacto positivo de la reutilización de aguas grises en la conservación de los recursos hídricos locales, la reducción de demanda de agua potable, la extracción de agua de las fuentes naturales, la reducción de la huella hídrica por actividades asociadas con el suministro y tratamiento convencional de agua potable y aguas residuales, entre otros. En un estudio previo se destaca que además de reducir el consumo de agua, la reutilización de aguas grises genera una gran disminución en la cantidad de aguas residuales generadas, generando efectos positivos sobre los procesos de recolección, transporte y tratamiento de aguas residuales. (Meléndez, et al., 2019).

3. Factores locales:

Es indispensable considerar aspectos como la capacidad técnica e infraestructura en la región, es decir, la disponibilidad de recursos técnicos necesarios para la implementación y operación de los sistemas de tratamiento en Ocaña, personal, la normatividad y regulación local existente con relación al tratamiento y reutilización de aguas grises, la aceptación social y cultural, enfocado en el apoyo de la comunidad hacia la implementación de sistemas de tratamientos, percepciones culturales, consideraciones climáticas y geográficas, las cuales podrían influir en el diseño y funcionamiento de los sistemas de tratamiento.

En síntesis, la gestión de aguas grises en entornos urbanos como Ocaña, se puede desarrollar a través de avances tecnológicos y una mayor conciencia de la importancia del

recurso hídrico, desarrollando estrategias sostenibles e innovadoras para el tratamiento y aprovechamiento de dichas aguas. En este contexto, la implementación de sistemas de tratamiento de aguas grises en edificios representa una oportunidad para mejorar la eficiencia del uso del agua, reducir la carga sobre los sistemas de alcantarillado y promover prácticas más responsables desde el punto de vista ambiental, económico y social. A través de la investigación y la innovación continua, se busca desarrollar soluciones efectivas y sostenibles contribuyendo al desarrollo de ciudades sostenibles.

1.5 Delimitaciones

1.5.1 Delimitación Geográfica.

El proyecto se enfocará en trabajar con constructoras o proyectos ubicados en la zona urbana y/o rural del municipio de Ocaña, en el departamento de Norte de Santander. Esta área ha sido seleccionada debido a su creciente urbanización y las presiones asociadas sobre los recursos hídricos, así como la necesidad de implementar estrategias sostenibles para la gestión de aguas grises en edificaciones residenciales.

1.5.2 Delimitación Temporal.

Ya que se trata de un proyecto de investigación se estima una duración para el mismo aproximada de (10) meses; teniendo en cuenta que se desarrollará en varias etapas, tal y como se muestra a continuación en el diagrama de Gantt (Tabla 1).

Tabla 1.

Diagrama de Gantt - Etapas de ejecución del proyecto.

ETAPAS DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO

TÍTULO DEL PROYECTO	Desarrollo de estrategias eficientes y sostenibles para la implementación de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises en edificios en Ocaña, Norte de Santander.
AUTOR	Ing. Karol Daniela Ortiz Vega
FECHA	Noviembre - 2024

TEMPA	ETAPA	DURACIÓN EN MESES	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4	MES 5	MES 6	MES 7	MES 8	MES 9	MES 10	M
.0	Planificación	1.5											
.0	Recopilación de Datos	2.0											
.0	Análisis	2.0											
.0	Evaluación	1.5											
.0	Documentación	1.5											
.0	Revisión y presentación	1.5											

Fuente: Elaboración propia.

1.5.3 Delimitación Conceptual.

La normatividad colombiana en materia de aguas residuales ha evolucionado significativamente desde 1974. Iniciando con el Decreto 2811, que establece bases para la gestión ambiental, la legislación ha progresado hacia un enfoque más integral y técnico.

Hitos importantes incluyen la Ley 99 de 1993, que crea el Ministerio del Medio Ambiente, y el RAS 2000, que proporciona criterios técnicos para el tratamiento de aguas residuales.

De manera más reciente, se encuentran el Decreto 3930 de 2010 y la Resolución 1207 de 2014, que abordan específicamente los usos del agua, manejo de vertimientos y el reúso de aguas tratadas; estudiando desde aspectos técnicos hasta políticas para el manejo del agua; esta normatividad refleja una creciente preocupación por la gestión sostenible del agua en el país.

Todo esto define las bases para comprender la importancia del tratamiento y aprovechamiento de aguas residuales y su alcance en Colombia. Para profundizar en esta temática, es fundamental definir y analizar conceptos clave, tales como:

Tipo de agua: Corresponde a la clasificación del agua que se transporta en los sistemas de acueducto o alcantarillado. Los tipos de agua para alcantarillado: aguas residuales, aguas lluvias, aguas combinadas (residuales y lluvias). Para acueducto: agua cruda, agua potable y descarga de conducción, de planta y de tanque (Empresas Públicas de Medellín, 2020).

Aguas grises: Son un recurso que, una vez recicladas, puede sustituir el agua de consumo humano en algunos usos comunes en labores domésticas, se definen como aguas grises, las aguas residuales que proceden de duchas, bañeras y lavamanos, lavadoras de más, estas presentan un bajo contenido contaminación y pueden ser usadas nuevamente. (Picón, 2022).

Reutilización de aguas grises: Hace referencia a la implementación de medidas de uso eficiente de agua en el sector urbano, en particular en el ámbito doméstico, con lo que se busca tener un efecto en la reducción de costos del ciclo urbano del agua. La reutilización de aguas residuales se constituye en una estrategia sustentable de gestión de los recursos hídricos, motivada esencialmente por la escasez de agua; constituyéndose en un pilar fundamental de la economía circular. Su uso se ha empleado tradicionalmente en sistemas centralizados con diversas aplicaciones, lo que ha contribuido a disminuir el estrés hídrico resultante de la alta demanda para estos usos. (Meléndez, et al., 2019).

Desarrollo sostenible: Es aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones, el desarrollo sostenible implica límites y requiere sacrificios, pero enfocados en que la tecnología y la organización social se pueden gestionar para abrir el camino a una nueva era de desarrollo económico. (Chavarro, et al., 2017)

Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH): Busca orientar el desarrollo de políticas públicas en materia de recurso hídrico, a través de una combinación de desarrollo económico, social y la protección de los ecosistemas. La GIRH se define como un proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, la tierra y los recursos

naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024).

Construcción sostenible: La Construcción Sostenible se puede definir co.mo aquella que, teniendo especial respeto y compromiso con el medio ambiente, implica el uso eficiente de la energía y del agua, los recursos y materiales no perjudiciales para el medioambiente, resulta más saludable y se dirige hacia una reducción de los impactos ambientales. Abarca, no sólo los edificios propiamente dichos, sino también cuenta el entorno y la manera cómo se integran para formar las ciudades. (Ramirez, 2002).

Planta de tratamiento de agua potable (PTAP): Elemento que representa un sistema de tratamiento integrado que incluye todos los procesos para la obtención de agua potable. (Empresas Públicas de Medellín, 2020).

Planta de tratamiento de agua residual (PTAR): Elemento que representa un conjunto de sistemas y operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es que a través de los equipamientos elimina o reduce la contaminación o las características no deseables de las aguas residuales. (Empresas Públicas de Medellín, 2020).

Conexiones erradas: Cuando se está conectado erróneamente aguas residuales a la red de lluvias, o viceversa. (Empresas Públicas de Medellín, 2020).

1.5.4 Delimitación Operativa.

Esta investigación se enfocará específicamente en el análisis y la evaluación de estrategias para la implementación de sistemas de tratamiento y el aprovechamiento de aguas grises en edificios ubicados en el municipio de Ocaña, Norte de Santander, Colombia.

Con el objetivo de identificar las tecnologías de tratamiento de aguas grises más eficientes en términos de aplicación y sostenibilidad; para su implementación en el contexto local, se analizarán y eximirán diferentes tecnologías; así como prácticas de reutilización. Posteriormente se realizará un diagnóstico de las necesidades y desafíos locales relacionados con el manejo de aguas residuales en edificios en Ocaña, para identificar áreas de acción y oportunidades para mejorar la sostenibilidad.

Para ello, se analizarán los factores económicos, ambientales y locales, evaluando además la viabilidad técnica de las diferentes estrategias; enmarcadas en las características del municipio de Ocaña y de igual forma se consultará información sobre consumos de agua potable en el municipio.

Dentro de las limitaciones que posiblemente se encuentren en el desarrollo del proyecto se incluye la disponibilidad y accesibilidad de información precisa sobre el consumo de agua potable en el municipio, redes de distribución y sistema de alcantarillado, cantidad de edificios o construcción de obras nuevas, debido a la posible falta de registros; así como la posible resistencia de los residentes o constructores a participar en las encuestas y entrevistas. Dichas

limitaciones se gestionarán mediante la planificación de la recolección de datos, colaboración con autoridades locales y profesionales del sector con el fin de facilitar el acceso a la información y fomentar la participación.

Capítulo 2. Marco Referencial

2.1 Marco Histórico

2.1.1 Antecedentes

Los avances tecnológicos y la creciente conciencia ambiental han llevado a la implementación de sistemas de tratamiento de aguas grises en diversas regiones del mundo, con el fin de mejorar la eficiencia en el uso del agua y reducir el impacto ambiental asociado con la gestión de aguas residuales. Desde sus orígenes centrados en la recolección y eliminación de aguas residuales, la gestión de aguas grises, es decir, aquellas provenientes de actividades domésticas como el lavado de manos, ducha y lavadora, excluyendo las aguas con contenido de materia fecal (Van de Walle, et al., 2023); han experimentado una transformación significativa a lo largo de los años. Sin embargo, en el contexto específico de Ocaña, existen limitaciones en la implementación de estos sistemas debido a la falta de conocimiento sobre las mejores prácticas y a la ausencia de regulaciones y políticas específicas que promuevan su adopción.

La gestión sostenible del agua se ha convertido en una prioridad global a medida que las comunidades urbanas buscan abordar la creciente demanda de recursos hídricos y mitigar el impacto ambiental. "…En 2019 casi 4 mil millones de personas enfrentaban escasez de agua y 2 mil millones de personas se asentaron en países con estrés hídrico. A medida que la población mundial crece, los lugares se urbanizan y la industria se expande rápidamente, tanto la demanda de agua como la cantidad de aguas residuales aumentan significativamente." (Bautista, et al., 2022).

La reutilización y el reciclaje del agua y las aguas residuales son prácticas previas clave para el logro de los compromisos de sostenibilidad, indispensables para la humanidad en el siglo XXI. Sin embargo, se ha demostrado que las prácticas sostenibles en los pequeños estados sobre la conservación y gestión de los recursos hídricos son lamentablemente deficientes en ausencia de políticas y sistemas formales para fomentar la reutilización y el reciclaje de las aguas pluviales y grises en los hogares. (Chadee, Ali, et al., 2023).

Por otra parte, Patrick Ssempeera en su libro titulado “Integrated Drainage Systems Planning and Design for Municipal Engineers”, afirma que: “La gestión del agua urbana debe adoptar un enfoque integrado que dé prioridad a los sistemas de drenaje sostenibles (SUDS) sobre la infraestructura gris”, y en el desarrollo de este explora la planificación y evaluación de sistemas de drenaje de tuberías, destacando la importancia de la sostenibilidad. Incluye secciones técnicas sobre diseño de infraestructura gris y verde, considerando los costos totales del ciclo de vida. También aborda técnicas avanzadas de simulación, dando un precedente importante para la planificación urbana y desarrollo municipal, enfocado en la sostenibilidad desde el punto de vista de los recursos hídricos. (Ssempeera, 2023).

En Colombia, aunque existe un marco normativo extenso sobre agua potable y saneamiento básico; no se cuenta con una regulación específica para el tratamiento y reutilización de aguas grises. No obstante, algunas normas pueden orientar su implementación. La Ley 1632 de 2000 promueve la cultura del agua; la Ley 631 de 2015 establece valores límites permisibles para vertimientos puntuales y la Resolución 1256 de 2021 contempla requisitos técnicos para sistemas de tratamiento individual. Así mismo, el Decreto 582 de 2023 del Distrito

establece directrices de Ecourbanismo y Construcción Sostenible, donde se contempla el manejo alternativo de aguas lluvias, entre otros. A pesar de estos avances, no existe una norma nacional específica que reglamente el manejo de aguas grises integralmente, limitando su aplicación de forma sistemática.

En este contexto, la reutilización de las aguas grises generadas por actividades no sanitarias en hogares y edificios ha surgido como una estrategia que permite conservar y aprovechar de forma más eficiente el recurso hídrico, teniendo en cuenta que: "… las estadísticas internacionales que indican que en 2025 más de 2.700 millones de personas en todo el mundo se enfrentarán a escasez de agua". Aunque se han realizado muchos trabajos de investigación sobre la reutilización de aguas grises durante las últimas dos o tres décadas, debido a la variabilidad en la calidad, la cantidad y los grandes cambios en los métodos de tratamiento, todavía se necesita mucho esfuerzo para comprender los desafíos y problemas asociados con las aguas grises reutilizadas. (Mahmoudi, et al., 2021).

En los últimos años se ha investigado más el tema en comparación con décadas anteriores, así mismo se han desarrollado varias revisiones bibliográficas. En el año 2020 los autores Shaikh y Ahammed realizaron un artículo de investigación en el que proporcionaron una descripción general de la literatura existente sobre la calidad y cantidad de aguas grises, así como las características de estas. (Shaikh & Ahammed, 2020). Otras investigaciones recientes han profundizado en diferentes tipos de soluciones relacionadas con manejos naturales (humedales), tecnología con membranas, muros verdes eliminando tensoactivos, materia orgánica,

microorganismos y otros contaminantes (Mahmoudi, et al., 2021); también se han analizado sistemas híbridos de agua lluvia y aguas grises para su utilización. (Chen, et al., 2023).

A la fecha existen varias tecnologías de tratamiento de aguas grises, una de ellas es la tecnología de biopelículas de lecho fijo, como el contactor biológico giratorio, que se ha utilizado para tratar aguas grises domésticas ya que permite una alta confiabilidad en el sistema; están los de lecho móvil utilizados para la eliminación de compuestos orgánicos y nitrógeno; se encuentra también el reactor de biopelícula de membrana, que combina dicha tecnología con una membrana mediante el suministro de un sustrato gaseoso a través de una membrana porosa; demostrando que se pueden eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos, como tensioactivos y nitrógeno, en aguas grises. (Van de Walle, et al., 2023).

La filtración por membrana se puede adaptar para el tratamiento de aguas grises dependiendo de los contaminantes que se deben eliminar. Sin embargo, la mayor desventaja de este sistema es que se produce un concentrado y no se elimina nada utilizando las propias membranas; es decir, la contaminación de la membrana es inevitable y también añade una barrera al transporte de aguas grises. Existen algunas soluciones basadas en la naturaleza, que se caracterizan por menor demanda de energía y eficiencia de eliminación orgánica; por ejemplo, las plantas de los humedales artificiales pueden ayudar en la eliminación de nitrógeno y fósforo porque pueden ser absorbidos por sus raíces. (Van de Walle, et al., 2023).

Las técnicas híbridas se crean en función de las propiedades de las aguas grises y las aplicaciones de reutilización; es decir, se utilizan dos o más tecnologías que superan los sistemas

individuales en la eliminación de contaminantes, el rendimiento del tratamiento y la disponibilidad de aguas grises; varias investigaciones han demostrado que el óxido de grafito, las membranas de ultrafiltración cerámicas, los coagulantes de semillas de Nirmali, la fotocatálisis solar, los reactores de Biofilm de membrana y las celdas de combustible microbianas de retención hidráulica ajustable en el tiempo, son algunos de los procesos que eliminan eficazmente los surfactantes, que son un contaminante presente en las aguas grises y que aumenta de forma considerable los niveles de toxicidad en el cuerpo de agua. (Jena, et al., 2023)

Una investigación desarrollada por Monsalve, Domínguez y Oviedo evaluó el desempeño ambiental de un Sistema Híbrido que combina la recolección de agua de lluvia con la reutilización de aguas grises utilizando la metodología de evaluación del Ciclo de Vida y lo comparó con un Sistema Centralizado, demostrando que el Sistema Híbrido tiene un mejor desempeño ambiental si se compara con el Sistema Centralizado. (Gómez, et al., 2022)

En otra investigación desarrollada se usaron plantas trepadoras y ornamentales en humedales artificiales de flujo vertical para tratar aguas grises, para ello se seleccionaron varios tipos de plantas (Trachelosprmum jasminoides, Lonicera japónica y Callistemon laevis) que se instalaron 4 tuberías idénticas al aire libre y se llevaron con 3 capas de materiales: Una de drenaje con grava gruesa, otra de transición con relleno de grava fina y una principal rellena de arena lavada se midieron quincenalmente las características de crecimiento de las plantas y los parámetros de calidad de las aguas residuales, finalmente se evaluó cuáles de ellas tenían mejor comportamiento con relación al crecimiento, rendimiento de remoción, fluorescencia, entre otras. (Stefanatou, et al., 2023).

Es importante analizar que por de tratarse de agua gris, esta debe tener unos parámetros de estabilidad biológica para poderse utilizar, en la investigación desarrollada por Ren, Zhang y Miao se establecen dichos parámetros para su uso específicamente en el desagüe de inodoros, que se encuentran relacionados con turbidez, color, entre otros, permitiendo concluir que después de un mes no se detectaron bacterias en el inodoro. (Ren, et al., 2023).

Es decir que los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) son estrategias y soluciones que se enfocan en la gestión y control distribuido de aguas pluviales, buscando restablecer el equilibrio hídrico natural aumentando la infiltración, la evapotranspiración y promoviendo la recolección y reutilización del agua de lluvia. (Van de Walle, et al., 2023). Para los SUDS, tiene gran relevancia el tratamiento de aguas grises, por esta razón existen varias tecnologías disponibles para su tratamiento. Las tecnologías de tratamiento biológico, como las tecnologías basadas en la naturaleza, las tecnologías de biopelículas y los biorreactores de membrana (MBR), junto con los métodos de tratamiento fisicoquímicos como la filtración por membrana, las tecnologías de sorción e intercambio iónico y la desinfección ultravioleta (UV), pueden producir agua tratada apta para su reutilización.

Los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) tienen el potencial de proporcionar servicios ecosistémicos, incluido el tratamiento de aguas grises. Si bien se han observado casos exitosos de descontaminación de escorrentías, los resultados de otros servicios ecosistémicos proporcionados por SUDS varían. Algunos estudios han mostrado resultados negativos para el control del cambio climático, ya que estas técnicas pueden emitir gases de efecto invernadero. El uso de SUDS como tratamiento de aguas grises no se ha estudiado ampliamente, pero se han

reconocido los beneficios potenciales de SUDS en términos de regulación del agua y otros servicios ecosistémicos. Se necesitan estudios específicos para optimizar los servicios ecosistémicos potenciales de SUDS y evitar posibles perjuicios. (Arbellán & Santamarta, 2022).

2.2 Marco Contextual

Este proyecto investigativo se centra en la evaluación de sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises en edificios residenciales del municipio de Ocaña, Norte de Santander, Colombia, por ello es importante situar el proyecto dentro del entorno específico del sector de la construcción, describiendo la relación del tema con el ambiente, la época y las condiciones actuales.

Ocaña enfrenta desafíos significativos en términos de disponibilidad y gestión de recursos hídricos. El cambio climático y el desarrollo urbano son factores que potencian la escasez de agua, que ya se empieza a notar en la región, a pesar de no ser crítico, es por ello que la implementación de sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises es una solución viable para reducir la demanda de agua potable y minimizar el impacto ambiental de los edificios residenciales.

Es necesario indicar que las soluciones propuestas deben ser económicamente viables y accesibles para la población local (Meléndez, et al., 2019), dado que la economía de Ocaña se basa principalmente en la agricultura y el comercio, con poco crecimiento en el sector industrial; para que así puedan generarse beneficios económicos a largo plazo al reducir los costos relacionados con el consumo de agua potable y el tratamiento de aguas residuales.

Globalmente existe una tendencia hacia la construcción sostenible y certificación de edificios verdes; lo que está impulsando la adopción de prácticas que mejoran la eficiencia en el uso de recursos (Guerra, 2019), dicho esto los sistemas de tratamiento de aguas grises se muestran un potencial significativo para mejorar los índices de sostenibilidad de edificios residenciales en Ocaña.

En todos los contextos se están adoptando cada vez más prácticas sostenibles, incluyendo la construcción con materiales ecológicos, el uso de energías renovables, la gestión eficiente del agua, entre otras, lo cual se alinea con la implementación de sistemas de tratamiento de aguas grises ofreciendo una solución práctica para la reutilización del agua en aplicaciones no potables (Guerra, 2019); en el contexto local, las empresas pueden contar con la capacidad técnica para implementarlos, sin embargo, la falta de experiencia y ausencia de conocimiento específico es un desafío latente, por esta razón la capacitación y el acceso a tecnología son indispensables para el éxito de estos proyectos.

En áreas urbanas con gran densidad de población y con infraestructura insuficiente para el tratamiento de aguas residuales, no sólo es útil sino necesaria la implementación de sistemas de tratamiento de aguas grises, ya que contribuye a la reducción de vertimiento de aguas residuales no tratadas, disminuyendo la contaminación de las fuentes hídricas y del medio ambiente en general. (Tidiane Compaoré, et al., 2024). Por ello, la ejecución de un proyecto como este formula una base o modelo que puede ser replicado en otras regiones, fomentando el desarrollo de nuevas tecnologías y la innovación en el sector de la construcción.

2.3 Marco Conceptual

En este proyecto se busca desarrollar estrategias para la implementación de sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises en edificios residenciales del municipio de Ocaña, Norte de Santander. Para ello, es esencial comprender los conceptos clave relacionados con la gestión del agua y las tecnologías de tratamiento.

Aguas Grises: Las aguas grises son las aguas residuales generadas en actividades domésticas como ducharse, lavarse las manos, lavar ropa y platos, excluyendo las aguas negras provenientes de inodoros. Según (Shaikh & Ahammed, 2020), las aguas grises representan entre el 50-80% del total de aguas residuales domésticas. Estas aguas contienen jabones, detergentes, grasas y residuos alimenticios, pero su carga contaminante es significativamente menor que la de las aguas negras, lo que las hace más fáciles de tratar y reutilizar (Mahmoudi, et al., 2021)

Tecnologías de tratamiento de Aguas Grises: El tratamiento de aguas grises incluye procesos físicos, químicos y biológicos diseñados para eliminar contaminantes. Entre las tecnologías más comunes se encuentran los sistemas de biopelículas, como el contactor biológico giratorio, y los reactores de biopelícula de membrana. (Van de Walle, et al., 2023).

Eficiencia y Sostenibilidad: El objetivo del tratamiento es producir agua de calidad suficiente para su reutilización en aplicaciones no potables. Según estudios de Jena, Dutta, & Daverey (Jena, et al., 2023) las tecnologías híbridas que combinan procesos físicos y biológicos han demostrado ser especialmente efectivas.

Aplicaciones Prácticas de aguas grises tratadas: El agua tratada puede ser reutilizada en actividades como riego de jardines, descarga de inodoros y limpieza de exteriores. Por otra parte, los sistemas híbridos de recolección de agua de lluvia y reutilización de aguas grises pueden mejorar significativamente la sostenibilidad ambiental de los edificios. (Gómez Monsalve, et al., 2022).

Sostenibilidad Hídrica: Consiste en gestionar los recursos hídricos de tal forma que satisfagan las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de futuras generaciones para satisfacer las suyas; considerando no solo aspectos ambientales sino también sociales y económicos. (Van de Walle, et al., 2023)

Tecnologías de tratamiento basadas en la naturaleza: Son aquellas que utilizan plantas y/o medios naturales tales como los humedales artificiales y otras tecnologías con el fin de tratar las aguas grises, siendo una solución sostenible con poco consumo de energía. (Van de Walle, et al., 2023).

Sistemas de Filtración por Membranas: Estas tecnologías de tratamiento consisten en aplicar barreras físicas con el fin de eliminar partículas y microorganismos de las aguas grises. A pesar de que son efectivas, su principal desventaja es la contaminación de las membranas y producción de concentrados. (Mahmoudi, et al., 2021)

Impacto Ambiental: La reducción en la extracción de agua potable y la disminución de la carga sobre los sistemas de tratamiento de aguas residuales son algunos de los principales beneficios ambientales de estos sistemas. (Gómez, et al., 2022)

2.4 Marco Teórico

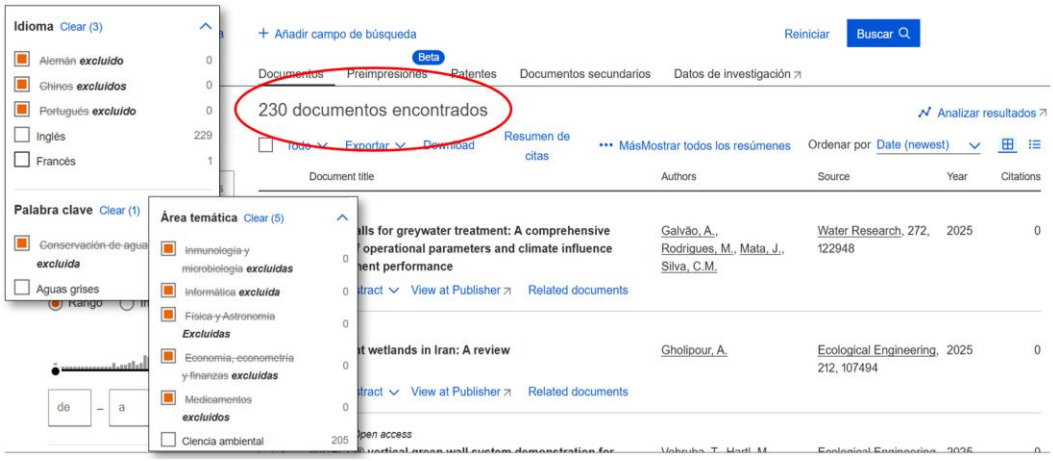
La creciente escasez del agua a nivel global ha hecho del manejo sostenible de este recurso un tema crucial de desarrollo. En este sentido, el tratamiento y reutilización de las aguas grises toma mayor relevancia; la implementación de sistemas de tratamiento es una alternativa eficiente y sostenible pues estas prácticas permiten optimizar el consumo hídrico, minimizar la descarga de aguas sin tratar y mitigar el impacto ambiental en la región. (Tidiane Compaoré, et al., 2024).

Para fundamentar esta investigación, se hace necesario abordar los conceptos clave, ideas, modelos y teorías relacionadas con el tratamiento y reutilización de aguas grises, integrando el conocimiento existente e identificando las áreas de vacíos investigativos. En este sentido, se analiza información relevante sobre estrategias, normativa, materiales y demás; para ello se llevó a cabo un análisis bibliométrico mediante la base de datos Scopus, empleando los términos clave "greywater", "reuse and systems" y "treatment", se identificaron 230 documentos relevantes sobre el tema, tal y como se evidencia en la Figura 3. Se identificó que existe un dinámico y creciente interés por el tema, así como el aumento de publicaciones relacionadas y una estrecha correlación entre los conceptos y su aplicación, reforzando la idea de que el problema tiene una dimensión global, y que se requiere abordarlo desde diversas perspectivas (información detallada en el Apéndice 4).

Este análisis respalda la necesidad de desarrollar estrategias aplicables a nivel local, considerando factores como la viabilidad técnica y económica, el contexto social y su impacto ambiental.

Figura 3.

Resultados encontrados en análisis bibliométrico.



Fuente: Pantallazo de la plataforma Scopus, acceso institucional de la UFPS Ocaña.

De acuerdo con su origen y carga contaminante el agua residual doméstica se clasifica en aguas negras y aguas grises. Las aguas negras provienen de inodoros (transportan excrementos humanos y orina) contienen gran cantidad de sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo y coliformes totales, lo que las convierte en foco de contaminación. Por otro lado, las aguas grises provienen de tinas, duchas, lavamanos y lavadoras, que constituyen aproximadamente el 70% del agua residual generada, contienen un alto grado de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), solidos suspendidos, fósforo y grasas. (Carpio, 2013). Una menor carga de contaminantes hace que las aguas grises sean más fáciles de tratar en comparación con las aguas negras, permitiendo su reutilización. Las caracterizaciones típicas de las aguas residuales que se pueden utilizar como referencia, se encuentran divididas por parámetros físicos, químicos y biológicos. (Carpio, 2013).

Parámetros físicos:

- Color: que varía entre gris, gris oscuro y negro dependiendo del tiempo, lo cual se debe a la formación de sulfuros metálicos.
- Conductividad eléctrica: Es la medida de la capacidad del agua para conducir electricidad, sirve para saber si el agua es apta o no para posteriores fines agrícolas.
- Sólidos suspendidos totales (TSS): Definen a la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación y pueden ser filtrables o no filtrables.
- Olores: Se deben a los gases que se liberan durante el proceso de descomposición de la materia orgánica.
- Temperatura: es un parámetro que ejerce efecto sobre las características del agua, procesos de tratamiento, método de disposición del agua tratada. Para el agua residual la temperatura es más elevada que para el agua de consumo humano.
- Turbiedad: es una medida óptica del material suspendido en el agua, se utiliza como medida de las propiedades de transmisión de la luz para indicar la calidad de las aguas. (Carpio, 2013).

Parámetros químicos:

- Acidez: Puede depender de la presencia de dióxido de carbono o combinado de ácidos minerales o de sales de ácidos fuertes. Alto grado de acidez indica descarga de desechos industriales en el sistema.

- Alcalinidad: Es una medida de su capacidad de neutralizar ácidos. Las aguas residuales domésticas son generalmente alcalinas. En el tratamiento funciona como un regulador de pH que permite una adecuada actividad enzimática.
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Causada por la materia orgánica expulsada en el agua, que constituye el alimento para bacterias que en condiciones aerobias consumen oxígeno. Permite determinar la cantidad de oxígeno requerido para diseñar unidades de tratamiento biológico, evaluar la eficiencia de procesos de tratamiento y fijar cargas orgánicas permisibles.
- Demanda Química de Oxígeno (DQO): Es el volumen de oxígeno requerido para oxidar la fracción orgánica de una muestra de agua. Se usa para medir la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente las sustancias orgánicas presentes.
- pH: Es la medida de concentración de ion hidrógeno en las aguas residuales, un pH menor a 6.0 favorece el crecimiento de hongos frente al de bacterias, Normalmente el pH debe estar entre 5 y 9. Las aguas residuales con valores menores a 5 o mayores a 9 son más difíciles de tratar por medio biológicos. (Carpio, 2013).

Parámetros biológicos:

- Microorganismos: Las aguas residuales contienen presencia potencial de grandes cantidades de microoorganismos patógenos que afectan la salud de las personas. El conocimiento del tipo de microorganismos presentes en el agua es fundamental para decidir el tipo de tratamiento adecuado; sin embargo, por su dificultad de determinación se trabaja con organismos indicadores.

- Bacterias: Son los organismos más importantes en la descomposición y estabilización de la materia orgánica. En el agua residual se encuentran mayormente las bacterias entéricas. El más utilizado como indicador de este tipo de contaminación son las bacterias coliformes.
- Coliformes: Indicadores de contaminación fecal por su relación con el grupo tifoide-paratifoide y alta concentración en muestras. La Escherichia Coli es la población más representativa y su presencia se puede detectar con facilidad. (Carpio, 2013).

Una revisión desarrollada por Muhammad Hamidi, relacionada con la tecnología de biorreactores de membrana (MBR) para el tratamiento de aguas grises; destaca su eficiencia y viabilidad pues logra remociones superiores al 90% de DQO y más del 95% de TSS. Comparado con otros métodos como humedales construidos y filtración convencional, el MBR ofrece una mayor calidad de efluente y optimización espacial. Menciona las láminas de tipo sumergidas y planas como las opciones más comunes; y en el proceso se requieren procesos complementarios de pretratamiento (sedimentación y filtración fina para evitar el ensuciamiento de las membranas) y de postratamiento (desinfección con rayos UV o cloración para garantizar que el agua tratada sea apta). Por último, menciona que el agua tratada se puede utilizar en riego, descarga de inodoros y limpieza y que los desafíos operativos radican en la necesidad de la optimización del rendimiento y la falta de regulaciones para su implementación a gran escala. (Hamidi, 2025).

Por otra parte, en un artículo se identificó el estrés hídrico global y la estrategia de la reutilización de aguas grises; identificando que los sistemas convencionales de tratamiento incluyen métodos químicos (coagulación y floculación), físicos (filtración) y biológicos

(reactores biológicos y membranas). Sin embargo, más recientemente se han promovido soluciones basadas en la naturaleza como humedales construidos y muros vedes, dado a sus beneficios que se relacionan con el uso eficiente de recursos, mínimo consumo energético, mejora de la calidad del aire y biodiversidad, y resiliencia urbana frente al cambio climático. Se han priorizado los muros verdes sobre los humedales dado que estos últimos requieren mucho espacio lo que dificulta su implementación en áreas urbanas. (Galvao, et al., 2025).

Existen dos tipos de muros verdes: Fachadas verdes (plantas trepadoras que crecen desde el suelo y se adhieren a la pared) y Muros vivos (plantas cultivadas en estructuras independientes que pueden ser continuas o modulares. Los modulares son más adecuados para el tratamiento de aguas grises puesto que permiten un mejor control del drenaje y reducen el contacto con el agua tratada; por lo anterior se analizaron 33 estudios en 12 países; mostrando que en climas templados había mejor rendimiento en el tratamiento respecto a los climas áridos; además se desarrollaron ecuaciones de regresión para predecir la eficiencia del tratamiento en función de la carga másica aplicada; concluyendo que los muros verdes son una buena solución dado que permiten la reutilización y a la vez generan beneficios ambientales; sin embargo, su eficiencia depende del clima, diseño del sistema y tipo de sustrato utilizado. (Galvao, et al., 2025).

Otra investigación desarrollada evalúa el desempeño de muros verdes para el tratamiento de aguas grises en zonas urbanas densamente pobladas, con énfasis en la eliminación de compuestos orgánicos xenobióticos (XOC). Para ello se utilizaron 8 especies de plantas en combinación con un medio filtrante óptimo (fibra de coco + zeolita + perlita) y variaron condiciones operativas como carga hidráulica, frecuencia de dosificación y periodos de secado durante un año; encontrando que se eliminaron más del 80% los XOC hidrófobos y con carga

positiva, para los XOC hidrófobos y con carga negativa se mostró variabilidad en su eliminación dependiendo de la especie vegetal y las condiciones del experimento; por otra parte, el sistema eliminó de forma eficiente contaminantes de hasta 120 L/m2/día, cuando el agua se dosificó en pulsos con intervalos de secado. (Hafiz, et al., 2025).

En otro artículo cuyo objetivo era evaluar el desempeño del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante un muro verde vertical (vertECO®); el cual consiste en balsas escalonadas dispuestas verticalmente, con flujo subsuperficial horizontal, se trató un caudal de 500 L/día de aguas residuales previamente tratadas mecánicamente, el agua se ozoniza tres veces al día antes de su reutilización. Se establecieron unos parámetros de tratamiento y se identificaron los porcentajes de remoción; concluyendo que el efluente final después de la ozonización cumple con la clase B de la regulación de reutilización de agua de la UE, permitiendo su uso para riego agrícola y que existen beneficios adicionales del sistema como sostenibilidad, eficiencia energética, optimización del espacio, regulación microclimática y propiedades de reutilización. (Vobruba, et al., 2024).

Otro estudio desarrollado en Costa Rica buscaba evaluar los factores técnicos, socioeconómicos y regulatorio inmersos en la implementación de las Soluciones Basadas en la Naturaleza (NbS), para el desarrollo en entornos urbanos, motivado por que solo el 14% de las aguas residuales recibe el tratamiento adecuado; se realizó un análisis del a calidad del agua en la que se evaluó el desempeño de un prototipo de NbS y se hizo una investigación socioeconómica y regulatoria mediante entrevistas, encuestas y observaciones de campo. Los resultados principales demostraron la capacidad del prototipo para reducir los contaminantes en el agua gris, pero además se evidenció la falta de gestión eficaz y mecanismos de financiamiento para su

implementación y se identificaron barreras como percepciones negativas en torno a los olores y proliferación de mosquitos. Lo anterior destaca la importancia de abordar de forma integral la implementación de NbS, pues a pesar de ser viable técnicamente requiere enfoques de financiamiento, normativa y percepción social. (Pérez, et al., 2024).

Un estudio publicado en el 2024 buscaba evaluar la eficiencia de un sistema de tratamiento domiciliario para reutilización en riego de jardines y usos indirectos, en este se utilizaron medios filtrantes de geotextiles no tejidos (termosoldados y punzonados) y un textil de algodón tejido. Durante un año se analizaron diferentes tazas de filtración de 15 y 25 m3/m2/día en seis ciclos. Los resultados mostraron que los mejores niveles de remoción fueron de la combinación de geotextil no tejido punzonado en doble capa con textil de algodón tejido. Por otra parte, se evidenció una remoción baja de DQO la cual mejoró con la adición de textil de algodón tejido y el sistema permitió un ahorro del 63% del consumo diario de gua, reduciendo los costos de facturación en un 22.50%. (Hassan, et al., 2024).

Otra estrategia que se ha evaluado para el tratamiento sostenible de aguas grises consiste en la implementación de un sistema de policultivo de microalgas junto con un nanocompuesto de óxido de zinc y carbono activado granular, para ellos se utilizó un fotobiorreactor durante 15 días en un lote, y se obtuvo una remoción del 80% de carbono orgánico total, un 94.2% de fosfatos y un 99.6% de amonio, lo que demuestra una alta eficacia para la remoción de nutrientes. Además, la biomasa microalgal obtenida tuvo un alto valor calórico, es decir, un aumento en su densidad debido a la presencia del nanocompuesto, característica favorable para su aprovechamiento energético. En general el sistema demostró ser viable, pues mantiene eficiencias de eliminación

superiores el 69% en cuatro ciclos y el agua tratada cumplió con los parámetros necesarios para su reutilización en descargas sanitarias. (Bhanu, et al., 2024).

El uso de polímeros como coagulantes, con énfasis en el policloruro de aluminio (PAC) para mejorar la calidad del agua tratada con énfasis en su reutilización se ha desarrollado en otra investigación, que aborda la escasez de agua en Egipto, que tiene una dependencia del Rio Nilo superior al 95% y ve el tratamiento de aguas grises como una estrategia de sostenibilidad. En los ensayos del experimento se demostró que la adición de PAC mejora significativamente la calidad del agua, reduciendo parámetros como la turbidez, los sólidos suspendidos y los contaminantes inorgánicos, además las variaciones del pH del agua no comprometen su efectividad, facilitando su aplicación en diversos entornos. Operativamente se evidenció un bajo requerimiento de dosificación y una pequeña producción de lodos, haciendo una remoción de contaminantes eficiente y reduciendo costos. Lo anterior indica que la estrategia puede ser viable para aplicaciones no potables en regiones áridas como Egipto. (Soussa, et al., 2024)

A la par con el análisis de sistemas de tratamiento de aguas grises on-site se evidencian nuevos desafíos, uno de ellos es la presencia de microplásticos, ya que pueden comprometer la calidad del agua y tener implicaciones ambientales, por esta razón, en un artículo desarrollado se investigaron ocho instalaciones de tratamiento de cuatro tipos distintos (A, B, C, y D), tres de ellas (A, B, y C) son sistemas comerciales empaquetados y la otra (D) es un filtro de arena convencional, se evaluó la eficiencia de estos en la eliminación de materia orgánica, nutrientes, surfactantes, bacterias indicadoras y microplásticos. El desempeño de los sistemas fue variable, pues los tipos A y D lograron reducciones mayores al 90% en materia orgánica, con respecto a los nutrientes se logró una mejor eliminación de nitrógeno y fósforo y la eliminación de los

microplásticos no fue del todo eficiente en los sistemas, por ello se sugirió la incorporación de filtros de fósforo o precipitación química para mejorar su remoción y se indicó la necesidad de mayor investigación para mejorar la eliminación de microplásticos en sistemas descentralizados, planteando el uso potencial del agua tratada para riego agrícola evaluando parámetros adicionales de su calidad. (Sami, et al., 2024).

Es de gran relevancia para la implementación de estrategias de tratamiento de aguas grises abordar no solo el enfoque técnico sino incorporar la dimensión social, esto se realizó en una investigación sobre el agua gris en Sahel, donde se evaluó como la población local percibe su reutilización en la agricultura. En este documento se combina el análisis de laboratorio de 40 muestras de agua gris con 240 encuestas a hogares rurales, donde los principales hallazgos incluyeron que el 80% de los hogares descargan el agua gris con tratamiento alguno a pesar de que la mayoría de los encuestados reconocen los riesgos sanitarios asociados, además también mostraron disposición de reutilizar el agua gris en la agricultura e instalar sistemas de tratamiento. Sin embargo, los análisis de las muestras indican que el agua gris no cumple con los límites de descarga, por lo que se recomienda considerar un tratamiento biológico. Este estudio muestra otro componente necesario en la literatura relacionada pues explora la percepción pública y las condiciones sociodemográficas de la región, aportando un enfoque integral y destacando la necesidad de diseñar sistemas adecuados y de implementar campañas de concienciación y capacitación. (Tidiane, et al., 2024).

Las comunidades rurales en Jordania tienen dificultades para acceder a sistemas centralizados de tratamiento de aguas residuales dado sus costos elevados y la baja densidad poblacional, por esta razón con el objetivo de evaluar la viabilidad cumpliendo con los

estándares para reutilización en riego agrícola, se planteó una solución descentralizada en la cual se utilizó un reactor anaerobio de mando de lodos de flujo ascendente (UASB) como tratamiento primario, cuya eficiencia radica en la degradación anaerobia de la materia orgánica y posteriormente, un humedal de flujo vertical (VFCW) sin plantas que sirvió como tratamiento secundario reduciendo la carga contaminante con bajos costos y sin producción de lodos. Los resultados arrojaron una eficiencia de remoción mayor al 90% en la mayoría de los parámetros evaluados, verificando que el agua tratada cumple con los estándares de esta región para su reutilización en riego, con un costo de implementación rentable. Además, se observó que se mejora la resistencia climática y se permite la participación comunitaria, destacando como principales desafíos la falta de conocimiento técnico y recursos económicos. (Obeidat, et al., 2024).

Debido a la crisis de escasez de agua que enfrenta Jordania y al alto índice de producción de aguas grises, la cual según datos asciende a 54 millones de m3 por año, se ha desarrollado una propuesta que consiste en un sistema de filtración solar sostenible, el cual está distribuido en cuatro etapas, que consiste en el uso de materiales naturales y carbón para reducir la materia orgánica y sólidos, que usa energía solar fotovoltaica para el calentamiento y la desinfección del agua y la filtración descentralizada con el fin de tener bajo consumo energético y viabilizar su uso en viviendas individuales. Se obtuvo una reducción de turbiedad del 92%, una reducción de DQO del 95% y una eliminación de la bacteria Escherichia Coli del 100%, así como disminución significativa en los coliformes totales, por lo que el agua tratada cumple con los estándares de esta región para su reutilización en riego. En cuanto a su viabilidad económica se demostró que el sistema es rentable y sostenible, que reduce costos operativos al usar energía sola, que se

puede instalar en hogares, y que no genera residuos peligrosos ni costos adicionales al no usar productos químicos. (Abdallat, et al., 2024).

En una investigación realizada en el año 2024, utilizando la metodología "Methodi Ordinatio", se revisó el estado del arte sobre el uso de humedales construidos para el tratamiento y reutilización de aguas grises en el periodo de 2019 a 2023, destacando su importancia por su eficiencia, sostenibilidad y bajo costo, pero además haciendo énfasis en la necesidad de mejorar los factores que influyen en su desempeño. En los principales hallazgos se encontró que los humedales son una solución sostenible dado si bajo consumo energético y facilidad de operación, siendo especialmente útil en comunidades pequeñas y zonas sin acceso a alcantarillado. Como factores clave se determinó la incidencia que tienen el tipo de sustrato, la vegetación y los criterios operativos, pues de ellos depende la eficiencia del sistema. Para mejorar la eficiencia del tratamiento se destaca el uso de materiales innovadores como los residuos de construcción y biochar como sustratos alternativos. Dentro de los desafíos encontrados se identificó la falta de estandarización, pues no existen diseños estándar; lo que genera variabilidad en el desempeño de los sistemas que además son sensibles a factores como el clima, la carga contaminante y la presencia de patógenos, se requiere mayor investigación para realizar aplicaciones a escala y más estudios de análisis de costo-beneficio detallados. Finalmente mencionan que, a pesar de que la reutilización de aguas grises es fundamental, los estudios existentes apenas lo abordan; e indican que respecto a las regulaciones y normatividad, estas se han endurecido para el vertimiento de aguas tratadas, evidenciando la necesidad inmediata de optimizar los sistemas de tratamiento para cumplir los estándares. (Santos, et al., 2024).

En el año 2018, en Lima, Perú se desarrolló una investigación que cuyo objetivo era desarrollar un sistema de tratamiento de aguas grises para fomentar el ahorro hídrico en un edificio multifamiliar con el propósito de disminuir el consumo de agua potable (existen problemas en algunos sectores de la ciudad para el acceso al agua potable). En el estudio se tomó una muestra de 12 habitantes del edificio, analizando su consumo de agua antes y después de la implementación del sistema. El diseño del sistema constaba de varias etapas: la captación del agua gris (red de tuberías que recogían el agua de dichas, lavamanos y lavanderías), posteriormente el proceso de filtración empleando un filtro de grava y arena para retener los sólidos suspendidos y otras partículas, luego se almacenaba en un tanque de polipropileno y finalmente se distribuía a puntos de reutilización, los cuales eran principalmente riego de jardines y limpieza de áreas comunes. Dentro de los resultados principales de identificó una reducción significativa en el consumo de agua potable (se evidenció en los recibos de pago antes y después de la implementación del sistema) y por otra parte el sistema permitió captar y reutilizar el agua gris eliminando impurezas físicas y mejorando su calidad. (Candiotti, 2018).

Pero no todo son beneficios, en este caso también es importante hablar de las limitaciones en torno al tratamiento y uso de aguas grises tratadas, pues a pesar de la creciente necesidad de usar aguas residuales, la falta de regulación y monitoreo de los contaminantes puede plantear riesgos ecológicos y sanitarios. En un estudio desarrollado se abordó el impacto de los contaminantes químicos emergentes (CECs) en el medio ambiente y la salud humana; para ello se realizó un metaanálisis basado en datos de aguas residuales en Suecia, evaluando la toxicidad y persistencia de los CECs cuyos hallazgos clave fueron los siguientes (Khan, et al., 2024):

- Baja tasa de reutilización del agua residual: Menos del 3% del agua residual tratada se utiliza, y solo algunas regiones utilizan aguas residuales tratadas para riego en Suecia, a pesar de la escasez.
- Deficiencias en el tratamiento: Las plantas de tratamiento convencionales no están diseñadas para eliminar la mayoría de los CECs, y los efluentes de estas son una fuente principal de contaminación química.
- Se evaluaron 14 parámetros de riesgo (ecológicos, ambientales y de salud humana), se identificaron 30 compuestos con amenaza ecológica (cociente de riesgo ≥ 1), y 16 de estos compuestos son persistentes y móviles, lo que aumenta su peligro ambiental. (Khan, et al., 2024).

Todo lo anterior fundamenta la necesidad de implementar normativas estrictas, con enfoque de tratamiento y monitoreo constante; destacando la urgencia de regular los CECs en el tratamiento con el fin de garantizar su reutilización, para ello se propone un modelo de evaluación en el que se priorizan los compuestos más peligrosos y se dan estrategias para su eliminación, finalmente menciona su aplicabilidad a otras regiones reiterando la importancia de trabajar de la mano con políticas de reutilización y concienciación pública. (Khan, et al., 2024).

Con todo lo anterior se evidencia que la reutilización de aguas grises es una estrategia sostenible que se puede aplicar en diversos sectores (riego de áreas verdes, descarga de inodoros, riego agrícola, limpieza de espacios, entre otros), su implementación permite reducir la presión sobre las fuentes hídricas y minimizar la contaminación, al tiempo que genera beneficios económicos (reducción de costos de consumo de agua potable). Sin embargo, su implementación tiene varias barreras; técnicamente, la variabilidad en la composición del agua gris puede afectar

la eficiencia de los sistemas, económicamente los costos de implementación y la falta de incentivos pueden dificultar su adopción a gran escalada y socioculturalmente la concepción negativa sobre el uso de agua "sucia" y la falta de conocimiento. A pesar de estos desafíos el desarrollo eficiente de estrategias con estrategias de financiamiento y socialización permitirán contribuir a la gestión hídrica.

2.5 Marco Legal

En Colombia el marco legal en cuanto al tratamiento y aprovechamiento de aguas residuales refleja la importancia (cada vez más evidente) de la gestión sostenible de este recurso. A pesar de que la legislación o normatividad no está dirigida de forma específica al tratamiento de aguas grises, si representa una base útil para abordar su manejo y aprovechamiento.

Por otra parte, es importante mencionar que actualmente no hay referentes normativos a nivel local que aborden el tratamiento de aguas grises, evidenciando la necesidad de interpretar y aplicar la normatividad existente de forma adaptativa.

En la Tabla 2 se presenta una compilación de las principales normas que conforman la legislación relacionada con la gestión ambiental, usos del agua y saneamiento básico; descritos brevemente, proporcionando un marco de referencia para abordar los obstáculos y oportunidades en la implementación de proyectos, a pesar de carecer de regulaciones específicas.

Tabla 2.

Normatividad Colombiana Relacionada.

Normativa	**Descripción**
Decreto 2811 de 1974	Establece las bases para abordar la gestión ambiental en Colombia, abarcando disposiciones sobre el uso y aprovechamiento de aguas, y la prevención y control de la contaminación.
Ley 9 de 1979	Dicta Medidas Sanitarias, regula el control sanitario de los usos del agua, señala algunas disposiciones generales, reglamenta lo relacionado a aguas superficiales, aguas subterráneas, aguas lluvias, así como su conducción, estaciones de bombeo y potabilización del agua.
Resolución 1256 de 2021	"Por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones." Establece lineamientos para su tratamiento y aprovechamiento con criterios de sostenibilidad y salud pública, así como requisitos de calidad para su reúso.
Decreto 1594 de 1984	Reglamenta los usos del agua y los residuos líquidos. Establece normas de vertimientos, criterios de calidad para diferentes usos del agua, y procedimientos para la obtención de permisos de vertimiento. Define responsabilidades en el control y vigilancia de la calidad del agua.
Ley 99 de 1993	Crea el Ministerio del Medio Ambiente y organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). Establece los fundamentos de la política ambiental colombiana y asigna responsabilidades para la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables.
Ley 373 de 1997	Establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua. Obliga a incorporar programas y proyectos para el uso eficiente del agua en los planes ambientales regionales y municipales.
RAS 2000 (actualizado periódicamente)	Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Proporciona criterios para el diseño, operación y mantenimiento de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Incluye especificaciones técnicas detalladas.

CONPES 3177 de 2002	Define acciones prioritarias y lineamientos para la formulación del Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales. Establece estrategias para mejorar la calidad del recurso hídrico de la Nación.
Resolución 1433 de 2004	Reglamenta los Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV). Exige a los prestadores del servicio de alcantarillado la planificación de proyectos para el saneamiento y tratamiento de vertimientos.
Decreto 3930 de 2010	Reglamenta los usos del agua y residuos líquidos. Establece disposiciones relacionadas con los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados. Define el Ordenamiento del Recurso Hídrico y criterios de calidad para diferentes usos.
Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico de 2010	Establece los objetivos, estrategias, metas, indicadores y líneas de acción para el manejo del recurso hídrico en el país. Promueve la gestión y el uso eficiente y eficaz del agua.
Decreto 1076 de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible". Compila y racionaliza el sector ambiental.
Decreto 1077 de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio". Relacionado con el saneamiento básico, especialmente en lo referente a la vivienda y el desarrollo territorial.
Decreto 582 de 2023	Por el cual se reglamentan las disposiciones de Ecourbanismo y Construcción Sostenible del Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C.
Resolución 1207 de 2014	Adopta disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Establece las condiciones para el reúso del agua residual tratada y los criterios de calidad requeridos para los diferentes usos permitidos.

Capítulo 3. Diseño Metodológico

3.1 Tipo de investigación

Este proyecto se desarrolla dentro de una investigación de tipo cualitativa, con naturaleza exploratoria y descriptiva, ya que busca una comprensión integral del tema de estudio; analizando la viabilidad de los sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises, describiendo aspectos técnicos, económicos y socioculturales en el contexto local de Ocaña, Norte de Santander.

El enfoque exploratorio se argumenta en la carencia de estudios, normatividad e investigación local sobre la implementación de sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises, haciendo necesario el proceso de indagación para su aplicabilidad en la región. De igual forma, la investigación es descriptiva, puesto que permitirá caracterizar los sistemas de tratamiento de aguas grises, sus principios de funcionamiento y propiedades técnicas, criterios de selección y factores que a pesar de no ser técnicos influyen completamente en su adopción.

Para el desarrollo de la investigación, se utilizarán métodos cualitativos, como entrevistas semiestructuradas y entrevistas con actores clave como residentes, profesionales del área y funcionarios públicos, todo esto con el fin de comprender aspectos como las oportunidades y barreras en torno a la implementación; así como la percepción en torno a la adopción de estos sistemas. Además, se hará una descripción de las variables relacionadas, tales como la capacidad de tratamiento, la eficiencia de los sistemas de reutilización de aguas grises, la reducción en el consumo de agua potable y el costo de implementación.

3.2 Seguimiento metodológico del proyecto

El seguimiento metodológico del proyecto se describe paso a paso en la Tabla 3, que incluye los objetivos de la investigación, con las actividades que les corresponden y el indicador para medir cada una de ellas.

Tabla 3.

Modelo metodológico.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	ACTIVIDADES POR OBJETIVO	INDICADOR POR ACTIVIDAD
Realizar un diagnóstico integral de la situación actual sobre el conocimiento, actitudes y percepciones de los habitantes y profesionales de la construcción respecto a la reutilización de aguas grises, mediante técnicas de investigación cualitativa y cuantitativa, con el fin de que se identifiquen las necesidades y oportunidades locales.	Investigar estudios previos y documentación relevante sobre las aguas grises y su percepción.	Número de documentos (mínimo 15), que permitan enriquecer el marco teórico del proyecto.
	Diseño y validación de instrumentos de recolección de datos (encuestas y entrevistas).	Instrumento de recolección de datos diseñado y validado (Sí/No).
	Aplicación de encuestas a habitantes y profesionales de la construcción en Ocaña.	Número de encuestas aplicadas (Meta: 75% de la muestra objetivo).
	Realización de entrevistas a expertos locales en construcción y gestión hídrica.	Número de entrevistas realizadas (Meta: 6 entrevistas).
	Análisis cualitativo de la información obtenida.	Resultados analizados se integran al diagnóstico (Sí/No).
Analizar el marco regulatorio, las políticas ambientales existentes y los sistemas de	Revisión documental del marco normativo en materia de tratamiento de aguas grises.	Número de documentos normativos revisados (Meta: 5 documentos relacionados).

tratamiento de aguas grises implementados en diversas regiones, mediante una revisión documental y estudios comparativos, con el fin de que se determinen oportunidades de mejora, incentivos y estrategias que fomenten la reutilización de estas aguas en el sector de la construcción.	Estudio comparativo de sistemas de tratamiento de aguas grises.	Número de casos analizados (Meta: 5 casos).
	Identificación de incentivos, barreras y oportunidades de mejora en el marco regulatorio.	Análisis normativo con incentivos y barreras identificadas (Sí/No).
	Consulta a autoridades locales y nacionales sobre la normativa aplicable a Ocaña.	Reuniones o entrevistas realizadas con autoridades (Meta: 3 consultas).
Definir una estrategia integral que promueva la implementación eficiente y sostenible de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises, mediante la síntesis de la información recopilada y el diseño de propuestas adaptadas al contexto local; enfocado en la reducción del consumo de agua potable y la gestión hídrica sostenible, considerando los aspectos ambientales, sociales y económicos.	Identificación y evaluación de tecnologías de tratamiento adecuadas para el contexto de Ocaña.	Número de tecnologías evaluadas (Meta: 4 tecnologías).
	Análisis de la viabilidad técnica, económica y ambiental de las tecnologías seleccionadas.	Resultados de análisis de viabilidad de tecnologías (Sí/No).
	Diseño y validación de la propuesta estratégica para la implementación de sistemas de tratamiento.	Estrategia propuesta entregada y validada con actores clave mediante entrevista y/o encuesta (Mínimo 5 actores).
	Elaboración del informe final de estrategia integral con conclusiones y recomendaciones.	Informe de estrategia final entregado (Si/No).

3.3 Población.

Para el presente estudio sobre la implementación de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises en edificios residenciales de la ciudad de Ocaña, Norte de

Santander, la población se define como todos los edificios residenciales ubicados en esta área geográfica. Estos edificios serán el objeto de investigación ya que en ellos se pretende analizar la viabilidad de instalar sistemas de tratamiento de aguas grises.

Los elementos por investigar deben cumplir con ciertas características y la población está delimitada en términos de espacio (ciudad de Ocaña) y tiempo (durante el periodo de la investigación). Hasta la fecha, no se cuenta con el total exacto de edificios residenciales en la ciudad, pero se ha solicitado esta información a las entidades pertinentes. Este dato será crucial para aplicar correctamente la fórmula de población finita.

3.4 Muestra.

La muestra es una parte representativa de la población total, que permitirá analizar las características relevantes para la investigación. Dado que el objetivo principal del proyecto no es realizar cálculos estadísticos sino comprender las percepciones, barreras y oportunidades en torno a la implementación de sistemas de tratamiento de aguas grises; se utilizará un muestreo no probabilístico, de naturaleza intencional o por criterio.

Este método permite seleccionar, con base en su conocimiento, experiencia o relación con el tema de estudio, a los participantes y para ello se trabajará con edificios residenciales seleccionados en función de ciertas características definidas. Se tendrán en cuenta informantes clave como profesionales del sector de la construcción, gestores ambientales, funcionarios públicos, que brindarán información relacionada sobre normativas, viabilidad técnica y operática, desafíos y oportunidades de implementación, entre otros. Y finalmente, a los

habitantes de los edificios seleccionados se les aplicarán encuestas y entrevistas para conocer su percepción, actitud y conocimientos sobre la reutilización de aguas grises.

De esta manera se garantiza que la investigación aborde factores no solo técnicos, sino sociales y económicos que influyen en la adopción de los sistemas, proporcionando información detallada para su diseño ajustado a la realidad local.

Teniendo en cuenta lo anterior, donde los participantes se intencionalmente, por su relación con el tema de estudio. Los criterios de selección de edificios incluyen las siguientes características: contar con un mínimo de tres pisos y tener un diseño adecuado para la instalación de sistemas de tratamiento de aguas grises. Para los informantes clave se incluirán residentes de edificios seleccionados interesados en conocer los sistemas de tratamiento de aguas; profesionales del sector de la construcción, con experiencia en construcción de edificios y/o implementación de tecnologías sostenibles y funcionarios públicos de entidades locales encargadas de la regulación local en materia de construcción.

La selección de los informantes se hará con base en su capacidad de proporcionar información relevante sobre desafíos y oportunidades para la implementación de sistemas t será un número limitado.

3.5 Diseño de instrumentos de recolección de la información y técnicas de análisis de datos

En este proyecto, se utilizarán las siguientes técnicas e instrumentos de recolección de información:

Observación: Esta técnica será empleada para recopilar información sobre el estado de la infraestructura de edificios en Ocaña y su relación son los sistemas de tratamiento de aguas grises. Esto se hará utilizando como instrumento una guía de observación, con la que se evaluarán las condiciones de los edificios residenciales, la posible existencia de sistemas de aprovechamiento de aguas residuales, las características constructivas y posibles limitaciones o potencialidades en cuanto a la adopción de los sistemas. Los aspectos por evaluar incluirán la infraestructura hidrosanitaria, el tipo de materiales de las redes de alcantarillado interno, la existencia o no de sistemas de reutilización de aguas grises, los posibles puntos de captación, disposición y/o reúso de aguas grises y la percepción de los residentes sobre las instalaciones y el uso de aguas grises. De esta manera se podrán documentar las condiciones del entorno, siendo base para el análisis de viabilidad en el contexto local.

Análisis documental: Se recopilarán y analizarán estudios, documentos, artículos y reportes relacionados con la reutilización de aguas grises, con el fin de elaborar un marco teórico sólido que respalde el proyecto. Para ello, se utilizarán fichas de revisión como instrumento, con las que se podrá organizar la información clave de las fuentes analizadas. Las fichas de revisión incluirán el tipo de documento, su referencia bibliográfica, el objetivo principal, la metodología, los principales hallazgos y conclusiones, la relación del estudio con la investigación y su aplicación en el contexto local. De esta manera se asegura la correcta fundamentación teórica y normativa, garantizando el análisis de la información.

Entrevistas: Se realizarán entrevistas con actores clave como expertos locales, profesionales del área, residentes y autoridades competentes con el fin de explorar sus percepción, actitud y conocimientos con respecto a los sistemas de reutilización de aguas grises.

Para esto, se utilizará como instrumento la guía de entrevista, que se encuentra en el Apéndice 1, esta guía contiene preguntas abiertas, admitiendo opiniones flexibles y detalladas sobre los temas clave de la investigación. Los principales ejes temáticos de la entrevista incluyen el conocimiento general del tema, percepción sobre la viabilidad de los sistemas, así como las ventajas y desventajas en el contexto local, aceptación y disposición, marco normativo, barreras de aplicación técnicas, económicas y sociales y posibles estrategias que fomenten la implementación; esto permitirá identificar patrones, desafíos y oportunidades en cuento a la implementación.

Encuestas: Se aplicarán encuestas como técnica de recolección de información sobre la percepción, aceptación y conocimiento de los residentes y profesionales de la construcción respecto al uso de aguas grises en Ocaña, además de la identificación de barreras y oportunidades de implementación. El instrumento será un cuestionario compuesto por preguntas cerradas y abiertas, enfocado en el conocimiento y percepción de las aguas grises, la disposición de reutilizar aguas grises, percepción de barreras y desafíos y datos sociodemográficos. Este modelo de cuestionario se muestra en el Apéndice 2 y será aplicado de forma presencial o en línea (según la disponibilidad de los participantes) a una muestra seleccionada no probabilística, eligiendo participantes que representen los actores clave. Finalmente, los datos obtenidos serán analizados para identificar tendencias y relaciones relevantes entre las variables estudiadas.

A continuación, en la Tabla 4, se presenta la matriz de operacionalización de variables, que se implementará en el proyecto, en la cual se relacionaron los instrumentos de recolección de información con las variables definidas para el estudio, de esta manera se dispone de un marco que permite interpretar más fácilmente los resultados y aborda los aspectos relevantes.

Tabla 4.

Matriz de operación de variables.

Variable(s)	**Propósito** ***(definición operacional)***	**Conceptualización** ***(definición conceptual)***	**Dimensiones**	**Subdimensiones**	**Ítems** ***(Preguntas)***
Conocimiento sobre la reutilización de aguas grises.	Medir el nivel de información de los participantes sobre el uso y beneficios de las aguas grises en edificios residenciales.	Información previa que poseen los individuos respecto al concepto, beneficios y sistemas de reutilización de aguas grises.	Nivel de conocimiento	Familiaridad con el tema. Información previa.	Encuesta (Preguntas 1, 2 y 3)) Entrevista (Preguntas 1 y 5)
Actitudes hacia el uso de aguas grises.	Evaluar las opiniones de los habitantes y profesionales sobre el uso de aguas grises en su vida cotidiana y en el contexto de la construcción.	Opinión de los participantes respecto al uso de aguas grises para diversos fines (lavado, riego, descarga de inodoros, etc.).	Percepciones	Beneficios percibidos. Barreras percibidas.	Encuesta (Preguntas 4, 5, 7 y 8)) Entrevista (Preguntas 2 y 4)
Disposición para adoptar sistemas de tratamiento.	Identificar el nivel de disposición de los participantes para implementar tecnologías de tratamiento en sus edificios o proyectos de construcción.	La disposición o interés de los participantes en adoptar sistemas de tratamiento de aguas grises, considerando factores económicos, sociales y técnicos.	Disposición	Factores económicos. Factores sociales. Factores técnicos.	Encuesta (Preguntas 6, 7 y 8) Entrevista (Pregunta 3)
Eficiencia de los sistemas de tratamiento.	Evaluar el desempeño de las tecnologías en términos de capacidad de reutilización y calidad del agua tratada.	Capacidad técnica de los sistemas de tratamiento para remover contaminantes de las aguas grises y hacerlas	Desempeño técnico	Reducción en el consumo de agua potable.	Entrevista (Preguntas 9 y 10)

		aptas para su reutilización en un edificio residencial.		Calidad del agua tratada.	Encuesta (Preguntas 8 y 9)
Impacto ambiental de los sistemas de tratamiento.	Determinar los efectos (positivos o negativos) en el ambiente por la implementación de los sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises.	Consecuencias en el ambiente derivadas del uso de sistemas de tratamiento de aguas grises, presión sobre fuentes hídricas y gestión de recursos y residuos.	Impacto ambiental	Ahorro de agua. Reducción de desechos. Minimización de huella ecológica.	Entrevista (Preguntas 2 y 11) Encuesta (Preguntas 7 y 8)

3.6 Análisis de la información

El análisis de la información se realizará con base en un enfoque descriptivo, permitiendo identificar las características y tendencias de los datos recopilados en los instrumentos utilizados. Para esto, se organizarán los datos en tablas y gráficas utilizando herramientas como Microsoft Excel, que permitan visualizar mejor la orientación, frecuencias y porcentajes de respuestas. Con este análisis se describirá el nivel de conocimiento, percepción y actitud de los participantes sobre la reutilización de aguas grises.

Por otra parte, las entrevistas serán estudiadas mediante técnicas de revisión y análisis de contenido, con el fin de identificar patrones, áreas y conceptos, que permitirán comprender las oportunidades y desafíos percibidos por los actores clave respecto a la implementación de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises, teniendo en cuenta la naturaleza descriptiva del proyecto, las respuestas serán agrupadas en categorías según su temática y se apoyarán en citas textuales con el fin de mostrar los puntos de vista más relevantes de los entrevistados.

Es importante tener en cuenta que a pesar de que se emplearán herramientas de análisis (descriptivo) con el fin de presentar de formas más visible los resultados, no se hará un análisis correlacional de variables, puesto que se excede de la naturaleza del estudio. Por ende, el análisis se enfocará en describir y comprender las precepciones en el contexto local, donde la implementación de sistemas de tratamiento de aguas grises aún no se ha desarrollado. Esto permitirá abordar la información de manera integral para mostrar una visión general de la situación actual y oportunidades de mejora en cuanto al manejo y reúso de las aguas grises.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Realizar un diagnóstico integral de la situación actual sobre el conocimiento, actitudes y percepciones de los habitantes y profesionales de la construcción respecto a la reutilización de aguas grises, mediante técnicas de investigación cualitativa y cuantitativa, con el fin de que se identifiquen las necesidades y oportunidades locales.

El primer objetivo específico consistía la realización de un diagnóstico integral que permitiera conocer el nivel de conocimiento, las actitudes y las percepciones que tienen los habitantes de edificios residenciales y los profesionales del sector de la construcción (tanto técnicos como académicos) en la ciudad de Ocaña en cuanto al tratamiento y aprovechamiento de aguas grises. Este diagnóstico es una base fundamental para el análisis y formulación de estrategias viables y sostenibles, puesto que permite identificar factores culturales, sociales, económicos y técnicos relacionados; evidenciando las oportunidades, barreras y condiciones para su implementación.

Con el fin de obtener una visión completa de los criterios abordados en la investigación se diseñaron y aplicaron dos instrumentos de recolección de información: una encuesta estructurada, dirigida a habitantes y profesionales del sector, y entrevistas semiestructuradas aplicadas a actores clave con conocimiento relevante y experiencia en el área de investigación.

La encuesta se aplicó de forma virtual durante el mes de junio de 2025, utilizando la herramienta Google Forms, con el objetivo de facilitar el acceso a los participantes y optimizar la recolección de datos. Por una parte, dicha encuesta se aplicó a residentes de edificios, para lo cual se seleccionaron edificaciones ubicadas en diversas zonas de la ciudad (norte, sur, este,

oeste y centro) con el propósito de que la cobertura fuera integral, además se consideró su antigüedad como criterio de variabilidad (menos de 5 años, entre 5 y 10 años, y más de 10 años).

La selección se realizó bajo un criterio de muestreo no probabilístico intencional, definido por el investigador. En la mayoría de los casos, se realizó una visita inicial al edificio y se contactó al administrador para explicar el propósito del estudio y solicitar su colaboración en la difusión de la encuesta. En otros casos, el contacto fue directo con los residentes.

A continuación, en la figura X, se presenta la ubicación georreferenciada de los edificios incluidos en el estudio, identificados mediante un número en el área urbana de Ocaña, con el fin de facilitar la interpretación espacial de la muestra seleccionada. Posteriormente, en la Tabla 5 se detalla el listado de edificaciones encuestadas, incluyendo el número de identificación correspondiente a la figura, la ubicación y la antigüedad estimada.

Figura 4.

Ubicación geográfica de los edificios encuestados.

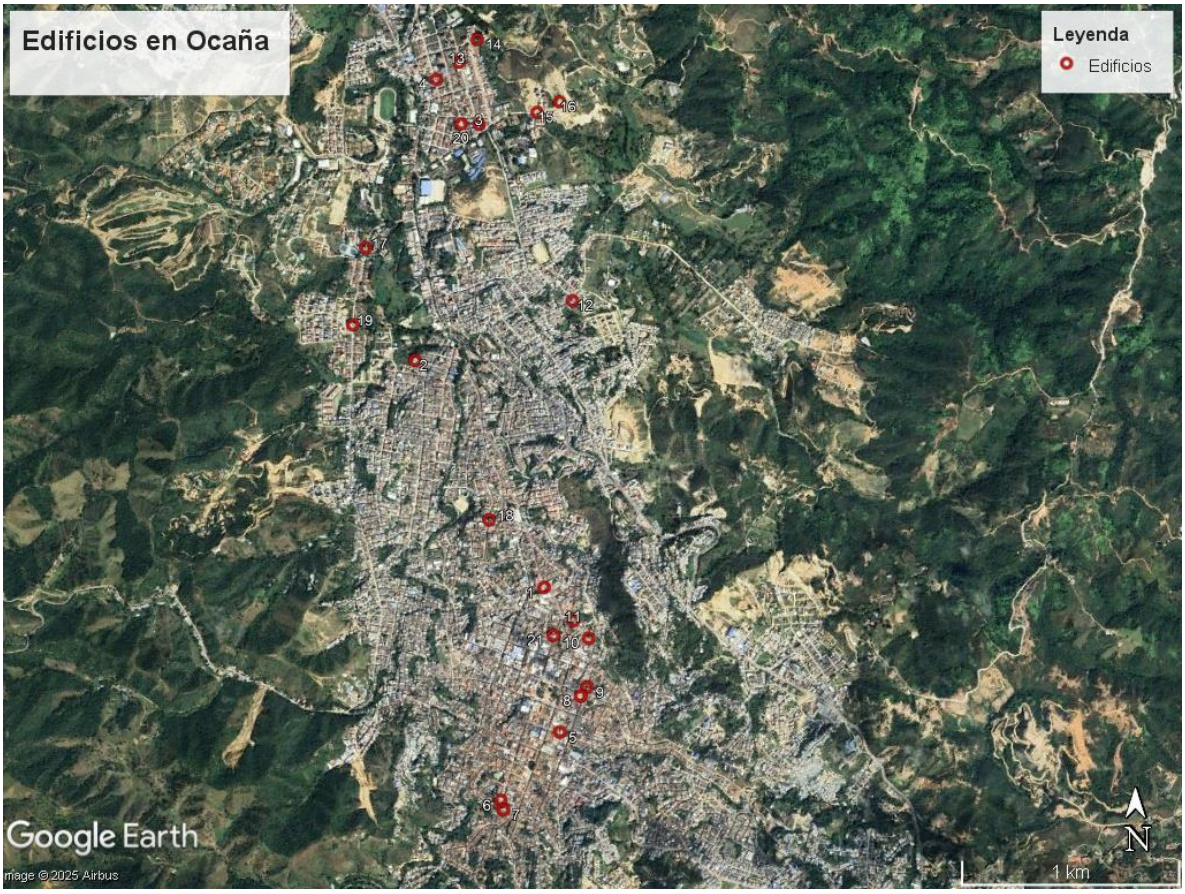


Tabla 5.

Edificios encuestados con su ubicación y antigüedad.

Número	Edificio	Zona de la ciudad	Antigüedad
1	Edificio Roma	Centro	Más de 10 años
2	Edificio Primero de Mayo	Centro-oeste	Entre 5 y 10 años
3	Conjunto Primavera Plaza	Noreste	Entre 5 y 10 años
4	Edificio Uno	Noreste	Más de 10 años
5	Edificio Bethel	Centro	Entre 5 y 10 años

6	Edificio Montreal	Centro-sur	Menos de 5 años
7	Edificio Milanés	Centro-sur	Entre 5 y 10 años
8	Edificio Central Park	Centro	Más de 10 años
9	Edificio Mariangola	Centro	Más de 10 años
10	Edificio Balcones de la Luz	Centro-este	Entre 5 y 10 años
11	Edificio ABC	Centro-este	Menos de 5 años
12	Edificio Juan Pablo II	Noreste	Entre 5 y 10 años
13	Edificio Dos	Noreste	Menos de 5 años
14	Edificio Primavera Select	Noreste	Menos de 5 años
15	Parque 34	Noreste	Entre 5 y 10 años
16	Parque Mayor	Noreste	Entre 5 y 10 años
17	Edificio Chikala	Oeste	Entre 5 y 10 años
18	Edificio AuraEva	Oeste	Entre 5 y 10 años
19	Edificio Torre Isa	Oeste	Menos de 5 años
20	Edificio San Sebastián	Noreste	Entre 5 y 10 años
	Edificio Torre del Conquistador	Centro	Más de 10 años

El otro grupo encuestado corresponde a profesionales del sector de la construcción, para ello se seleccionó personal con experiencia en diseño, ejecución, supervisión de obras o docencia en áreas relacionadas; en el contexto local. Esta categoría incluyó tanto ingenieros del sector privado como profesionales vinculados al ámbito académico; docentes universitarios con formación en ingeniería civil y conocimiento del entorno urbano de Ocaña. A estos profesionales se les explicó el objetivo del proyecto, su finalidad y se les remitió el formulario de forma

directa. Las entrevistas se desarrollados en modalidad virtual o presencial, de acuerdo con la disponibilidad del entrevistado.

4.1.1 Desarrollo y análisis de la encuesta

La encuesta fue uno de los instrumentos de recolección de datos empleados para realizar el diagnóstico. Su aplicación estaba enfocada en conocer el nivel de conocimiento, percepción, disposición y posibles barreras en relación con la reutilización de aguas grises en Ocaña. La información obtenida es clave para identificar factores de resistencia, aceptación, oportunidades de implementación y condiciones sociales y técnicas que se deben considerar en el diseño de estrategias. En total se obtuvo una muestra de 128 encuestas válidas, a continuación, se presentan los resultados organizados por categoría.

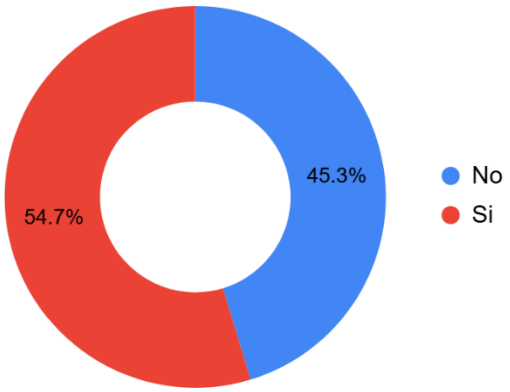
- **Conocimiento y percepción sobre las aguas grises**

Pregunta 1: ¿Ha escuchado antes el término “aguas grises”?

- Sí: 70 personas (54,7 %).
- No: 58 personas (45,3 %)

Figura 5.

Conocimiento del término "aguas grises".



La mayoría de los participantes (54,7 %) indicó haber escuchado el término "aguas grises", mientras que el 45,3 % señaló no conocerlo. Esto muestra un nivel de familiaridad parcial con el concepto en de la población, siendo un punto de partida importante para evaluar la aceptación y viabilidad de implementación. Aun así, existe una parte significativa de la población que no ha oído hablar del concepto, ya sea por falta de iniciativas informativas o porque el tema no ha sido divulgado formalmente en la ciudad de Ocaña. El resultado indica la necesidad de desarrollar estrategias de sensibilización y educación para mejorar la comprensión del concepto.

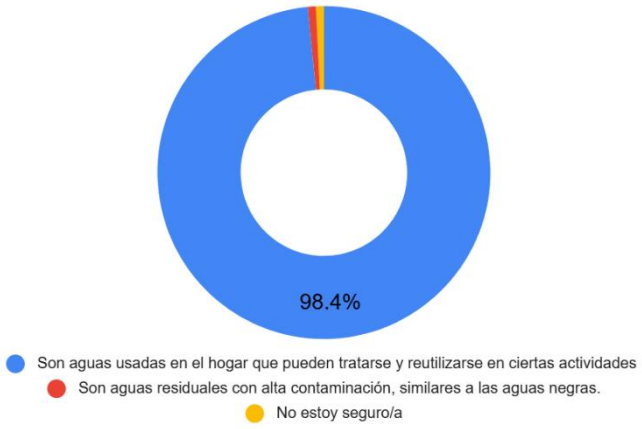
Pregunta 2: Las aguas grises son aquellas generadas en actividades domésticas como lavado de manos, duchas y lavandería, que pueden ser tratadas para su reutilización. ¿Cuál de las siguientes opciones cree que mejor describe las aguas grises?

- Son aguas usadas en el hogar que pueden tratarse y reutilizarse en ciertas actividades: 126 respuestas (98,4 %)

- Son aguas residuales con alta contaminación, similares a las aguas negras: 1 respuesta (0,8 %)
- No estoy seguro/a: 1 respuesta (0,8 %)
- Aguas lluvias recolectadas para uso doméstico: 0 respuestas (0 %)

Figura 6.

Identificación del concepto de aguas grises.



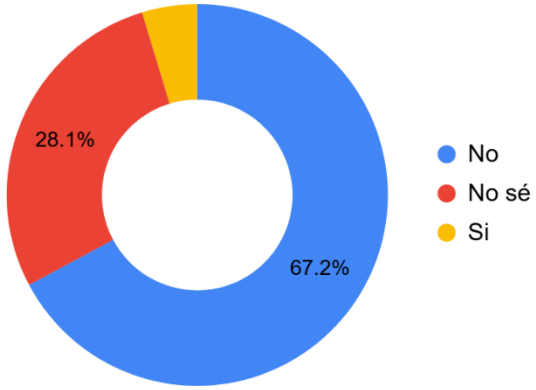
Los resultados reflejan una comprensión técnica bastante alta entre los encuestados del concepto de aguas grises, pues el 98,40% seleccionó la opción que las define correctamente como aguas usadas en el hogar que pueden tratarse y reutilizarse en ciertas actividades, indicando una precisión conceptual sobresaliente para la población en general. Esto indica que más allá no haber escuchado el término la mayoría de los encuestados logro diferenciar correctamente las aguas grises de otras categorías; pues solo hubo dos respuestas erróneas. Este dato es un indicador positivo pues demuestra una base de comprensión que facilita apropiación de soluciones.

Pregunta 3: ¿Sabe si actualmente reutilizan aguas grises en su hogar, edificio o comunidad?

- No: 86 personas (67,20%)
- No sabe: 36 personas (28,10%)
- Sí: 6 personas (4,70%)

Figura 7.

Reutilización actual de aguas grises.



La mayoría de los encuestados (67,20%) manifestó que no reutiliza aguas grises actualmente, mientras que un 28,10% manifestó no saber si lleva a cabo esta práctica ya sea en su hogar, edificio o comunidad. Por otra parte, solo un pequeño grupo, equivalente al 4,70%, respondió afirmativamente. Esto confirma que, aunque los encuestados indicaron un alto nivel de comprensión conceptual, su implementación práctica sigue siendo mínima. Además, más de la cuarta parte de la muestra indicó no saber si reutilizan aguas grises, sugiriendo una falta de información sobre estas prácticas a nivel colectivo. Finalmente, el reducido grupo que respondió afirmativamente probablemente se refiere a experiencias particulares o informales, más que a

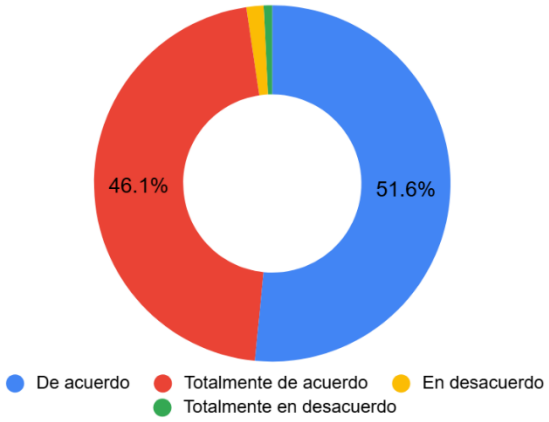
sistemas estructurados. Todo lo anterior indica la necesidad de fortalecer procesos de sensibilización.

Pregunta 4: ¿Considera que las aguas grises son un recurso desaprovechado?

- De acuerdo: 66 personas (51,60%)
- Totalmente de acuerdo: 59 personas (46,1 %)
- En desacuerdo: 2 personas (1,6 %)
- Totalmente en desacuerdo: 1 persona (0,8 %)

Figura 8.

Percepción del desaprovechamiento de aguas grises.



La percepción en general, de los encuestados es que las aguas grises representan un recurso subutilizado, ya que más del 97 % de los participantes (opciones “de acuerdo” y “totalmente de acuerdo”), coincidieron en que estas aguas se están desaprovechando actualmente. Esta percepción es coherente con el buen nivel de conocimiento sobre el concepto y reconocimiento de que la práctica es limitada. Esto refuerza la idea de que hay una actitud favorable con respecto al potencial de aprovechamiento de las aguas grises. Las pocas respuestas en desacuerdo indican que hay poca resistencia conceptual, siendo positivo para la formulación de estrategias que fomenten su uso.

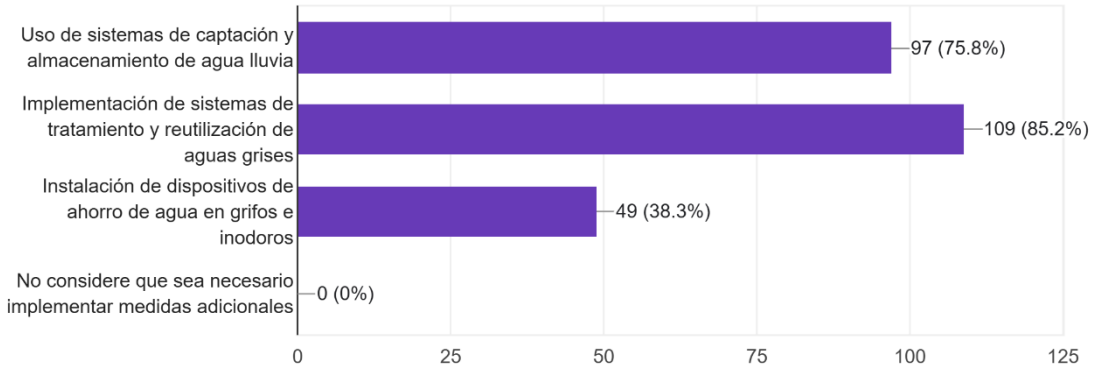
Pregunta 5: Según tratados internacionales sobre sostenibilidad, los nuevos proyectos de construcción deben incluir estrategias para el ahorro del recurso hídrico. ¿Qué medidas considera que podrían implementarse en Ocaña?

- Uso de sistemas de captación y almacenamiento de agua lluvia: 97 personas (75,8 %)
- Implementación de sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises: 96 personas (75,0 %)
- Instalación de dispositivos de ahorro de agua en grifos e inodoros: 49 personas (38,3 %)
- No considera que sea necesario implementar medidas adicionales: 0 personas (0 %)

Para esta pregunta se debe aclarar que los porcentajes corresponden al total de personas que seleccionaron una opción con respecto al total de respuestas, por ende, no suman 100 % ya que cada participante podía seleccionar más de una opción.

Figura 9.

Medidas propuestas para el ahorro hídrico.



Los resultados reflejan un alto grado de aceptación con respecto a la implementación de medidas sostenibles. La opción más seleccionada fue “implementación de sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises”, seguida por “uso de sistemas de captación y almacenamiento de agua lluvia”, y en tercer lugar “instalación de dispositivos de ahorro de agua en grifos e inodoros”. Esto demuestra que los encuestados priorizan las soluciones tecnológicas sostenibles orientadas al aprovechamiento del recurso hídrico; más allá de acciones individuales, y la combinación de estas medidas seleccionadas indica coherencia con el enfoque integral de eficiencia hídrica. Finalmente, el hecho de que ningún encuestado considere innecesarias las medidas refuerza la conclusión de conciencia colectiva sobre la necesidad de gestionar el recurso hídrico.

Los resultados obtenidos en esta categoría reflejan una buena base conceptual y percepción positiva por parte de los encuestados respecto a la reutilización de aguas grises. Aunque un buen porcentaje indicó no haber escuchado el término, casi la totalidad identificó

correctamente su definición técnica, sin embargo, muy pocos participantes manifestaron reutilizar aguas grises actualmente, dejando en evidencia la brecha existente entre el conocimiento y la aplicación práctica. Con respecto a la percepción la mayoría están de acuerdo con que las aguas grises con un recurso desaprovechado, siendo una crítica al modelo actual de gestión hídrica; lo cual se soporta con la disposición sobre la implementación de sistemas de tratamiento de aguas grises, y captación de agua lluvia. En síntesis, estas respuestas muestran una población informada y consciente sobre la necesidad de gestionar el uso del recurso hídrico, aunque limitada en la práctica e implementación.

- **Usos y disposición a reutilizar aguas grises**

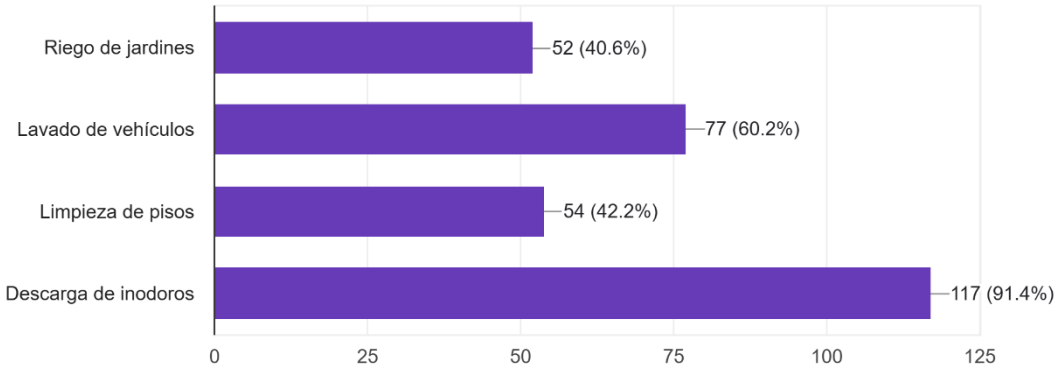
Pregunta 6: ¿Para qué actividades considera que serían útiles las aguas grises tratadas?

- Descarga de inodoros: 117 personas (91,4 %)
- Lavado de vehículos: 77 personas (60,2 %)
- Limpieza de pisos: 54 personas (42,2 %)
- Riego de jardines: 52 personas (40,6 %)

Para esta pregunta se debe aclarar que los porcentajes corresponden al total de personas que seleccionaron una opción con respecto al total de respuestas, por ende, no suman 100 % ya que cada participante podía seleccionar más de una opción.

Figura 10.

Actividades propuestas para reutilizar aguas grises.



Los resultados reflejan claridad respecto a las aplicaciones prácticas más viables para las aguas grises tratadas. La más seleccionada fue “descarga de inodoros”, seguida de “lavado de vehículos”, “limpieza de pisos” y por último “riego de jardines”, dejando en evidencia la visualización del potencial del recurso para sustituir el agua potable en funciones de alta demanda, todas coinciden en ser de uso doméstico y contacto indirecto, demostrando la comprensión adecuada respecto al riesgo sanitario. El orden de preferencia sugiere que los encuestados tienen una percepción práctica y funcional, priorizando aquellos que pueden tener un mayor impacto en el ahorro de agua potable; finalmente la variedad demuestra la disposición a considerar el reúso en distintas áreas del entorno doméstico.

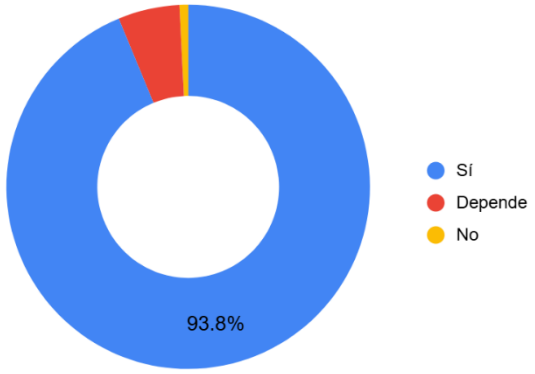
Pregunta 7: ¿Si tuviera un sistema de tratamiento de aguas grises en su vivienda, ¿lo utilizaría?

- Sí: 120 personas (93,8 %)
- Depende (sin especificar razón): 7 personas (5,5 %)
- No: 1 persona (0,8 %)

Aunque algunos encuestados marcaron la opción “depende”, ninguno especificó su justificación.

Figura 11.

Disposición a utilizar un sistema de tratamiento.



La mayoría de los participantes manifestó estar dispuesto a utilizar un sistema de tratamiento de aguas grises en su vivienda, indicando un alto gradeo de aceptación hacia estas soluciones sostenibles; lo cual es coherente con la percepción definida en la categoría anterior. Solamente uno de los encuestados expresó una negativa rotunda el uso y el 5,5 % condicionó su respuesta sin especificar causa alguna, lo cual indica que en general la aceptación no tiene barreras socioculturales negativas. Este resultado es relevante pues indica que, en una implementación de sistemas de tratamiento, no se enfrentarían resistencias sociales de fondo.

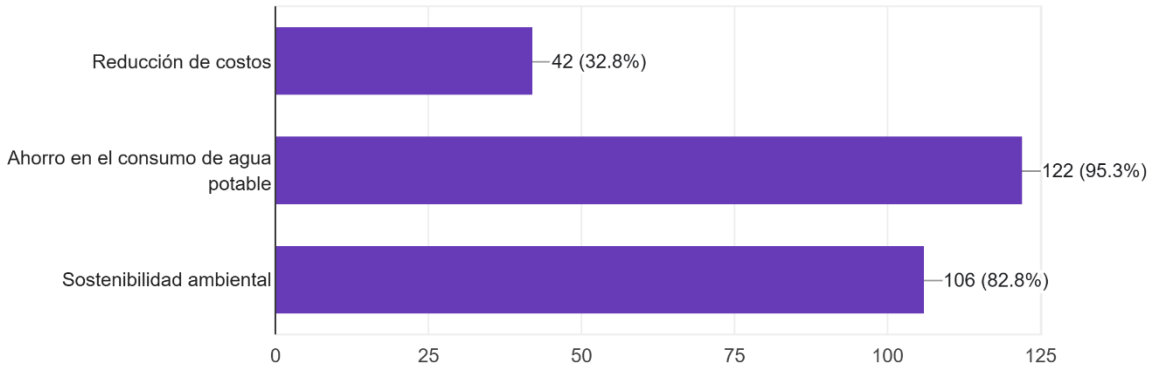
Pregunta 8: ¿Qué beneficios cree que traería el uso de aguas grises?

- Ahorro en el consumo de agua potable: 122 personas (95,3 %)
- Sostenibilidad ambiental: 106 personas (82,8 %)
- Reducción de costos: 42 personas (32,8 %)

Para esta pregunta se debe aclarar que los porcentajes corresponden al total de personas que seleccionaron una opción con respecto al total de respuestas, por ende, no suman 100 % ya que cada participante podía seleccionar más de una opción.

Figura 12.

Beneficios percibidos del uso de aguas grises.



La mayoría de los encuestados identifica en el uso de aguas grises una fuente de ahorro significativa en el consumo de agua potable (95,3 %), seguido por su contribución a la sostenibilidad ambiental (82,8 %), estas dos respuestas son dominantes y reflejan la conciencia ambiental y valor positiva del impacto en términos de eficiencia hídrica. Con respecto a la reducción de costos, fue mencionada por un porcentaje de 32,8 %, indicando que, aunque es relevante no es primordial, y depende más de los beneficios con el bienestar colectivo y gestión sostenible.

Los resultados de esta categoría evidencian una actitud favorable hacia la reutilización de aguas grises, acompañada de una percepción clara sobre sus posibles aplicaciones. Con respecto a los usos las respuestas demuestran que existe una comprensión adecuada de que las aguas

grises se pueden utilizar en actividades domésticas que no requieren agua potable, siendo reforzada por la cantidad de encuestados que indicó disposición para utilizar un sistema de tratamiento de aguas grises. Finalmente, en términos de beneficios percibidos se concluye que los encuestados reconocen el valor práctico y ambiental de las aguas grises.

- **Barreras y desafíos percibidos**

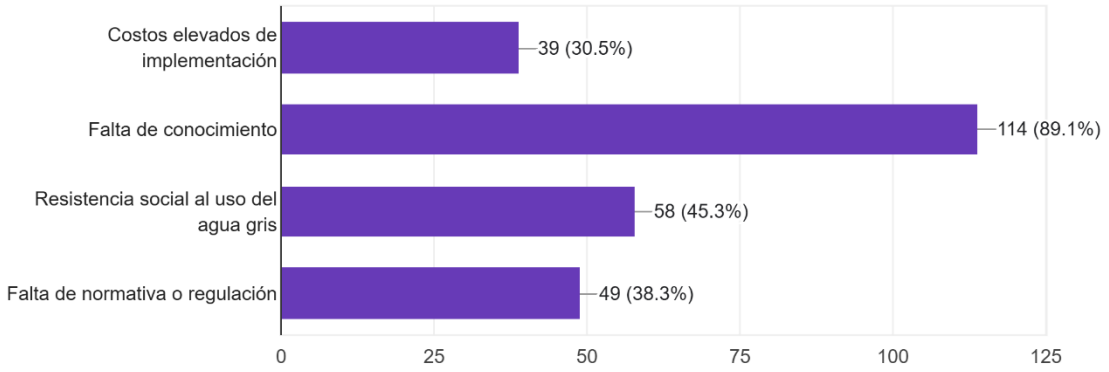
Pregunta 9: ¿Cuáles cree que son las principales barreras para el uso de aguas grises en Ocaña?

- Falta de conocimiento: 114 personas (89,1 %)
- Resistencia social al uso del agua gris: 58 personas (45,3 %)
- Falta de normativa o regulación: 49 personas (38,3 %)
- Costos elevados de implementación: 39 personas (30,5 %)

Para esta pregunta se debe aclarar que los porcentajes corresponden al total de personas que seleccionaron una opción con respecto al total de respuestas, por ende, no suman 100 % ya que cada participante podía seleccionar más de una opción.

Figura 13.

Barreras percibidas para el uso de aguas grises.



La barrera principal identificada por los encuestados es la falta de conocimiento sobre el tema, lo que condice con la observación realizada anteriormente respeto a la limitada apropiación práctica del concepto. Esto indica que el desconocimiento no es respecto al concepto sino a la información concreta de formas de implementación, beneficios, aspectos técnicos y normatividad. Por otra parte, identificaron la resistencia social al uso de agua gris, indicando que a pesar d la disposición hay preocupación colectiva, por posibles creencias erróneas, factores culturales o desconfianza de las tecnologías. En tercer lugar, se ubica la barrera de la falta de normativa o regulación y finalmente los costos elevados de implementación, lo que indica que, aunque son relevantes el componente sociocultural y la ausencia de información son los principales frenos en la adopción de sistemas de reuso de aguas grises.

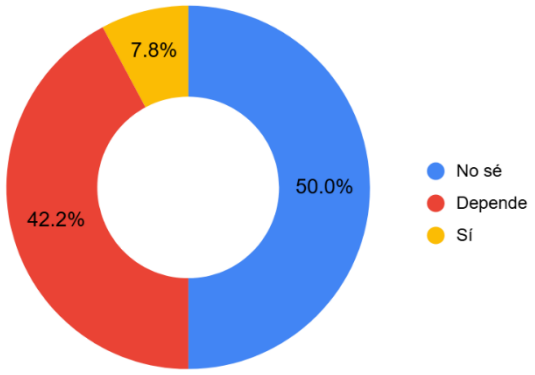
Pregunta 10: ¿Cree que los edificios en Ocaña están preparados para la implementación de sistemas de reutilización de aguas grises?

- No sabe: 64 personas (50,0 %)
- No: 54 personas (42,2 %)

- Sí: 10 personas (7,8 %)

Figura 14.

Percepción sobre preparación de edificaciones.



El 50 % de los encuestados manifestó no saber si los edificios en Ocaña están preparados para la implementación de sistemas de reutilización de aguas grises, mientras que el 42,2% respondió de forma negativa y solamente el 7,8% considera que si lo están. Estos resultados indican una percepción de incertidumbre frente a la preparación técnica y estructural de las edificaciones existentes; así como desinformación sobre las condiciones constructivas reales, también existe una percepción concreta de que los edificios no están diseñados ni adaptados para incluir este tipo de sistemas, lo cual se puede deber a la antigüedad de las construcciones, desconocimiento o ausencia de diseños sostenibles, indicando que es clave incorporar procesos de diagnóstico y evaluación estructural como parte de las estrategias de implementación.

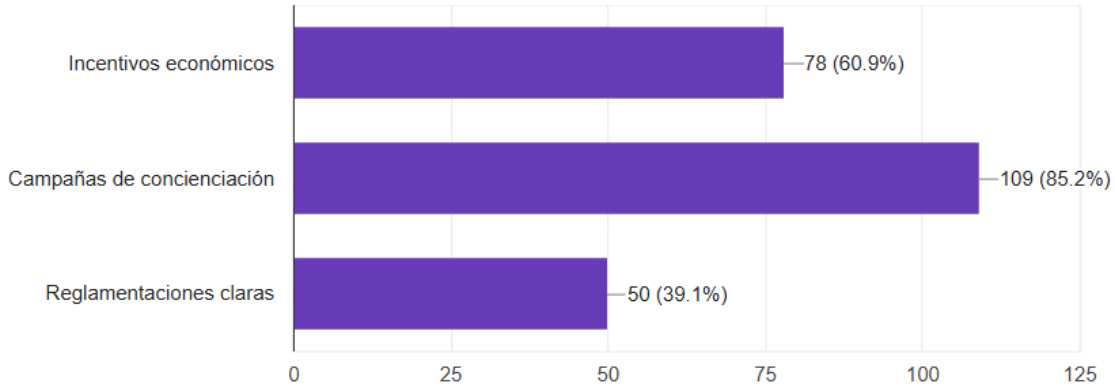
Pregunta 11: ¿Qué acciones cree que pueden tomarse para fomentar el uso de aguas grises?

- Campañas de concienciación: 109 personas (85,2 %)
- Incentivos económicos: 78 personas (60,9 %)
- Reglamentaciones claras: 50 personas (39,1 %)

Para esta pregunta se debe aclarar que los porcentajes corresponden al total de personas que seleccionaron una opción con respecto al total de respuestas, por ende, no suman 100 % ya que cada participante podía seleccionar más de una opción.

Figura 15.

Acciones propuestas para fomentar el uso.



Las campañas de concienciación fueron la acción más respaldada, lo que confirma que la percepción de desconocimiento y poca educación ambiental es una prioridad. Los incentivos económicos fueron seleccionados por 78 encuestados, demostrando que el aspecto financiero juega un rol importante en la decisión de adoptar sistemas de tratamiento, a pesar de no ser el único determinante. Finalmente, las reglamentaciones claras puedes identificadas por 50 de los encuestados, mostrando una necesidad de respaldo normativo con el fin de que exista seguridad jurídica, estándares técnicos y responsabilidad en el proceso de implementación.

Los resultados de esta categoría muestran que los principales desafíos están relacionados con factores informativos, culturales y de gestión institucional, más que con aspectos solamente

técnicos y económicos. En primer lugar, se identifica que el problema no radicaría en la viabilidad técnica, sino en la ausencia de condiciones que faciliten la adopción, tales como la educación, normalidad, promoción y acompañamiento social. Por otra parte, la percepción de baja preparación estructural se puede explicar por la antigüedad de edificaciones como por la falta de diseños sostenibles en proyectos realizados. Con respecto a las acciones, la comunidad espera que haya iniciativas integrales que involucren procesos educativos, apoyo institucional y directrices normativas. Todo esto refuerza la necesidad de acompañar cualquier estrategia técnica con educación y respaldo institucional.

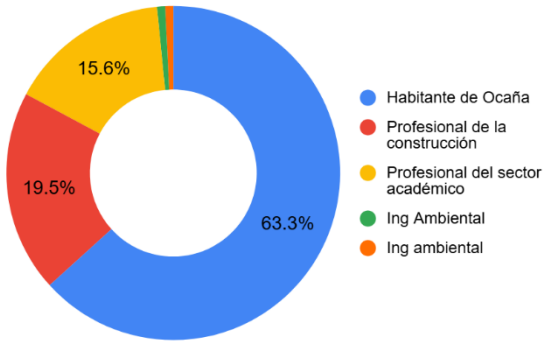
- **Información sociodemográfica**

Pregunta 12: ¿Cuál es su ocupación principal?

- Profesional de la construcción: 81 personas (63,3 %)
- Profesional del sector académico: 25 personas (19,5 %)
- Habitante de Ocaña (no vinculado al sector): 22 personas (17,2 %)
- Otros: 2 Ingenieros ambientales (considerados como habitantes)

Figura 16.

Distribución por ocupación principal.



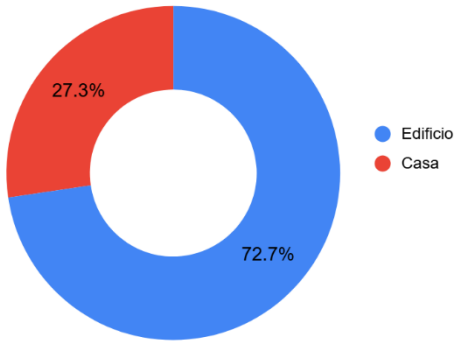
La muestra encuestada estuvo compuesta principalmente por habitantes de Ocaña, seguido por profesionales del sector de la construcción y del sector académico; lo cual corresponde al enfoque intencional del estudio que buscaba actores con conocimiento técnico como de residentes que son la base social clave; los profesionales académicos aportan la perspectiva crítica y normativa, fortaleciendo el diseño de estrategias basados en la realidad local. En general, las respuestas reflejan opiniones y criterios informados, dando validez al diagnóstico general.

Pregunta 13: ¿Vive en un edificio o en una casa?

- Vive en edificio: 93 personas (72,7 %)
- Vive en casa: 35 personas (27,3 %)

Figura 17.

Tipo de vivienda de los encuestados.



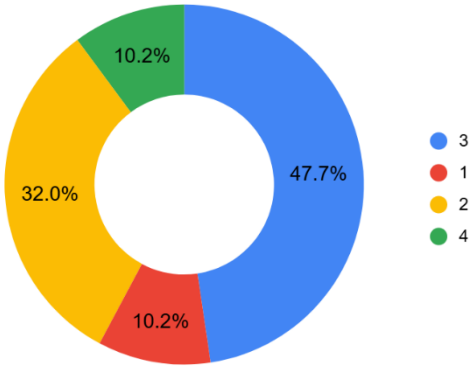
La mayoría de los encuestados, un 72,7% reside en edificios, mientras que un 27,3 % vive en casas; la proporción coincide con la intencionalidad del muestro, donde se buscó priorizar la participación de residentes en edificaciones. Las personas que indicaron vivir en casas deben pertenecer al grupo de profesionales ya sea del sector académico o de la construcción; y añade un valor al estudio porque permite contrastar percepciones y viabilidad, identificando diferencias contextuales.

Pregunta 14: ¿Cuál es el estrato socioeconómico de su vivienda?

- Estrato 3: 61 personas (47,7 %)
- Estrato 2: 41 personas (32,0 %)
- Estrato 1: 12 personas (10,2 %)
- Estrato 4: 13 personas (10,2 %)

Figura 18.

Distribución por estrato socioeconómico.



Casi la mitad de los encuestados pertenece al estrato 3, seguido por el estrato dos, lo que indica que la muestra está conformada principalmente por personas con un nivel socioeconómico medio. Los estrados 1 y 4 representan cada uno un porcentaje del 10,2 %. Esta composición coincide con la realidad urbana de Ocaña, donde la mayoría reside en estratos 2 y 3, especialmente en edificios multifamiliares. Finalmente, la representación de varios niveles socioeconómicos enriquece el análisis y permite considerar capacidad de inversión, percepción y disposición al cambio según condiciones económicas.

La caracterización de la muestra permite comprender el perfil de los participantes, con respecto a la distribución se integraron perspectivas técnicas como ciudadanas, fortaleciendo la validez e identificando percepciones reales de usuarios. La mayoría del grupo encuestado corresponde a habitantes de edificios, y la distribución por estrato socioeconómico confirma que la muestra está representada por población con un nivel socioeconómico medio, permitiendo afirmar que el diagnóstico cuneta con insumos representativos de los sectores técnico y social, vinculados en el entorno urbano, cumpliendo con el propósito de tener una visión integral.

4.1.2 Desarrollo y análisis de las entrevistas

Con el fin de que el diagnóstico sobre el nivel de conocimiento percepción y disposición para la reutilización de aguas grises en Ocaña fuera integral, se realizaron entrevistas semiestructuras a 12 actores clave, seleccionados por su experiencia técnica, institucional y académica en temas de gestión hídrica, construcción sostenible y normatividad.

Con estas entrevistas se buscaba abordar cualitativamente las oportunidades, barreras, aspectos técnicos y sociales asociados con la implementación de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises en edificaciones residenciales. Los participantes incluyeron profesionales del sector académico, consultores y diseñadores y representantes de entidades. Para la recolección de información se utilizó la entrevista estructurada en seis bloques temáticos, y se realizaron entre el 07 de mayo y el 18 de junio de 2025, en modalidad presencial o virtual de acuerdo con la disponibilidad del entrevistado. La información se organizó en fichas individuales, donde el contenido se abordó en cada una de las temáticas definidas, identificando los hallazgos clave, lo que permitió identificar integralmente los desafíos y oportunidades percibidos por los actores calve frente al tema de estudio en el contexto local; estas 12 fichas (una por cada entrevista) se pueden observar en el Apéndice 5.

A continuación, se muestra la Tabla 6, en la que se presenta un resumen donde se incluye la información general de los entrevistados: datos como el nombre, cargo, tipo de actor clave, fecha y medio de la entrevista. Los perfiles seleccionados fueron diversos, esto con el fin de hacer un análisis que aborde distintas perspectivas del entorno local y nacional, dando un carácter integral al diagnóstico.

Tabla 6.

Datos generales de profesionales entrevistados.

Nº	Nombre	Cargo / Rol	Tipo de actor clave	Medio	Fecha
1	Ing. Ray Carlos Ramírez	Ing. Civil - Docente ocasional UFPSO – Gestión hídrica y normatividad.	Académico - Técnico	Presencial	07 mayo 2025
2	Ing. Juan Carlos Rodríguez	Ing. Ambiental – Profesional técnico regional de CORPONOR.	Institucional – Ambiental.	Presencial	10 mayo 2025
3	Ing. Dibrey Paola Quintero	Ing. Civil - Docente ocasional UFPSO – Consultora en proyectos hidráulicos.	Académico – Técnico – Consultor.	Virtual	08 mayo 2025
4	Ing. Emilio Bonza Jaimes	Ing. Civil - Director de Planeación – Empresa de Servicios Públicos de Ocaña ESPO S.A.	Institucional – Técnico.	Presencial	14 mayo 2025
5	Ing. Sayda Montes Molina	Ing. Civil – Profesional de la subdirección de proyectos de agua potable y saneamiento Minvivienda.	Institucional - Nacional	Virtual	29 mayo 2025
6	Ing. Yeeny Lozano Lázaro	Ing. Ambiental - Docente ocasional UFPSO – Asesora en PSMV y seguimiento ambiental.	Académico – Técnico – Ambiental.	Virtual	30 mayo 2025
7	Ing. Harvey Pacheco Arias	Ing. ambiental – Profesional técnico del Instituto Departamental de Salud (IDS).	Institucional - Salud pública.	Virtual	30 mayo 2025
8	Ing. Juan Carlos Isaza	Ing. Civil - Constructor y consultor regional privado.	Técnico - Consultor – Empresarial.	Presencial	06 junio 2025
9	Ing. Willinton Carrascal Muñoz	Ing. Civil - Secretario de Planeación – Municipio de Ocaña	Institucional - Local - Normativo.	Virtual	10 junio 2025
10	Ing. Miguel Orejuela Duarte	Ing. Civil - Experto en construcción sostenible - Coautor Casa Colombia.	Académico – Nacional – Experto sostenibilidad.	Virtual	16 junio 2025

11	Ing. Gustavo Castilla Vergel	Ing. Civil - Secretario de Vías, Infraestructura y Vivienda – Municipio de Ocaña	Institucional – Local.	Virtual	18 junio 2025
12	Ing. Napoleón Gutiérrez de Piñeres	Ing. civil – Experiencia público-privada en Ocaña la región.	Profesional - Técnico – Regional.	Presencial	18 junio 2025

A partir de la información recolectada, se realiza el análisis estructurado por los bloques temáticos definidos inicialmente, cada uno agrupa preguntas relacionadas con un eje de la investigación, permitiendo identificar coincidencias y contrastes entre las perspectivas de los actores clave; esto se desarrolló mediante la revisión de contenido, identificando tendencias y puntos de vista más representativos.

- **Conocimiento y percepción sobre aguas grises**

Pregunta 1. ¿Qué entiende por aguas grises y cuáles cree que son sus principales fuentes en edificaciones residenciales?

Todos los entrevistados demuestran tener un conocimiento técnico claro y coherente en la definición de aguas grises, coincidiendo en que se originan de actividades domésticas como lavamanos, lavadores y duchas. La mayoría hacen la exclusión explícita de las aguas provenientes de sanitarios por la presencia de materia fecal y las de cocina por el contenido de grasa. Algunos de los participantes ahondaron en las características fisicoquímicas, como presencia de detergentes, fosfatos, baja carga orgánica, o bajo nivel de coliformes, así como los riesgos sanitarios asociados a incorrecta clasificación. "Las aguas grises contienen fosfatos y niveles bajos de coliformes; generalmente provienen de actividades como lavado y duchas, pero no deben incluir aguas negras ni de cocina." – *Ing. Yeeny Lozano.*

Pregunta 2. ¿Ha tenido experiencia con sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises? Si es así, ¿podría describirla?

La mayoría de los entrevistados no ha participado de forma directa en proyectos de tratamiento y/o reutilización de aguas grises; sin embargo, varios han estado involucrados en diseño o supervisión de PTAR convencionales, o en seguimiento de redes y sistemas hidráulicos. Algunos indican tener experiencias específicas aplicadas en contextos rurales, o en cabañas en Barichara. Solo uno de los entrevistados indicó haber trabajado directamente en proyectos de reuso de aguas grises, indicando que a nivel local la experiencia en este tipo de proyectos es limitada. "Estoy trabajando en un proyecto con una empresa donde se pretende utilizar aguas lluvias y grises para riego y descarga de sanitarios". – *Ing. Miguel Orejuela.*

Pregunta 3. ¿Qué beneficios y riesgos asocia con el uso de aguas grises?

Los beneficios más mencionados son ahorro en el consumo de agua potable, reducción de la factura de servicios públicos, sostenibilidad ambiental y disminución del volumen de vertimientos. En cuanto a los riesgos percibidos predominan la falta de conocimiento técnico o cultura ciudadana, el diseño deficiente o uso inadecuado, la resistencia social ya sea por desconocimiento o percepción negativa y la potencial generación de focos de contaminación si no se almacena ni trata adecuadamente. En general, los entrevistados concuerdan en que los beneficios superan los riesgos, siempre y cuando el sistema se diseñe, instale, y se le realice el mantenimiento correctamente. "Los riesgos no están en el agua en sí, sino en la falta de educación y mantenimiento. Un sistema mal instalado puede ser un problema." – *Ing. Napoleón Gutiérrez de Piñeres.* "Desde el punto de vista institucional, no identifico riesgos críticos, pero sí se requiere educación y control". – *Ing. Sayda Montes Molina.*

Con respecto a este bloque temático, se evidencia que existe un alto nivel de conocimiento técnico entre los actores entrevistados, esto respalda la viabilidad conceptual del proyecto. Aun así, la experiencia directa con sistemas de tratamiento de aguas grises es limitada, pero el interés y comprensión del tema es general. Se reconocen los beneficios ambientales y económicos, así como las barreras sociales y técnicas que deben ser abordadas.

- **Viabilidad y percepción de la comunidad**

Pregunta 4. ¿Cree que en Ocaña hay conciencia sobre la importancia de reutilizar aguas grises? ¿Por qué?

Casi la totalidad de los entrevistados coincide en la baja o inexistente conciencia ambiental sobre la reutilización de aguas grises en Ocaña, la cual incluye a la población en general, así como al gremio profesional, ya que según varios entrevistados desconocen aspectos técnicos y prácticos relacionados con el tema. Algunos de ellos indican que la falta de conocimiento no es solo a nivel local, sino que es un patrón regional, e incluso nacional, el cual se puede saber a qué no hay procesos de educación ambiental relacionados y a que las instituciones no han hecho promoción del uso eficiente del agua. “No existe conciencia ambiental en Ocaña sobre la reutilización de aguas grises, ya que no se promueve desde la familia ni desde las instituciones”. – *Ing. Ray Carlos Ramírez.* “La falta de cultura del agua es evidente incluso en el manejo de fuentes como el río que abastece a la ciudad”. – *Ing. Napoleón Gutiérrez de Piñerez.*

Así mismo, algunos de los entrevistados indican que existe un grado de conciencia conceptual, pero la brecha está en que no hay acciones prácticas ni promoción de soluciones tecnológicas.

Pregunta 5. Desde su punto de vista, ¿qué tan dispuestos estarían los habitantes de Ocaña a implementar estos sistemas en sus viviendas o edificios?

Aunque la mayoría de los actores considera que la disposición es limitada, todos coinciden en que se podría mejorar fortaleciendo procesos de educación y sensibilización, explicando de forma clara los beneficios sociales y ambientales, pero sobre todo los económicos. Varios de los actores indican que argumentar el beneficio ambiental no es suficiente motivación, puesto que en Ocaña no se perciba una escasez del recurso hídrico. Por ello, la estrategia de adopción debe estar enfocada en indicar ahorros, beneficios tangibles y tiempo de retorno de la inversión, en términos cotidianos de la comunidad. "La disposición depende del análisis costo-beneficio. Es clave estimar ahorros y amortización para justificar el sistema." – *Ing. Miguel Orejuela.*

Además, según varios entrevistados la percepción de aceptación también se ve condicionada por la viabilidad, serían los edificios nuevos quienes tendrían mejores posibilidades de adaptación, dado que en edificios existentes puede haber ausencia de planos, redes no divididas y, por ende, alto costo de implementación.

Pregunta 6. ¿Qué factores podrían incentivar o desmotivar la adopción de sistemas de reutilización de aguas grises en la comunidad?

Para los entrevistados el tipo de incentivo más reiterado fue el económico, ya sea en forma tarifaria, tributaria, retorno de inversión o acceso a recursos. Otros de los actores mencionan que obtener beneficios de reconocimiento público como certificaciones ambientales puede mejorar la competitividad de empresas. La educación ambiental y una normatividad clara también fueron aspectos destacados para motivar el cambio. Varios actores mencionaron que las empresas constructoras lo podrían integrar si representar ventajas en licitaciones o condiciones regulatorias, pero finalmente una ventaja más allá de lo ambiental.

Con respecto a las barreras se enfatiza en la falta de cultura, desconocimiento técnico, percepción negativa sobre el uso de agua tratada y costos de instalación y mantenimiento limitan la implementación actualmente. “Los sistemas costosos y complejos que requieran mantenimiento constante desmotivan. La clave está en la educación y en ofrecer modelos viables.” – *Ing. Sayda Montes Molina.*

Se evidencia en este bloque temático una baja percepción de conciencia ambiental en la comunidad, así como una disposición sujeta a la existencia de beneficios económicos y procesos de educación eficaces. La falta de información técnica y poca promoción institucional del tema son los desafíos principales para la implementación de estos sistemas; en este punto incluir incentivos financieros, formular normatividad específica, y estrategias pedagógicas se hacen necesarios para mejorar la aceptación e implementación en el contexto local.

- **Aspectos normativos y administrativos**

Pregunta 7. ¿Conoce normativas locales o nacionales que regulen la reutilización de aguas grises?

La mayoría de los actores entrevistados indica que no existe una normatividad específica y clara sobre la reutilización de aguas grises en Colombia. Algunos de ellos hacer referencia a normativas sobre aguas residuales o vertimientos como el Decreto 3930 de 2010, la Resolución 0631 de 2015, el Decreto 1256 de 2021, o el RAS 2000, las cuales se consideran de aplicación indirecta, y no están enfocadas en sistemas de reuso en edificaciones. Otros de los actores mencionan normatividad estructural como el Título J de la NSR-10, y referencian la economía circular como la Ley 631 de 2014. Sin embargo, se observa la tendencia en todos los casos de que el conocimiento técnico se limita a normativas generales, lo cual no da claridad sobre lineamientos específicos que se puedan aplicar a aguas grises tratadas para reúso. "No hay normativas específicas. Se puede actuar con más libertad si se diseña adecuadamente un sistema, pero se debe iniciar." – *Ing. Juan Carlos Isaza.*

"Conozco normativas de vertimientos, pero no hay nada que regule directamente el tratamiento de aguas grises". – *Ing. Yeeny Lozano Lázaro.*

Pregunta 8. ¿Considera que el marco normativo actual es suficiente para fomentar su implementación? ¿Por qué?

Los entrevistados coinciden en que el marco normativo actual es insuficiente para fomentar la implementación de estos sistemas; la mayoría de ellos considera que el vacío normativo (nacional, regional y local), impide la viabilidad de estos procesos, pues no hay directrices claras que orienten a las autoridades, diseñadores y constructores.

Algunos de los actores indican que esta falta de normatividad tiene dos interpretaciones; una de ellas es como limitante pues no hay garantías técnicas ni jurídicas para actuar; o también como una oportunidad, ya que los proyectos se pueden implementar con mayor libertad, pero teniendo en cuenta que no se deben generar riesgos sanitarios y justificando su operación técnicamente. "Actualmente existen documentos en el aire, que no se aterrizan a la realidad. Se requiere una directriz nacional clara." – *Ing. Napoleón Gutiérrez de Piñeres.*

Pregunta 9. ¿Qué barreras legales o administrativas cree que dificultan la implementación de estos sistemas en edificaciones residenciales?

Los actores coinciden en que las principales barreras tanto legales como administrativas se originan por la ausencia de una normatividad específica; este vació genera inseguridad jurídica al tiempo que no incentiva la inversión y dificulta el control y seguimiento por parte de las instituciones. Algunos de los entrevistados indican que la desarticulación entre instituciones como Alcaldía, autoridades ambientales y la empresa prestadora de servicios públicos es otro de los factores que impide avanzar coordinadamente. Otros de ellos mencionan que existen barreras vinculadas con la gestión pública, tales como la ausencia de personal capacitado en instituciones

y la falta de normatividad directa relacionada. “La desarticulación entre entidades y la ausencia de lineamientos técnicos son el principal obstáculo”. – *Ing. Juan Carlos Rodríguez.*

Este análisis identifica la falta de normatividad específica que aborde la reutilización de aguas grises en Colombia como un vacío latente. A pesar de que existen normas relacionadas de forma indirecta, las mismas no ofrecen claridad ni respaldo jurídico para impulsar proyectos de reuso de aguas grises en edificaciones. Se evidencia, además, una baja articulación institucional, así como la carencia de lineamientos desde los entes territoriales, lo que indica la necesidad de establecer un marco regulatorio claro con enfoque territorial, en el cual se definan responsabilidades, criterios técnicos y parámetros de diseños.

- **Consideraciones técnicas y económicas**

Pregunta 10. ¿Qué tecnologías considera más adecuadas para el contexto de Ocaña en términos de tratamiento de aguas grises?

La mayoría de los entrevistados propone tecnologías que sean adaptables, básicas y de bajo costo, de acuerdo con el contexto de Ocaña, entre las alternativas más frecuentes se incluyen:

Sistemas de pretratamiento (trampa de grasa, filtros para sedimentos y separación de sólidos), Tratamientos biológicos o fisicoquímicos sencillos (filtración por lechos con membranas simples, carbón activado, ósmosis inversa o nanofiltración), Almacenamiento y

posterior distribución (tanques enterrados de polietileno, sistemas de bombeo hidroneumáticos o redistribución a tanques aéreos), Usos complementarios de tecnología (como paneles solares y sensores de monitoreo para mantenimiento).

Varios de los actores coinciden en que el sistema se debe diseñar desde la etapa inicial del proyecto, con el fin de garantizar su integración arquitectónica y eficiencia. “Un sistema básico debe incluir filtración, almacenamiento y bombeo, adaptado al tipo de edificio y a los productos usados por los usuarios”. – *Ing. Dibrey Paola Quintero.* “El diseño integral debe contemplar eficiencia energética, tanques enterrados accesibles y monitoreo de calidad del agua”. – *Ing. Juan Carlos Isaza.*

Pregunta 11. ¿Cuáles cree que son los principales retos técnicos en la instalación y mantenimiento de estos sistemas?

Según la mayoría de entrevistados el principal reto es el desconocimiento técnico relacionado con el diseño, instalación, operación y mantenimiento de los sistemas. Resaltan que ni las instituciones, autoridades locales y la comunidad están preparadas para su implementación y mantenimiento, más aún por la ausencia de modelos locales replicables o guías de referencia. Se identificaron además desafíos como la ausencia de personal capacitado para el diseño, instalación y mantenimiento, la resistencia cultural que dificulta la aceptación, la falta de integración entre diseños y normatividad y la posible complejidad operativa. “El mayor reto es la falta de plataformas de implementación y guías claras. Hay que empezar desde lo nacional.” –

Ing. Napoleón Gutiérrez de Piñeres. "No hay experiencia local ni disciplina técnica. Los sistemas fracasan por falta de mantenimiento." – *Ing. Miguel Orejuela.*

Pregunta 12. ¿Desde su perspectiva, qué costos están involucrados en la implementación de un sistema de reutilización de aguas grises y cómo podrían reducirse?

Un alto porcentaje de los entrevistados concuerda en que los costos de implementación son una de las principales barreras económicas; estos costos incluyen el diseño y las redes hidráulicas diferenciadas, tanques, bombas, filtros, sensores, mantenimiento, operación y capacitación de personal técnico.

Varios de los entrevistados señalan que, sin incentivos financieros o normatividad, es poco probable que los costos sean asumidos de forma voluntaria, ya que no hay conciencia colectiva ni existe una estructura institucional que los respalde. Plantean la necesidad de calcular el periodo de recuperación de la inversión y socializar modelos de éxito, para que los beneficios se analicen también en el ámbito económico. "Hay que analizar el retorno de inversión y educar sobre la viabilidad económica, si no, es difícil que se implemente." – *Ing. Ray Carlos Ramírez.*

Se observa que las propuestas planteadas son viables técnicamente y adaptables al entorno local, pero la falta de experiencia, el desconocimiento y la carencia de normatividad son los retos principales. Además, la ausencia de liderazgo institucional, falta de modelos y costos fortalecen la necesidad de acompañar iniciáticas con lineamientos técnicos, procesos formativos e incentivos económicos.

- **Certificaciones en sostenibilidad hídrica**

Pregunta 13. ¿Está familiarizado con certificaciones en construcción sostenible que incluyen criterios de uso eficiente del agua, como CASA Colombia, EDGE, LEED u otras?

Gran parte de los actores indicó tener conocimiento limitado o nulo sobre certificaciones como Colombia, EDGE o LEED, específicamente en su aplicación a proyectos relacionados con el uso de aguas grises. Solo uno de ellos, el Ing. Miguel Orejuela demostró tener conocimiento técnico relacionado, incluso es coautor del programa Casa Colombia. Dos autores más indican tener acercamientos desde el contexto académico o institucional, pero no como parte del ejercicio profesional. Este desconocimiento deja en evidencia la falta de divulgación y capacitación sobre estos temas en el contexto local y regional. "No sé quién las avala ni cómo se implementan en la práctica." – *Ing. Juan Carlos Rodríguez.*

Pregunta 14. ¿Considera que la obtención de certificaciones de sostenibilidad podría ser un incentivo para que los constructores adopten sistemas de reutilización de aguas grises?

La mayoría de los entrevistados coincide en que, como reconocimiento reputacional, las certificaciones no son suficientes para movilizar a constructores o usuarios, pero podrían ser útiles si llegan a representar un incentivo válido en términos económicos, tales como descuentos en impuestos, agilidad en trámites, mejoras en puntajes de licitación, reducción de costos en

licencias, entre otros. “Podrían ser útiles si implican beneficios concretos: permisos más económicos, reducción de costos en licencias.” – *Ing. Juan Carlos Isaza.*

Pregunta 15. ¿Qué barreras o dificultades identifican en el acceso y cumplimiento de estas certificaciones en proyectos locales?

Las principales barreras identificadas son el desconocimiento técnico y procedimental para acceder a estas certificaciones, la complejidad administrativa y costos asociados al cumplimiento de requisitos así como la falta de adaptación d criterios al contexto local y la ausencia de un marco normativo que promueva o exija estos procesos. Aún así, algunos de los entrevistados consideran que las barreras se podrían mitigar si las certificaciones integran incentivos locales, de carácter Municipal. “Obtener certificaciones puede ser un proceso engorroso y costoso para constructores locales.” – *Ing. Sayda Montes Molina.* “Sin beneficios tangibles no serían adoptadas ampliamente.” – *Ing. Emilio Bonza Jaimes.*

Se evidencia el poco conocimiento y aplicación de estas certificaciones en el contexto local, limitando su potencial como herramienta para fomentar el reuso de aguas grises, aun así se reconoce que podrían aumentar su valor si integran incentivos económicos o administrativos adaptados al contexto local; así es como a medida que se dejen de percibir como un reconocimiento institucional y se conviertan en instrumentos de acceso a beneficios podrían transformar las dinámicas de la construcción en relación con la sostenibilidad.

- **Estrategias y propuestas**

Pregunta 16. ¿Qué acciones o estrategias podrían mejorar la aceptación e implementación de estos sistemas en la ciudad?

Los actores entrevistados proponen una variedad de estrategias complementarias con el fin de fomentar la implementación de sistemas de reutilización de aguas grises, los cuales se pueden agrupar en tres líneas de acción:

1. Educación: Casi todos los actores coinciden en la necesidad de realizar procesos formativos, incluyendo funcionaros públicos, constructores, diseñadores y comunidad en general; estos procesos deben ser prácticos, continuos y adaptados al contexto local.
2. Liderazgo y articulación institucional: Varios de los entrevistados concuerdan en que las estrategias deben partir desde instituciones como la Alcaldía, CORPONOR, ESPO S.A. y Universidades, como instituciones relacionadas con interés en promover este tipo de proyectos ya sea con campañas educativas, proyectos piloto o mesas técnicas.
3. Incentivos: Se plantea la necesidad de reconocer y premiar iniciativas sostenibles, puede ser con reconocimiento público, beneficios económicos o sellos locales de referencia. “Debe iniciarse desde las instituciones. Si las universidades, la Alcaldía y ESPO lideran con el ejemplo, se podrá replicar en el entorno residencial.” – *Ing. Ray Carlos Ramírez.* “Sugiero crear una mesa técnica interinstitucional y una campaña que reconozca a los edificios eficientes.” – *Ing. Juan Carlos Isaza.*

Pregunta 17. ¿Cómo percibe el papel de las autoridades locales en la promoción de estas iniciativas?

La mayoría de los actores entrevistados coinciden en que las autoridades locales no llevan un papel activo actualmente con relación a la promoción de estas tecnologías. Algunos afirman que no regulación, promoción ni participación clara por parte de las entidades y que casa una trabaja por su cuenta sin una estrategia conjunta. Aun así, también hay consenso en que las autoridades locales tienen el potencial de liderar estos procesos, desde el acompañamiento, educación, facilitación de trámites, así como normatividad y diseños piloto. Algunas de las funciones clave que mencionan los actores son la inclusión de criterios de reúso en licencias de construcción, la generación de normativas locales claras, el otorgar beneficios o reducir barreras administrativas y la capacitación a las oficinas técnicas. "La promoción no existe actualmente. Las autoridades deben desarrollar regulación y evaluar el riesgo hídrico futuro." – *Ing. Miguel Orejuela.* "La Alcaldía podría liderar desde la educación, promoción y apoyo técnico, en alianza con otras entidades". – *Ing. Gustavo Castilla Vergel.*

Pregunta 18. ¿Considera que existen modelos de referencia exitosos a nivel nacional o internacional que podrían adaptarse a la realidad de Ocaña?

La mayoría de los entrevistados no conoce casos concretos aplicables directamente a Ocaña, aun así, reconocen que deben existir múltiples modelos de éxito a nivel internacional y algunos a nivel nacional. Esto deja en evidencia una falta de divulgación técnica en el contexto local. Algunas de las referencias generales mencionas incluyen las ciudades esponja, los

Sistemas Urbanos de drenaje Sostenible implementados en Bogotá, hospitales verdes, y la necesidad de desarrollar un modelo tipo o piloto replicable en Ocaña. “El reto es desarrollar un diseño piloto viable y verificable en Ocaña, con acompañamiento institucional.” – *Ing. Juan Carlos Isaza.*

Este bloque temático deja en evidencia la buena disposición de los actores calve para impulsar las estrategias de implementación, siempre y cuando se fundamenten en procesos educativos e institucionales bien estructurados, y basados en una normatividad. La falta de referentes y el poco o nulo liderazgo son los principales vacíos; sin embargo, hay claridad en que si las autoridades locales asumen un papel proactivo es posible abrir el camino hacia la adopción de sistemas estos sistemas en Ocaña.

El análisis de estas entrevistas permitió obtener una visión integral sobre las condiciones actuales y posibilidades de implementación en el contexto local. Las respuestas obtenidas revelan coincidencias y criterios técnicos en cuanto a las barreras, oportunidades y aspectos estratégicos. Se destaca un alto nivel de conocimiento técnico conceptual sobre las aguas grises, su origen y potencial de aprovechamiento, la percepción general en Ocaña destaca que no existe una cultura ciudadana orientada al uso eficiente del agua, pero se reconoce que la disposición social podría mejorar si se incluyen procesos educativos y beneficios. La ausencia de normatividad genera vacíos en el diseño, implementación y seguimiento de estos sistemas, al tiempo que puede ser una oportunidad para construir marcos que se adapten al contexto local. Finalmente se plantea que las estrategias de implementación deben iniciar desde las instituciones, se recomienda diseñar proyectos piloto replicables, articulados con campañas de

sensibilización y el desarrollo de una guía técnica local que permita la apropiación por parte de los actores involucrados.

El diagnóstico realizado mediante la aplicación de encuestas y entrevistas permitió identificar de forma clara el nivel de conocimiento, percepciones y disposición de la comunidad y actores clave con respecto a la reutilización de aguas grises en edificaciones residenciales en Ocaña. Todos estos hallazgos, en conjunto permiten indicar que Ocaña cuenta con condiciones favorables, tanto a nivel social como técnico, que permiten avanzar en la adopción de estos sistemas; siempre y cuando se implementes estrategias que integren educación, regulación, acompañamiento institucional e incentivos.

4.2 Analizar el marco regulatorio, las políticas ambientales existentes y los sistemas de tratamiento de aguas grises implementados en diversas regiones, mediante una revisión documental y estudios comparativos, con el fin de que se determinen oportunidades de mejora, incentivos y estrategias que fomenten la reutilización de estas aguas en el sector de la construcción.

Para abordar el análisis del segundo objetivo específico del proyecto, se realizó una revisión documental sistemática, que se sustentó en unas fichas técnicas elaboradas con base en artículos científicos y técnicos, documentos normativos y estudios de caso tanto nacionales como internacionales. Estas fichas se clasificaron en las siguientes categorías temáticas teniendo en cuenta el enfoque principal del documento.

1. Categoría A. Estado del arte y tendencias en reutilización de aguas grises: Se incluyen estudios que presentan una visión general del tema, con enfoques emergentes y evolución a nivel académico.

2. Categoría B. Factores sociales y percepción pública: Contempla investigaciones centradas en la aceptación, barreras sociales, culturales y económicas para la implementación de las tecnologías.

3. Categoría C. Aspectos normativos: Incluye documentos que abordan leyes, decretos, resoluciones y demás elementos jurídicos que regulan el uso y tratamiento de aguas grises o se relacionan con la temática.

4. Categoría D. Viabilidad técnico, económico y ambiental: Contempla estudios en los que se analiza el rendimiento, sostenibilidad de tecnologías y costo-beneficio de tecnologías aplicadas en diferentes contextos.

5.

Con base en la anterior clasificación, el análisis se realizó iniciando por una revisión del marco normativo consultado, a partir de los documentos agrupados en la categoría C, así como la normatividad indicada en el Marco Legal y las mencionadas por los actores clave entrevistados para el desarrollo del primer objetivo específico; donde se identificó avances y condiciones regulatorias de relevancia así como los posibles aspectos o apartes que se pueden integrar a este proyecto; posteriormente se realizó un análisis de los documentos que contienen información relacionada con percepción pública, factores sociales, viabilidad económica y técnica y tendencias globales (categorías A, B y D), para comprender como se abordó la implementación de estos sistemas en diferentes contextos. Con lo anterior se ilustran buenas prácticas y estrategias de adopción replicables en contextos similares al de Ocaña.

4.2.1 Marco Regulatorio y políticas ambientales

La revisión normativa y documentar realizada deja en evidencia Colombia no cuenta con un marco legal específico y aplicable para el tratamiento y reutilización de aguas grises. A pesar de que existen múltiples normas y políticas ambientales que abordan aspectos relacionado con el recurso hídrico, la mayoría se enfocan en la regulación de vertimientos o el tratamiento de aguas residuales convencionales, sin diferenciar entre aguas negras y aguas grises ni definir lineamientos ya sea técnicos, sanitarios o administrativos para su aprovechamiento. De acuerdo con el análisis realizado se identificaron cuatro grupos normativos generales.

4.2.1.1 Materia ambiental e hídrica

Tabla 7.

Identificación y análisis de normatividad hídrica y ambiental

Normativa	**Descripción**
Decreto 2811 de 1974	***Descripción:*** Es el Código Nacional de Recursos Naturales, establece los lineamientos para la protección del recurso hídrico, el uso y aprovechamiento del agua, así como las condiciones generales para vertimientos, es una norma de tipo legal con alcance nacional. Se puede tomar como base, pero no contempla el reusó de aguas grises en edificaciones. Se destaca el Artículo 134 que menciona *"Corresponde al Estado garantizar la calidad del agua para consumo humano... Para dichos fines deberá: determinar…, los casos en que debe prohibirse, condicionarse o permitirse el vertimiento de residuos… y prohibir o señalar las condiciones para el uso de estas"*, y el Artículo 148 donde se indica que: *"El dueño, poseedor o tenedor de un predio puede servirse de las aguas lluvias que caigan o se recojan en éste y mientras por él discurran. Podrá, en consecuencia, construir dentro de su propiedad las obras adecuadas para almacenarlas y conservarlas, siempre que con ellas no cause perjuicios a terceros."*, (República de Colombia, 1974). Lo

	anterior muestra relación con el recurso hídrico, más no la apropiación directa con relación a las aguas grises. ***Análisis:*** Aunque este decreto no regula el tratamiento o reuso de aguas grises de forma directa, es un marco ambiental base que respalda el uso eficiente del recurso hídrico. No es de obligatorio cumplimiento específico para este tipo de proyectos, pero se pueden aplicar sus principios generales, el artículo 148 se puede catalogar como un antecedente que legitima el uso interno de aguas no potables siempre que no generen impactos negativos. En síntesis, puede usarse como apoyo jurídico y sustento general en la implementación de soluciones sostenibles en edificaciones.
Ley 99 de 1993	***Descripción:*** Establece las competencias de las autoridades ambientales, principios de prevención, precaución y responsabilidad, así como la participación ciudadana en la gestión ambiental. Es un pilar del derecho ambiental, crea el Ministerio del Medio Ambiente y estructura el Sistema Nacional Ambiental, aunque no menciona las aguas grises, establece principios y competencias que respaldan su gestión, enfocados en el desarrollo sostenible. En el Artículo 1 se menciona que: "*La política ambiental colombiana seguirá los siguientes principios generales: … Las zonas de páramos, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial*. (República de Colombia, 1993). Dicta Medidas Sanitarias, regula el control sanitario de los usos del agua, reglamenta lo relacionado a aguas superficiales, subterráneas, lluvias, así como su conducción, estaciones de bombeo y potabilización del agua. Es una norma de carácter legal y alcance nacional. ***Análisis:*** Aunque no hace mención directa a las aguas grises, establece el marco sobre el que se desarrolla la legislación ambiental en el país. Al reconocer el principio de desarrollo sostenible respalda la implementación de soluciones como la reutilización de aguas grises. Fundamenta el papel regulador de entidades ambientales frente a iniciativas como esta. Aunque

	no es de aplicación directa es un soporte para justificar la pertinencia ambiental, de acuerdo con principios de sostenibilidad y gestión del agua.
Ley 142 de 1994	***Descripción:*** Esta ley establece el marco general para la prestación de servicios públicos domiciliarios (acueducto y alcantarillado, entre otros), incluye actividades complementarias como tratamiento y disposición final de residuos líquidos (el tratamiento y reutilización de aguas grises podría estar enmarcado como una actividad complementaria del servicio público de alcantarillado). Menciona que uno de los objetivos de intervención estatal es la promoción de metas de eficiencia, cobertura y calidad en la prestación de los servicios y reconoce como instrumento de intervención la protección de los recursos naturales. Aunque no menciona las aguas grises, puede brindar sustento para que su tratamiento y reutilización se consideren como actividades complementarias en los servicios públicos. Expedida por el Congreso de la República, tiene carácter legal y aplicación nacional. (República de Colombia , 1994) ***Análisis:*** No menciona expresamente las aguas grises ni establece lineamientos sobre su tratamiento, pero su contenido brinda un marco favorable para incluir estos sistemas como actividades complementarias. Podría respaldar la implementación en edificaciones si se argumenta como medida de eficiencia y reducción de carga al sistema de alcantarillado. Además, habilita a las autoridades regulatorias a desarrollar esquemas tarifarios o programas que promuevan el uso eficiente del recurso, que se podría traducir, en incentivos para la implementación de estos sistemas.
Ley 373 de 1997	***Descripción:*** Es el documento por el cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua", fomenta estrategias de reutilización como mecanismo para cumplir con los planes de uso eficiente y ahorro del agua. En su Artículo 1 resalta que: *"Todo plan ambiental regional y municipal debe incorporar obligatoriamente un programa para el uso eficiente y ahorro del agua…"*, en el Artículo 5 indica que las aguas utilizadas en cualquier actividad que genere afluentes líquidos deberán ser reutilizadas si es técnica y económicamente viable. El Artículo 8 dice que la CRA definirá una estructura tarifaria que incentive el uso eficiente y de ahorro

	del agua, y desestimule su uso irracional, el cumplimiento lo vigilará la Superservicios, y los mecanismos los definirán las CAR y demás autoridades ambientales. El Artículo 9 indica que para proyectos nuevos las entidades que otorgan licencias deberán exigir que incluya, oferta de aguas lluvias y se implante su uso si hay viabilidad técnica y económica. Además, en el Artículo 12 se habla incluir campañas educativas enfocadas en el uso racionalizado y eficiente del recurso hídrico en presupuestos; esto indica que se fomenta el tratamiento y reuso de aguas grises. Es de carácter letal con aplicación en el territorio nacional. (República de Colombia, 1997). ***Análisis:*** Es muy pertinente dado que obliga a incorporar programas de uso eficiente y ahorro del agua en planes ambientales regionales y municipales. Proporciona un respaldo directo al exigir que los afluentes líquidos se reutilicen si hay viabilidad técnica y económica. Sugiere implantar el uso de aguas lluvias, que por analogía puede extenderse a aguas grises tratadas. No define incentivos, pero abre la puerta a mecanismos que premien el uso racional del recurso y permite articular campañas de sensibilización. En síntesis, es una ley de aplicación directa soportando la implementación de estas estrategias.

El análisis del Decreto 2811 de 1974, la Ley 99 de 1993, la Ley 373 de 1997 y la Ley 142 de 1994 en conjunto permite identificar oportunidades, a pesar de que ninguna de las normas regula de específicamente el reúso de aguas grises, si brindan un marco que promueve el uso eficiente del agua, la protección ambiental y la prestación eficiente de los servicios públicos domiciliarios. Por ellos, son una base para proponer estrategias normativas, técnicas y de implementación local. Los vacíos identificados se convierten en oportunidades de mejora, ya que permiten la formulación de lineamientos que integren el reuso como parte de los instrumentos de planificación urbana y ambiental. Además, se ofrecen incentivos indirectos tales como la posibilidad de estructuras tarifarias diferenciales para proyectos sostenibles y se facilita el

respaldo institucional y técnico para entidades que promuevan y regulen estos sistemas, de acuerdo con sus competencias. Estratégicamente permiten sustentar la inclusión del tratamiento de aguas grises como una actividad complementaria en el servicio público de alcantarillado y promover la gestión integral del agua. Todo esto, aunque es un marco disperso y general, se puede articular para respaldar legal y técnicamente las propuestas planteadas en este proyecto.

4.2.1.2 Vertimientos y tratamiento de aguas residuales

Tabla 8.

Identificación y análisis de normatividad sobre vertimientos y tratamiento de aguas residuales

Normativa	Descripción
Decreto 1594 de 1984	***Descripción:*** Regula los usos del agua y vertimientos de aguas residuales. No menciona las aguas grises, pero fija lineamientos para su tratamiento y reuso bajo condiciones técnicas y sanitarias. En el Capítulo 4 detalla criterios de calidad con base en la destinación del recurso (agrícola, recreativo, etc.). El Artículo 70 exige un tratamiento previo a cualquier vertimiento, el Artículo 72 establece parámetros mínimos para vertimientos a cuerpos de agua, el Artículo 74 las condiciones máximas permisibles para sustancias de interés sanitario. Así mismo, el Artículo 80 indica que el control de vertimientos se debe realizar desde el inicio de operación del sistema y el Artículo 86 establece que las edificaciones fuera del área de cobertura de alcantarillado se deben dotar de sistemas de recolección y tratamiento; respaldando el uso de soluciones descentralizadas para aguas grises, indicando que es posible el reuso de aguas grises, siempre que se cumplan los parámetros establecidos, se tenga el permiso de vertimiento y se eviten riesgos sanitarios. Es la primera regulación técnica integral sobre vertimientos en el país. (República de Colombia, 1984)

	Análisis: Aunque no menciona las aguas grises de forma explícita, permite su tratamiento y reuso bajo condiciones técnicas claras, específicamente en edificaciones que no cuentan con acceso a la red de alcantarillado. Respalda la implementación de sistemas descentralizados al interior de edificaciones siempre que garanticen el cumplimiento de los límites máximos permisibles y se tramiten los permisos de vertimiento, así mismo aportan criterios técnicos de referencia para definir parámetros de calidad. En el contexto del proyecto, puede argumentar la viabilidad técnica y legal de implementar estos sistemas bajo seguimiento, control y cumplimiento ambiental.
Decreto 3930 de 2010	***Descripción:*** Esta norma define el marco técnico y legal para vertimientos, y representa la actualización de aspectos técnicos y jurídicos en materia de vertimientos, sustituyendo disposiciones del Decreto 1594 de 1984. El Artículo 1 establece que regula el uso, ordenamiento y vertimientos al recurso hídrico, suelo y alcantarillado. El Artículo 31 dice *"Toda edificación … localizada fuera del área de cobertura del sistema de alcantarillado público, deberá dotarse de sistemas de recolección y tratamiento de residuos líquidos y deberá contar con el respectivo permiso de vertimiento"*. Los Artículos 19 y 22 hacen énfasis en los criterios de calidad del recurso hídrico, con los que se evalúa si cumple las condiciones para su reuso o disposición segura, el Artículo 41 obliga a tener un permiso de vertimiento para cualquier descarga y el Artículo 43 indica que las actividades residenciales deben presentar evaluación si generan descargas a cuerpo de agua o suelo. Este documento ofrece un marco regulatorio viable, si se respetan los criterios de calidad, se justifica técnicamente y se tenga el permiso de vertimiento; es aplicable a soluciones individuales o descentralizadas, no conectadas a sistemas públicos de alcantarillado. (República de Colombia, 2010) ***Análisis:*** Es directamente aplicable al diseño e implementación de sistemas de tratamiento de aguas grises descentralizados. Exige la obtención de un permiso de vertimiento, la justificación técnica del sistema y la evaluación de la calidad del recurso. Respalda la instalación

	obligatoria de sistemas individuales cuando se carece de red de alcantarillado. Con base en esta norma, se puede estructurar técnicamente una propuesta que cumpla los criterios de calidad establecidos y gestionando la licencia ambiental correspondiente.
Resolución 0631 de 2015	***Descripción:*** Establece los parámetros y valores límites máximos permisibles para vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y sistema de alcantarillado. No menciona las aguas grises, pero se enmarca en las aguas residuales domésticas. El Artículo 8 establece los valores límites máximos permisibles para vertimientos puntuales (de obligatorio cumplimiento para evitar afectaciones ambientales) y es un requisito para tramitar un permiso de vertimiento ante la autoridad ambiental. En el Artículo 17 se permite la exclusión de parámetros "*siempre y cuando mediante balances de materia o de masa y con la realización de la respectiva caracterización demuestre que estos no se encuentran presentes en sus aguas residuales*", útil para proyectos de aguas grises, y el Artículo 18 establece criterios de monitoreo, reporte y análisis. Es una norma clave para diseñar y operar sistemas descentralizados verificando que cumpla con las condiciones ambientales y sanitarias. Fue emitida en desarrollo del Decreto 3930 de 2010 y aplica a todos los usuarios que realicen vertimientos puntuales. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible., 2015) ***Análisis:*** Es de obligatorio cumplimiento para cualquier sistema que genere vertimientos puntuales. Permite diseñar sistemas ajustados a los límites establecidos, y aplicar la exclusión de parámetros no presentes para el caso de aguas grises. Define lineamientos técnicos de monitoreo, frecuencia de muestreo y control de calidad. Sirve como base para estructurar los parámetros de diseño y criterios de operación, así como la documentación exigida por autoridades ambientales.

El análisis del Decreto 1594 de 1984, el Decreto 3930 de 2010 y la Resolución 0631 de 2015 permite identificar que, aunque no se regula el reuso de aguas grises directamente si hay criterios concretos para su tratamiento, monitoreo y disposición en contextos donde no hay

cobertura de alcantarillado. Se definen parámetros de calidad, sanitarios y administrativos para vertimientos puntuales. El primer decreto establece la base histórica y la obligación de realizar un tratamiento previo y control desde el inicio de operación, respalda el uso de tecnologías in situ, si no hay conexión a redes públicas respetando criterios de calidad y salud pública. Por su parte el Decreto 3930 de 2010 actualiza el marco técnico y jurídico, siendo aplicable directamente, respalda la obligación de instalar sistemas de recolección y tratamiento en edificaciones localizadas fuera de la cobertura de alcantarillado, sustentando la implementación de estos sistemas bajo condiciones normativas claras. Finalmente, la Resolución 0631 establece valores máximos permisibles para vertimientos puntuales, y permite ajustar el diseño de sistemas de tratamiento con base en los parámetros requeridos, así como aplicar exclusiones justificadas, representando una oportunidad técnica para optimizar los sistemas, y los lineamientos de monitoreo y reporte establecidos aportan criterios operativos que son clave para el control ambiental del sistema. Con estas normas se identifican oportunidades normativas reales para la implementación de las tecnologías, siempre que se cumpla con los requisitos de calidad, permisos y evaluación ambiental, además se aportan herramientas concretas para justificar su incorporación.

4.2.1.3 Normas técnicas, guías y políticas públicas.

Tabla 9.

Identificación y análisis de normas técnicas, guías y políticas públicas.

Normativa	Descripción
RAS 2000 – Resolución 0330 de 2017	***Descripción:*** Esta Resolución establece los reglamentos técnicos para los componentes de sistemas de acueducto, alcantarillado y saneamiento básico. No menciona las aguas grises, pero define la base técnica para su tratamiento, especialmente cuando se implementan soluciones individuales o comunitarias. En el Artículo 71 da la posibilidad de utilizar

	sistemas de tratamiento distintos a los convencionales (descentralizados) de acuerdo a estudios específicos, que incluyen trampas de grasa (artículo 172), tanques sépticos (artículos 173 y 174), filtros anaerobios (artículo 175), humedales artificiales (artículo 180), entre otros, que pueden ser aplicables a viviendas que están fuera de la cobertura de alcantarillado; así mismo establece requisitos de diseño hidráulico y sanitario y parámetros técnicos mínimos para la operación. Define la ruta para el tratamiento de aguas residuales domésticas en edificaciones (no conectadas a sistemas centralizados), permitiendo el uso de tecnologías adaptables al contexto local. Es una norma de carácter técnico y aplicación obligatoria para los diseños y construcciones en Colombia. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017) ***Análisis:*** Esta norma es un referente técnico obligatorio para el diseño de sistemas de tratamiento en edificaciones no conectadas al alcantarillado, con soluciones descentralizadas que se podrían adaptar. Permite el uso de tecnologías no convencional previo sustento técnico, y se establecen componentes específicos aplicables a unidades residenciales con requisitos que pueden ser retomados en el diseño de sistemas para aguas grises siempre que garantice eficiencia técnica, hidráulica, sanitaria y facilidad de operación. Para este proyecto, aporta los parámetros de diseño y operación mínimos exigibles, permitiendo estructurar soluciones técnicas viables.
NTC 1500	***Descripción:*** Este documento no regula el uso de aguas grises de forma directa, sino que establece los requisitos mínimos para el diseño, instalación y operación de los sistemas de fontanería, pero establece bases técnicas necesarias para su implementación. Exige que en los diseños se incluyan planos, memorias de cálculo y especificaciones técnicas, así como que toda modificación a instalaciones hidrosanitarias debe cumplir con requerimientos y debe ser inspeccionada. Promueve el uso de aparatos y sistemas de bajo consumo de agua. El diseño permite establecer redes separadas para diferentes tipos de aguas. (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2024)

	Análisis: Aunque no regula de forma directa las aguas grises, aporta criterios técnicos para el diseño de instalaciones internas que lo permitan. Permite el trazado separado de redes hidráulicas, esencial para implementar sistemas de captación, conducción y uso en una edificación. De igual forma garantiza que las instalaciones cumplan con seguridad, eficiencia, control de fugas y compatibilidad, por lo tanto, sirve como soporte técnico complementario para el diseño de estrategias de reuso.
Título J de la NSR-10	***Descripción:*** El título J de la NSR-10 regula los requisitos para la protección contra incendios en edificaciones, establece parámetros que se pueden relacionar. En el Capítulo J.6 se exige la implementación de sistemas de protección contra incendios en parqueaderos, centros comerciales y edificaciones de gran altura, entre otros. Establece condiciones técnicas para el diseño y operación de redes hidráulicas de extinción de incendios, incluyendo exigencias como caudal, presión y disposición de fuentes de agua. Hace parte de la Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), la cual es de carácter obligatorio en todo el país para edificaciones nuevas, ampliaciones o modificaciones estructurales. (República de Colombia, 2010)
	Análisis: Aunque no contempla de forma explícita el uso de aguas grises tratadas, permite la utilización de cualquier fuente de agua cuando se garantice su idoneidad técnica, lo que incluye la posibilidad de utilizar aguas grises tratadas si se cumplen los requisitos exigidos. Para este proyecto abre una línea de oportunidad al proponer el uso de aguas grises en redes contraincendios como estrategia de aprovechamiento interno. Sin embargo, su implementación requiere un soporte técnico detallado que asegure la eficacia y seguridad.
CONPES 3919 de 2018	***Descripción:*** Este documento establece los lineamientos para el desarrollo de edificaciones sostenibles en Colombia y su enfoque tiene relación con el tratamiento y reuso de aguas grises. Realiza la inclusión del ciclo de vida de las edificaciones como una herramienta para evaluar su impacto durante su existencia. Destaca el uso eficiente del agua como uno de los criterios fundamentales de sostenibilidad, y plantea como medidas de

	ahorro *"la inclusión de accesorios de conservación de agua, la instalación de sistemas de tratamiento y reciclaje de aguas residuales, y la construcción de sistemas de recolección y reutilización de aguas lluvias"*, aunque resalta que no se han implementado a nivel nacional. Respalda estas iniciativas económicamente, indicando que con la instalación ecotecnologías se puede lograr un ahorro promedio del 13% en el consumo. Finalmente, plantea como acción prioritaria *"Diseñar e implementar instrumentos de política pública que permitan incluir criterios de sostenibilidad para todos los usos y dentro de todas las etapas del ciclo de vida de las edificaciones"*, es decir, promueve el fortalecimiento normativo e institucional. Es un documento de carácter de política pública. (Departamento Nacional de Planeación., 2018) ***Análisis:*** Respalda directamente la incorporación de sistemas de tratamiento y reuso de aguas residuales, como las aguas grises, en el diseño sostenible de edificaciones. No impone obligaciones normativas, pero si establece una ruta estratégica para implementar estas soluciones ya sea en licenciamiento, políticas sectoriales o certificaciones ambientales. Refuerza la viabilidad institucional y económica del proyecto, destaca el ahorro hídrico e incentivo su inclusión en instrumentos de planificación urbana. Por todo esto, es un documento respaldo para vincular el reuso de aguas groses a los objetivos de sostenibilidad en el sector de la construcción.
CONPES 4004 de 2020	***Descripción:*** Establece la política de Economía Circular en agua potable y saneamiento, promueve el tratamiento y reúso de aguas residuales tratadas como estrategia "*para reducir la presión sobre las fuentes hídricas y como alternativa para afrontar la escasez de agua"*. Reconoce que el modelo actual de uso debe migrar a uno circular que incluya el reúso en actividades como riego y limpieza. Identifica barreras normativas y económicas que limitan reuso y propone acciones para superarlas. El documento respalda la implementación de sistemas descentralizados, enfocados en la sostenibilidad urbana. (Departamento Nacional de Planeación, 2020)

	Análisis: Es un documento pertinente ya que promueve el tratamiento y reuso de aguas residuales tratadas como parte de la transición a un modelo de gestión hídrica sostenible y eficiente. Respalda el enfoque de plantear el reuso como una herramienta para enfrentar la presión hídrica en entornos urbanos, reconoce la viabilidad de sistemas descentralizados y promueve acciones para superar las barreras técnicas y normativas. Se puede usar para fortalecer la argumentación institucional, relacionándolo con los ODS y la circularidad en la construcción.
Resolución 1256 de 2021	***Descripción:*** Reglamenta el uso de las aguas residuales tratadas en Colombia, y establece requisitos técnicos, ambientales y administrativos para su recirculación o reúso, no menciona las aguas grises, pero en general aplica a cualquier tipo de agua residual doméstica. El Artículo 3 dice que *"Siempre que sea técnica y económicamente viable, todo usuario del recurso hídrico podrá hacer la recirculación de sus aguas residuales, sin que se requiera autorización ambiental",* siempre que no haya escorrentía ni contacto con el suelo. El en el Artículo 4 indica que se requiere concesión de uso de aguas, y el usuario receptor debe garantizar el cumplimiento de los requisitos de calidad sin estar obligado a asegurar continuidad del suministro. El Artículo 5 define límites para el reúso agrícola (para el industrial no fija criterios ambientales, pero sí exige cumplir normas sanitarias). En el artículo 6 obliga al usuario receptor a presentar balance hídrico, identificación de riesgos ambientales, medidas de mitigación, y planes de monitoreo y seguimiento. En síntesis, esta normativa representa un marco actualizado para el reuso de aguas residuales tratadas (incluye aguas grises), siempre que se sometan a un tratamiento adecuado. (República de Colombia, 2021) ***Análisis:*** Aplica de forma directa si se enmarcan las aguas grises dentro de las residuales susceptibles de recirculación, permite su implementación sin autorización ambiental cuando no haya vertimiento, favoreciendo el reuso interno. Además, establece criterios técnicos que se pueden integrar como soporte para un diseño responsable y conforme a la normativa. Para

	este proyecto es un respaldo normativo claro y reciente que puede justificar técnica y legalmente el reuso de aguas grises tratadas en edificaciones residenciales.
Decreto 582 de 2023 (Bogotá D.C.)	***Descripción:*** Aunque no es una norma nacional, es un ejemplo pionero de regulación distrital que otras regiones pueden adaptar, está enfocado en promover prácticas de Ecourbanismo y Construcción Sostenible. En él se establecen estrategias para la implementación de redes hidráulicas diferenciadas, sistemas de pretratamiento y tratamiento secundario/terciario, en especial para aguas lluvia y aguas grises. También establece incentivos técnicos para edificaciones que adopten prácticas de este tipo, los diseños incluyen memorias que son verificadas por autoridades distritales. Aplica de forma obligatoria en Bogotá para proyectos urbanísticos y arquitectónicos que se acojan a los lineamientos de sostenibilidad (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2023) ***Análisis:*** Aunque tiene cobertura distrital, es un precedente técnico y normativo replicable en otras regiones, establece directrices específicas para redes diferenciadas, niveles de tratamiento y memorias técnicas, que se pueden adaptar en la formulación de lineamientos locales. Es una evidencia de como la normativa puede incorporar incentivos técnicos y administrativos para la implementación de sistemas sostenibles. Para este proyecto es un ejemplo práctico de aplicación territorial y argumento para promover procesos normativos similares en Ocaña.

Este último conjunto normativo proporciona un soporte clave que impulsa el tratamiento y reúso de aguas grises en edificaciones, a pesar de que la mayoría no lo regulan de forma directa, en estas normas se establecen las bases técnicas para el diseño de soluciones descentralizadas, específicamente en el RAS 2000 ya que permite implementar sistemas no convencionales previa justificación técnica, o la NTC 1500 que admite la construcción de redes hidráulicas diferenciadas en los diseños hidrosanitarios. Con respecto a las políticas públicas, el CONPES 4004 refuerza el modelo de economía circular, ideal para soportar este tipo de

proyectos y reconoce el reúso como alternativa importante ante la escasez hídrica, y el CONPES 3919 incluye estos sistemas en los criterios de sostenibilidad de edificaciones. Y la Resolución 1256 de 2021 es el referente legal más reciente y directo, que permite la recirculación de aguas residuales tratadas sin necesidad de autorización ambiental, garantizando la viabilidad técnica y sanitaria, esto es una oportunidad normativa concreta para implementar sistemas de reúso interno en edificios. Finalmente, el Decreto 582 de 2023 de Bogotá sirve como ejemplo replicable teniendo en cuenta su enfoque de construcción sostenible; experiencia que demuestra que es posible integrar el reúso de aguas grises en normativas urbanas que cuenten con respaldo técnico y administrativo. En síntesis, este bloque ofrece referentes que se pueden articular para diseñar, justificar y promover sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises en edificaciones urbanas como las del municipio de Ocaña.

4.2.1.4 Referentes internacionales y de artículos científicos

En esta sección se incluyen referentes normativos internacionales, así como consultas realizadas con base en artículos científicos.

Tabla 10.

Referentes internacionales y artículos de investigación.

Normativa	Descripción
Lineamientos técnicos voluntarios y acción institucional local – Jordania.	En este estudio se analizan las barreras para la implementación de prácticas de construcción sostenible en Jordania, enfocado en el marco institucional y regulatorio. Destaca que no existe una normativa nacional obligatoria; sin embargo, resalta el rol de Jordan Green Building Council y de la Greater Amman Municipality que promueven lineamientos técnicos voluntarios y ofrecen guías de inventivos locales. Indica que la falta de

	formas técnicas oficiales de regulación estatal obligatoria es una barrera crítica. Este referente demuestra que la acción institucional local puede ser el punto de partida de normativas progresivas, sin una política nacional consolidada. (Jaradat, et al., 2024)
Implementación de ODS en Colombia y vacíos normativos .	Este documento indica que se han incorporado los ODS en el Plan Nacional de Desarrollo y CONPES en Colombia, aún no se han establecido normas técnicas obligatorias ni mecanismos normativos claros para cumplir con estos compromisos, especialmente en Agua Limpia y Saneamiento (ODS 6), y en Construcción Sostenible (ODS 11). Identifica vacíos regulatorios y resalta la necesidad de que las entidades territoriales generen marcos de gobernanza e instrumentos regulatorios propios, en coordinación con el nivel Nacional. Destaca la importancia de alinear políticas públicas, normativas técnicas y licencias urbanísticas con los ODS para facilitar la implementación a nivel local. (Chavarro , et al., 2017)
Descentralización y viabilidad normativa del tratamiento de aguas grises – Costa Rica.	El estudio señala que Costa Rica no cuenta con un marco legal unificado y clatro que regule sistemas de tratamiento de aguas grises descentralizados. Menciona que el Decreto 33601-MINAE-S regula vertimientos y reuso de aguas residuales, pero carece de lineamientos específicos para aguas grises. Para propiedades privadas se permite la instalación cumpliendo unos requisitos, pero en espacios públicos la normativa involucra entidades dificultando su viabilidad. Destaca la ausencia de lineamientos técnicos oficiales, sistemas de monitoreo estandarizados e incentivos económicos, limitando su escalabilidad. El estudio concluye que el modelo es viable para condiciones muy específicas, por lo que se requieren normas más claras y con adaptación local. El estudio termina siendo un referente metodológico para otros países. (Perez, et al., 2024)
Avances normativos y vacíos regulatorios sobre aguas tratadas – Chile.	Este estudio analiza avances y desafíos del reuso de aguas residuales tratadas, especialmente en el sector agrícola. Aunque el país tiene una cobertura de tratamiento cercana al 100 % en zonas urbanas, el reúso es inferior al 1 % del caudal; y uno de los obstáculos es la falta de un marco legal. Destaca la Ley 21.075 de 2018, que regula la recolección y reutilización de aguas grises y establece cinco usos permitidos. Sin embargo, su aplicación está pendiente por la falta de normas técnicas

	definitivas. Añade también que el Instituto Nacional de Normalización (INN) desarrolló en 2021 la NCh 3456, una guía técnica con parámetros de calidad alineados con la regulación europea. Concluye indicando que a pesar de los avances el enfoque normativo es fragmentado, con más de 40 entidades gubernamentales involucradas, pero sin un liderazgo claro. (Vera Puerto, et al., 2022)
Panorama normativo sobre aguas grises en América Latina y el Caribe.	El estudio presenta un análisis comparativo del marco normativo sobre el agua en América Latina y el Caribe, enfocado en la reutilización de aguas grises. Evidencia heterogeneidad legislativa (algunos países reconocen el derecho humado al agua y tienen normas para aguas residuales pero la mayoría carece de regulación sobre aguas grises). Solo Chile contaba a la fecha de la publicación con una ley aprobada, Perú y Brasil tenían proyectos en trámite. El término "aguas grises", no está definido en muchas leyes, dificultando su tratamiento técnico y normativo. Propone avanzar hacia políticas públicas que impulsen el reuso descentralizado y el fortalecimiento de normativas a partir de referentes internacionales. (Rodríguez, et al., 2022)
Normas nacionales y legislación municipal sobre aguas grises – Sudáfrica.	Este estudio revisa el marco legal para la gestión de aguas grises en asentamientos informales urbanos en Sudáfrica. Identifica normas, pero fragmentadas y con difícil aplicación. Destaca que existen normas como la Constitución de 1996, la Water Services Act de 1997 y la SANS 1732:201x de 2019, que promueven el reuso en viviendas, pero su aplicación depende del apoyo local. Las National Building Regulations, de 2011, ofrecen lineamientos generales, pero no exigen separación de aguas. A nivel municipal, solo algunas ciudades (Ciudad del Cabo y Buffalo City) tienen ordenanzas específicas, pero la mayoría de los municipios carece de reglamentación clara y su implementación se ve limitada por desconocimiento técnico y falta de presupuesto. (Vala & Malazaa, 2024)
Falencias estructurales del marco normativo hídrico – Colombia.	En este artículo de identifica una crisis de gobernabilidad del recurso hídrico en Colombia, impidiendo avanzar hacia una gestión integral; a pesar de contar con múltiples normas (Decreto 2811 de 1974 o la Ley 99 de 1993). Señala que el marco actual es insuficiente y fragmentado, impidiendo la gestión integral del agua. Destaca cinco falencias

	estructurales: La descoordinación normativa ente entidades y niveles de gobierno, la ausencia de una Ley General de Aguas que unifique competencias, el desconocimiento de formas locales de gestión del agua como acueductos veredales o pueblos indígenas, la percepción de abundancia hídrica que desincentiva normas preventivas y la falta de referentes internacionales en el diseño normativo nacional. El documento propone avanzar hacia marcos normativos locales claros, dado que el vacío nacional obstaculiza soluciones como el reuso de aguas grises. (Zamudio Rodríguez, 2012).
Normas nacionales e internacionales como sustento técnico – Colombia y otros países.	En este trabajo de grado se propone un sistema para reutilizar aguas grises de la ducha en inodoros, y está respaldado por normas nacionales e internacionales. Destaca la Resolución 1207 de 2014, que en su artículo 6 menciona que autoriza el uso de aguas tratadas en descargas sanitarias, despaldando su diseño técnico. Menciona también el Real Decreto 1620 de 2007 (España), que permite usos similares como el riego y descarga de inodoros en viviendas, siendo un referente internacional. Analiza casos internacionales (EE. UU., Japón, Canadá, Australia, China, México, Brasil), donde ya se aplican tecnologías de reuso en sectores residenciales y urbanos, reforzando su viabilidad. En conclusión, aunque en Colombia no hay reglamentación específica, si hay marcos normativos aplicables al reuso de aguas tratadas y que el diseño se puede replicar con criterios de bajo costo y eficiencia. (Herrera Novoa & García Rodríguez, 2021).
Actualización del Reglamento de Alcantarillados y definición técnica de aguas grises – Chile.	Este informe técnico de la Dirección General de Aguas de Chile propone una actualización al Decreto Supremo N.º 236 de 1926, centrada en permitir el tratamiento y reutilización segura de aguas grises. Como componentes clave destaca la definición técnica de aguas grises excluyendo las aguas negras para diferenciación normativa, las limitaciones del DS 236 de 1926 que solo aplica en zonas sin alcantarillado público y propone modificar y articularlo con la Ley General de Servicios Sanitarios, y finalmente un análisis comparativo internacional especialmente con España, Estados Unidos, Australia e Israel; donde destaca el Real Decreto 1620/2007 como modelo por sus requisitos de calidad y procedimientos para autorización de reuso. El informe concluye que en Chile es necesario modernizar la normativa para

	permitir el uso eficiente mediante la reutilización segura de aguas grises. (Dirección General de Aguas – DGA, 2010).
Información financiera para la gestión hídrica en Colombia.	Este documento propone mecanismos contables para evidenciar la gestión ambiental hídrica de las empresas prestadoras de servicios públicos en Colombia. A pesar de que no está enfocado en aguas grises, destaca vacíos normativos de inversiones en protección hídrica, eficiencia y reúso. Critica la falta de lineamientos obligatorios en torno al uso eficiente del recurso bajo la Ley 99 de 1993 y la Ley 142 de 1994; por ello sugiere crear instrumentos como informes financieros ambientales o cuentas satélite del agua que orienten decisiones e incentiven prácticas como el reúso, por lo que resulta útil para fortalecer el diseño normativo y financiero local con respecto a estrategias sostenibles. (García & Moreno, 2010)
Reglamentación técnica para el reúso de aguas grises – Chile.	El documento analiza la regulación chilena sobre el reuso de aguas grises, destaca el avance con el Decreto Supremo No 4 de 2014, que aprueba el reglamento para el uso de aguas grises y establece criterios técnicos y sanitarios para su utilización en actividades no potables como riego, inodoros y lavado de vehículos. Menciona la modificación del DS 1199 de 2004, que habilita los sistemas, pero con limitaciones para uso habitacional. Además, la normativa chilena otorga competencias a los municipios para definir usos y autorizar instalaciones, lo cual puede generar heterogeneidad regulatoria. Se hace énfasis en la necesidad de avanzar con una normativa coherente y transversal, que relacione los niveles técnicos, institucionales y territoriales, fomentando la innovación en la gestión del agua. (Gras Alomá, 2024)
Ley 21.075 – Regulas las aguas grises – Chile.	El eje central es la Ley 21.075 de 2018, que es una de las más completas en América Latina sobre aguas grises, ya que define conceptos técnicos, regula su recolección, tratamiento y reúso, establece usos permitidos y prohibidos (contempla sanciones), condiciones para aprobación de proyectos, establece exigencias sanitarias y criterios urbanísticos. Además, ordena la integración obligatoria de estos sistemas en proyectos urbanísticos definidos por la normativa de planificación. Esta ley permite desarrollar sistemas individuales o colectivos, garantizando la separación obligatoria

> de aguas grises y negras, promoviendo la integración. Por ello representa un modelo normativo replicable, útil como referente técnico y legislativo para contextos como el colombiano, y a nivel Municipal. (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2018).

Analizando toda la información se observa que la mayoría de los actores clave entrevistados desconocen el marco legal específico, algunos indican que no hay exigencias técnicas claras ni normas que obliguen a implementar estos sistemas de reuso. Esta percepción coincide con lo encontrado en el análisis documental: el marco normativo es insuficiente para implementar este tipo de soluciones. Se concluye que no existe una norma específica aplicable a la reutilización de aguas grises en edificios residenciales en Ocaña, ya que las disposiciones actuales se orientan al control de vertimientos, más que al fomento del reuso y no existen estándares técnicos. La experiencia internacional demuestra que se puede construir de forma progresiva el marco legal, basado en control sanitario, calidad del agua, usos permitidos y diferenciación de tecnologías teniendo en cuenta el tipo de tratamiento y su alcance.

4.2.2 Sistemas de tratamiento de aguas grises implementados

En esta sección se integran los resultados de la revisión documental clasificada en las categorías estado del arte y tendencias (Categoría A), factores sociales y percepción pública (Categoría B) y viabilidad técnica, ambiental y económica (Categoría D); lo que permitió abordar globalmente el reuso de aguas grises teniendo en cuenta distintas dimensiones. Los documentos analizados incluyen investigaciones académicas, artículos técnicos, estudios de caso internacionales y experiencias (locales o regionales) que han sido sistematizadas en fichas con enfoque comparativo. Esta metodología facilita una visión integral, complementando el análisis normativo previo con evidencia sociocultural y técnica.

4.2.2.1 Estado del arte y tendencias en reutilización de aguas grises. El análisis de los documentos agrupados en esta categoría evidencia la evolución en el enfoque de la reutilización de aguas grises, proporcionando una visión integral y adaptativa, donde las tecnologías deben integrarse con aspectos sociales, ambientales y de planificación urbana.

Varios estudios contemplan el reuso como un componente estratégico para sistemas urbanos sostenibles y resaltan que las aguas grises no se deben evaluar desde una perspectiva sanitaria o hidráulica; sino como una fuente complementaria en el ciclo urbano del agua, que es capaz de reducir la dependencia de las fuentes convencionales, mejora la resiliencia urbana y es clave en la transición a ciudades circulares, con gestión integrada del agua y resilientes. Un artículo de investigación desarrollado entre instituciones de Bélgica y Corea del Sur plantea que el reúso de aguas grises permite cerrar ciclos, reducir cargas sobre los sistemas convencionales de tratamiento y optimizar el balance hídrico urbano, especialmente en regiones con presión hídrica o semiáridas. (Van de Walle, et al., 2023).

Con respecto a la integración entre infraestructura verde y servicios ecosistémicos, otra investigación evalúa la multifuncionalidad de sistemas de revegetación vertical empleando distintas estrategias de riego, que incluyen agua potable y aguas grises no tratadas, evaluando los aspectos de enfriamiento, desarrollo vegetal y capacidad de tratamiento, se evidencia que los sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises pueden cumplir varias funciones a la vez (hidráulicas, térmicas, paisajísticas y ecológicas), lo cual es una estrategia valiosa para incorporar en edificaciones sostenibles, reforzando el concepto de multifuncionalidad, como un criterio clave en el diseño. (Pucher, et al., 2022)

Así mismo, en el documento titulado "*Scientific Evidence behind the Ecosystem Services Provided by Sustainable Urban Drainage Systems"* se profundiza en los servicios ecosistémicos aportados por soluciones basadas en la naturaleza como biofiltros, humedales urbanos o jardines filtrantes donde se buscaba gestionar el agua pluvial de forma sostenible; se demostró que estas estructuras contribuyen a la diversidad, regulación térmica y recuperación paisajística además de tratar el agua, lo que representa una oportunidad para implementar sistemas que además de gestionar las aguas grises mejoren las condiciones urbanas locales. (Arbellán & Santamarta, 2022).

Abordando la planificación urbana y las rutas de implementación gradual se encuentra un artículo científico desarrollado en el 2020, el cual plantea una metodología de planificación de sistemas urbanos de aguas residuales mediante rutas de adaptación para evaluar la resiliencia y flexibilidad a largo plazo en contextos con incertidumbre climática, urbanización y eventos extremos. Se destaca la importancia de implementar tecnologías de manera progresiva, contemplando aspectos como el crecimiento urbano, participación institucional y disponibilidad presupuestal, y resalta además que las estrategias verdes muestran mayor flexibilidad a largo plazo mientras que las híbridas tienen a ser más efectivas a corto plazo. Esto refuerza la necesidad de que en ciudades como Ocaña se adopten esquemas flexibles y sencillos, con metas realistas a mediano plazo. Lo anterior es un planteamiento para ciudades intermedias como Ocaña, iniciar con soluciones híbridas que complejidad baja en términos tecnológicos y alta capacidad de adaptación, que se puedan escalar de forma progresiva. (Sadr, et al., 2020)

Por otra parte, con respecto a indicadores de sostenibilidad, un estudio realizando en España analiza como los sistemas de certificación de construcción sostenible (LEED, BREEAM, etc.) abordan las dimensiones ambiental, social y económica en términos de sostenibilidad, en términos de gestión del agua se centran más el consumo de agua potable y no incorporan de forma integral los criterios relacionados con el ciclo de vida del agua, lo que refleja una oportunidad de mejora en estos esquemas. El artículo señala la necesidad de ampliar los módulos de información para incluir el reuso de aguas grises en los criterios de evaluación. Esto justifica el desarrollo de marcos normativos e incentivos a nivel local en los que se reconozcan los proyectos que integren tecnologías de tratamiento de aguas grises como una medida del desempeño ambiental. (Braulio Gonzalo, et al., 2022).

En síntesis, todos estos documentos coinciden en que identifican como factores críticos para el éxito de la implementación de sistemas de reuso: la existencia de una regulación ya sea específica o permisiva, incentivos económicos o fiscales, el diseño integrado desde la planificación del proyecto, la educación y apropiación social del sistema y monitoreo de calidad con mantenimiento accesible. Las tendencias actuales apuntan a que esta problemática de debe abordar de forma multifuncional y sistémica, en la que se integre la infraestructura de tratamiento con los objetivos técnicos, sociales y ambientales. Estas ideas son fundamentales para orientar propuestas en Ocaña ya que permiten identificar estrategias de implementación adaptables al contexto urbano, enfocadas en soluciones escalables, con un diseño progresivo que además permitan el aprovechamiento de servicios ecosistémicos y la alineación con marcos de sostenibilidad.

4.2.2.2 Factores sociales y percepción pública. Otros de los elementos decisivos en la viabilidad de los sistemas de reutilización de aguas grises son la aceptación social, las barreras culturales y las creencias colectivas en torno al uso del agua. En análisis documental realizado basado en estudios provenientes de diferentes contextos evidencia una tendencia de que la tecnología no garantiza por sí sola, el éxito de los sistemas de tratamiento y reutilización si no existe respaldo social, apropiación comunitaria y confianza pública.

Se identificó en la mayoría de los estudios consultados que existe una baja familiaridad de la población con el término "aguas grises", y una confusión frecuente con las aguas negras o aguas lluvias. Lo cual puede generar un rechazo inicial al uso de agua tratada, especialmente para actividades dentro del hogar, pues como se indica en uno de los artículos de investigación consultados la sociedad tiene una barrera psicológica que genera sensación de repulsión hacia el uso de agua reciclada, debido a una percepción de que el agua está sucia o puede representar alguna infección después del uso. (Meléndez Perez, et al., 2019). Además, en muchos casos no se socializan los beneficios ambientales o económicos asociados y esto genera una reducción en la motivación para adoptar estas soluciones.

En un estudio desarrollado en la región de Sahel se reveló que el 78% de los encuestados desconocía que son las aguas grises, a pesar de que más del 80% manifestó estar interesado en las soluciones para reducir el consumo hídrico y reconoció que descargaban estas aguas al entorno natural sin un tratamiento previo. (Tidiane Compaoré, et al., 2024). Esto evidencua una oportunidad clara para diseñar estrategias educaticas e infromativas en las que se convieta el desconocimiento en una aceptación progresiva, más aun cuando los beneficios son tanbigles, como es el caso.

Por otra parte, en una investigación desarrollada en Colombia, se realizó una encuesta a 73 personas entre estudiantes y profesores de una universidad en Bogotá evidenciando que, aunque el 100% considera que es importante cuidar y optimizar el agua, la mayoría confundían los conceptos, desconocían normativas aplicables o nunca habían realizado prácticas para recolectar aguas grises. (Picón, 2022).

Ahora bien, pese al desconocimiento inicial, la mayoría de los estudios consultados reportan que la disposición para aceptar el reúso de aguas grises aumenta de manera significativa cuando se hace un proceso de socialización en el que se explican los beneficios para la sostenibilidad, el funcionamiento del sistema y que los usos propuestos que no están relacionados con el consumo humano. En uno de los estudios analizados, realizado en Colombia, se evidenció que tras procesos de socialización el 89% de los participantes aceptaría el uso de aguas grises tratadas especialmente para riego o descarga de sanitarios. (Meléndez Perez, et al., 2019). En el Caso de Costa Rica, otro estudio mostró la aceptación de una solución basada en la naturaleza para el tratamiento descentralizado de aguas grises los hallazgos clave incluyeron que la aceptación pública y la percepción social son factores críticos para una implementación exitosa, así mismo se identificó que la disposición de los usuarios depende de la eficiencia del tratamiento, costo y facilidad de mantenimiento y que la aceptación mejoraba si se garantizaba la seguridad del tratamiento y funcionalidad del sistema, todo esto gracias a la estrategia de educación ambiental implementada desde el inicio del proyecto. (Perez, et al., 2024).

Uno de los obstáculos más persistentes es la percepción de riesgo para la salud (por la presencia de compuestos químicos) particularmente cuando el sistema no es visible, el agua

presenta color, olor o turbidez no habitual y no se realiza mantenimiento constante. (Nuñez, et al., 2014). En contextos con bajos ingresos o que tienen acceso limitado al agua es más reducida la confianza en sistemas no convencionales. En Buenos Aires, Argentina los usuarios aceptarían el reúso solamente si se garantiza un tratamiento seguro, y si el agua tratada no tiene contacto visual o físico directo con los residentes. (Nuñez, y otros, 2014).

También existen contextos donde la reutilización puede entrar en conflicto con creencias religiosas, pues existen percepciones sobre "pureza" del agua o representaciones culturales del saneamiento. Aunque no es un aspecto predominante, en Jordania una parte del rechazo está relacionado con la falta de reconocimiento cultural como una práctica positiva ambientalmente. (Jaradat, et al., 2024)

Finalmente, varios estudios señalan que la aceptación mejora considerablemente cuando la solución se implementa en entornos institucionales, comunitarios o espacios educativos, en los cuales se puede observar, monitorear e incluso replicar. En el caso del diseño desarrollado por Daniel Picón, como parte de un proyecto universitario se evidenció una alta aceptación del modelo propuesto donde se incluía el ciclo de vida del sistema. (Picón, 2022).

En conjunto, se concluye que la aceptación social no depende únicamente del desempeño técnico, sino de factores como la educación ambiental, la participación comunitaria, la percepción del riesgo y el uso del agua tratada; estas variables se deben considerar desde el diseño de las estrategias de implementación ya que en ciudades como Ocaña el éxito del sistema

dependerá de la capacidad del proyecto para generar confianza, apropiación comunitaria y beneficios tangibles desde el ámbito social.

4.2.2.3 Viabilidad técnica. En numerosos estudios se ha evaluado la viabilidad técnica de los sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises ya sea aplicado en viviendas unifamiliares, edificios multifamiliares, instituciones educativas y comunidades. Los documentos analizados muestran que existen diseños replicables, eficientes y adaptables, desarrollados tanto en América Latina como en otros contextos internacionales, lo que permite identificar alternativas viables en el contexto de Ocaña.

En un estudio realizado por Herrera y García, se diseñó un sistema doméstico en el que se recolectan las aguas grises de la ducha, se almacenan en un tanque y luego se bombea al inodoro. Para realizar el diseño se tuvo en cuenta el cálculo hidráulico, los caudales adecuados para viviendas y las pérdidas por fricción. Con este sistema se logró llenar un tanque de 16 L en 58 segundos, permitiendo hasta seis descargas diarias con agua reciclada. El costo de los componentes del sistema fue en total de **$ 212.890,00 COP**, incluyendo la bomba, tubería, tanque y accesorios; y se cumplió con el objetivo de reducir el consumo de agua potable. (Herrera Novoa & García Rodríguez, 2021).

Los humedales artificiales o construidos son una tecnología consolidada, adaptable, de bajo costo y operación sencilla, siendo relevante para entornos residenciales en ciudades intermedias. En un análisis a nivel regional se identificaron cerca de 300 experiencias exitosas con sistemas de flujo subsuperficial y vertical que emplean sustratos como grava, arena y zeolita, junto con especies vegetales, demostrando una eficiencia alta en la remoción de sólidos y contaminantes orgánicos. (Santos, et al., 2024). En estudios desarrollados en México se

integraron estos sistemas con actividades productivas como la producción de plantas ornamentales, dando como resultado una remoción de DBO, nutrientes y sólidos suspendidos variable, la cual de acuerdo con el tipo de vegetación ascendió hasta más del 90% en algunos casos. (Marín Muñiz, 2017) Todos estos hallazgos sugieren oportunidades claras para incluir los humedales artificiales como soluciones sostenibles en planes de ordenamiento territorial o como incentivo por ambiental.

Entre las tecnologías consultadas también se halló una basada en un tratamiento con biofiltros y humedales artificiales, que evaluó un bioprototipo en Puerto Colombia compuesto por filtros naturales y un humedal subsuperficial horizontal. El sistema operó en condiciones reales y demostró tener eficiencia en la remoción de sólidos y materia orgánica, específicamente un 96,18% de DBO, un 82,76 % de DQO, un 96,02% de sólidos suspendidos totales y un 100% de coliformes totales, entre otros. Su implementación se realizó con materiales de bajo costo, con éxito técnico y buena aceptación social, cumpliendo con el objetivo de ofrecer una solución técnica viable en un entorno urbano. (Vergel, 2023).

En cuanto a la Nanofiltración, varios estudios la destacan como una tecnología eficiente en la remoción de compuestos orgánicos, solidos disueltos y micro contaminantes, con un requerimiento energético mejor con comparación con tecnologías como la ósmosis inversa. En un estudio desarrollado para el tratamiento de aguas residuales industriales la remoción de sólidos disueltos y de materia orgánica fue cercana al 90%, operando a presiones más bajas que para procesos de ósmosis inversa y con caudales adaptables a plantas urbanas pequeñas. (Deratani, et al., 2012) Adicionalmente en una experiencia piloto con membranas de

nanofiltración y procesos avanzados de oxidación, se alcanzó una eficiencia elevada de remoción de micro contaminantes, que varía entre el 94% y el 97%, cumpliendo con estándares de calidad para uso no potable. (Miralles Cuevas, 2015) Un análisis detallado realizado por Sotto Diaz, comprobó que el rendimiento de membranas de Nanofiltración varía según el pH, la estructura molecular y la presión de los contaminantes, en el estudio se evaluaron varios tipos de membranas y se analizaron las propiedades fisicoquímicas, aportando criterios para seleccionarlas en función de las características del agua gris a tratar. (Sotto, 2008). Estas investigaciones permiten identificar oportunidades de mejora técnica en el tratamiento de aguas grises mediante sistemas de nanofiltración, ya que ofrecen alternativas eficientes, de alta calidad y con posibilidad de implementación en edificaciones urbanas residenciales.

En otro estudio, desarrollado en Lima, Perú, se diseñó un sistema para un edificio multifamiliar, que tenía la capacidad de tratar 990 L al día. El diseño incluyó un tanque de pretratamiento, filtro biológico, cloración y almacenamiento, y para realizando se tuvo en cuenta caudales reales y normas peruanas aplicables. La eficiencia del sistema fue adecuada para su uso en inodoros, cumpliendo así con el objetivo de ofrecer una solución técnica replicable en zonas urbanas de mediana densidad. (Candiotti, 2018).

Los sistemas físico-biológicos simples como los filtros de grava, carbón activado y arena sílica, representan soluciones accesibles, de bajo costo y de fácil mantenimiento, adecuadas para viviendas. Por ejemplo, en México se implementó un sistema modular para una vivienda de interés social, como filtros en serie con distintos medios (materiales pétreos naturales y plantas

de ornato) que logró la reducción del 77,6% de DQO, siendo apto para riego y limpieza. (Bautista Gómez, et al., 2023).

Por otra parte, la autora Melisa León propuso el uso de tres tipos de geotextiles no tejidos para filtros caseros de bajo costo, el estudio se desarrolló probando tres configuraciones distintas con materiales locales, evaluando los criterios DBO, DQO, SST y coliformes. Los resultados arrojaron que los filtros tienen buena capacidad de remoción de DBO y DQO, mientras que en los parámetros de coliformes totales y fecales arrojó altos niveles de contaminación, a pesar de que se cumplió el objetivo de probar materiales alternativos para implementar en estos sistemas de tratamiento, se determinó que no son los ideales ya que no remueven los parámetros indicados. (León, 2021)

Hay una tecnología que destaca por su alto rendimiento en espacios reducidos, haciéndola viable técnicamente para edificaciones urbanas y edificios multifamiliares, son los Biorreactores de Membrana (MBR). En Murcia se implementó un sistema híbrido (UASB + MBR), cuyos resultados arrojaron cerca de un 95% de remoción de materia orgánica, un 98% de nitrógeno amoniacal, buena parte del nitrógeno total (entre el 45% al 78%), y eliminación total de los sólidos suspendidos. (Simón Andreu, et al., 2024).

También se documentó un estudio en Portugal, donde analizó el uso de muros verdes como tecnología multifuncional para tratar aguas grises. En este estudio se evaluaron parámetros de diseño como la tasa de carga hidráulica, profundidad del sustrato y especies vegetales. Se logró determinar que los sistemas tenían buena eficiencia en la remoción de nutrientes y sólidos,

y, además, se recomendó su implementación en zonas con estrés térmico, cumpliendo con el objetivo y destacando aspectos como los beneficios paisajísticos y de confort térmico. (Galvao, et al., 2025)

Por último, el autor Patarroyo Martínez, diseñó un sistema de circulación de aguas grises para colegios públicos en Chía, en Cundinamarca, el cual consta de tratamiento fisicoquímico y almacenamiento, además de analizar los aspectos económicos y ambientales, determinando un presupuesto de $ 42.040.361,00 COP, incluyendo la estructura del sistema de recirculación y la línea base de costos. El diseño fue viable en términos estructurales por lo que se planteó como modelo estándar replicable; de esta forma se cumplió con el propósito de formular una solución adaptada al entorno educativo, y que se puede trasladar a edificios multifamiliares. (Patarroyo, 2017).

Esta diversidad de estudios demuestra que hay variedad de soluciones viables técnicamente para el tratamiento y reutilización de aguas grises, adaptables al contexto urbano de Ocaña y diferenciadas por criterios como el tipo de edificación, disponibilidad de espacio y nivel de tratamiento requerido. Se identificó que los objetivos técnicos se alcanzaron en todos los casos revisados, con niveles adecuados de remoción, adaptados a los materiales locales en algunos casos, con una demanda energética controlada en sistemas avanzados y con posibilidad integración con estrategias de sostenibilidad urbana. Así mismo, la evidencia técnica demuestra que hay cuatro estrategias que destacan: Humedales construidos, MBR, Nanofiltración y Sistemas físico-biológicos simples, y son viables para su aplicación en Ocaña de acuerdo con las eficiencias de remoción indicadas y su adaptabilidad.

4.2.2.4 Viabilidad ambiental. Desde la perspectiva ambiental los sistemas analizados ofrecen beneficios directos e indirectos que los catalogan como alternativas sostenibles para la gestión hídrica urbana; estos beneficios no solo se limitan a la reducción en el consumo de agua potable, el cual es muy importante, sino que incluyen también la disminución de cargas contaminantes, mitigación del impacto climático, conservación de los cuerpos receptores y generación de servicios ecosistémicos urbanos.

En el caso de los sistemas físico-biológicos simples, se ha comprobado su capacidad de remover contaminantes domésticos con materiales accesibles. En un sistema modular de filtración en viviendas familiares se realizaron análisis fisicoquímicos mostrando remociones de DBO del 66,67%, DQO del 62,50%, nitratos del 70,59%, y sólidos totales disueltos del 52,68%, entre otros; para esto se utilizaba grava, arena y carbón activado artesanal como medios filtrantes. Esto confirma que las tecnologías, además de ser accesibles permiten reducir la contaminación del agua, sin generar una huella ambiental considerable. (Azabache, et al., 2020)

Como se mencionaba anteriormente la reutilización de aguas grises evita que grandes volúmenes de aguas ligeramente contaminadas lleguen a los sistemas de alcantarillado y, posteriormente, a cuerpos receptores, reduciendo su carga contaminante y protegiendo los ecosistemas acuáticos. Como se consultó en el documento desarrollado en la Universidad Católica de Colombia, que hacía un análisis y evaluación de alternativas de ahorro y reutilización de aguas lluvias y grises para viviendas unifamiliares y edificios multifamiliares en Colombia, se estimó que la reducción efectiva de agua podía estar cerca de un 29,61%. (López Bernal & Ávila Escobar, 2021).

Los humedales construidos y otras soluciones basadas en naturaleza tales como biojardineras, humedales artificiales o construidos, muros verdes y zanjas de infiltración, ofrecen otros beneficios ecosistémicos, pues promueven la biodiversidad, mejoran el entorno urbano, reducen la temperatura ambiente y capturan carbono. En uno de los estudios consultados se documenta que los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible contribuyen al mejoramiento de la calidad del agua, a la regulación del escurrimiento, al incremento de la biodiversidad urbana, al enfriamiento micro climático y al secuestro de carbono en suelos y vegetación. (Arbellán & Santamarta, 2022). Así mismo en una revisión sobre humedales para aguas grises se resalta que estos sistemas además de ser efectivos ambientalmente permiten la integración con vegetación y paisajismo local. (Santos, et al., 2024) De la misma forma, un experimento desarrollado en Austria, que se realizó con un sistema de muro verde vertical demostró remociones promedio de 91% para BOD5, 86% para COD y 92% de NH4-N, entre otros; en conjunto con la reducción de la temperatura superficial logrando mejorar el confort térmico urbano y generando hábitats vegetales; así mismo resaltan la importancia de realizar un estudio más de la influencia de la temperatura ambiente en los procesos de tratamiento. (Vobruba, et al., 2024)

Desde el punto de vista energético, la reutilización local del agua mediante tecnologías descentralizadas como MBR o Nanofiltración, hace que reduzca el consumo energético asociado al transporte, bombeo y tratamiento tanto de agua potable como residual. En una revisión realizada los autores encontraron que el uso descentralizado de aguas grises reduce de forma significativa el gasto energético y las emisiones de carbono, favoreciendo su adopción como una herramienta de mitigación climática; de igual forma resaltan la importancia de conectar las fuentes de energía limpia a la gestión del agua descentralizada. (Van de Walle, et al., 2023). Este

argumento se refuerza la teoría de que los sistemas de membranas operan de forma eficiente en presiones bajas, reduciendo el requeriemiento energético.

También se consultó que los sistemas de tratamiento tienen buen rendimiento en distintos contextos, incluso en los áridos donde hay una temperatura alta y disponibilidad limitada de agua, abordando efectos como la isla de valor y purificación del aire. En un estudio desarrollado se demostró que la irrigación con aguas grises no generó efectos negativos en el desarrollo vegetal y se presentó una reducción del aire local de hasta 3,4°C, lo cual, valida su uso como una alternativa para zonas secas, sin embargo, debe tenerse en cuenta que hay que controlar la carga hidráulica y optimizar los materiales de relleno para evitar obstrucciones. (Pucher, et al., 2022).

Por otra parte, en el estudio desarrollado por Gómez & Hoyos, se reporta que el reúso de aguas grises en primera medida reduce el consumo actual de agua potable y reduce la carga hacia las plantas de tratamiento convencionales, destacan que una reducción del 25% (la mínima determinada) en el consumo de agua potable tiene impactos ambientales positivos como el aumento en la vida útil de los sistemas de alcantarillado centralizados y la disminución de vertimientos Además, un aspecto importante señalado es la generación de conciencia ambiental comunitaria, clave para la sostenibilidad de los sistemas en el tiempo. (Gómez & Hoyos, 2017).

En conjunto, se observa que los sistemas de tratamiento de aguas grises, en especial aquellos basados en la naturaleza, de bajo impacto energético y descentralizados contribuyen de manera significativa a la sostenibilidad ambiental urbana, reducen la demanda de agua potable, mitigan la carga contaminante, reducen vertimientos, disminuyen la huella de carbono, generan confort térmico y promueven la biodiversidad. Esta lista de beneficios respalda su aplicación en

contextos como Ocaña, y se debe considerar como criterios técnicos en los procesos de diseño y evaluación de proyectos de reúso.

4.2.2.5 Viabilidad económica**.** Para establecer la factibilidad financiera de la implementación de sistemas de tratamiento en edificaciones urbanas, el potencial en la reducción de consumo de agua potable y los costos operativos asociados, se debe realizar la evaluación económica que considere el valor inicial, así como los beneficios acumulados a largo plazo. En el análisis realizado se evidencia que, si bien el costo inicial se puede percibir como una barrera, la mayoría de los sistemas presentan retornos de inversión aceptables y ahorros relevantes, especialmente si desde el diseño arquitectónico se contempla el sistema.

Los estudios concuerdan en que los sistemas más viables para entornos urbanos con ingresos medios o limitados son aquellos que emplean filtración, sedimentación y desinfección básica, ya que son sistemas de bajo costo. En un prototipo desarrollado por Herrera & García en Bogotá el costo de los componentes del sistema fue aproximadamente de $212.890 COP, y se determinó que no requería intervenciones estructurales complejas, es decir, fue diseñado para que operara de forma autónoma. (Herrera Novoa & García Rodríguez, 2021).

Por otra parte, hay sistemas más avanzados como los biorreactores de membrana (MBR), que se caracterizan por presentar altos costos iniciales. En un estudio desarrollado en Portugal, el sistema alcanzó un ahorro anual del 33 % en consumo de agua potable, que tendría una equivalencia de 3.351,92 m^3 y un retorno de inversión de 24 años. Identificaron que los costos elevados pueden sugerir alternativas más económicas que pueden incluir filtros de arena o humedales artificiales. (Meléndez Perez, et al., 2019).

En otro caso, en el que desarrolló un sistema completo para un edificio multifamiliar en Lima, Perú, los autores estimaron que el consumo de agua se reduce de 58,81 a 23,18 lo que en términos económicos refleja una reducción cercana al 60%, además se estimó un retorno de inversión entre 3 a 4 años por reducción en el consumo de agua potable y menor volumen de vertimiento. (Candiotti, 2018).

En general, numerosos estudios reportan que los ahorros en el consumo de agua potable pueden estar entre el 25% y el 40%, especialmente cuando el sistema se utiliza para descarga de inodoros y riego. Por ejemplo, en la investigación desarrollada por López y Ávila, se modelaron sistemas mixtos en Bogotá, estimando reducciones de hasta el 30% del consumo en viviendas unifamiliares y del 35% en edificios multifamiliares, generando un retorno de inversión entre 5 y 7 años según el tamaño del sistema y la ubicación. Los autores también resaltan mayor viabilidad económica en proyectos nuevos que en adaptaciones sobre edificaciones existentes. (López Bernal & Ávila Escobar, 2021).

Así mismo, en el proyecto desarrollado por Gómez y Hoyos, que estaba enfocado en reducir el consumo de agua potable en un condominio de 300 viviendas en Girardot mediante una planta de tratamiento que aprovechara las aguas lluvias recolectadas, se logró un ahorro se estimado en el 70% del consumo de agua potable, además se hizo un análisis que indicó que la recuperación de la inversión se daría en menos de 18 meses y una tasa interna de retorno del 65,31%, lo que indica su rentabilidad. (Gómez & Hoyos, 2017).

En otro documento consultado, se lograron ahorros diarios de hasta más de 10 litros en viviendas familiares, y una reducción significativa en la tarifa de acueducto y vertimientos a la red de alcantarillado sanitarios. (Azabache, et al., 2020). Todas estas cifras demuestran que,

dependiendo del contexto, el retorno puede ser rápido y los beneficios a largo plazo son relevantes para edificaciones residenciales.

También es conveniente analizar los factores identificados que pueden afectar la rentabilidad de estos sistemas de tratamiento. Entre ellos destacan: el costo del agua potable en la región (a mayor tarifa, mayor ahorro y retorno más rápido); el número de usuarios o apartamentos conectados pues en sistemas compartidos se mejora la economía de escala; el tipo de tecnología seleccionada, ya que sistemas más simples tienen mejores indicadores financieros iniciales mientras que los de alta tecnología requieren otro tipo de incentivos para ser viables, y el mantenimiento, ya que de no planificarlo puede generar sobrecostos o reducir la vida útil del sistema**.** (Meléndez Perez, et al., 2019).

En muchos estudios se resalta la falta de políticas públicas que fomentes estos sistemas en términos económicos, ya que se identifican barreras comunes como la falta de subsidios o créditos, el no reconocimiento de los sistemas en la valorización de edificaciones y los costos no subsidiados por entidades territoriales; por ello varios documentos sugieren la creación de incentivos tributarios, la incorporación de criterios de reuso en certificación como EDGE o LEED, o incluso bonos verdes urbanos para proyectos que integren el reuso de aguas grises. (Departamento Nacional de Planeación, 2020).

A pesar de los desafíos iniciales, los sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises son económicamente viables, especialmente en edificaciones nuevas como se propone en este proyecto, con un diseño adaptado desde la etapa de diseños y planeación. Con las tecnologías adecuadas, el retorno de inversión puede ser inferior a 5 años especialmente, si se aplican incentivos de algún tipo. Para contextos como el de Ocaña, donde la presión hídrica

aumenta al igual que las tarifas de servicios estas soluciones, además de ser una medida ambienta, son una inversión estratégica a mediano plazo.

La revisión documental, normativa y el análisis de experiencias técnicas y sociales realizado, permiten identificar oportunidades concretas para fomentar la implementación de sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises en Ocaña. Actualmente en Colombia no hay regulación específica, clara ni obligatoria para el reuso de aguas grises, a pesar de que hay normatividad relacionada ninguna exige o reglamente el aprovechamiento de aguas grises. Localmente también se evidencia esta ambigüedad, pues no se han definido lineamientos técnicos ni en su POT ni en los requisitos para emitir licencias de construcción que promuevan estas soluciones, a esto se le suma la débil articulación institucional con las autoridades ambientales, lo que se refleja en la ausencia de incentivos y líneas de apoyo, situación que se respalda con el alto nivel de desconocimiento manifestado por los actores entrevistados.

Pese a estas limitaciones, la comparación internacional evidenció modelos normativos replicables, destacando la Ley 21.075 de Chile, y avances en ciudades donde se han generado ordenanzas locales, reglamentos y guías de diseño específicas aún sin regulación internacional. Técnicamente se identificaron soluciones modulares de bajo costo y fácilmente replicables, las cuales se han probado en contextos similares con buenos resultados técnicos, sociales y financieros. En el ámbito social se evidenció que la aceptación aumenta cuando se socializa el sistema, se explica su funcionamiento y se detallan beneficios económicos y ambientales.

Desde el punto de vista técnico, se identificaron cuatro tipos de estrategias de tratamiento que destacan en los estudios y son especialmente viables para Ocaña: los humedales construidos, los biorreactores de membrana (MBR), los sistemas físico-biológicos simples y la nanofiltración;

cada una de ellas ofrece ventajas específicas según el tipo de edificación, disponibilidad de espacio, calidad requerida y capacidad operativa. Los humedales y los sistemas físico-biológicos se caracterizan por su bajo costo y facilidad de operación, mientras que los MBR y la nanofiltración brindan un tratamiento más avanzado en espacios compactos a pesar de tener un costo de implementación mayor con respecto a las otras dos. Estas tecnologías, identificadas en múltiples estudios han mostrado altos porcentajes de remoción de contaminantes, adaptabilidad y aceptación social.

En el componente social, se evidenció que la aceptación de los sistemas aumenta si la implementación va de la mano con un proceso de socialización adecuado, donde se expliquen los beneficios económicos y ambientales, y e brinde confianza en la calidad del agua tratada. Las percepciones negativas disminuyen cuando el sistema es visible y se integra en contextos comunitarios o institucionales, lo que representa una oportunidad estratégica de implementación inicial.

Con el fin de impulsar la adopción de estos sistemas en Ocaña se propone partir con la formulación de un lineamiento técnico local, que sea liderado por entidades competentes, que defina los usos permitidos, criterios de diseño y parámetros operativos, tomando como base modelos existentes como el de Bogotá D.C. o las guías internacionales. Esto documento debería estar integrado con el Plan de Ordenamiento Territorial estableciendo criterios obligatorios en proyectos nuevos y zonas piloto. En segundo lugar, se sugiere formular un piloto en alguna institución, edificio multifamiliar o conjunto residencial, donde se valide el sistema técnicamente, se evalúe el desempeño y sirva como modelo replicable. Finalmente se recomienda la implementación de una campaña educativa comunitaria con el fin de mejorar la

apropiación social y técnica en todos los niveles, permitiendo que además de ser técnicamente viables sean aceptados, mantenidos y escalados sostenibleme nte.

4.3 Definir una estrategia integral que promueva la implementación eficiente y sostenible de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises, mediante la síntesis de la información recopilada y el diseño de propuestas adaptadas al contexto local; enfocado en la reducción del consumo de agua potable y la gestión hídrica sostenible, considerando los aspectos ambientales, sociales y económicos.

En esta sección se desarrolla el tercer objetivo del proyecto, que está centrado en la formulación de una estrategia técnica e integral para implementar sistemas de tratamiento **y** reutilización de aguas grises en edificaciones del municipio de Ocaña, Norte de Santander. Se parte de la síntesis de los hallazgos identificados en el diagnóstico normativo, técnico, social y ambiental abordado en los anteriores objetivos específicos; incorporando además criterios de evaluación comparativa y propuestas adaptadas a la realidad local.

Es necesario recordar que, aunque en Ocaña no se presenta un déficit hídrico generalizado, ya que hay suministro de agua potable de forma continua, las fuentes abastecedoras del sistema de acueducto del municipio si enfrentan presiones importantes tanto por el crecimiento urbano acelerado como por la ausencia de estrategias de conservación bien estructuradas. El crecimiento desordenado en unos sectores y el aumento en la construcción en los últimos años ha aumentado la demanda del recurso, y por ende, los volúmenes de aguas residuales generadas; sin embargo, hasta la fecha no existe una iniciativa concreta orientada a la reutilización de aguas ya sea a nivel particular o general.

Como se evidenció en el primer objetivo, la ciudadanía tiene una percepción positiva pero dependiente de la garantía de la calidad del tratamiento y de que los usos sean no potables, especialmente para descarga de inodoros o limpieza de área comunes. Así mismo se evidenció la falta de proyectos piloto locales, de lineamientos técnicos y de apoyo institucional, lo que ha limitado la difusión y adopción de estas tecnologías.

4.3.1 Selección inicial de tecnologías.

Algunas entidades han emitido mensajes alusivos al uso responsable en fechas conmemorativas; sin embargo, no existen programas de fomento al reuso del agua ni articulación institucional en torno a la temática. Por lo tanto, en este objetivo se busca seleccionar, caracterizar y hacer una comparación técnica de los cuatro sistemas de tratamiento validados en la literatura científica que tienen condiciones para ser replicados, escalables y son viables en edificaciones residenciales en Ocaña. Estas tecnologías son:

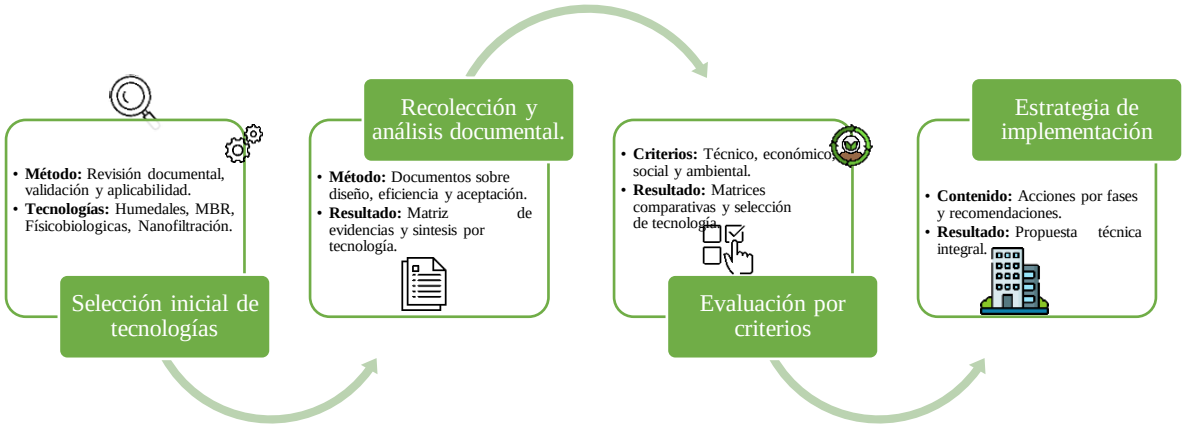
1. Humedales construidos
2. Sistemas físico-biológicos simples (filtros + desinfección básica)
3. Biorreactores de membrana (MBR)
4. Nanofiltración

Cada uno de estos sistemas se analizará teniendo en cuenta los criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales, posteriormente se hará una evaluación comparativa de sus características para identificar las opciones más eficientes y adaptables al entorno urbano del municipio de Ocaña. Finalmente, se formulará la estrategia integral de implementación donde se incluyan recomendaciones, actores involucrados y acciones institucionales sugeridas, con el fin

de promover una gestión hídrica urbana más eficiente y sostenible en Ocaña. La representación gráfica del proceso descrito se observa en el siguiente diagrama:

Figura 19.

Procedimiento para la determinación de la estrategia de implementación.



4.3.2 Organización y análisis documental

Para la formulación de la estrategia técnica, se realizó un proceso de revisión documental en el que se identificaron experiencias y estudios técnicos aplicados a los cuatro sistemas de tratamiento de aguas grises que se definieron como viables en el contexto urbano de Ocaña. Se organizaron cinco documentos técnicos para cada tipo de sistema, seleccionados teniendo en cuenta su relevancia, metodología y aplicabilidad urbana en edificaciones. Cada uno de ellos se analizó mediante una ficha técnica que incluyó aspectos como el diseño del sistema, eficiencia de remoción, requisitos operativos, costos, aceptación social y beneficios ambientales; las cuales se encuentran como apéndices del presente documento. Las fichas se codificaron de la siguiente forma:

Humedales construidos: H1, H2, H3, H4 y H5.

Biorreactores de membrana (MBR): M1, M2, M3, M4 y M5.

Sistemas físico-biológicos simples: F1, F2, F3, F4 y F5.

Nanofiltración: N1, N2, N3, N4 y N5.

4.3.2.1 Humedales artificiales. Como se describió anteriormente, se elaboraron cinco fichas resumen de los documentos consultados para esta tecnología, las cuales se encuentran incluidas en el Apéndice 6 del presente documento. A continuación, se presenta un resumen comparativo inicial que integra los elementos más representativos de la revisión:

Tabla 11.

Resumen comparativo de los documentos H1–H5 sobre humedales construidos.

Código	Tipo de estudio	Configuraciones abordadas	Rango de eficiencia técnica	Aspectos clave adicionales
H1	Revisión técnica internacional	Humedales construidos, híbridos con celdas de contacto microbiano.	Reducción mayor al 96% de SDS (en sistemas híbrido), y mayor al 90% en general	Comparación de tecnologías. Remoción de surfactantes.
H2	Estado del arte 2019–2023	HFS, HFSS, VFSS e híbridos.	DQO: 85%–92% $NH_4^+ \geq 90\%$ TP ≥ 91%	Destaca el efecto del tipo de sustrato, uso de biochar y especies vegetales.
H3	Estudio técnico de casos reales en México	HFS, HFSS, VFSS e híbridos	DQO: 65%–92% Coliformes > 99%	Reúso de aguas tratadas en riego y producción de plantas ornamentales.

H4	Revisión con estudios de caso en México	HFS, HFSS, VFSS e híbridos	DBO: 68%–91% SST: 77%–90% N: 74%–81%	Casos reales en comunidades rurales mexicanas.
H5	Síntesis conceptual y técnica, con referencias a Colombia	HFS, HFSS, VFSS e híbridos	Se describen procesos, pero no reportan valores específicos de eficiencia.	Presenta fundamentos de diseño, principios físicos, químicos y biológicos; casos en Colombia.

4.3.2.2 Sistemas físico-biológicos simples. Las fichas técnicas correspondientes a esta estrategia están incluidas en el Apéndice 7 del presente documento. Esta tecnología combina procesos físicos de filtración con mecanismos biológicos simples, que no requieren energía ni productos químicos complejos. A continuación, se muestra el resumen comparativo de los documentos analizados destacando sus aspectos clave.

Tabla 12.

Resumen comparativo de los documentos F1–F5 sobre sistemas físico-biológicos simples.

Código	**Tipo de estudio**	**Configuraciones abordadas**	**Rango de eficiencia técnica**	**Aspectos clave adicionales**
F1	Investigación experimental con filtros de geotextil (Guatemala)	Filtración por gravedad mediante geotextiles	DBO: 17% DQO: 16% SST: 40% Coliformes: 0%	Sistema simple y bajo costo, ideal como pretratamiento
F2	Diseño experimental con filtros lentos y biofiltro vegetal (Perú)	Filtros lentos con arena/grava y biofiltro con pasto Vetiver	DQO: 89% DBO_5: 8 mg/L SAAM dentro de norma	Diseño modular orientado al riego, propuesta de etapa vegetal flotante

F3	Aplicación en vivienda de interés social con filtros y vegetación (México)	Tres filtros en serie (zeolita, carbón, arena) con plantas ornamentales	DQO: 77.6% Mejora en color, ligera reducción en conductividad	Filtros combinados con vegetación, diseño compacto para uso doméstico
F4	Análisis de percepción social y normativa en viviendas (México)	Sistemas físicos domésticos en viviendas ecológicas y de clase media	No reporta datos técnicos, se enfoca en percepción y aceptación social	Evalúa factores sociales, educativos y económicos en la adopción
F5	Implementación real en vivienda urbana (Perú)	Sistema modular con pretratamiento, sedimentación y biofiltros con/sin microorganismos	DBO: 86% DQO: 89% SST: 90% Aceites: 97% Nitratos: 77%	Alta eficiencia, destaca la inclusión de microorganismos y cumplimiento normativo

4.3.2.3 Biorreactores de membrana (MBR). Las fichas técnicas correspondientes a la estrategia de biorreactores de membrana (MBR) se pueden observar en el Apéndice 8. En esta tecnología se destaca la eficiencia de remoción, calidad del efluente y estabilidad microbiológica, haciéndola útil para contextos urbanos. A continuación, se presenta un resumen comparativo de los documentos analizados, resaltando los aspectos más representativos.

Tabla 13.

Resumen comparativo de los documentos M1–M5 sobre biorreactores de membrana (MBR)

Código	Tipo de estudio	Configuraciones abordadas	Rango de eficiencia técnica	Aspectos clave adicionales
M1	Comparación experimental de tecnologías para reúso en inodoros (China)	MBR para aguas grises con cloración (GMBR)	Remoción total de DBO y NH_3 -N Cloro residual estable por 18 días	Alta estabilidad biológica del efluente y menor consumo de cloro
M2	Tesis doctoral con planta piloto EMBR en EDAR (España)	MBR con electrocoagulación (EMBR)	DQO >90%. Microcontaminantes y nutrientes eliminados. PTM reducida en un 73%	Menor ensuciamiento de membranas y consumo energético (0.16 kWh/m³)
M3	Diseño y modelación de MBR piloto para industria farmacéutica (Colombia)	MBR sumergido tipo placa plana, escala piloto	Remoción proyectada mayor al 85% DBO y DQO ≥88% (datos modelados)	Diseño con automatización; adaptable a edificios residenciales
M4	Puesta en marcha de planta piloto híbrida UASB + MBR (España)	MBR posterior a reactor UASB, aireación + microfiltración	DQO: 95% NT: 45% PT: 45–78% SS menor a 1 mg/L Turbidez: 0.66 NTU	Producción de biogás y menor intervención operativa. Mejora microbiológica
M5	Evaluación continua de sistema híbrido UASB + MBR con agua sintética (España)	MBR externo con limpieza automática, post-UASB, módulos externos	DQO: 82%–98% N y P: 34%. Fármacos: 80%–99% Biogás: 72% CH_4	Ensayo continuo con control de calidad, energía, biogás y limpieza automática

4.3.2.4 Nanofiltración. Las fichas técnicas de esta estrategia están incluidas en el Apéndice 9. La nanofiltración se caracteriza porque permite la remoción de compuestos orgánicos, sólidos disueltos y sales divalentes, generando un efluente de alta calidad para usos no potables. Tiene bajo consumo energético y capacidad de operar de forma automatizada. A continuación, se presenta un resumen de los documentos analizados.

Tabla 14. *Resumen comparativo de los documentos N1–N5 sobre nanofiltración*

Código	Tipo de estudio	Configuraciones abordadas	Rango de eficiencia técnica	Aspectos clave adicionales
N1	Evaluación experimental con aguas residuales industriales (España)	NF-90 y NF-200, validadas en célula de laboratorio	DQO: 96% Conductividad: 93%–95%. SO_4^{2-} y Ca^{2+} : >96%	Comparación membranas y simulación con NanoFlux. Adaptable a aguas grises
N2	Tesis doctoral sobre NF combinada con AOP en efluentes de EDAR	NF90 + foto-Fenton solar / ozonización	Microcontaminantes removidos: >90%. DQO reducida y baja toxicidad. Costo: 0.40–0.58€/m³	Sistema combinado eficiente, apto para aguas con pH neutro y bajo impacto ambiental
N3	Modelado y control de planta piloto de NF para reúso agrícola	Tres membranas en serie, con sistema SCADA, sensores y automatización total	Punto óptimo: 35.5 L/h con presión de 4.3 bar. Sistema estable y controlado	Ideal para entornos urbanos, destaca el monitoreo continuo y la eficiencia energética
N4	Tesis doctoral con membranas NF y ósmosis inversa frente a contaminantes orgánicos	NF 90 y NF 270 en flujo cruzado, con control de pH	Remoción de fenoles y ácidos: >90%. Comportamiento predecible	Análisis de los mecanismos de rechazo y el comportamiento hidrofóbico de solutos

N5	Propuesta tecnológica real en empresa colombiana (LEGIO.filter)	Módulo NF comercial (0.02 µm), compacto y automatizado	Reducción de sólidos, tensoactivos, turbidez y color	Aplicación industrial replicable, sistema modular compacto apto para edificios, y de bajo mantenimiento

Como se evidencia, se realizó la revisión técnica documental de las cuatro tecnologías. Para cada una de ellas se recopilaron cinco documentos relevantes y se elaboró la tabla comparativa, sintetizando sus elementos clave. Con esta información existe una base sólida para realizar la evaluación comparativa multicriterio considerando las particularidades del Municipio de Ocaña.

4.3.3 Evaluación por criterios

Con base en la revisión técnica realizada en el paso anterior, se procede con una evaluación comparativa entre las cuatro tecnologías, con el fin de determinar cuál de ellas es más eficiente, sostenible y viable para su implementación en edificios en Ocaña. El análisis está enfocado en aspectos clave como el desempeño técnico, la viabilidad económica, aceptación social y beneficios ambientales con el fin de hacer una selección adecuada para las condiciones locales.

Para ello se elaboraron cuatro matrices comparativas, una por cada dimensión evaluada: técnica, económica, social y ambiental. En cada una de estas dimensiones se establecieron tres criterios específicos para asignar una valoración cualitativa (Bajo, Medio o Alto) con su respectiva justificación técnica basada en los documentos analizados. De esta forma se permite identificar fortalezas y debilidades de cada estrategia, comparar el comportamiento de las

tecnologías en el contexto urbano y Ocaña y fundamentar la elección de la estrategia de forma técnica.

Los criterios de evaluación para cada una de las dimensiones son los siguientes:

Dimensión técnica:

- Eficiencia en la remoción de contaminantes
- Facilidad de operación y grado de automatización
- Flexibilidad de diseño, posibilidad de adaptación y escalabilidad

Dimensión económica:

- Costo de implementación inicial
- Costo operativo y de mantenimiento
- Durabilidad y vida útil del sistema

Dimensión social:

- Aceptación y apropiación por parte de los usuarios
- Nivel de monitoreo e intervención requerido
- Integración arquitectónica y requerimientos de espacio.

Dimensión ambiental:

- Reducción del consumo de agua potable
- Producción de subproductos o residuos
- Impacto ambiental positivo adicional

4.3.3.1 Dimensión técnica. En esta dimensión se analiza el comportamiento de cada una de las estrategias en términos de eficiencia de remoción, facilidad de operación y flexibilidad de diseño, aspectos que son fundamentales para garantizar el funcionamiento del sistema en edificaciones en Ocaña. Las calificaciones se sustentan en los resultados documentados y la aplicabilidad en el entorno local, y se observan a continuación, en la Tabla 15 que incluye la matriz comparativa de la dimensión técnica.

Tabla 15.

Matriz comparativa - Dimensión técnica.

Criterio técnico	Humedales Construidos	Físico-Biológicos	MBR	Nanofiltración
1. Eficiencia de remoción de contaminantes	**Medio** En los documentos H2, H3 y H4 se reportan remociones entre el 65% y 92% para DBO, SST y nutrientes, aunque con variabilidad y alta dependencia de la vegetación.	**Bajo** Los documentos F1, F2 y F3 muestran remociones parciales: DBO 17–77%, sin eliminación de coliformes; adecuados principalmente como tratamiento primario.	**Alto** En los informes M1, M2 y M5 se alcanzan remociones mayores al 90% en DQO, coliformes, grasas y nutrientes; aptos para reúso sanitario.	**Alto** En la documentación N1, N2 y N4 se reportan remociones de DQO mayores al 95%, conductividad mayor al 90%, y microcontaminantes emergentes entre 80%–99.9%.
2. Facilidad de operación	**Alto** Los documentos H3 y H5 son sistemas pasivos, de bajo mantenimiento, sin necesidad de energía ni productos químicos.	**Alto** En los informes F1 y F2 se indica que operan sin energía, permiten autoconstrucción y requieren mantenimiento mínimo.	**Medio** La documentación M3 y M4 indican que requieren monitoreo técnico constante y limpieza especializada de membranas.	**Alto** En los archivos N3 y N5 se incorpora la automatización, limpieza programada y bajo consumo energético; así como la operación sencilla con entrenamiento básico.
3. Flexibilidad de diseño y escalabilidad	**Medio** Los documentos H2 y H5 son adaptables, pero requieren espacio físico amplio y están más	**Alto** En los documentos F2, F3 y F5 se permiten diseños modulares, integrables a patios o zonas de jardín; con facilidad de replicar.	**Medio** Los documentos M3 y M5 resaltan que tienen potencial modular, pero requieren equipamiento	**Alto** La referencia N5 tiene formato compacto, modular, apto para interior o áreas reducidas y el documento N3 demuestra control adaptativo.

	limitados en entornos densos.	técnico y espacio protegido.

En la dimensión técnica se observa que la Nanofiltración destaca por su alta eficiencia, flexibilidad de diseño y automatización operativa, superando incluso al MBR en simplicidad y adaptabilidad. La tecnología MBR tiene buen nivel de eficiencia, pero mayor costo de operación y requerimiento técnico. Los sistemas físico-biológicos y humedales construidos destacan por ofrecer una simplicidad operativa pero no garantizar la calidad suficiente del efluente para su reuso confiable.

4.3.3.2 Dimensión económica. En esta dimensión se analiza la viabilidad financiera de las cuatro estrategias, teniendo en cuenta el costo inicial de implementación, los gastos operativos y de mantenimiento y la durabilidad del sistema. Para el caso de Ocaña donde si identificó la carencia de incentivos y subsidios ambientales, lo que hace de esta dimensión es un aspecto clave para definir la adaptabilidad a corto y mediano plazo; además influye en la aceptación, pues como se identificó en la encuesta realizada en el primer objetivo; los costos son un factor parcialmente determinante para la adopción de los sistemas. A continuación, en la Tabla 16 se muestra la matriz realizada para la dimensión económica.

Tabla 16.

Matriz comparativa - Dimensión económica.

Criterio económico	Humedales Construidos	Físico-Biológicos	MBR	Nanofiltración
1. Costo de implementación inicial	**Bajo** En las referencias H1, H3 y H5 indica que pueden construirse con materiales locales, sin requerimientos técnicos complejos ni equipos costosos.	**Bajo** n los estudios F2, F3 y F5 emplean grava, carbón, zeolita y materiales fácilmente accesibles, además permiten autoconstrucción.	**Alto** Las referencias M3 y M5 indican que se requiere inversión en módulos de membranas, bombas, controladores y tanques; es decir, tecnología importada en la mayoría de los casos.	**Medio** En el documento N5 se indican valores entre 8.500 y 9.800 USD, menor que el MBR y con sistema completo integrado.
2. Costo operativo y de mantenimiento	**Bajo** La experiencia de los documentos H3 y H5 indica que no consumen energía, no usan químicos y solo requieren limpieza ocasional.	**Bajo** Se destaca en los documentos F1 y F2 que operan sin insumos eléctricos o químicos; mantenimiento básico.	**Medio** Las referencias M2 y M4 presentan consumo eléctrico moderado y requieren limpieza regular de membranas, aunque menos frecuente si hay pretratamiento.	**Medio** En las referencias N2, N3 y N5 se menciona que tienen limpieza automática y bajo consumo energético, pero requieren monitoreo básico y recambio de membranas cada 1.5–2 años.
3. Durabilidad y vida útil del sistema	**Medio** En los archivos H4 y H5 se destaca que dependen del material vegetal y de	**Medio** En los documentos F2 y F3 se indica que tienen vida útil de medios filtrantes de	**Alto** En los documentos M3 y M5 se menciona que están diseñados para 10–15 años	**Alto** Los documentos N3 y N5 tienen vida útil de 10 años (estructura) y membranas de

	factores ambientales. Tienen vida útil prolongada si se hace mantenimiento adecuado.	1–2 años, y requieren renovación parcial de componentes.	con mantenimiento técnico; componentes modulares reemplazables.	1.5–2 años; automatización mejora su durabilidad operativa.

Con respecto a la dimensión económica se observa que los Humedales construidos y los sistemas físico-biológicos son las opciones más económicas, que se pueden adaptar a comunidades de bajo presupuesto, a pesar de que no tenga la calidad de tratamiento requerida para su reúso directo, La Nanofiltración ofrece una relación costo/beneficio favorable ya que tiene una inversión inicial intermedia pero un bajo consumo energético, durabilidad y operación automatizada, haciéndola rentable a largo plazo en edificios. Por último, la tecnología MBR es muy eficiente, sin embargo, es menos accesible económicamente en el contexto local, ya que requiere condiciones técnicas más avanzadas para mantener una operación estable.

4.3.3.3 Dimensión social. En la dimensión social también se realizó una matriz para evaluar los aspectos relacionados con la aceptación social, facilidad de adopción y compatibilidad del sistema con los entornos residenciales, tomando en cuenta los resultados del diagnóstico realizado en el primer objetivo específicos donde la disposición a la reutilización de aguas grises depende de la percepción de seguridad y facilidad de uso. Los criterios evaluados incluyen la apropiación, el monitoreo requerido y el impacto del sistema, y se evidencian en la Tabla 17, que se muestra a continuación.

Tabla 17.

Matriz comparativa - Dimensión social.

Criterio social	Humedales Construidos	Físico-Biológicos	MBR	Nanofiltración
1. Aceptación y apropiación por parte de los usuarios	**Alto** En los documentos H3 y H5 se integra vegetación, genera valor paisajístico y ecológico, favoreciendo la apropiación comunitaria.	**Alto** En los documentos F2, F3 y F5 combinan diseño simple, estético y con plantas ornamentales logrando buena integración en viviendas sociales.	**Medio** Según los documentos M4 y M5 no son visibles ni atractivos para el usuario común ya que requieren explicación técnica y acompañamiento institucional.	**Alto** Según la referencia N5 es discreto, modular y silencioso, se presenta como solución "llave en mano". Da la percepción de alta tecnología lo que significa mayor confianza en la calidad del agua tratada.
2. Nivel de intervención y monitoreo requerido	**Bajo** En la experiencia de H3 y H5 se funciona con intervención mínima; pueden mantenerse con apoyo comunitario o del usuario.	**Bajo** En los estudios F1 y F2 se destaca que no requieren monitoreo técnico; intervención limitada a limpieza y observación.	**Alto** Teniendo en cuenta los estudios M2, M3 y M4 se identifica que requieren monitoreo de presión, ciclos de limpieza y acompañamiento técnico periódico.	**Medio** Según los documentos N3 y N5, son automatizados, pero exigen revisión ocasional del sistema y cambio de membranas que debe ser realizado por personal capacitado.
3. Requerimientos de espacio e integración arquitectónica	**Bajo** Según los documentos H2 y H3 se requiere espacio amplio, preferiblemente zonas verdes exteriores;	**Medio** Según las referencias F2, F3 y F5 son compactos, pero requieren una zona	**Medio** Los documentos M3 y M5 resaltan que requieren cuarto técnico y espacio cubierto;	**Alto** Según el documento N5 tiene formato compacto (1.8 x 1.5 x 2.1 m), es silencioso, estéticamente neutro y puede

	difícil de adaptar en edificios existentes.	libre y acceso a flujo de aguas grises.	no aptos para todo tipo de viviendas.	instalarse en interiores o patios de edificios.

En el aspecto social se evidencia que las estrategias de Humedales y Sistemas físico-biológicos tienen una buena calificación por su valor ecológico y facilidad de apropiación en comunidades, sin embargo, tienen limitaciones en cuanto al espacio. La tecnología MBR requiere acompañamiento institucional y condiciones técnicas que podrían dificultar su apropiación directa por parte de usuarios comunes. Finalmente, la nanofiltración tiene una presentación comercial compacta y automatizada que favorece la percepción de modernidad, sin exigir grandes cambios estructurales.

4.3.3.4 Dimensión ambiental. En la matriz elaborada para analizar la dimensión ambiental se analizó el impacto de forma directa e indirecta, considerando el potencial de ahorro de agua potable, la generación de residuos o subproductos y los beneficios ecológicos, incluyendo la eficiencia energética, que están asociados a su implementación. En Ocaña, donde aún no existen normativas sobre reuso, estos aspectos permiten valorar el aporte de cada sistema en términos de una gestión hídrica sostenible. A continuación, en la Tabla 18 se presenta la matriz elaborada para la dimensión ambiental.

Tabla 18.

Matriz comparativa - Dimensión ambiental.

Criterio ambiental	Humedales Construidos	Físico-Biológicos	MBR	Nanofiltración
1. Reducción del consumo de agua potable	**Alto** Según los documentos H2 y H4 permiten recolectar y tratar aguas grises para riego o limpieza, sin necesidad de energía.	**Medio** En las referencias F2 y F3 resalta que se permite el reúso para riego y limpieza, pero no garantizan calidad para usos como descarga sanitaria.	**Alto** Las referencias M1, M2 y M5 generan efluente de alta calidad para descarga de inodoros, limpieza y riego, reemplazando 26–35% del agua potable usada en edificios.	**Alto** Los documentos N1, N2 y N5 resaltan que se permite sustituir agua potable en todos los usos no potables (inodoros, limpieza, riego), con altos estándares de seguridad.
2. Producción de residuos o subproductos	**Bajo** Las referencias H3 y H5 indican que se generan residuos mínimos (sólidos orgánicos y material vegetal) que son fácilmente compostables.	**Medio** En los documentos F1 y F2 se menciona que requieren cambio de medios filtrantes (arena, carbón, zeolita) cada 1–2 años.	M**edio** Según las referencias M2 y M5 generan lodos activos y requieren limpieza de membranas; además de residuos líquidos más difíciles de manejar.	**Medio** Según los estudios N2 y N5 producen concentrado y requieren cambio de membranas cada 1.5–2 años. Los residuos son manejables, pero deben disponerse adecuadamente.
3. Impacto ambiental positivo adicional	**Alto** Según los documentos H2 y H3 aportan valor ecológico y paisajístico, integran biodiversidad	**Medio** Según los estudios F3 y F5, tienen vegetación y estética verde, pero	**Medio** Los documentos M4 y M5 mencionan que reducen carga contaminante, pero sin	**Alto** Los documentos N3 y N5 indican que operan con bajo consumo energético (150–250 W), no requieren químicos agresivos, y

	urbana y mejoran microclima.	menor aporte paisajístico general.	beneficios paisajísticos ni energéticos significativos.	son integrables en edificios sostenibles o certificados.

En la evaluación de la dimensión ambiental los humedales construidos son un referente ideal dado su aporte ecológico directo e impacto visual positivo, pero con una limitación espacial. La estrategia MBR logra un buen desempeño ambiental per su operación implica mayor generación de subproductos técnicos. La Nanofiltración tiene la capacidad de reducir de forma significativa el uso de agua potable manteniendo un impacto ambiental indirecto con bajo consumo energético, residuos controlables y sin uso continúo de productos químicos.

Con base en el análisis comparativo de las cuatro estrategias seleccionadas para el tratamiento y aprovechamiento de aguas grises en edificaciones en Ocaña, se identificó que la tecnología de Nanofiltración ofrece el mejor balance entre eficiencia, adaptabilidad y sostenibilidad. En el aspecto técnico obtuvo calificaciones altas en todos los criterios evaluados. Los documentos analizados en esta tecnología pueden alcanzar remociones superiores al 95% en DQO, sólidos disueltos y sales divalentes, así como eliminación de micro contaminantes emergentes entre un 80% y 99,9%, lo que garantiza un efluente de calidad adecuada para el reusó urbano no potable, como descarga sanitaria, limpieza y riego.

En términos operativos algunos estudios destacan la posibilidad de implementar sistemas modulares y sistematizados de bajo consumo energético, con mantenimiento programado sin necesidad de químicos agresivos, facilitando su manejo en edificaciones residenciales. Además, su estructura compacta permite la instalación en interiores sin generar impactos negativos en el entorno construido. Con respecto a la dimensión económica, si bien la inversión inicial es superior a las de los Humedales o los Sistemas físico-biológicos, es menor que la MBR, y se compensa a largo plazo gracias a la durabilidad del equipo, baja demanda energética y estabilidad en condiciones urbanas. En la propuesta real de la empresa colombiana de

detergentes Dersa se plantea un sistema modelo con costos accesibles y escalables para diferentes tipos de edificaciones. En el componente social el sistema propuesto combina la automatización y confianza tecnología, aspectos valorados por el usuario, especialmente en contextos urbanos donde la aceptación va ligada con la percepción de modernidad y seguridad. Su instalación facilidad de monitoreo básico permiten que sea apropiado para comunidades no especializadas. Finalmente, desde el contexto ambiental, la nanofiltración permite sustituir un porcentaje significativo del agua potable utilizada en edificios, reduce el vertimiento de aguas grises sin tratamiento y genera un residuo manejable. No requiere productos químicos peligrosos y su eficiencia energética la convierte en una alternativa coherente con los lineamientos de construcción sostenible.

Con base en el anterior análisis se concluye que la estrategia más adecuada para promover la implementación eficiente y sostenible de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises en edificaciones en Ocaña es la Nanofiltración. Esta tecnología ofrece un desempeño superior en calidad de tratamiento, viabilidad operativa y compatibilidad con el entorno, lo que la convierte en una opción estratégica para avanzar hacia una gestión hídrica responsable y replicable en el contexto local.

4.3.4 Estrategia de implementación

Tras el análisis comparativo realizado, se concluyó que la Nanofiltración es la tecnología más adecuada para promover el tratamiento y reutilización de aguas grises en edificaciones en Ocaña, tanto por su eficiencia técnica y bajo consumo energético como la facilidad de operación y capacidad de adaptación. Teniendo en cuenta esta selección se formula una estrategia técnica integral que se orienta a viabilizar la implementación a corto, mediano y largo plazo. Esta

estrategia se enmarca en la necesidad de que exista una gestión hídrica urbana sostenible, mediante el aprovechamiento de aguas grises tratadas en usos no potables como descarga de inodoros, riego y limpieza de áreas comunes. A pesar de que Ocaña cuenta con disponibilidad continua de agua potable, la presión sobre las fuentes abastecedoras y el acelerado crecimiento urbano justifican la adopción de soluciones eficientes como la planteada en este estudio.

En esta propuesta además de definir cómo implementar técnicamente el sistema, se resalta quienes deben participar, como iniciar y las condiciones mínimas requeridas. Para ello se plantea una estructura por fases, con sectores piloto sugeridos, actores clave y posibles mecanismos de articulación institucional; fundamentado en principios de sostenibilidad, modularidad, aceptación social y viabilidad operativa.

4.3.4.1 Principios clave de la estrategia. La formulación de la estrategia se guía por cuatro principios donde se articulan los resultados obtenidos anteriormente con las condiciones territoriales, sociales y técnicas del municipio. De esta manera se garantiza que la propuesta sea viable, sostenible y replicable a mediano y largo plazo, especialmente en zonas donde se concentra la mayor densidad de edificios residenciales.

4.3.4.1.1 Sostenibilidad hídrica y urbana

Aunque en Ocaña no existe un déficit hídrico generalizado, si hay presiones importantes sobre las fuentes abastecedoras, producto del acelerado crecimiento urbano y el aumento en la demanda de agua en sectores de expansión. Con la estrategia se busca mitigar estos impactos con el tratamiento y reutilización de las aguas grises generadas en edificios, para usos no potables. Este principio se fundamenta en el enfoque preventivo de la gestión del recurso hídrico en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente el ODS 6, así como en

los lineamientos del Plan de Desarrollo Municipal 2024-2027, donde en la Línea Estratégica No 3 el objetivo es contribuir con el ordenamiento del territorio alrededor del agua, minimizando vulnerabilidades, promoviendo la conservación y protección de áreas estrategias y un crecimiento urbano basado en sostenibilidad ambiental. (Alcaldía de Ocaña, 2024).

4.3.4.1.2 Escalabilidad modular

Como se ha mencionado en el desarrollo del documento aún no existen proyectos institucionales ni reglamentación local que rija la reutilización de aguas grises, por ello se basa en una lógica progresiva y modular, donde se pueda iniciar con pilotos a pequeña escala ya sea en edificaciones nuevas o instituciones interesadas y escalar de forma gradual con base en los aprendizajes obtenidos, aceptación social y fortalecimiento de capacidades locales. La tecnología seleccionada permite configuraciones compactas, modulares y adaptables, favoreciendo su aplicación escalonada según el tipo de edificio, disponibilidad de espacio y volumen de agua gris generada. En este principio se busca evitar propuestas rígidas, optando modelos replicables adaptados al entorno urbano real.

4.3.4.1.3 Aceptación social y apropiación comunitaria

Los resultados obtenidos en el diagnóstico del primer objetivo específico evidenciaron una alta disposición a reutilizar aguas grises, siempre que con el tratamiento se garantice la calidad del efluente. Además, se identificó una brecha significativa entre el conocimiento conceptual y la aplicación práctica, así como desinformación técnica. Por lo tanto, la estrategia debe incorporar acciones que fomenten la participación ciudadana, apropiación y educación técnica del sistema desde la fase piloto. Se debe priorizar un enfoque comunicativo claro, donde se eliminen los mitos relacionados con los riesgos, se fortalezca la confianza en la tecnología

seleccionada y se estimule el sentido de responsabilidad entre usuarios, instituciones y constructores.

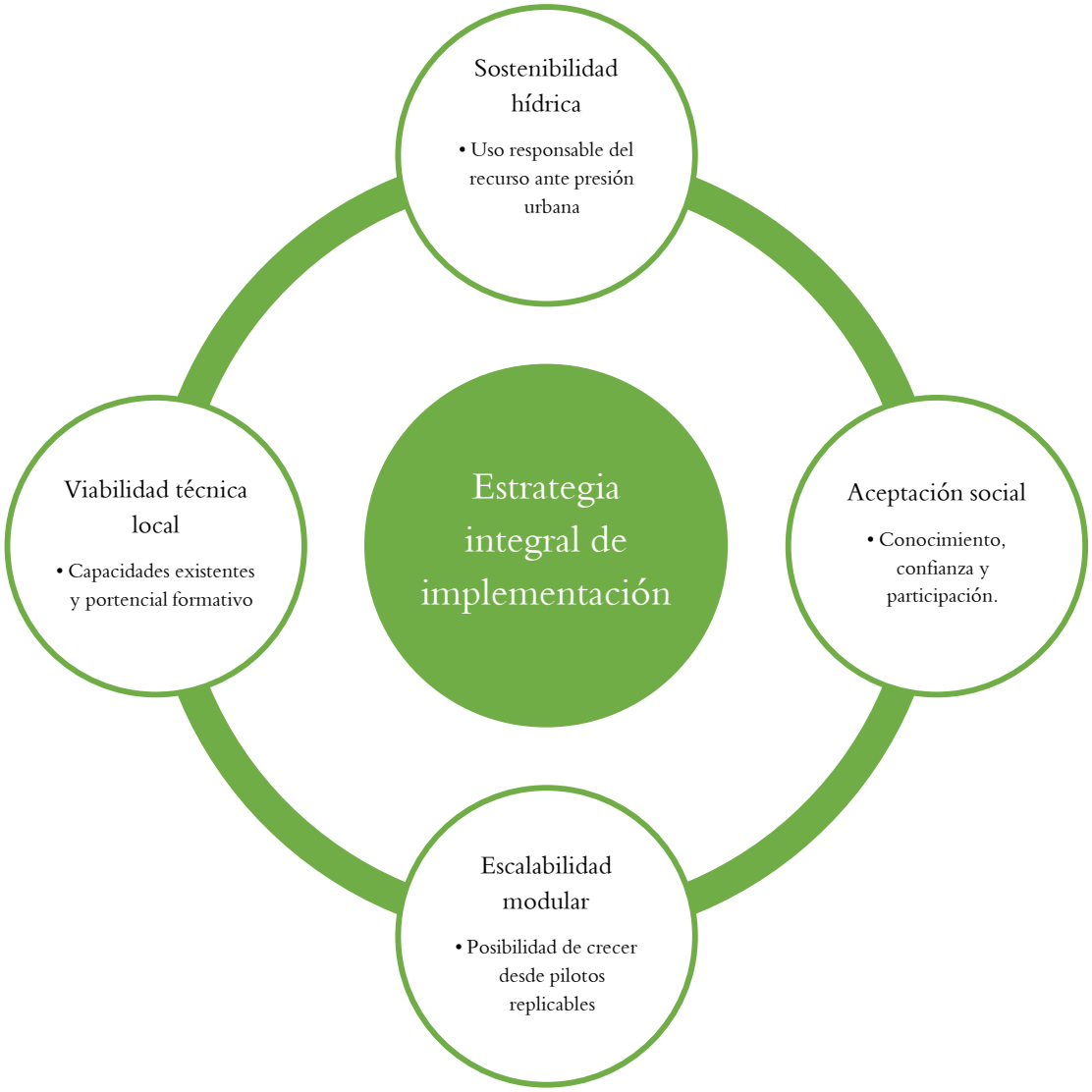
4.3.4.1.4 Viabilidad técnica e institucional local

En Ocaña actualmente no existen redes hidráulicas separadas ni personal especializado en sistemas de reutilización de aguas grises, sin embargo, el municipio cuenta con recursos humanos e institucionales valiosos, como la disponibilidad de personal técnico en la Empresa de Servicios Públicos ESPO S.A., la capacidad formadora de la Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocala UFPSO, y la experiencia de profesionales del sector. La estrategia consiste en una formación local progresiva, enfocada en el fortalecimiento de capacidades, acompañamiento institucional y generación de empleo técnico. Se contempla la posibilidad de formar personal en la operación, instalación y mantenimiento de sistemas de Nanofiltración, generando un círculo virtuoso entre implementación técnica y dinamismo económico.

En la Figura 20 se observa la interacción entre estos cuatro principios, que garantizan coherencia con el contexto local, viabilidad técnica y social.

Figura 20.

Principios clave que sustentan la estrategia integral de implementación en Ocaña



4.3.5 Fases de implementación de la estrategia integral

Con el fin de garantizar la viabilidad técnica, económica y social de la implementación de sistemas de reúso de aguas grises en edificios residenciales en Ocaña mediante Nanofiltración se

requiere una ejecución estratégica y progresiva, compuesta por fases articulas, las cuales se presentan a continuación:

4.3.5.1 Identificación de actores y articulación institucional

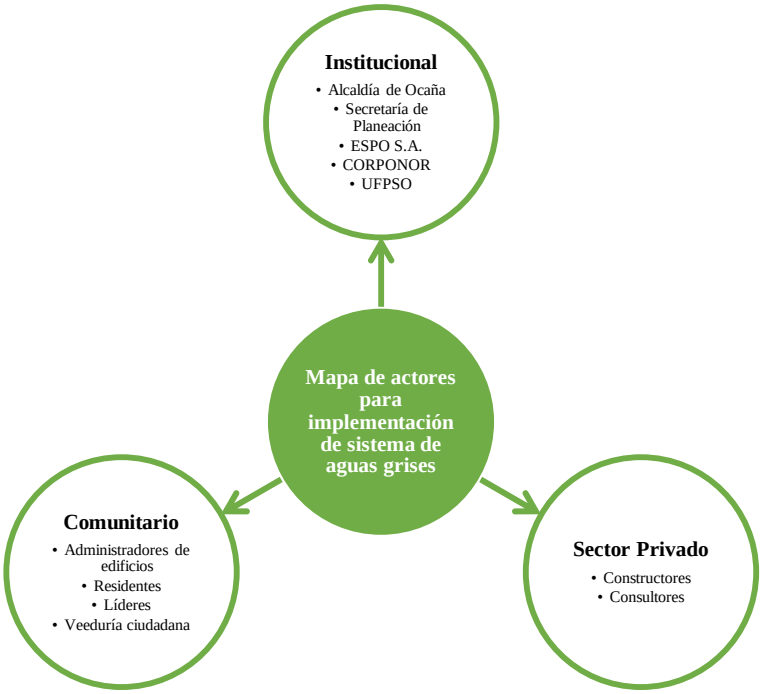
El objetivo de esta fase es establecer alianzas con actores clave en el entorno institucional, privado y comunitario que puedan respaldar y facilitar la implementación de proyectos piloto y escalables de reutilización de aguas grises.

Las actividades sugeridas para lograr el objetivo mencionado son:

- Realizar un mapeo de actores clave locales, la cual debe incluir la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña (UFPSO), Alcaldía Municipal, Secretaría de Planeación, Secretaría de Vías, Infraestructura y Vivienda, ESPO S.A. E.S.P., CORPONOR, constructores locales y juntas de acción comunal, como se evidencia en la Figura 21.
- Organizar una mesa técnica en la que se definan los roles y compromisos de participación de cada una de las entidades involucradas.
- Elaborar acuerdos generales y o de intención con otras entidades interesadas o relacionadas (universidades, empresas y entidades públicas).
- Articulación con las entidades ambientales competentes para orientación técnica, a pesar de que no haya normativas específicas.

Figura 21.

Mapa de actores para implementación de sistema de aguas grises.



4.3.5.2 Diseño y ejecución del proyecto piloto en un edificio. Esta fase consiste en implementar un sistema piloto para el tratamiento de aguas grises con Nanofiltración en un edificio residencial nuevo que sirva como modelo de replicable para otros proyectos residenciales en Ocaña.

Ubicación y selección del edificio piloto

La intervención se propone en un edificio residencial nuevo, que se encuentre en la etapa de diseño o planificación y esté ubicado en una zona con alta densidad urbana de edificaciones multifamiliares como los barrios La Primera, Los Lagos o El Centro. Los criterios mínimos de selección del proyecto son:

- Estar ubicado en una zona estratégica bien sea de expansión urbana o de alta densidad.
- Tener disponibilidad de redes hidráulicas diferencias, para separar las aguas grises.
- Estar dispuesto a participar en el proceso demostrativo, contando con acompañamiento técnico durante el mismo.
- Presentar condiciones adecuadas para la instalación de un sistema compacto de Nanofiltración.

Especificaciones técnicas sugeridas

El sistema se debe diseñar teniendo en cuenta los siguientes lineamientos técnicos:

- El origen del agua gris debe provenir únicamente de duchas, lavamanos y lavadora. Se prohíbe incluir aguas negras o aguas de cocina.
- Se parte de la dotación neta definida en la Resolución 0330 de 2017, que para Ocaña es de 130 L/hab/día, y considerando un 50-60% como aguas grises reutilizables, se tendría un valor reutilizable de agua gris entre 65–78 L/hab/día.
- Los componentes del sistema son los siguientes:
  - Tanque primerio de recolección
  - Rejilla o sedimentador para tratamiento.
  - Unidad de Nanofiltración
  - Tanque de almacenamiento del efluente tratado.
  - Red interna para usos no potables (inodoros, lavado de pisos y riego).

- El espacio requerido para el cuarto técnico o área de instalación puede estar en el sótano o la azotea, y se estima un área mínima entre 5 y 7 m².
- La inversión inicial estimada es de 12 a 20 millones COP por unidad habitacional, dependiendo del tamaño del edificio y el número de usuarios. Para este costo se consideraron referencias nacionales e internacionales adaptadas al contexto local.

Análisis económico del sistema piloto: estimación de costos y tiempo de recuperación de la inversión

Como parte del proceso de estudio se incorpora un análisis económico orientado a estimar el costo total del sistema, sus beneficios económicos asociados al ahorro en consumo de agua potable y descarga al alcantarillado, así como el tiempo estimado de retorno de la inversión.

Este análisis se estructura a partir de una proyección realista para un edificio tipo de 10 apartamentos, con un promedio de 4 habitantes por unidad habitacional, que es lo estipulado por el DANE para el departamento, esto corresponde a una población de diseño de 40 personas. Para el consumo de agua se toma como base la dotación neta establecida en la Resolución 0330 de 2017, que es de 130 L/hab/día; y teniendo en cuenta los estudios consultados se estima que entre el 50% y 60% del caudal corresponde a aguas grises potencialmente reutilizables. Se proyecta que el sistema de nanofiltración cubra exclusivamente el reúso de aguas grises provenientes de duchas, lavamanos y lavadoras, con aplicación posterior para inodoros, limpieza y riego de áreas comunes.

Se agruparon los costos en tres componentes: inversión inicial, operación y mantenimiento, y costos energéticos anuales. Para la estimación se consideraron fuentes

documentales previamente analizadas en este trabajo, dado que se trata de una experiencia real, junto con ajustes realizados para el contexto residencial y local.

Tabla 19.

Estimación de costos del sistema de Nanofiltración en un edificio residencial en Ocaña.

Componente	**Descripción general**	**Costo estimado**
Inversión inicial	Incluye tanque de recolección, filtros, módulo de nanofiltración, bomba, sistema de distribución, instalación y adecuación del cuarto técnico	$ 10.000.000,00
Costos de operación y mantenimiento anuales	Reposición de cartuchos, limpieza de membranas, servicio técnico ocasional, insumos menores	$ 1.000.000,00
Costos energéticos anuales	Consumo estimado de energía eléctrica por bombas (0,5 kWh/día), con tarifa local ($680 COP/kWh).	$ 124.100,00

El sistema permitirá sustituir el consumo de agua potable por agua tratada para usos no potables (aprox. 65 L/hab/día), lo cual implica un ahorro significativo en el pago de acueducto y alcantarillado. Considerando las tarifas locales ($1.659 COP/m³ para acueducto y $953 COP/m³ para alcantarillado), y una eficiencia de ahorro del 60% del consumo total, se tiene que el total de aguas grises anual sería de 1.138.800 Litros, es decir 1138.8 m³; el ahorro anual se detalla en la Tabla 20.

Tabla 20.

Ahorros anuales estimados por reutilización de aguas grises.

Concepto	**Cálculo base**	**Valor anual**
Ahorro en acueducto	1138.8 m³ * $1.659	$ 1.889.269
Ahorro en alcantarillado	1138.8 m³ * $953	$ 1.085.277
Ahorro total anual		**$ 2.974.546**

La evaluación financiera del sistema de nanofiltración propuesto se realizó con el fin de estimar la viabilidad económica de su implementación en un edificio residencial de 10 apartamentos, tomando como base un escenario realista para la ciudad de Ocaña. Este análisis considera tanto los costos de inversión inicial como los de operación y mantenimiento, frente a los beneficios derivados del ahorro en consumo de agua potable, disposición a alcantarillado y energía eléctrica asociada al bombeo.

Con base en los consumos proyectados, el ahorro total anual generado por el sistema se estima teniendo en cuenta la inversión inicial, los costos anuales y la reducción en consumo de acueducto y alcantarillado; esto genera un flujo neto anual de $1.850.446 COP, a partir del segundo año, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 21.

Análisis de flujo neto para un periodo de 10 años.

Año	Inversión inicial	Costos de operación y mantenimiento	Consumo de energía	Reducción consumo acueducto	Reducción consumo alcantarillado	Flujo Neto
0	$ -10000000	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ -10000000
1	$ 0	$ -1000000	$ -124100	$ 1889269	$ 1085277	$ 1850446
2	$ 0	$ -1000000	$ -124100	$ 1889269	$ 1085277	$ 1850446
3	$ 0	$ -1000000	$ -124100	$ 1889269	$ 1085277	$ 1850446
4	$ 0	$ -1000000	$ -124100	$ 1889269	$ 1085277	$ 1850446
5	$ 0	$ -1000000	$ -124100	$ 1889269	$ 1085277	$ 1850446
6	$ 0	$ -1000000	$ -124100	$ 1889269	$ 1085277	$ 1850446
7	$ 0	$ -1000000	$ -124100	$ 1889269	$ 1085277	$ 1850446
8	$ 0	$ -1000000	$ -124100	$ 1889269	$ 1085277	$ 1850446
9	$ 0	$ -1000000	$ -124100	$ 1889269	$ 1085277	$ 1850446
10	$ 0	$ -1000000	$ -124100	$ 1889269	$ 1085277	$ 1850446

Con base en este flujo de caja, se realizó el cálculo del Valor Presente Neto (VPN) para un periodo de evaluación de 10 años, utilizando una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 9,25%. El resultado muestra que el sistema tiene un retorno de la inversión al año 8, momento en el que el VPN se vuelve positivo, tal como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 22.

Valor Presente Neto para los 10 años.

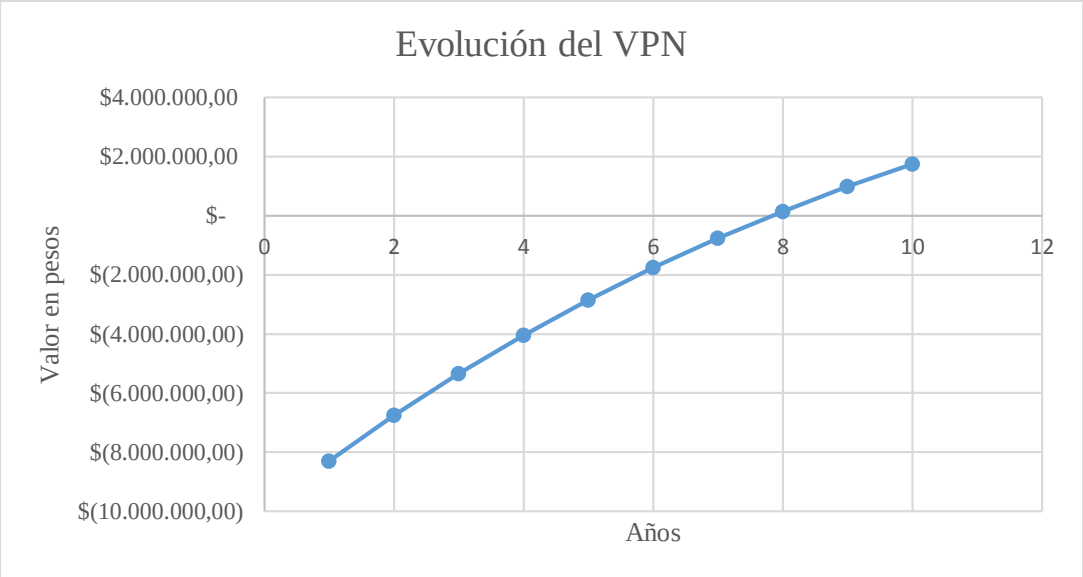
Año	VPN
1	-$ 8.306.227,92
2	-$ 6.755.864,46
3	-$ 5.336.767,46
4	-$ 4.037.822,85
5	-$ 2.848.857,53
6	-$1.760.559,75
7	-$ 764.406,18
8	$ 147.404,87
9	$ 982.014,53
10	$ 1.745.959,29

Tal como se observa en la Tabla 22, el Valor Presente Neto (VPN) es negativo durante los primeros siete años del periodo evaluado. Esto indica que, en esos años, los beneficios acumulados del sistema aún no alcanzan a recuperar la inversión inicial. No obstante, el valor del VPN presenta un comportamiento creciente año a año, gracias al ahorro sostenido en servicios públicos (acueducto y alcantarillado) que genera el sistema de nanofiltración, frente a costos de operación y mantenimiento moderados. A partir del año 8, el VPN se torna positivo, alcanzando los $147.404, lo que significa que en ese punto el sistema comienza a generar un retorno económico neto. Para el año 10 llega a $1.745.959 COP, consolidando así la recuperación de la

inversión y generando un beneficio económico acumulado adicional. Este comportamiento queda claramente representado en la Figura XX, donde se visualiza la curva ascendente del VPN.

Figura 22.

Evolución del Valor Presente Neto



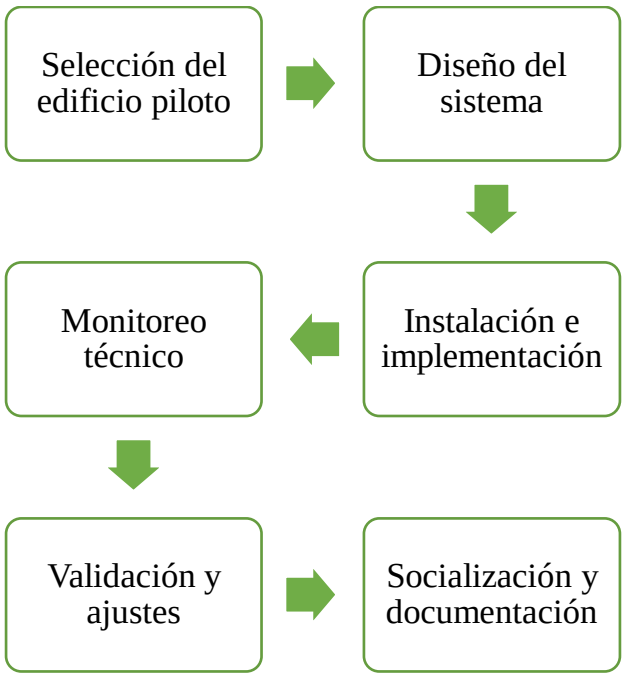
Este resultado respalda la viabilidad económica del sistema de nanofiltración en contextos urbanos residenciales como el de Ocaña, especialmente si se considera que su vida útil estimada puede extenderse a 15 años o más, lo cual aumentaría significativamente el retorno acumulado. Además, es necesario resaltar que este análisis no contempla beneficios no monetarios como la valorización del inmueble, la mejora en la percepción ambiental o la disminución de la presión sobre fuentes hídricas. La gestión de residuos del sistema no genera costos significativos, dado el bajo volumen generado, pero debe manejarse conforme a la normatividad ambiental vigente. Se recomienda documentar en el piloto real los costos reales de instalación y operación para afinar estos cálculos y evaluar otras posibles formas de financiación o escalamiento progresivo.

Proceso de implementación del piloto

En la figura 22 se muestra el paso a paso o la secuencia operativa para el desarrollo del sistema piloto.

Figura 23.

Secuencia operativa para el desarrollo del sistema piloto.



Complementos estratégicos

Con el fin de garantizar el éxito técnico, social y académico del sistema piloto, se recomienda incluir los siguientes elementos en el desarrollo de este:

- Monitorear variables clave como la eficiencia técnica, reducción del consumo de agua potable, aceptación de los usuarios, facilidad de operación, entre otras.
- Acompañamiento técnico y validación institucional por parte de alguna entidad externa, que apoye el desarrollo, la evaluación y análisis de resultados.

- Realizar jornadas de socialización del piloto en jornadas de visita con entidades, profesionales del sector y comunidad académica para aumentar el impacto en la región.
- Registro de lecciones aprendidas por medio de una bitácora operativa donde se sistematicen los aprendizajes obtenidos, para hacer el proceso de mejora continua.

4.3.5.3 Formación técnica y elaboración del manual operativo. Se deben estandarizar los procedimientos y generar capacidades técnicas locales mediante un manual de operación técnica del sistema de nanofiltración y un proceso de formación.

Se sugiere que el manual operativo contemple como mínimo los siguientes aspectos:

- Diagrama general del sistema.
- Protocolo de operación con frecuencia diaria.
- Mantenimiento semanal y mensual.
- Verificación de presión, flujo y rechazo.
- Análisis básicos de control de parámetros (color, turbidez, olor, etc).
- Registro y reporte de fallas.
- Contactos de soporte, revisión y reposición de componentes.

Para el curso de formación se sugiere que se incluya:

- Introducción a la gestión sostenible del agua y el reuso.
- Conceptos básicos como aguas grises, aguas negras, tratamiento, entre otros.
- Casos de éxito en diversos contextos nacionales e internacionales.
- Fundamentos técnicos de la Nanofiltración.
- Diseño y mantenimiento del sistema instalado.
- Análisis de los parámetros de calidad del agua.

- Seguridad, mantenimiento preventivo y correctico.
- Normatividad aplicable directa o indirectamente.
- Taller práctico.

4.3.5.4 Escalamiento gradual y promoción de incentivos. El objetivo es que se pueda expandir de forma progresiva la implementación del sistema piloto en nuevos proyectos residenciales, apoyándose en incentivos técnicos, económicos e institucionales que fomenten la adopción.

Estrategias de escalamiento:

- Presentación de resultados del piloto en mesas técnicas, conferencias y reuniones con constructores del sector.
- Inclusión del sistema como requisito en convocatorias locales o licencias por parte de la Alcaldía Municipal.

Tipos de incentivos sugeridos:

- En términos económicos la reducción de impuestos prediales proyectos sostenibles, subsidios municipales para obras civiles de sistemas de reutilización, reducción en la tarifa de servicios públicos y la posibilidad de explorar créditos verdes con entidades como Findeter o Bancoldex.
- Desde el componente técnico se sugiere el acompañamiento de instituciones como la ESPO S.A. o la UFPSO en el diseño o instalación y la prioridad para una certificación ambiental local.

- En el aspecto social el reconocimiento público a edificios pioneros y la etiqueta de "Edificio Sostenible", promovida por la Alcaldía.

4.3.5.2 Seguimiento, evaluación y retroalimentación. En esta fase se debe verificar la eficiencia técnica, aceptación social y sostenibilidad del sistema instalado, para utilizar los hallazgos en el ajuste de procesos e impulsar futuras implementaciones.

Indicadores clave de evaluación:

- Porcentaje de reducción de DQO, DBO y sólidos y demás parámetros.
- Cnatidad de agua gris reutilizada por mes.
- Costo operativo por cada m^3 tratado.
- Nivel de satisfacción entre los usuarios.
- Tiempo promedio entre mantenimientos correctivos.

Acciones recomendadas:

- Monitoreo técnico de la calidad del agua tratada y porcentaje de reutilización.
- Encuestas periódicas a residentes sobre su experiencia y satisfacción.
- Evaluación de costos de mantenimiento y retorno económico real.
- Elaboración de informes comparativos entre el diseño y el desempeño real.
- Ajustes al manual y plan formativo basado en los resultados.

En el desarrollo de este objetivo se consolidó una estrategia integral de implementación para el aprovechamiento de aguas grises en edificios residenciales, partiendo del análisis comparativo de tecnologías y del diagnóstico realizado. En primer lugar, la evaluación de las cuatro tecnologías de tratamiento a través de criterios técnicos, económicos, sociales y

ambientales permitió identificar ventajas y limitaciones de cada una con respecto a la adaptabilidad. Se seleccionó la Nanofiltración como la opción más viable por su eficiencia técnica, potencial de escalabilidad, adaptabilidad a espacios reducidos y respaldo de casos exitosos tanto a nivel nacional como internacional.

En segundo lugar, el análisis de las condiciones locales de Ocaña permitió contextualizar la propuesta. Se identificó una percepción positiva sobre el reúso, un buen nivel técnico institucional y disponibilidad de población que se puede capacitar. A pesar de la ausencia de normatividad específica y personal especializado se evidenció un entorno favorable para iniciar pilotos demostrativos, procesos formativos y articulación institucional.

En las fases de implementación definidas se indicaron las acciones técnicas específicas, los componentes sociales y formativos para reducir las barreras de aceptación y aumentar el conocimiento de la ciudadanía.

En conjunto, la estrategia definida es viable técnicamente y responde a los retos ambientales, sociales e institucionales identificados en el diagnóstico, donde la implementación progresiva aportaría de forma significativa a la gestión sostenible del recurso hídrico, innovación urbana y resiliencia frente al contexto de presión sobre las fuentes hídricas en la región.

Conclusiones

El diagnóstico realizado permitió identificar que la mayoría de la población tiene una actitud positiva frente a la reutilización de aguas grises, hay un bajo nivel de conocimiento técnico y poca experiencia práctica en el tema. La encuesta aplicada a 128 personas reveló disposición al uso de aguas grises tratadas, así como el reconocimiento de beneficios ambientales y económicos. Sin embargo, se evidencian barreras como el desconocimiento técnico, la ausencia de referentes y la falta de incentivos. Las entrevistas a los actores clave reforzaron los hallazgos, señalando la necesidad de una articulación institucional y educativa para fomentar la aceptación e implementación de estas tecnologías.

El análisis normativo, técnico y contextual reveló que en Colombia no existe un marco regulatorio especifico que promueva el reúso de aguas grises en edificaciones residenciales. Las normas se enfocan en las aguas residuales en general. A nivel internacional de identificaron algunos marcos normativos más avanzados y flexibles como el chileno, que podrían servir de referencia para el diseño de políticas. Además, la revisión documental evidenció vacíos en términos económicos, articulación institucional y estrategias de implementación local, representando tanto una limitación como una oportunidad para el desarrollo de estrategias.

Se permitió establecer una estrategia eficiente y sostenible para la implementación de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de aguas grises en edificios residenciales en Ocaña, mediante una evaluación técnica de tecnologías, el análisis del contexto local y la estructuración de fases de implementación progresiva. A partir del estudio de cuatro tecnologías, se concluyó que la Nanofiltración representa la alternativa más viable por su eficiencia de tratamiento, compatibilidad en espacios reducidos, modularidad y replicabilidad. La estrategia diseñada

contempla la validación técnica mediante un piloto real, generación de lineamientos, acciones formativas, articulación institucional y mecanismos de retroalimentación.

.

Recomendaciones

Implementar un proyecto piloto real de nanofiltración en un edificio residencial nuevo en Ocaña, en colaboración con una empresa privada constructora, ESPO S.A. E.S.P. y la administración municipal. Este piloto permitirá validar técnica y socialmente el sistema, generar datos operativos locales y construir referentes replicables para futuros desarrollos urbanos sostenibles.

Desarrollar un programa de formación técnica y social para operarios, técnicos y profesionales del sector de la construcción, enfocado en diseño, instalación y mantenimiento de sistemas de tratamiento de aguas grises. Esto podría ejecutarse como diplomado o curso cortó con apoyo de instituciones como el SENA, universidades locales o alianzas público-privadas, y representaría una oportunidad de generación de empleo verde y fortalecimiento de capacidades locales.

Formular una guía técnica de diseño y operación de sistemas de tratamiento de aguas grises, adaptada a las condiciones del municipio de Ocaña y basada en la experiencia del piloto. Este documento podrá servir como insumo normativo o técnico para incluir el reúso dentro de futuras licencias de construcción o lineamientos de planificación urbana sostenible.

Establecer incentivos desde la administración municipal o entes de control urbano, como reducción de cargas urbanísticas, beneficios tributarios o puntos adicionales en procesos de licenciamiento para proyectos que incluyan sistemas de tratamiento de aguas grises. Esto promoverá el interés del sector privado y facilitará su adopción voluntaria.

Diseñar e implementar un programa educativo y de sensibilización comunitaria sobre el reúso de aguas grises y la importancia de la gestión eficiente del agua en la ciudad. Este programa puede estar liderado por instituciones educativas y organizaciones sociales, con apoyo de ESPO y la Alcaldía, y puede incluir campañas escolares, actividades en fechas ambientales, e instalación de sistemas demostrativos en instituciones.

Iniciar estudios específicos sobre la viabilidad del reúso de aguas grises en otros sectores distintos al residencial, como instituciones educativas, centros comerciales y zonas industriales. Esto permitirá ampliar el alcance del reúso, priorizando sectores de alta generación y consumo hídrico.

Promover una reforma normativa local o la inclusión del reúso de aguas grises en el próximo Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) de Ocaña, para establecer criterios de diseño, operación y seguimiento técnico de estos sistemas, con base en los resultados de este estudio.

Conformar una mesa técnica o grupo de trabajo interinstitucional, entre actores clave como la Alcaldía, ESPO, la Universidad, curadurías urbanas y desarrolladores inmobiliarios, para hacer seguimiento a la estrategia planteada y liderar proyectos derivados, promoviendo su continuidad y articulación.

Referencias

Abdallat , R., Bdour, A., Haifa, A., Rawash, F., Almakhadmah, L., & Hazaimeh, S. (2024). Development of a sustainable, green, and solar-powered filtration system for E. coli removal and greywater treatment. *Journal of Environmental Science and Management, 10*. doi:10.22035/gjesm.2024.02.02

Alcaldía de Ocaña. (2024). *Plan de Desarrollo Municipal 2024-2027*. Obtenido de Alcaldía de Ocaña: https://ocananortedesantander.micolombiadigital.gov.co/sites/ocananortedesantander/content/files/001874/93676_plan-de-desarrollo-20242027.pdf

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (Diciembre de 2023). *Decreto 582 de 2023 Por el cual se reglamentan las disposiciones de Ecourbanismo y Construcción Sostenible del Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C., y se dictan otras disposiciones.* Obtenido de Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. - Secretaría Jurídica Distrital: https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=151925

Alcaldía Municipal de Ocaña. (2018). Obtenido de Alcaldía Municipal de Ocaña: https://www.ocana-nortedesantander.gov.co/tema/municipio

Alsina Correa, J. C. (2017). *Estrategias comunicativas para incentivar la conservación y cuidado del agua en Ocaña, Norte de Santander.*

Álvarez Pinzón, G. L. (2017). El reúso de aguas residuales en Colombia. Bogotá: Universidad Externado de Colombia. doi:10.57998/bdigital.handle.001.2344

Arbellán García, A., & Santamarta, J. (2022). Scientific Evidence behind the Ecosystem Services Provided by Sustainable Urban Drainage Systems. *Land*. doi:https://doi.org/10.3390/land11071040

Arévalo Navarro, L. F., Lozano Lázaro, Y., & Hermida Castillo, H. (Septiembre de 2022). Formulación de lineamientos estratégicos degestión ambiental para el manejo de los sistemas de agua potable y aguas residuales. Caso: sector urbano del municipio de Ocaña, Norte de Santander. doi:https://doi.org/10.26507/paper.2170

Azabache, Y., Rojas, K., Irigoín, S., Rodriguez, R., & Quispe, B. (2020). Propuesta de un sistema hidráulico de reutilización de las aguas grises que disminuiría el consumo de agua potable en viviendas familiares. *Manglar*. doi:http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2020.026

Bautista Gómez, M., Rodríguez Reyes, D., Castañeda Robles, I., González Sandoval, M., & Escalante Lozano, J. (2023). Tratamiento de aguas grises para viviendas de interés social popular graywater treatment for popular social interest housing. *Pädi: Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*. doi:https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial3.11509

Bautista Quispe, J., Campos, L., Masek., O., & Bogush, A. (2022). Use of biochar-based column filtration systems for greywater treatment: A systematic literature review. *Journal of Water Process Engineering*, 1-21.

Bernal, P. A. (2011). Gestión del agua - Una preocupación de las empresas ambientalmente responsables. *Revista Universidad Y Empresa*, 20. Obtenido de https://revistas.urosario.edu.co/index.php/empresa/article/view/1300/1352

Bhanu, M., Mohit, A., & Remya, N. (2024). Polyculture Microalgae and Zno/GAC-Nanocomposite System for Greywater Treatment. *Applied Biochemistry and Biotechnology, 90*. doi:10.1016/j.biombioe.2024.107391

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (Febrero de 2018). *Ley 21.075 regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises.* Obtenido de Legislación Chilena.: https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1115066

Braulio Gonzalo, M., Jorge Ortiz, A., & Bovea, M. (2022). How are indicators in Green Building Rating Systems addressing sustainability dimensions and life cycle frameworks in residential buildings? *Environmental Impact Assessment Review*, 12. doi:https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106793

Candiotti Lima, E. (2018). *Sistema de Tratamiento de Aguas Grises para Fomentar el Ahorro Hídrico en el Edificio Multifamiliar del Asentamiento Humano Micaela Bastidas Sect. 2 Mz A26, Ate - 2018.* Lima: Universidad César Vallejo.

Carpio Vallejo, D. E. (2013). Análisis de eficiencia de fitorremediación de dos plantas nativas del Oriente ecuatoriano para tratamiento de aguas grises y negras en humedales artificiales en el campamento Amo 1, Bloque 16. *Universidad de las Américas*, 305.

Chadee, A. A., Ali, B., Mallikarjuna, V., Jameel, M., & Azamathulla, H. M. (2023). Application of the analytic hierarchy process for the selection of recycling rainwater/household grey

water to improve SIDS sustainability targets. *Modeling Earth Systems and Environment*. doi:10.1007/s40808-023-01875-3

Chavarro , D., Vélez, M., Tovar , G., Montenegro , I., Hernández, A., & Olaya, A. (2017). *Los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Colombia y el aporte de la ciencia, la tecnología y la innovación.* Bogota D.C.: Colciencias – Unidad de Diseño y Evaluación de Políticas.

Chen, W., Gao, W., Wei, X., & Gong, Y. (2023). Economic analysis of hybrid rainwater-greywater systems between demand and supply sides based on cooperative theory. *Journal of Cleaner Production, 382*.

Delgado, D. S. (2022). *Aguas Grises.* Bogotá: Universidad del Bosque.

Departamento Nacional de Planeación. (15 de Marzo de 2018). *Departamento Nacional de Planeación.* Obtenido de https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3918.pdf

Departamento Nacional de Planeación. (28 de Septiembre de 2020). *CONPES 4004 - Economía Circular en la Gestión de los Servicios de Agua Potable y Manejo de Aguas Residuales.* Obtenido de Departamento Nacional de Planeación.: https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4004.pdf

Departamento Nacional de Planeación. (23 de Marzo de 2018). *CONPES 3919 - Política Nacional de Edificaciones Sostenibles.* Obtenido de Departamento Nacional de Planeación: https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3919.pdf

Deratani, A., Palmeri, J., Moliner Salvador, R., & Sánchez, E. (2012). *Uso de la tecnología de Nanofiltración a través de membranas para el tratamiento de las aguas residuales de la industria cerámica.* Castellón.

Dirección General de Aguas – DGA. (2010). *Actualización para reutilización de aguas grises del Reglamento General de Alcantarillados Particulares, Fosas Sépticas, Cámaras Filtrantes, Cámaras de Contacto, Cámaras Absorbentes y Letrinas Domiciliarias.* Santiago de Chile: Centro de Información de Recursos Hídricos – Área de Documentación.

Empresas Públicas de Medellín. (2020). *Instructivo para la referenciación de los sistemas de Acueducto y Alcantarillado.* Medellín: epm. Recuperado el 2024

ESPO S.A., E. (2024). *Empresa de Servicios Públicos de Ocaña ESPO S.A.* Obtenido de ESPO S.A.: https://espo.com.co/

Galvao, A., Rodrigues, M., Mata, J., & Silva, C. (2025). Green walls for greywater treatment: A comprehensive review of operational parameters and climate influence on treatment performance. *Water Research*, 19. doi:10.1016/j.watres.2024.122948

García, N., & Moreno, J. (2010). *El estado de origen y aplicación de fondos orientado a la gestión hídrica. Una ilustración para Colombia.* Bogotá D.C.

Garizabal, L., Barrios, I., Bernal , O., & Garizabal, M. (2020). Estrategias de planeación tributaria para optimizar impuesto de los contribuyentes. *Espacios*, 8. Obtenido de https://www.revistaespacios.com/a20v41n08/a20v41n08p01.pdf

Gómez Monsalve, M., Dominguez, I., Yan , X., Ward , S., & Oviedo Ocaña , E. (23 de Febrero de 2022). Environmental performance of a hybrid rainwater harvesting and greywater reuse system: A case study on a high water consumption household in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 01-14.

Gómez, S., & Hoyos, L. (2017). *Proyecto planta de agua potable en condominio.* 2017: Universidad del Bosque.

Gras Alomá, R. (2024). *La Ciencia de las Ciudades, una revolución en la concepción del urbanismo moderno.* Actualidad Jurídica Uría Menéndez.

Guerra Romero, L. (2019). *Metodología para la reutilización de aguas lluvias y grises en Edificaciones.* Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia.

Hafiz M, A.-u.-R., Zhang, K., Deletic, A., Khan, S., & Prodanovic, V. (2025). Long-term performance of eight green wall plants in removing xenobiotic organic compounds from greywater across varied operational conditions. *Journal of Water Process Engineering, 71*, 12. doi:https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107142

Hamidi, M. N. (2025). Membrane bioreactor technology for greywater treatment: A review. *Elsevier B.V., 361*. doi:10.1016/j.seppur.2025.131451

Hassan, K., Alzahrani, A., Alotaibi, N., & Helmy, M. (2024). Performance of an integrated household greywater treatment system for water optimization and reuse. *Applied Water Science, 14*, 19. doi:10.1007/s13201-024-02303-2

Herrera Novoa, H., & García Rodríguez, P. (2021). *Diseño de un prototipo para la reutilización de aguas grises en viviendas.* Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia.

Howell, J. (2004). Future of membranes and membrane reactors in green technologies and for water reuse. doi:doi:10.1016/S0011-9164(04)00017-2

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2024). *NTC 1500 - Código Colombiano de Fontanería.* Obtenido de ICONTEC: https://www.academia.edu/28670459/NORMA_T%C3%89CNICA_NTC_COLOMBIANA_1500_C%C3%93DIGO_COLOMBIANO_DE_FONTANER%C3%8DA

Jaradat, H., Mohammad Alshboul, O., Mohammed Obeidat, I., & Kamal Zoubi, M. (2024). Green building, carbon emission, and environmental sustainability of construction industry in Jordan: Awareness, actions and barriers. *Ain Shams Engineering Journal*, 10. doi:https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102441

Jena, G., Dutta, K., & Daverey, A. (Noviembre de 2023). Surfactants in water and wastewater (greywater): Environmental toxicity and treatment options. *Chemosphere, 341*.

Judd, S. (2011). Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment. Elsevier.

Khan, U. A., Loffler, P., Spilsbury, F., Wiberg, K., Lundborg, C., & Yin, F. (2024). Towards sustainable water reuse: A critical review and meta-analysis of emerging chemical contaminants with risk-based evaluation, health hazard prediction and prioritization for assessment of effluent water quality. *Journal of Hazardous Materials, 480*, 12. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136175

León Urrutia, M. (2021). *Oportunidades para el uso de geotextiles para el tratamiento de aguas grises.* Guatemala.: Agua, Saneamiento & Ambiente.

López Bernal, Y., & Ávila Escobar, Y. (2021). *Análisis y evaluación de alternativas de ahorro y reutilización de aguas lluvias y grises en vivendas para su aplicación en el contexto colombiano.* . Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia.

Lucas López, Y. M., & Alsina Correa, J. C. (2017). *Estrategias Comunicativas para incentivar la conservación y cuidado del agua en Ocaña, Norte de Santander.* Trabajo de grado, Ocaña. Obtenido de https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/xmlui/handle/20.500.14167/3549

Mahmoudi, A., Mousavi, S., & Darvishi, P. (2021). Greywater as a sustainable source for development of green roofs: Characteristics, treatment technologies, reuse, case studies and future developments. *Journal of Environmental Management*, 18.

Marín Muñiz, J. (2017). Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reuso del agua. *Agroproductividad*.

Meléndez Perez, J. A., Lemos Lima , M. M., Domínguez, I., & Oviedo Ocaña, E. (2019). Domestic greywater reuse for water use efficiency: social acceptance and financial analysis. A case in Portugal. *Revista UIS Ingenierías, 18*, 14. Recuperado el 2024, de https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (14 de Marzo de 2015). *Resolución 0631 de 2015*. Obtenido de MInisterio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (8 de Junio de 2017). *Resolucipon 0330 de 2017*. Obtenido de Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.: https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/resolucion-0330-2017.pdf

Miralles Cuevas, S. (2015). *Eliminación de micro-contaminantes mediante combinación de sistemas de membrana (nanofiltración) y procesos avanzados de oxidación.* Almería: Universidad de Almería.

Morales Pinzón, T., Flórez Calderón, M., & Orozco Gómez, I. (2016). *Aprovechamiento del agua no convencional en sistemas urbanos* (Primera edición ed.). Pereira, Colombia: Editorial UPT.

Murillo Bermudez, L., & Silva de Abreu, A. (2019). La gestión del recurso hídrico en Brasil y Colombia, una comparación de sus instrumentos. *Gestión y Ambiente*, 18. doi:https://doi.org/10.15446/ga.v22n2.82554

Nuñez, L., Molinari, C., Paz, M., Tornello , C., Mantovano, J., & Moretton, J. (2014). Análisis de riesgo sanitario en aguas grises de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. . *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*.

Obeidat, N., Shatanawi, K., Kassab, G., & Halalsheh, M. (2024). Performance of decentralized wastewater treatment system employing Upflow anaerobic sludge blanket and Vertical Flow Constructed Wetland. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10. doi:10.1016/j.cscee.2024.100695

Ocaña, A. M. (2018). *Alcaldia Municipal de Ocaña.* Obtenido de https://www.ocana-nortedesantander.gov.co/tema/municipio

Patarroyo Martínez, A. (2017). *Diseño de un Sistema para la Recirculación de Aguas Grises, en los Colegios Públicos del Municipio de Chía Cundinamarca, como Estrategia para el Aprovechamiento, Uso Eficiente y Ahorro del Agua.* Cundinamarca.: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

Pedraza, A. Y. (2022). Gestión del agua – una preocupación de las empresas ambientalmente responsablesWater Management - A Concern of the Companies Environmentally Responsible. 1-21.

Perez, M., Schiffmann, C., & Hack, J. (2024). Multidimensional assessment of a Nature-based Solution for decentralized greywater treatment in Costa Rica. *Nature-Based Solutions, 6*, 13. doi:https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2024.100156

Piazza, P., & Ursino, N. (Junio de 2023). On the Reason to Implement a Sustainable Urban Drainage Nature-Based Solution to Decrease Flood Threat: A Survey. *Sustainability*, 13. doi:https://doi.org/10.3390/su15129798

Picón Delgado, D. S. (2022). *Aguas Grises.* Bogotá: Universidad del Bosuqe.

Pucher, B., Zluwa, I., Spörl, P., Pitha, U., & Langergraber, G. (2022). Evaluation of the multifunctionality of a vertical greening system using different irrigation strategies on cooling, plant development and greywater use. *Science of the Total Environment*, 14. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157842

Ramirez, A. (2002). *La construcción sostenible.* Física y Sociedad.

Ren, X., Zhang, S., & Miao, H. (2023). Biological stability of reclaimed greywater reused for flushing household toilets. *Journal of Cleaner Production, 387*.

República de Colombia . (11 de Julio de 1994). *Ley 142 de 1994 Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones*. Obtenido de Gestor Normativo - Función Pública. : https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=2752

República de Colombia. (18 de Diciembre de 1974). *Decreto 2811 de 1974 por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*. Obtenido de Gestor Normativo - Función Pública: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1551

República de Colombia. (26 de Junio de 1984). *Decretov 1594 de 1984*. Obtenido de Gestor Normativo - Función Pública.: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18617

República de Colombia. (22 de Diciembre de 1993). *Ley 99 de 1993*. Obtenido de Gestor Normativo - Función Pública: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297

República de Colombia. (6 de Junio de 1997). *Ley 373 de 1997 Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua.* Obtenido de Gestor Normativo - Función Pública.: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=342

República de Colombia. (25 de Octubre de 2010). *Decreto 3930 de 2010*. Obtenido de Gestor Normativo - Función Pública.: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=40620

República de Colombia. (2010). *NSR-10, Título J. Requisitos Generales para Protección contra Incendios en Edificaciones.* Obtenido de Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente NSR-10: https://www.pedrazaserranoing.com/wp-content/uploads/2019/03/J-NSR-10.pdf

República de Colombia. (23 de Noviembre de 2021). *Resolución 1256 de 2021 Por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones.* Obtenido de Gestor Normativo - Función Pública: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256-de-2021.pdf

Revista UIS Ingenierías. (2019). Domestic greywater reuse for water use efficiency: social acceptance and financial analysis. A case in Portugal. *Revista UIS Ingenierías, 18*, 14. Recuperado el 2024, de https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias

Rodríguez, C., García , B., Pinto, C., Sánchez, R., Serrano , J., & Leiva, E. (2022). Water Context in Latin America and the Caribbean: Distribution, Regulations and Prospects for Water Reuse and Reclamation. *Water*, 26. doi:https://doi.org/10.3390/w14213589

Sadr, S., Casal Campos, A., Fu, G., Farmani, R., Ward, S., & Butler, D. (2020). Strategic planning of the integrated urban wastewater system using adaptation pathways. *Water Research*, 14. doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116013

Sami, M., Hedström, A., Kvarnström, E., Österlund, H., Nordqvist, K., & Herrmann, I. (2024). Treatment of greywater and presence of microplastics in on-site systems. *Journal of Environmental Management*, 11. doi:10.1016/j.jenvman.2024.121859

Santos , J., Rodrigues, S., Magalhaes, M., Rodrigues, K., Pereira, L., & Marinho, G. (2024). A state-of-the-art review (2019–2023) on constructed wetlands for greywater treatment and reuse. *Environmental Challenges*. doi:https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100973

Shaikh, I., & Ahammed, M. (01 de Mayo de 2020). Quantity and quality characteristics of greywater: A review. *Journal of Environmental Management, 261*, 01-15.

Simón Andreu, P., Lardín Mifsut, C., Domínguez Chabalina, L., Prats Rico, D., Cases López, V., Prado Álvarez, G., . . . Llosa Llacer, C. (2024). *Puesta en marcha de un sistema híbrido UASB + MBR para el tratamiento de las aguas residuales.* España: TecnoAqua.

Sotto Díaz, A. (2008). *Aplicación de la tecnología de membranas de Nanofiltración y Ósmosis Inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos fenólicos y ácidos carboxilicos.* . Madrid: Universidad Rey Juan Carlos.

Soussa, H. K., Ahmed, M. E., Taha, M. M., & Ali, M. N. (2024). Experimental study based on the usage of polymers for greywater treatment. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 7. doi:10.15243/jdmlm.2024.121.6501

Ssempeera, P. (2023). *Integrated Drainage Systems Planning and Design for Municipal Engineers.* CRC Press. doi:10.1201/9781003255550

Stefanatou, A., Schiza, S., Petousi, I., Rizzo, A., Masi, F., Stasinakis, A., . . . Fountoulakis, M. (11 de Mayo de 2023). Use of climbing and ornamental plants in vertical flow constructed wetlands treating greywater. *Journal of Water Process Engineering*, 01-09.

Tidiane Compaoré, C., Ouili, A., Zongo, S., Dabré, D., Maiga , Y., Mogmenga, I., . . . Ouattara, A. (2024). Assessing greywater characteristics in the sahel region and perception of the local population on its reuse in agriculture. *Heliyon*, 13. doi:https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33473

Torres Gallardo, A. (13 de Abril de 2019). Elementos de un sistema de información contable efectivo. *Quipukamayoc*, 8. Obtenido de https://core.ac.uk/download/pdf/304895619.pdf

Vala, B., & Malazaa, N. (2024). Examining the efficacy of the legal framework governing the management of greywater in South Africa's informal settlements. *Journal of water & health*. doi:10.2166/wh.2024.312

Van de Walle, A., Kim, M., Alam, M., Wang, X., Wu, D., Ranjan Dash, S., . . . Kim, J. (2023). Greywater reuse as a key enabler for improving urban wastewater management. *Environmental Science and Ecotechnology*, 13.

Vera Puerto, I., Valdés, H., Bueno, M., Correa, C., Olave, J., Carrasco Benavides, M., . . . Arias, C. (2022). Reclamation of Treated Wastewater for Irrigation in Chile: Perspectives of the Current State and Challenges. *Water*, 20. doi:https://

Vergel Castro, C. (2023). *Evaluación del desempeño de un bioprototipo para el tratamiento de aguas residuales domésticas descargadas en el arroyo León en Puerto Colombia, Atlántico.* Barranquilla: Universidad del Norte.

Vobruba, T., Hartl, M., Langergraber, G., Pucher, B., Gattringer, H., Bertino, G., . . .

Kisser, J. (2024). vertECO® vertical green wall system demonstration for domestic wastewater treatment and on-site reuse in an Austrian eco-village. *Ecological Engineering*, 9. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107460

Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. doi:doi:10.3390/w2030530

Zamudio Rodríguez, C. (2012). Gobernabilidad sobre el recurso hídrico en Colombia: entre avances y retos. *Gestión y Ambiente*.

Apéndices

Apéndice 1. Entrevista - Guía de preguntas:

Datos generales:

- Nombre (opcional):
- Profesión/Cargo:
- Experiencia en temas de gestión de aguas residuales o construcción sostenible:

Conocimiento y percepción sobre aguas grises

1. ¿Qué entiende por aguas grises y cuáles cree que son sus principales fuentes en edificaciones residenciales?
2. ¿Ha tenido experiencia con sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises? Si es así, ¿podría describirla?
3. ¿Qué beneficios y riesgos asocia con el uso de aguas grises?

Viabilidad y percepción de la comunidad

4. ¿Cree que en Ocaña hay conciencia sobre la importancia de reutilizar aguas grises? ¿Por qué?
5. Desde su punto de vista, ¿qué tan dispuestos estarían los habitantes de Ocaña a implementar estos sistemas en sus viviendas o edificios?
6. ¿Qué factores podrían incentivar o desmotivar la adopción de sistemas de reutilización de aguas grises en la comunidad?

Aspectos normativos y administrativos

7. ¿Conoce normativas locales o nacionales que regulen la reutilización de aguas grises?
8. ¿Considera que el marco normativo actual es suficiente para fomentar su implementación? ¿Por qué?

9. ¿Qué barreras legales o administrativas cree que dificultan la implementación de estos sistemas en edificaciones residenciales?

Consideraciones técnicas y económicas

10. ¿Qué tecnologías considera más adecuadas para el contexto de Ocaña en términos de tratamiento de aguas grises?

11. ¿Cuáles cree que son los principales retos técnicos en la instalación y mantenimiento de estos sistemas?

12. ¿Desde su perspectiva, qué costos están involucrados en la implementación de un sistema de reutilización de aguas grises y cómo podrían reducirse?

Certificaciones en sostenibilidad hídrica

13. ¿Está familiarizado con certificaciones en construcción sostenible que incluyen criterios de uso eficiente del agua, como CASA Colombia, EDGE, LEED u otras?

14. ¿Considera que la obtención de certificaciones de sostenibilidad podría ser un incentivo para que los constructores adopten sistemas de reutilización de aguas grises?

15. ¿Qué barreras o dificultades identifican en el acceso y cumplimiento de estas certificaciones en proyectos locales?

Estrategias y propuestas

16. ¿Qué acciones o estrategias podrían mejorar la aceptación e implementación de estos sistemas en la ciudad?

17. ¿Cómo percibe el papel de las autoridades locales en la promoción de estas iniciativas?

18. ¿Considera que existen modelos de referencia exitosos a nivel nacional o internacional que podrían adaptarse a la realidad de Ocaña?

Apéndice 2. Encuesta – Guion de preguntas

Encuesta sobre la percepción y viabilidad del uso de aguas grises en Ocaña

Objetivo: Conocer el nivel de conocimiento, aceptación y posibles barreras para la reutilización de aguas grises en Ocaña, con el fin de evaluar su viabilidad e identificar estrategias de implementación.

Conocimiento y percepción sobre las aguas grises

Pregunta 1: ¿Ha escuchado antes el término "aguas grises"?

Sí _____ No_____

Pregunta 2: Las aguas grises son aquellas generadas en actividades domésticas como lavado de manos, duchas y lavandería, que pueden ser tratadas para su reutilización. ¿Cuál de las siguientes opciones cree que mejor describe las aguas grises?

Son aguas residuales con alta contaminación, similares a las aguas negras _____

Son aguas usadas en el hogar que pueden tratarse y reutilizarse en ciertas actividades _____

Son aguas pluviales recolectadas para uso doméstico _____

No estoy seguro/a _____

Pregunta 3: ¿Sabe si actualmente reutilizan aguas grises en su hogar, edificio o comunidad?

Sí_____ No_____ No sé_____

Pregunta 4: ¿Considera que las aguas grises son un recurso desaprovechado?

Totalmente de acuerdo_____ De acuerdo_____

En desacuerdo_____ Totalmente en desacuerdo_____

Pregunta 5: Según tratados internacionales sobre sostenibilidad, los nuevos proyectos de construcción deben incluir estrategias para el ahorro del recurso hídrico. ¿Qué medidas considera que podrían implementarse en Ocaña? (Puede seleccionar más de una opción).

Uso de sistemas de captación y almacenamiento de agua lluvia _____

Implementación de sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises _____

Instalación de dispositivos de ahorro de agua en grifos e inodoros _____

No considere que sea necesario implementar medidas adicionales _____

Otro: _____

Usos y disposición a reutilizar aguas grises

Pregunta 6: ¿Para qué actividades considera que serían útiles las aguas grises tratadas? (Puede seleccionar más de una opción)**.**

Riego de jardines_____ Lavado de vehículos_____

Limpieza de pisos_____ Descarga de inodoros_____

Otro: _____

Pregunta 7: Si tuviera un sistema de tratamiento de aguas grises en su vivienda, ¿lo utilizaría?

Sí_____ No_____

Depende (¿Por qué?) _____

Pregunta 8: ¿Qué beneficios cree que traería el uso de aguas grises? (Puede seleccionar más de una opción)

Reducción de costos_____ Ahorro en el consumo de agua potable_____

Sostenibilidad ambiental____ Otro: _____

Barreras y desafíos percibidos

Pregunta 9: ¿Cuáles cree que son las principales barreras para el uso de aguas grises en Ocaña? (Puede seleccionar más de una opción)

Costos elevados de implementación_____ Falta de conocimiento_____

Resistencia social al uso del agua gris_____ Falta de normativa o regulación_____

Otro: _____

Pregunta 10: ¿Cree que los edificios en Ocaña están preparados para la implementación de sistemas de reutilización de aguas grises?

Sí_____ No_____ No sé_____

Pregunta 11: ¿Qué acciones cree que pueden tomarse para fomentar el uso de aguas grises? (Puede seleccionar más de una opción).

Incentivos económicos_____ Campañas de concienciación_____

Reglamentaciones claras_____ Otro:

_____

Información sociodemográfica

Pregunta 12: ¿Cuál es su ocupación principal?

Profesional de la construcción_____ Profesional del sector académico_____

Habitante de Ocaña_____ Estudiante_____

Otro: _____

Pregunta 13: ¿Vive en un edificio o en una casa?

Edificio_____ Casa_____ Otro: _____

Pregunta 14: ¿Cuál es el estrato socioeconómico de su vivienda?

1_____ 2_____ 3_____ 4_____ 5_____ 6_____

Apéndice 3. Matriz de Análisis Documental

Objetivo	Actividad Asociada	Tipo de Documento	Fuente	Contenido Específico	Criterios de Selección	Uso en el Proyecto
Identificar la percepción sobre las aguas grises	Revisión de literatura e informes en contextos similares. Diseño y validación de instrumentos de recolección de datos.	Artículos científicos, libros, reportes técnicos. Manuales de metodología de encuestas y entrevistas.	Bases de datos académicas, universidades, bibliotecas.	Definiciones sobre aguas grises. Percepciones sociales y barreras. Metodologías para diseño y validación de instrumentos.	Publicaciones relevantes de últimos años. Contexto con características similares a Ocaña. Aplicabilidad práctica de metodologías.	Fundamentar el diagnóstico inicial sobre percepción. Definir preguntas e ítems de encuestas y entrevistas. Recopilar experiencias comparables para sensibilización.
Analizar la normativa y las barreras para la adopción	Revisión documental de normas sobre reutilización de aguas grises. Identificación de barreras y oportunidades. Consulta a autoridades.	Legislación vigente. Informes y estudios. Minutas de reuniones, actas oficiales.	Secretaría de Planeación, Ministerio de Ambiente. Páginas web oficiales y repositorios de documentos públicos.	Normativas de manejo de aguas grises. Licencias de construcción. Políticas e incentivos. Datos de autoridades.	Enfoque aplicable a Ocaña. Claridad en la normativa. Documentos que muestren brechas legales y barreras.	Identificar brechas y oportunidades normativas. Complementar con información cualitativa. Lineamientos que fomentan la adopción.
Evaluar tecnologías y estrategias viables.	Revisión de reportes y estudios de caso.	Artículos y reportes científicos.	Instituciones de investigación, revistas indexadas.	Características de sistemas de tratamiento.	Evidencia empírica. Pertinencia para entornos de	Justificar la elección adecuada para Ocaña. Proponer estrategias con base

	Análisis de la viabilidad. Definición de propuestas estratégicas.	Patentes, fichas técnicas. Modelos de evaluación costo-beneficio.	Organismos internacionales. Bases de datos UFPSO.	Análisis de aceptación social, costos y rentabilidad. Experiencias exitosas en otras ciudades.	condiciones similares. Viabilidad demostrada en estudios reales.	en evidencia científica. Generar un enfoque integral y sostenible.
Elaborar la propuesta estratégica final	Consulta de planes estratégicos, guías de diseño y normas para la redacción del informe.	Informes de validación técnica, guías de diseño. Normas APA, manuales de redacción.	Dependencias académicas. Manuales de estilo y bibliotecas virtuales.	Modelos de éxito en otras ciudades. Lineamientos de presentación y citación.	Coherencia. Normas de citación. Adaptabilidad a informes académicos y técnicos.	Garantizar conclusiones validadas. Presentar recomendaciones alineadas con regulaciones y la práctica profesional.

Fuente: Elaboración propia

Apéndice 4. Análisis bibliométrico

Se realizó el análisis bibliométrico de la documentación mediante la base de datos **Scopus**, empleando herramientas como R, RStudio y Bibliometrix, y tulizando los términos clave "greywater", "reuse and systems" y "treatment"; de esta forma se identificaron 230 documentos relevantes sobre el tema, tras una depuración inicial de 440 artículos, donde se excluyeron áreas temáticas y publicaciones no relacionadas, tal y como se evidencia en la Figura 4 y Figura 5:

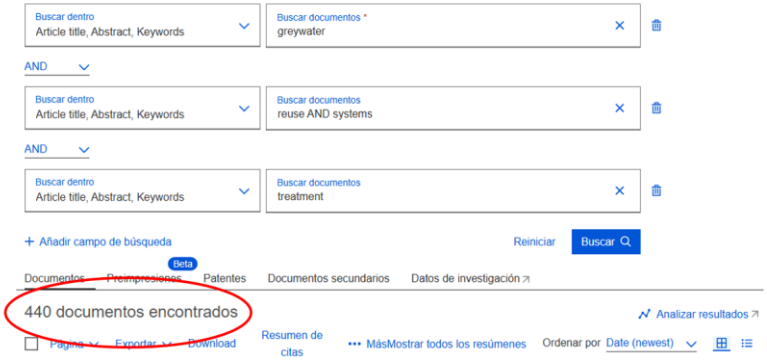


Figura 1 Términos clave de búsqueda y resultados encontrados.

Fuente: Pantallazo de la plataforma Scopus, acceso institucional de la UFPS Ocaña.



Figura 2 Filtros aplicados y resultados encontrados.

Fuente: Pantallazo de la plataforma Scopus, acceso institucional de la UFPS Ocaña.

Los términos clave fueron elegidos porque las aguas grises son el eje central del estudio, “reúso y sistemas”, permite enfocar la búsqueda en tecnologías, prácticas y sistemas aplicables, y por último “tratamiento” permite identificar los métodos utilizados para garantizar la calidad del agua tratada.

El análisis inicial de los datos muestra que la información filtrada consta de 226 documentos, los cuales fueron desarrollados por 761 autores y 110 fuentes con una tasa de crecimiento anual del 1.59% y 26,55 ditas promedio por documento; como se muestra en la Figura 6. Esto refleja la amplia colaboración entre los autores y la diversidad de publicaciones relacionadas con el tema de estudio, la cantidad de citaciones por año refuerzan la relevancia de las investigaciones. Estos datos permiten dimensionar el impacto de los estudios relacionados con el tratamiento y reutilización de aguas grises, siendo una base sólida para documentarse.



Figura 3 Información principal Análisis Bibliométrico.

Fuente: Pantallazo de la plataforma Biblioshiny, generado con Bibliometrix en R y RStudio, utilizando base la de datos Scopus.

Si se procese a analizar cada una de las variables del análisis bibliométrico, se puede observar el gráfico de producción científica anual, que se muestra en la Figura 7, en él se

evidencia el crecimiento en la cantidad de publicaciones de estudios relacionados con los conceptos clave, teniendo un incremento considerable en los últimos años, lo que sugiere el creciente interés en el tema de estudio, teniendo en cuenta la necesidad de brindar soluciones sostenibles a los desafíos relacionados con la gestión del recurso hídrico en diversas regiones del mundo, lo cual resalta la importancia del desarrollo de esta investigación no solo a nivel local sino global.

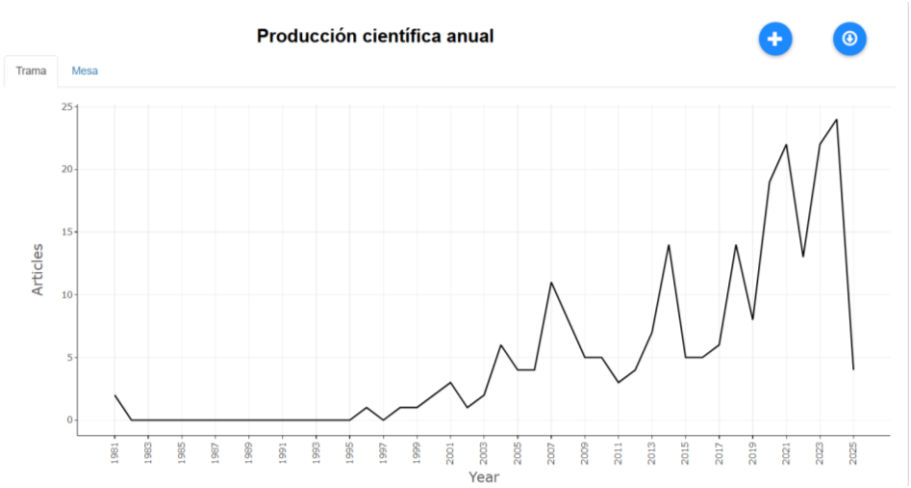


Figura 4 Gráfico de producción científica anual.

Fuente: Pantallazo de la plataforma Biblioshiny, generado con Bibliometrix en R y RStudio, utilizando base la de datos Scopus.

Por otra parte, en la variable de análisis de las citas promedio por año se muestra un gráfico que refleja cómo han impactado los estudios a lo largo del tiempo. Se observa que desde el año 2000, las citas han variado, con años de poca incidencia y con picos significativos como en el 2013 y 2017, tal y como se puede evidenciar en la Figura 8. Esto indica que el interés por el tema ha tenido momentos relevantes probablemente debidos a publicaciones clave o avances con

relación al tema de estudio en algunas regiones. De igual forma, la constancia en las citas indica también que se ha mantenido como un área de interés en la comunidad científica.

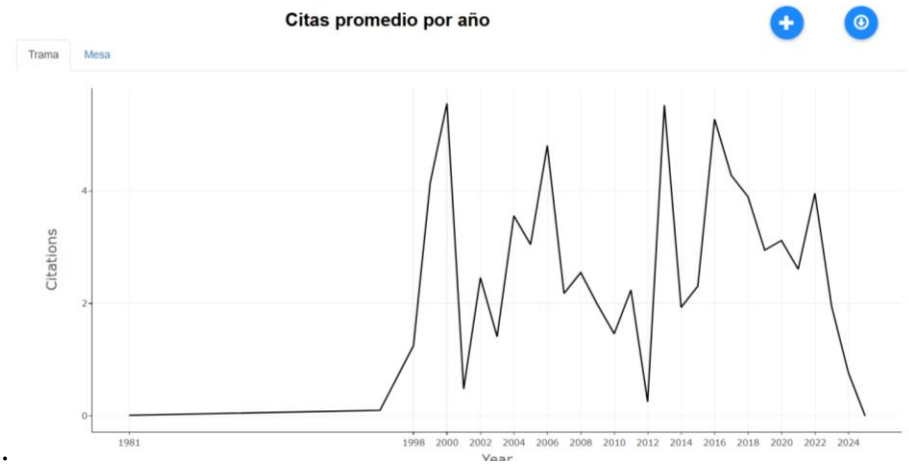


Figura 5 Gráfico de citas promedio por año.

Fuente: Pantallazo de la plataforma Biblioshiny, generado con Bibliometrix en R y RStudio, utilizando base la de datos Scopus.

Dentro de la variable Fuentes; específicamente en la sección "Fuentes más relevantes", se destacan las revistas que han contribuido; desde la más significativa hasta la de menor incidencia, en cuanto al desarrollo de investigaciones relacionadas con el tema. La revista más relevante es "*Water Science and Technology"*, con un total de 21 artículos, seguida de las revistas "*Desalination", "Desalination and water treatment"* y *"Journal of water process engineering"*, las cuales han publicado 10 artículos de investigación cada una, tal y como se puede observar en la Figura 9. Esta información permite identificar cuáles son las fuentes clave y más relevantes al momento de realizar revisiones literarias y consultas técnicas y teóricas.

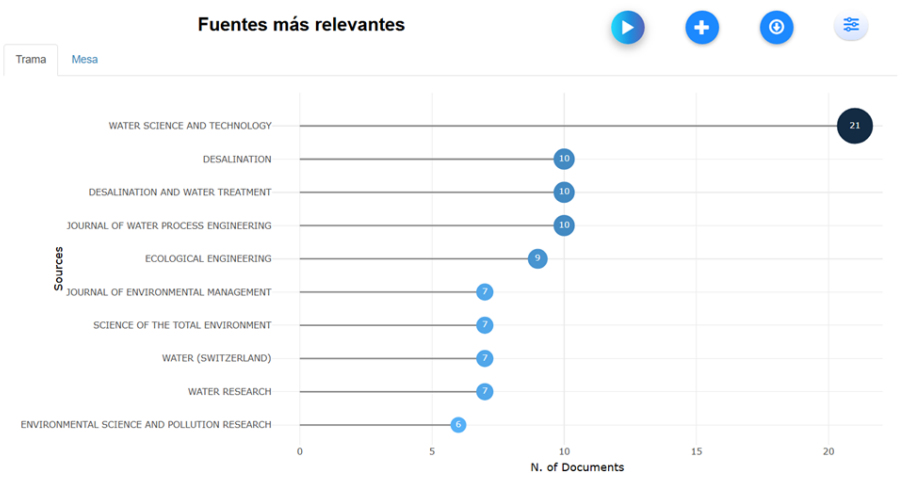


Figura 6 Fuentes más relevantes.

Fuente: Pantallazo de la plataforma Biblioshiny, generado con Bibliometrix en R y RStudio, utilizando base la de datos Scopus.

Con respecto a la variable relacionada con el impacto local de las fuentes, el análisis bibliométrico muestra que la revista "*Water Science and Technology*" cuenta con el mayor impacto, el cual está medido en 14, seguida de *Desalination*, con un impacto medido en 9, como se puede observar en la Figura 10. Este dato refuerza la relevancia de las revistas en torno al tema de estudio y permite orientar a los investigadores hacia publicaciones que han tenido mayor influencia en el área de investigación.

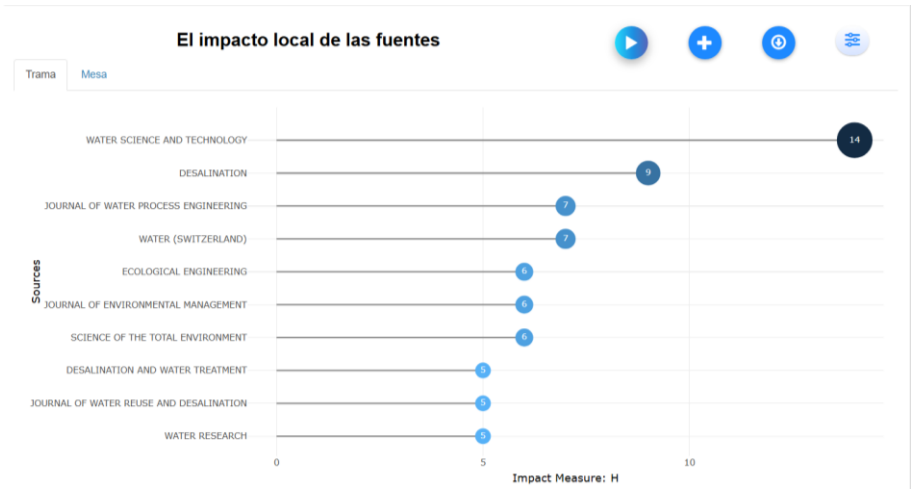


Figura 7 Impacto Local de las fuentes.

Fuente: Pantallazo de la plataforma Biblioshiny, generado con Bibliometrix en R y RStudio, utilizando base la de datos Scopus.

Otra de las variables que se puede explorar en el análisis bibliométrico corresponde a la producción de las fuentes a lo largo del tiempo, esta variable muestra un crecimiento constante en la cantidad de artículos publicados por las revistas, teniendo un aumento de mayor significancia en los últimos años, este incremento se puede observar en la Figura 11. Lo anterior permite inferir que el interés en el tema de estudio y la actividad investigativa relacionada con el tratamiento y reutilización de aguas grises han sido constantes, validando la importancia de este estudio.

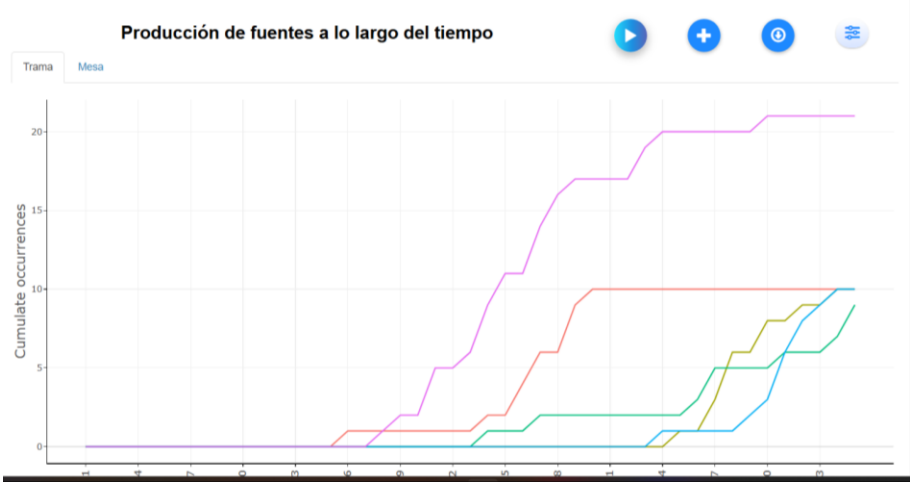


Figura 8 Producción de fuentes a lo largo del tiempo.

Fuente: Pantallazo de la plataforma Biblioshiny, generado con Bibliometrix en R y RStudio, utilizando base la de datos Scopus.

Es indispensable hacer un análisis de los autores involucrados en el desarrollo de proyectos de investigación, por ello, con respecto a esta variable, específicamente en la sección Autores más relevantes, se identifica al autor más relevante *"Friedler E"* quien cuenta con un total de 13 artículos publicados con relación al tema de estudio, seguido por otros con menor cantidad de estudios, pero siendo de igual forma, relevantes en el campo de investigación, tal y como se muestra en la Figura 12. Con esta información se puede reconocer a los investigadores más dinámicos en el campo lo que podría facilitar colaboraciones y consultas futuras.

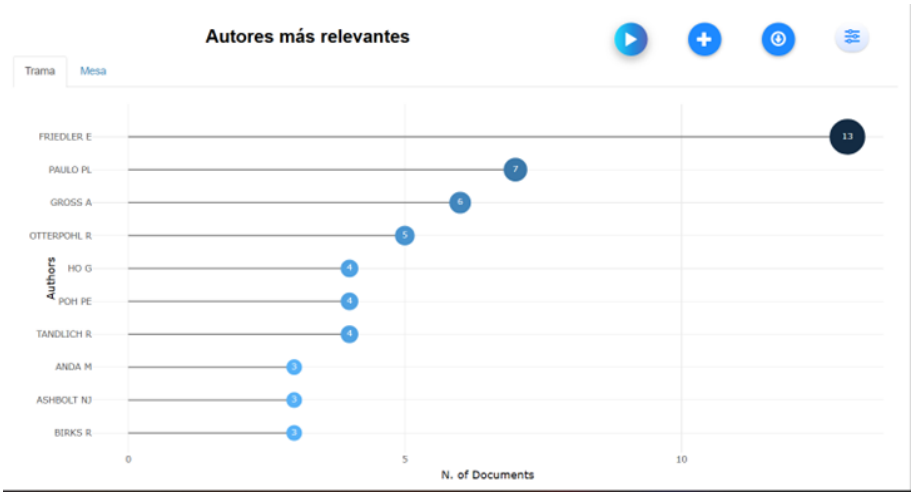


Figura 9 Autores más relevantes.

Fuente: Pantallazo de la plataforma Biblioshiny, generado con Bibliometrix en R y RStudio, utilizando base la de datos Scopus.

Con respecto a la variable impacto Local de los Autores, se evidencia que el autor con mayor relevancia también es quien ha tenido el mayor impacto local, con una puntuación numerada en 10, tal y como se muestra en la Figura 13. Esto resalta la influencia de su trabajo en la comunidad científica y su contribución al desarrollo del conocimiento en esta área de investigación.

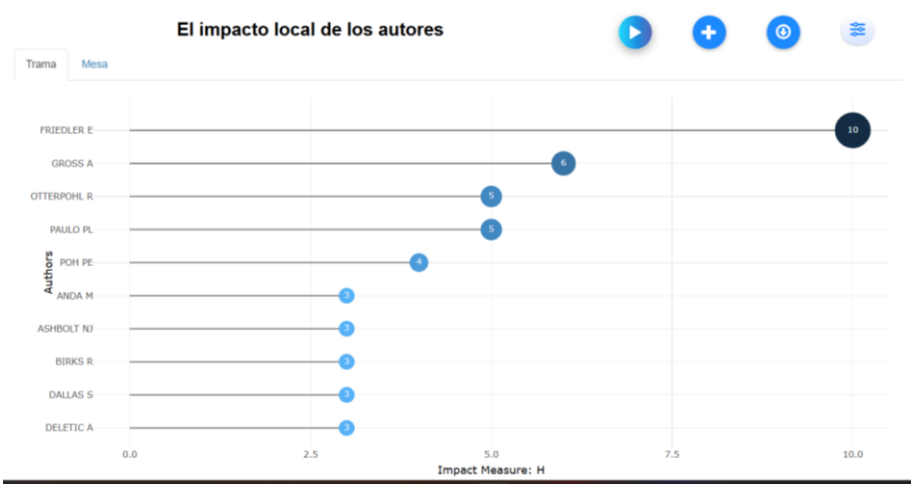


Figura 10 Impacto local de los autores.

Fuente: Pantallazo de la plataforma Biblioshiny, generado con Bibliometrix en R y RStudio, utilizando base la de datos Scopus.

En el análisis de la variable Documentos, que se puede observar en la Figura 14, se presentan los documentos más citados a nivel mundial. El documento más destacado cuenta con un total de 289 citas, seguido por documentos con 240 y 116 citas respectivamente. De esta forma se analizan los artículos que han tenido más influencia en el campo de estudio y que representan una fundamentación necesaria para comprender los avances en el área de investigación.



Figura 11 Documentos más citados a nivel mundial.

Fuente: Pantallazo de la plataforma Biblioshiny, generado con Bibliometrix en R y RStudio, utilizando base la de datos Scopus.

En la variable palabras, la nube de palabras es que encargada de identificar los términos clave más frecuentes en los documentos analizados, en este caso y como se evidencia en la Figura 15 los términos más destacados son *wastewater treatment*, *wastewater reclamation*, *recycling* y *greywater*, los cuales indican las áreas de enfoque principales en las investigaciones

y sirve como guía para fundamentar el marco teórico. Por otra parte, el mapa de árboles complementa la nube de palabras ya que proporciona porcentajes y datos numéricos sobre la ocurrencia de cada término, permitiendo así identificar la relevancia de los conceptos clave en el área de estudio.



Figura 12 Nube de palabras.

Fuente: Pantallazo de la plataforma Biblioshiny, generado con Bibliometrix en R y RStudio, utilizando base la de datos Scopus.

Con respecto a la variable del enfoque de red; se muestra un gráfico que permite realizar un análisis de la red de coocurrencia, en este se muestra la interconexión entre los diferentes términos clave de las investigaciones, destacando los que tienen mayor presencia en los documentos. Como se muestra en la Figura 16, los términos más relevantes son también los más destacados en la nube de palabras, validando su influencia en torno a la investigación.

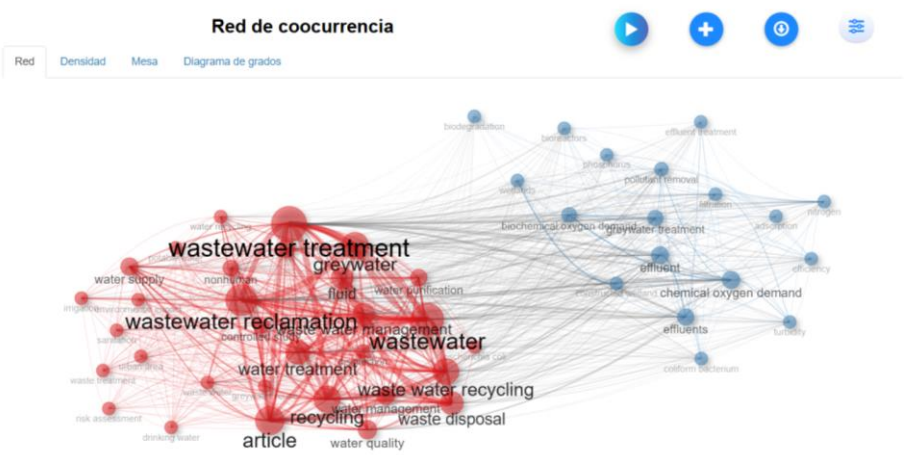


Figura 13 Red de Coocurrencia

Fuente: Pantallazo de la plataforma Biblioshiny, generado con Bibliometrix en R y RStudio, utilizando base la de datos Scopus.

En el análisis factorial es otra variable de gran importancia, pues con ella se pueden correlacionar las variables relacionadas en las investigaciones y además, muestra las conexiones entre los diferentes conceptos clave involucrados. Según lo estudiado, las palabras más utilizadas aparecen en el eje central, mientras que la proximidad con otros términos indica que tan estrecha es la relación entre ellos. Según lo que se puede observar en la Figura 17, en general, los términos conservan una estrechez entre sí, permitiendo identificar las tendencias de investigación.

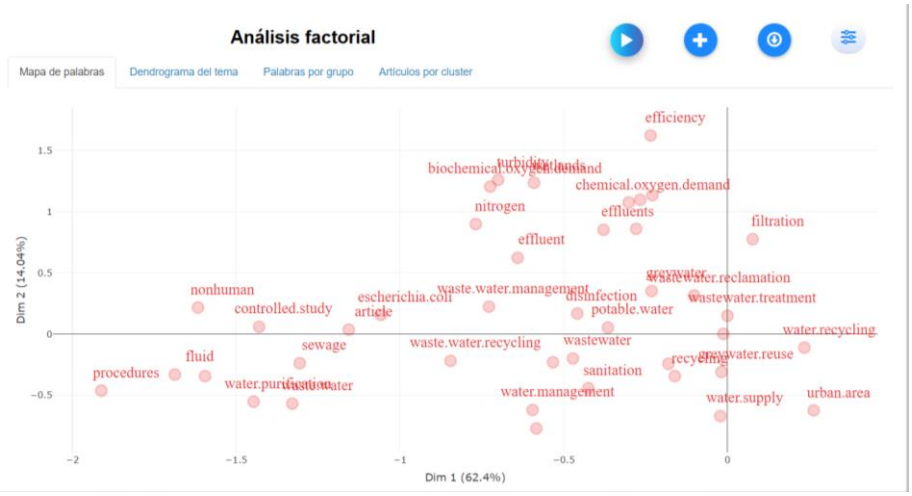


Figura 14 Análisis factorial

Fuente: Pantallazo de la plataforma Biblioshiny, generado con Bibliometrix en R y RStudio, utilizando base la de datos Scopus.

Finalmente, en la estructura social se muestra el mapa mundial de colaboración entre países, allí se ilustra las conexiones internacionales con relación a la investigación en el área de estudio. Se observa en la Figura 18 que Canadá, Estados Unidos y China destacan como los principales colaboradores, aunque también se observan contribuciones de otros países. Con este análisis se puede identificar la globalidad del tema y la importancia en torno al concepto de sostenibilidad. De la misma forma se puede identificar que en Colombia la investigación relacionada ha sido limitada

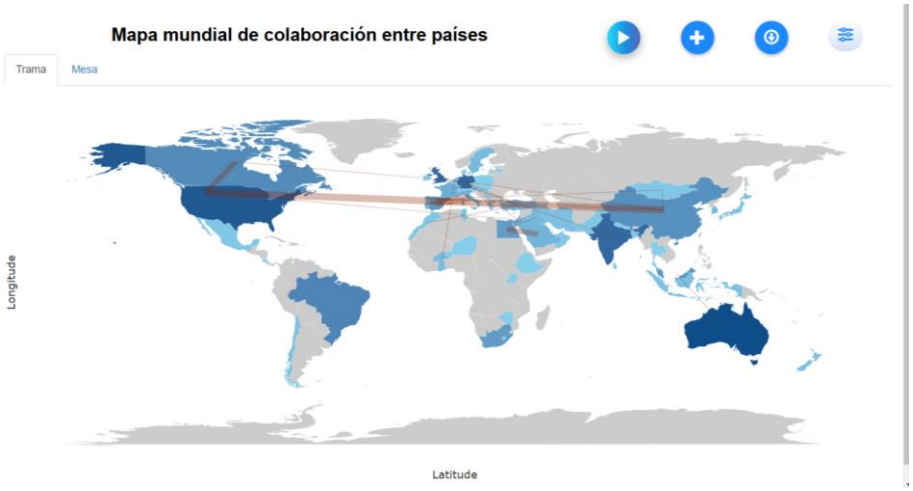


Figura 15 Mapa mundial de colaboración entre países

Fuente: Pantallazo de la plataforma Biblioshiny, generado con Bibliometrix en R y RStudio, utilizando base la de datos Scopus.

A partir del análisis bibliométrico realizado, se observó un interés creciente por el tema, justificado por el incremento en publicaciones y con ello, autores relevantes y citaciones a lo largo de los años. Se evidenció que la investigación es dinámica y evolutiva, subrayando la investigación presente como un aporte relevante. Se observaron revistas incidentes y su impacto en la comunidad científica, así como el impacto de los autores y documentación.

Este análisis bibliométrico también facilitó la identificación de términos clave recurrentes en la literatura científica y que constituyen los conceptos centrales de esta investigación. Además, se observó una correlación entre conceptos y su aplicación (red de ocurrencia) y se destacó la importancia de la cooperación entre países, reforzando la idea de que el problema tiene una dimensión global y, por ende, requiere abordarse desde diversas perspectivas, tanto disciplinarias como regionales.

Apéndice 5. Entrevistas realizadas

Entrevista No. 1

Nombre del entrevistado: Ing. Ray Carlos Ramírez.

Cargo, experiencia y tipo de actor clave: Docente Ocasional UFPSO – Línea de aguas y gestión hídrica, 10 años de experiencia en servicios públicos y normatividad operativa.

Fecha y medio: 07 de mayo de 2025 – Presencial.

Dimensión / Tema	Nº de Pregunta	Resumen de Respuesta
Conocimiento y percepción sobre aguas grises.	1	Define el termino de aguas grises como aquellas que provienen de actividades domésticas como duchas, lavamanos y lavandería, excluyendo las de cocina por carecer generalmente de trampa de grasas y por riesgo en mantenimiento de redes.
	2	No ha desarrollado proyectos de tratamiento de aguas grises, pero ha revisado diseños y supervisados sistemas convencionales en Ocaña y considera que sería un sistema descentralizado básico para reutilización en pequeña escala.
	3	En cuanto a los beneficios, considera el ahorro en la factura y uso eficiente del recurso. Por otro lado, con relación a los riesgos describe la percepción negativa de usuarios y potencial foco de contaminación si es almacenado de forma inadecuada.
Viabilidad y percepción de la comunidad.	4	Determina la falta de conciencia ambiental en Ocaña sobre la reutilización de aguas grises, ya que no se implementa desde la familia ni desde las instituciones educativas.
	5	Indica que puede ocurrir la falta de aceptación en viviendas y enfatiza en que debería iniciarse en instituciones que ya tienen una cultura de consciencia ambiental y consumo responsable.
	6	Para fomentar el tratamiento de aguas grises, sugiere reducir tarifas y reconocer el esfuerzo adicional, pero resalta barreras como la consciencia ambiental, desconocimiento, desinterés institucional y falta de servicios técnicos especializados.

Aspectos normativos y administrativos.		7	Aunque está familiarizado con la Resolución 0330, no conoce una regula específica a nivel local o departamental.
		8	Debido a la falta de normativa que asegure la suficiencia de agua, propone implementar estrategias de "ciudades esponja" para aprovechar y utilizar aguas lluvias.
		9	Describe como barreras, la economía familiar debido a la alta tasa de viviendas en arriendo, cultura desinformada y ausencia de liderazgo institucional sumado al desconocimiento de conceptos básicos de saneamiento.
Consideraciones técnicas y económicas.	0	1	Recomienda la recolección de aguas grises en la zona baja del edificio, se almacenen en tanques de polietileno, se traten con membrana y desinfección simple y se distribuyan mediante bombeo hidroneumático.
	1	1	El mayor desafío es la alta inversión inicial sin beneficios normativos o incentivos tangibles para los usuarios.
	2	1	Sugiere que se debe analizar costos iniciales frente a los ahorros a largo plazo para establecer el periodo de recuperación de dicha inversión.
Certificaciones en sostenibilidad hídrica.	3	1	Tiene conocimiento de CASA Colombia y EDGE desde el ámbito académico.
	4	1	Consideran que deberían incentivarse a instituciones, pero no enfocado a usuarios residenciales, que ofrezcan beneficios como puntajes o exenciones a constructores que adopten tecnologías en aguas grises.
	5	1	En cuanto a las barreras, predominan lo que son, las limitaciones legales o locales y la falta de condiciones para cumplir con los requisitos de certificación.
Estrategias y propuestas.	6	1	Plantea que el inicio debe realizarse desde la alcaldía, ESPO y universidades y que estas mismas instituciones lleguen a establecer un ejemplo gubernamental y que este logre replicarse en residencias.
	7	1	Menciona que las diferentes autoridades de la localidad lideren estrategias y programas que permitan el reuso de aguas grises.
	8	1	Hizo énfasis en aplicar como referencia teórica las "ciudades esponja", pero desconoce que estos modelos han sido aplicados en Colombia y el municipio de Ocaña.

Observaciones adicionales: El entrevistado hace énfasis que en el municipio de Ocaña no se percibe la necesidad de reusar aguas grises porque se cuenta con servicio constante.

Propone que la implementación inicie en instituciones para que posteriormente se traslade la cultura a los usuarios residenciales.

Entrevista No. 2

Nombre del entrevistado: Ing. Juan Carlos Rodríguez

Cargo, experiencia y tipo de actor clave: Ingeniero ambiental, miembro del equipo técnico de CORPONOR – Actor clave institucional ambiental.

Fecha y medio: 10 de mayo – Presencial.

Dimensión / Tema	Nº de Pregunta	Resumen de Respuesta
Conocimiento y percepción	1	Define Las aguas grises como aquellas generadas tras el uso doméstico, como lavamanos, duchas o lavado de superficies, sin realizar la inclusión de aguas negras ni de cocina por su alta carga de materia fecal y grasas contenidas respectivamente.
	2	Indica que no ha laborado con sistemas de tratamiento de aguas grises, pero sí ha hecho seguimiento técnico a PTARs convencionales.
	3	Con base a los beneficios menciona que estos se relacionan con la sostenibilidad ambiental y el uso racional del recurso hídrico y que, por otro lado, los riesgos son principalmente la falta de conocimiento técnico y social, lo que puede conllevar a un uso inadecuado o instalaciones con un mal diseño.
Viabilidad y percepción de la comunidad	4	Hace relación que en el municipio de Ocaña no existen suficiente conciencia ambiental, y que ese desconocimiento predomina incluso en el ámbito profesional, trayendo como consecuencias la falta de cultura y de apropiación del concepto, lo cual limita su viabilidad actual.
	5	Considera que dicha disposición podría tener mejoría si logra enfocarse el mensaje hacia beneficios económicos. Ya que indica que la abundancia relativa del recurso en la ciudad impide que la población perciba la necesidad de ahorro, por lo que el argumento debe estar enfocado en el ámbito financiero.

	6	Expone que para motivar la adopción de este término es relevante indicar los incentivos económicos y una adecuada educación ambiental, puesto que, sin los mismos, los costos de implementación y operación desmotivan a la comunidad.
Aspectos normativos y administrativos	7	Tiene conocimiento del Decreto 1256 de 2021, que reglamenta el uso de aguas residuales
	8	Hace énfasis en que la normatividad actual no es suficiente ni específica, y debería ser liderada inicialmente por las autoridades ambientales nacionales.
	9	Identifica como barrera principal la desarticulación institucional y la ausencia de canales de comunicación efectiva entre entidades clave: Alcaldía, Planeación, Empresa de Servicios Públicos y la autoridad ambiental.
Consideraciones técnicas y económicas	10	Hace énfasis en que la solución debe llevar filtros y luego un tratamiento químico para eliminar esos componentes.
	11	El desafío principal es el desconocimiento técnico, tanto en diseño como en operación y mantenimiento, por ello, en el municipio de Ocaña no existe experiencia previa que sirva como modelo replicable.
	12	Se requiere una inversión en tuberías diferenciadas, tanques de almacenamiento, sistemas de tratamiento y mantenimiento periódico, sin embargo, la falta de estándares y referentes técnicos locales dificulta su implementación.
Certificaciones en sostenibilidad	13, 14, 15	Desconoce certificaciones como EDGE o CASA Colombia. Plantea la duda de qué autoridad debería avalarlas y considera que si trajeran beneficios económicos reales podrían ser útiles, pero el desconocimiento sobre su existencia es generalizado.
Estrategias y propuestas	16	Propone articulación institucional.
	17	Determina que las autoridades locales deben asumir un rol activo, promoviendo normativas y proyectos piloto. También incluye el tema en la revisión de licencias de construcción para que los diseños de separación de aguas grises sean aprobados desde el inicio.
	18	No tiene pleno conocimiento de modelos locales, pero considera que hay muchas experiencias internacionales. Sugiriendo adaptar estas soluciones al contexto local.

Observaciones Adicionales: Recomienda evaluar si se requiere permiso de vertimientos, así como la necesidad de un aval institucional para la implementación del sistema. Menciona que los proyectos serían más aplicables a nuevas construcciones y parcelaciones campestres y que las entidades deben construir una ruta clara y trabajar en conjunto, para evitar proyectos desarticulados.

Entrevista No. 3

Nombre del entrevistado: Ing. Dibrey Paola Quintero.

Cargo, experiencia y tipo de actor clave: Docente Ocasional UFPSO – Línea de aguas – Experta en gestión hídrica, con experiencia en consultoría de proyectos hidráulicos.

Fecha y medio: 08 de mayo de 2025 – Virtual.

Dimensión / Tema	Nº de Pregunta	Resumen de Respuesta
Conocimiento y percepción sobre aguas grises.	1	Las define como las provenientes de lavadoras, duchas y lavamanos, con contaminantes tipo detergentes, excluyendo aguas de cocina por aceites y materia grasa, y considera que puede haber trazas de orina accidental en duchas.
	2	No contiene experiencia directa en los sistemas de tratamiento, pero si tiene en diseño de alcantarillados y estructuras urbanas.
	3	En cuanto a los beneficios, considera el ahorro hídrico y reducción de costos a largo plazo. Sin embargo, respecto a los riesgos, la necesidad de separar redes, la inversión inicial alta y la gestión del almacenamiento por caudales limitados.
Viabilidad y percepción de la comunidad.	4	Desconoce en gran medida en la ciudadanía este tipo de situación, salvo en personas con formación académica específica.
	5	Considera viabilidad solo en edificios nuevos, en edificios construidos sería poco factible debido a la falta de planos récord y al alto costo de remodelación de redes internas.
	6	Recomienda como incentivo resaltar los usos potenciales (aparatos sanitarios, riego en zonas campestres) y

		educar sobre la calidad del agua tratada, ya que la percepción negativa es una gran barrera.
Aspectos normativos y administrativos.	7	No reconoce normativa específica en aguas grises, simplemente ha consultado experiencias en usos industriales como lavaderos de autos.
	8	Considera que la normativa ambiental está desactualizada, y que por lo tanto hace la sugerencia que la entidad de CORPONOR debe definir lineamientos claros para la reutilización, según calidad, tratamiento y destino final.
	9	Con respecto a las barreras, considera la de personal técnico especializado, costos de mantenimiento y operación de redes separadas, además de la carencia de cultura de mantenimiento en edificaciones y empresas prestadoras.
Consideraciones técnicas y económicas.	10	Recomienda iniciar con trampas de grasa, filtrado de sedimentos y restringir productos sumamente espumosos.
	11	En lo que se refiere a retos, evalúa la definición de tipo de edificio, compatibilidad con productos de limpieza, y compensar el aumento en consumo energético (por bombeo) ante la reducción de agua potable.
	12	De acuerdo con el requerimiento, exclama la inversión inicial elevada por redes y sistemas de tratamiento, necesitando diseños hidráulicos específicos y formación técnica local, empleando diversos factores sociales y de estrato que logren cooperar en la influencia de la viabilidad.
Certificaciones en sostenibilidad hídrica.	13	Desconoce certificaciones específicas, pero sí ha visto experiencias en Medellín.
	14	Estima que las certificaciones implican trámites administrativos desgastantes y personal técnico calificado, lo que lo hace poco viable para el municipio de Ocaña.
	15	Identifica como barreras los costos, trámites demorados, criterios subjetivos de evaluación y la escasa cultura institucional y que este mismo podría ser atractivo solo si se logra traducir en incentivos financieros para compradores.
Estrategias y propuestas.	16	Propone iniciar campañas de divulgación para culturizar sobre tipos de agua, beneficios y costos del reúso. Sugiere realizar una matriz de pros y contras para fundamentar las propuestas.
	17	Indica que las autoridades no tienen alguna participación ni tampoco lideran discusiones sobre sostenibilidad hídrica, percibiendo en forma la falta de actualización en funcionarios públicos y universidades.

	1 8	Conoce experiencias en Medellín y Canadá (separación de fluidos y reúso de residuos orgánicos y líquidos). Considera que en Ocaña se podrían aplicar en zonas con baja presión o intermitencia de agua, previo análisis socioeconómico.

Observaciones Adicionales: El entrevistado enfatiza que el éxito de la reutilización depende de la cultura ambiental, incentivos normativos y viabilidad económica, considera prioritario la intervención desde nuevas construcciones y en zonas con mayores restricciones hídricas.

Entrevista No. 4

Nombre del entrevistado: Ing. Emilio Fernando Bonza Jaimes.

Cargo, experiencia y tipo de actor clave: Director de Planeación Empresa de Servicios Públicos de Ocaña.

Fecha y medio: 14 de mayo de 2025 – Presencial.

Dimensión / Tema	**Nº de Pregunta**	**Resumen de Respuesta**
Conocimiento y percepción sobre aguas grises.	1	Son las aguas generadas por instalaciones hidráulicas no conectadas a sanitarios: duchas, lavaderos, patios.
	2	Ha trabajado solo con aguas residuales en su experiencia laboral; no ha trabajado con sistemas de tratamiento de aguas grises.
	3	Beneficios: ahorro para dueños y reducción de caudales que llegan a fuentes hídricas. Riesgo: percepción social negativa.
Viabilidad y percepción de la comunidad.	4	No hay conciencia colectiva, ejemplificado en el alto consumo durante carnavales. Recomienda campañas de sensibilización bien estructuradas.
	5	Cree que solo con incentivos económicos lograrían motivar a la comunidad, el argumento ambiental por sí solo no tendría suficiente impacto.

		6	Relacionado con percepción social. Opina que las campañas de concienciación son clave para motivar cambios.
Aspectos normativos y administrativos.		7	Su conocimiento se limita a normatividad tarifaria y de tratamiento de aguas residuales; desconoce regulaciones específicas para aguas grises.
		8	Considera insuficiente el marco regulatorio, aunque reconoce avances académicos en los últimos años. Los estudios impulsan desarrollo normativo.
		9	Falta de marco teórico y normativo; escasa documentación y estudios sobre aguas grises en Colombia.
Consideraciones técnicas y económicas.	0	1	Sugiere incluir trampa de grasas, pero enfatiza que la resistencia cultural es una barrera. Hay que evaluar beneficios económicos directos para el propietario.
	1	1	Señala una falta de conocimiento, incluso entre profesionales del sector.
	2	1	Costos de implementación, operación, mantenimiento y contratación de personal técnico calificado son barreras importantes.
Certificaciones en sostenibilidad hídrica.	3	1	No conoce certificaciones.
	4	1	Cree que solo serían atractivas si generan incentivos económicos directos; como reconocimiento, no tendrían suficiente peso.
	5	1	Considera que sin la presencia de beneficios tangibles no serían adoptadas ampliamente.
Estrategias y propuestas.	6	1	Propone iniciar con campañas sociales para sensibilizar a los actores clave, como primer paso antes de estructurar un proyecto formal de cualquier proyecto relacionado.
	7	1	Sugiere la de un marco jurídico nacional, regional y local. Explica que la ESPO se rige por el marco tarifario y que, si la CRA autoriza, las tarifas se ajustarían. Menciona que CORPONOR también debe involucrarse para permisos y control ambiental.
	8	1	No conoce modelos específicos aplicables a Ocaña, pero menciona los SUDs (Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible) como referencia general implementada en otras ciudades como Bogotá.

Observaciones Adicionales: El entrevistado resalta la importancia de un trabajo articulado entre instituciones y autoridades ambientales. Señalando como principales limitantes

la falta de cultura ambiental y normativa, junto con el costo operativo, pero considera que los beneficios económicos podrían ser un motor de cambio en la ciudad.

Entrevista No. 5

Nombre del entrevistado: Ing. Sayda Montes Molina.

Cargo, experiencia y tipo de actor clave: Especialista en gerencia de obras, vinculada al Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio en subdirección de proyectos en agua potable y saneamiento.

Fecha y medio: 29 de mayo de 2025 – Virtual.

Dimensión / Tema	Nº de Pregunta	Resumen de Respuesta
Conocimiento y percepción	1	Las aguas grises son las se producen en los lavaplatos, lavamanos y duchas, omitiendo sanitarios por contener materia fecal, y cocinas por grasas.
	2	No ha laborado directamente en proyectos de tratamiento de aguas grises, aunque sabe que su aprovechamiento puede darse para jardinería o lavado. En el Ministerio no se han ejecutado proyectos con este enfoque.
	3	Señala ventajas como el ahorro de agua y la reducción del daño ambiental. Desde su enfoque institucional, no identifica riesgos graves.
Viabilidad y percepción de la comunidad	4	Piensa que en general no hay sensibilización sobre la reutilización de aguas grises ni en Ocaña ni a nivel país, mencionando complicaciones observadas en el Caribe colombiano como vertimientos al aire libre.
	5	Cree que podría haber predisposición si se hace un proceso de educación, resaltando el beneficio ambiental y económico.
	6	Estímulos: beneficios económicos y sentido de aporte al desarrollo nacional. obstáculos: sistemas costosos y complejos que requieran mantenimiento constante.
Aspectos normativos y administrativos	7	No conoce legislación específica para aguas grises. Reconoce la existencia de tratados ambientales, pero no de una reglamentación directa.
	8	Considera que no hay normativa específica, pero tampoco limitaciones; se podrían implementar sistemas tomando como base el RAS 2000 como guía.

		9	Sugiere utilizar el RAS 2000 como marco básico implementable, especialmente para evitar problemas sanitarios. No identifica barreras normativas claras por la falta de regulación.
Consideraciones técnicas y económicas	0	1	No ha trabajado con estas tecnologías; en su experiencia, los avances en el Ministerio y el DNP se limitan a PTAR y algunos proyectos con energías sostenibles.
	1	1	El mayor desafió técnico es el desconocimiento, tanto en el ámbito técnico como social y económico.
	2	1	Identifica costos en implementación, diseño, separación de redes y también en administración del sistema.
Certificaciones en sostenibilidad	3	1	No está adaptada con certificaciones como CASA o EDGE.
	4	1	Cree que podrían ser un incentivo si reducen barreras y se adaptan al contexto local.
	5	1	Considera que obtener acreditaciones puede ser un proceso engorroso y costoso para constructores locales; sería más útil si se vinculan a beneficios económicos.
Estrategias y propuestas	6	1	El Estado debe liderar el fomento de estas propuestas; las empresas privadas actúan más por beneficios económicos que ambiental. La inversión en equipamiento es mayoritariamente pública, por lo tanto, las políticas públicas deben apoyar estas estrategias.
	7	1	El Estado es un actor principal. Sugiere generar estímulos para proyectos sostenibles, por ejemplo, en el sistema general de regalías, vinculando la modernización con mayor puntaje o cofinanciación de proyectos que propongan tecnologías de reutilización.
	8	1	No conoce esquemas específicos, pero cree que los hay, especialmente a nivel internacional en zonas con escasez de agua.

Observaciones Adicionales: La entrevistada tiene una perspectiva enfocada en políticas públicas e inversión a nivel nacional, así mismo, resalta la importancia del papel protagónico en estos procesos debe ser asumido por el Estado. Además; Muestra una posibilidad concreta de gestión con su propuesta de ampliar el indicador de innovación en regalías.

Entrevista No. 6

Nombre del entrevistado: Ing. Yeeny Lozano Lázaro.

Cargo, experiencia y tipo de actor clave: Ingeniera Ambiental, docente UFPSO. Experiencia en seguimiento ambiental a empresas de servicios públicos y asesora en manejo de residuos y formulación de PSMV. Actora académica y técnica.

Fecha y medio: 30 de mayo de 2025 – Virtual.

Temática	Pregunta	Resumen de la respuesta
Conocimiento y percepción	1	Son residuos líquidos producto de actividades domésticas de lavado y limpieza. Contienen fosfatos, bajas proporciones de compuestos orgánicos y de coliformes. Generalmente descargan al sistema de alcantarillado.
	2	Dice que en Colombia no hay un proceso de gestión para aguas grises porque no se separan de las aguas residuales. A veces incluso se mezclan con aguas lluvias. Conoce procesos tradicionales como coagulación y floculación.
	3	Beneficios: el uso de agua de segunda lavada con menor concentración de contaminantes. Riesgos: Si no hay tratamiento adecuadamente, puede generar afectaciones en piel y mucosas.
Viabilidad y percepción comunitaria	4	No existe sensibilización sobre el tema ni en Ocaña, ni en la región, ni en el país. La falta de cultura y desconocimiento general (separación, mantenimiento, almacenamiento, usos) son las principales barreras.
	5	Se está exigiendo más cumplimiento ambiental (por ejemplo, a través de los PAGA). Si bien el factor económico puede frenar la voluntad, una normatividad que exija podría impulsar su adopción.
	6	Sugiere regulación e incentivos ambientales como los sellos verdes o certificaciones como la ISO 14000 para que las constructoras aumenten su competitividad. Los contratistas suelen integrar lo ambiental si les representa beneficio en licitaciones.

Normatividad	7	Conoce el Decreto 3930 de 2010 (vertimientos) y la Resolución 0631 de 2015 (parámetros de vertimiento), además del RAS 2000.
	8	La regulación se enfoca más en límites contaminantes como DBO o sólidos suspendidos. Falta mayor exigencia en el aprovechamiento. Considera clave integrar los procesos constructivos y ambientales.
	9	No hay limitantes legales como tal, porque tampoco hay normatividad específica. Si el tratamiento demuestra no causar afectaciones, podría aplicarse sin inconvenientes, siempre que no se use para consumo humano.
Consideraciones técnicas y económicas	10	Recomienda tratamientos simples y económicos, que permitan remoción de sólidos. Los usos viables serían irrigación y descargas de inodoros.
	11	Es necesario un diseño higiénico que contemple separación, almacenamiento y tratamiento con tanques adecuados, adaptado al tipo de carga contaminante.
	12	Incluir diseño, parte constructiva y mantenimiento, crucial para garantizar funcionamiento del sistema.
Certificaciones en sostenibilidad	13, 14, 15	No conoce en profundidad las certificaciones, pero indica que serían útiles si implican beneficios económicos reales para constructores o residentes. Lo valioso no es el sello en sí, sino lo que aporta en términos prácticos.
Estrategias y propuestas	16	Sugiere concientización y capacitación a la comunidad y constructores. Propone que los ingenieros civiles validen técnicamente la viabilidad de los sistemas evaluando cuánto cambia la calidad del agua tras su tratamiento.
	17	Deben emitir regulaciones y hacer seguimiento a su cumplimiento. Las auditorías deben enfocarse en mejorar la calidad ambiental, lo cual permitiría evolucionar en la implementación de estos sistemas.
	18	Ha visto hospitales verdes que gestionan residuos y reutilizan el agua. A nivel internacional sabe que hay muchos ejemplos, pero se requeriría investigación detallada para identificar modelos aplicables.

Entrevista No. 7

Nombre del entrevistado: Ing. Harvey Pacheco Arias.

Cargo, experiencia y tipo de actor clave: Ingeniero ambiental del Instituto Departamental de Salud. Actor clave institucional, con enfoque técnico y en salud pública.

Fecha y medio: 30 de mayo de 2025 – Virtual.

Dimensión / Tema	Nº de Pregunta	Resumen de Respuesta
Conocimiento y percepción	1	Las aguas grises son aquellas que contienen detergentes y productos químicos no peligrosos, provenientes de duchas y lavadoras. No incluyen aguas de inodoros ni de cocina por su alto contenido en grasas y materia fecal.
	2	Ha trabajado en seguimiento a PTAR convencionales, pero no ha intervenido directamente en sistemas de tratamiento de aguas grises.
	3	Los beneficios son ambientales y de concienciación social. Los riesgos se relacionan con el desconocimiento general y la posible falta de aceptación social.
Viabilidad y percepción de la comunidad	4	No hay conciencia ambiental ni conocimiento en Ocaña, incluso entre profesionales del área.
	5	Las personas estarían dispuestas a implementarlos si se les presentan beneficios económicos concretos. La ausencia de escasez evidente de agua no genera motivación.
	6	Los incentivos deben ser económicos y claros sobre el retorno de inversión. La educación y concienciación son fundamentales debido al alto desconocimiento.
Aspectos normativos y administrativos	7	Conoce el Decreto 1256 de 2021 (uso de aguas residuales) y el Decreto 1594 de 1984, que podrían aplicarse a las aguas grises.
	8	No es suficiente. Se necesita fortalecimiento de la regulación desde las autoridades ambientales regionales como CORPONOR.
	9	Existe una brecha de comunicación entre los actores clave: CORPONOR, Alcaldía, ESPO, constructores, etc. Esto limita la articulación e implementación.
Consideraciones técnicas y económicas	10	Sugiere un sistema inicial con lechos filtrantes, posiblemente con plantas acuáticas, seguido de desodorización y control de vectores en el almacenamiento.

	1	1	El principal reto es el desconocimiento en instalación y mantenimiento. No hay modelos locales que sirvan de referencia, y la cultura es conservadora.
	2	1	Costos asociados a redes, estructura de tratamiento, almacenamiento y mantenimiento.
Certificaciones en sostenibilidad	3	1	No conoce certificaciones.
	4	1	Reconoce que si ofrecen beneficios económicos (ej. descuentos, licencias, préstamos) podrían motivar a constructores y usuarios.
	5	1	La barrera principal es el desconocimiento, ya que algunas veces ni el gremio de la construcción conoce estos criterios.
Estrategias y propuestas	6	1	Sugiere crear una mesa técnica con todas las entidades para articular esfuerzos, y luego iniciar procesos de sensibilización comunitaria.
	7	1	El papel de las autoridades locales es indispensable. Deben crear conciencia, promocionar estas iniciativas y articular políticas públicas para su implementación.
	8	1	No conoce modelos específicos, pero cree que hay muchos a nivel internacional, especialmente en zonas con escasez de agua.

Observaciones Adicionales: El entrevistado tiene una perspectiva ambiental institucional, enfatiza que el proyecto es más viable en edificios nuevos, donde se puedan diseñar redes independientes. Sugiere promover el uso de jabones y detergentes de baja carga contaminante en caso de implementación.

Entrevista No. 8

Nombre del entrevistado: Ing. Juan Carlos Isaza.

Cargo, experiencia y tipo de actor clave: Ingeniero civil constructor, diseñador y consultor con más de 17 años de experiencia en el sector privado de construcción en la región. Actor clave del sector profesional técnico y empresarial.

Fecha y medio: 06 de junio de 2025 – Presencial.

Dimensión / Tema	Nº de Pregunta	Resumen de Respuesta
Conocimiento y percepción	1	Aguas provenientes de lavamanos, lavaplatos, lavadoras y duchas, con componentes químicos (detergentes), no incluyen aguas de cocina ni sanitarios por grasas o materia fecal.
	2	No ha trabajado directamente en sistemas de tratamiento de aguas grises, pero conoce un caso en cabañas en Barichara donde se realizó un tratamiento para reutilización.
	3	Destaca beneficios ambientales. Económicamente no es rentable a corto plazo, estima recuperación de la inversión a 20 años. No ve riesgos si el sistema está bien diseñado.
Viabilidad y percepción de la comunidad	4	Existe conciencia ambiental, pero al analizar costos (almacenamiento, tratamiento, bombeo), la viabilidad económica desmotiva. Sugiere incluir aguas lluvias para equilibrar costos.
	5	La comunidad estaría dispuesta si se explican claramente los beneficios económicos y el retorno de inversión. Sugiere que las corporaciones autónomas otorguen incentivos.
	6	El mayor incentivo sería económico. Se deben mostrar casos de éxito como modelos de referencia, como el reciente caso en Bogotá.
Aspectos normativos y administrativos	7	Conoce el RAS 2000 y el Título J de la NSR-10, que podrían aplicarse indirectamente. No hay normativas específicas para aguas grises.
	8	No hay regulación específica. Las acciones actuales podrían surgir de incentivos o iniciativas aisladas.
	9	No existen barreras legales porque no hay regulación. Eso permite actuar con más libertad si se diseña adecuadamente.
Consideraciones técnicas y económicas	10	Sugiere integrar ahorro energético (paneles solares), uso de bombas eficientes, tanques enterrados accesibles y un diseño integral desde el inicio.
	11	Los retos están en el mantenimiento. Propone incluir trampas de grasa, filtros, sensores (pH, alcalinidad), y definir frecuencias de limpieza mediante ensayo y error.
	12	El sistema requiere diseño técnico completo: redes, tanques, filtros, bombas, sensores y capacitación al personal encargado del mantenimiento.

Certificaciones en sostenibilidad	13	Las certificaciones existen, pero son ambiguas y no tienen impacto visible en ciudadanos o constructores comunes; más significativas para instituciones.
	14	Serían útiles si traen beneficios concretos: permisos más económicos, reducción de costos en licencias. Propone una hipotética certificación "H2O gris".
	15	No hay barreras. Sugiere crear incentivos municipales como descuentos en impuestos si se cumplen criterios técnicos verificados.
Estrategias y propuestas	16	Propone implementación práctica con incentivos visibles. Reconocer oficialmente edificios eficientes mediante campañas o certificaciones locales verificables.
	17	Las autoridades no tienen participación. Deben empezar a reconocer la necesidad y liderar desde el ejemplo para motivar iniciativas.
	18	Existen múltiples modelos. El reto es desarrollar un diseño piloto en Ocaña. Sugiere capacitar a la empresa prestadora para que certifique diseños, ofrezca servicios de limpieza y acompañe técnicamente los procesos.

Observaciones Adicionales: El entrevistado insiste en que todo diseño debe partir desde el sistema sanitario interno. Sugiere incorporar aguas lluvias al sistema. Menciona que la empresa prestadora podría ser un actor clave si lidera un plan piloto y certifica procesos locales. La sensibilización desde entidades públicas sería un buen punto de partida para promover modelos replicables.

Entrevista No. 9

Nombre del entrevistado: Ing. Willinton Carrascal.

Cargo, experiencia y tipo de actor clave: Secretario de Planeación del Municipio de Ocaña. Actor clave institucional del sector público, con enfoque técnico-normativo.

Fecha y medio: 10 de junio de 2025 – Virtual.

Dimensión / Tema	Nº de Pregunta	Resumen de Respuesta
Conocimiento y percepción	1	Las aguas grises son aquel producto de actividades domésticas como lavado, duchas y aseo general, excluyendo sanitarios y lavaplatos por presencia de materia fecal y grasas.
	2	Ha trabajado en diseños y construcción de PTAR convencionales, no específicamente en tratamiento de aguas grises.
	3	Beneficios: sostenibilidad ambiental y ahorro en el consumo de agua potable. Riesgos: manejo adecuado en separación y usos, dado que no es apta para consumo humano.
Viabilidad y percepción de la comunidad	4	Hay conciencia sobre su importancia, pero falta dar el paso hacia su implementación real.
	5	Cree que sí habría disposición ciudadana, siempre que se socialice y exista un diseño tipo viable para la ciudad.
	6	El aspecto económico es un factor decisivo: costos altos desmotivan, pero beneficios económicos a largo plazo pueden incentivar.
Aspectos normativos y administrativos	7	No conoce normativas específicas para aguas grises, solo el RAS 2000 como regulación general del agua.
	8	No considera que la normatividad actual sea suficiente para fomentar su implementación. Hay un vacío en regulación específica.
	9	Las barreras legales son consecuencia del vacío normativo; no existe un sistema ni lineamientos técnicos definidos para implementar un modelo.
Consideraciones técnicas y económicas	10	Aunque no conoce tecnologías específicas, plantea como opción un sistema con filtración y bombeo a tanque aéreo para usos como descarga de inodoros o riego.
	11	El mayor reto es el desconocimiento general, tanto técnico como social.
	12	Requiere división de redes, diseño adecuado, implementación de equipos y mantenimiento continuo.
Certificaciones en sostenibilidad	13	No tiene conocimiento sobre certificaciones en construcción sostenible.
	14	Serían útiles si implican beneficios económicos o ventajas en procesos licitatorios.
	15	No conoce barreras específicas, pero insiste en el desconocimiento del tema.

Estrategias y propuestas	16	Sugiere como estrategia inicial la socialización de beneficios e implementación de un sistema tipo que pueda replicarse en la ciudad.
	17	Actualmente, el rol de las autoridades locales es nulo. Propone crear normatividad clara y un documento guía. Como Secretaría de Planeación, su papel sería revisar licencias y generar disposiciones municipales. Abre posibilidad de ofrecer beneficios económicos, previo estudio financiero con Hacienda.
	18	Considera que sí los hay, a pesar de que no conoce alguno puntualmente.

Observaciones Adicionales: Considera crucial definir un **sistema tipo de tratamiento** que sea viable técnica y económicamente. Desde la Secretaría de Planeación no se cuenta con recursos para estudios técnicos, pero puede participar en el proceso de revisión y regulación de licencias. Muestra apertura para explorar **incentivos tributarios municipales** si se formula una política local adecuada.

Entrevista No. 10

Nombre del entrevistado: Ing. Miguel Orejuela Duarte.

Cargo, experiencia y tipo de actor clave: Ingeniero consultor y constructor con experiencia en sostenibilidad y gestión de proyectos, vinculado al Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS), Coautor de Casa Colombia.

Fecha y medio: 16 de junio de 2025 – Virtual.

Dimensión / Tema	**Nº de Pregunta**	**Resumen de Respuesta**
Conocimiento y percepción	1	Aguas provenientes del lavado personal o superficies que no incluyen materia fecal ni grasas; excluye aguas de lavaplatos e inodoros. Contienen detergentes biodegradables y productos químicos ligeros.

	2	Ha participado en proyectos con reúso de aguas grises, como en cabañas de VERSA, donde se usan nanofiltración y aguas lluvias para sanitarios y riego.
	3	Beneficios: reducción de demanda de agua potable y menor contenido de cloro para riego. Riesgo: que el diseño e implementación se perciban como sobrecostos no contemplados en obras convencionales.
Viabilidad y percepción de la comunidad	4	La conciencia es baja a nivel nacional. Se debe presentar el sistema como parte de la economía circular y sostenibilidad.
	5	La disposición depende del análisis costo-beneficio. Es clave estimar ahorros y amortización para justificar el sistema.
	6	Incentivos tributarios pueden motivar: exenciones de IVA, descuentos en renta o beneficios en inversión ambiental. Sin incentivos, el mantenimiento podría desmotivar.
Aspectos normativos y administrativos	7	Cita la Ley 631 de 2014 sobre economía circular como relacionada.
	8	El marco normativo nacional es insuficiente. Solo Bogotá ha reglamentado con el Decreto 582 de 2023. Se requiere desarrollo regulatorio municipal y departamental.
	9	No hay barreras legales porque no hay regulación directa. Las barreras son gremiales: desconocimiento del sector constructor y falta de integración con el POT.
Consideraciones técnicas y económicas	10	Propone sistemas de nanofiltración con carbón activado u ósmosis inversa para Ocaña, por su eficiencia en espacios reducidos.
	11	El principal reto es la disciplina en el cumplimiento técnico y el mantenimiento. No identifica obstáculos técnicos relevantes.
	12	Costos: diseño, doble red de tuberías, adquisición de equipos, gastos energéticos y mantenimiento.
Certificaciones en sostenibilidad	13	Las conoce, incluso es coautor de Casa Colombia.
	14	En 2024 se eliminaron beneficios tributarios asociados a certificaciones. Hoy no ofrecen incentivos prácticos.
	15	No les ve utilidad significativa más allá del reconocimiento institucional.
Estrategias y propuestas	16	Recomienda iniciar con procesos educativos dirigidos a usuarios, constructores, diseñadores e instituciones.

	17	La promoción no existe actualmente. Las autoridades deben evaluar el riesgo hídrico futuro y desarrollar regulación. Cita como ejemplo ciudades como Bucaramanga, Cúcuta y Medellín.
	18	Existen múltiples modelos, pero faltan conexiones efectivas entre entidades que desarrollan los proyectos (como el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible) y los ejecutores.

Observaciones Adicionales: Enfatiza que el diseño debe incluir un análisis del ciclo de vida del sistema de tratamiento para justificar económicamente la inversión. Sugiere implementar incentivos fiscales específicos desde el estatuto tributario nacional para fomentar el uso de estas tecnologías. Resalta la necesidad de generar articulación entre diseñadores, empresas, instituciones y gremios, ya que el aislamiento actual limita la replicabilidad de modelos exitosos.

Entrevista No. 11

Nombre del entrevistado: Ing. Gustavo Castilla Vergel.

Cargo, experiencia y tipo de actor clave: Secretario de Vías, Infraestructura y Vivienda del municipio de Ocaña. Ingeniero civil con experiencia en obra pública. Actor institucional – funcionario público.

Fecha y medio: 18 de junio de 2025 – Virtual.

Dimensión / Tema	**Nº de Pregunta**	**Resumen de Respuesta**
Conocimiento y percepción	1	Identifica las aguas grises como aquellas provenientes de duchas, lavamanos y lavadoras, sin incluir aguas fecales ni de cocina.
	2	No ha participado en proyectos de tratamiento de aguas grises. Desde la administración municipal no se ha impulsado este tipo de estrategias.

		3	Considera que los beneficios se centran en la sostenibilidad ambiental y en la reducción del consumo de agua potable. Señala como posible riesgo la implementación sin conocimiento técnico.
Viabilidad y percepción de la comunidad		4	Cree que hace falta concienciación en la comunidad, por lo que sería necesario un proceso educativo y de sensibilización.
		5	Considera que con una correcta socialización y explicando los beneficios, podría haber disposición por parte de la comunidad para implementar estos sistemas.
		6	El factor económico es determinante. Si el sistema implica gastos excesivos o es complejo, desmotivaría su implementación. Un incentivo económico o reducción en trámites podría motivar.
Aspectos normativos y administrativos		7	No conoce normativas específicas sobre el tema. Solo hace referencia al RAS 2000 como norma general para agua potable y saneamiento básico.
		8	Cree que la normativa actual es insuficiente para fomentar estos sistemas. No hay lineamientos claros ni estrategias definidas desde lo nacional ni desde lo local.
		9	Reconoce un vacío legal. Sugiere que desde la Alcaldía podrían diseñarse incentivos o incluir lineamientos en la expedición de licencias para nuevos proyectos.
Consideraciones técnicas y económicas	0	1	Imagina que un sistema adecuado incluiría filtración, almacenamiento y bombeo para reutilización. Menciona que no hay experiencia local, pero podría adaptarse de modelos internacionales.
	1	1	El principal reto sería el desconocimiento técnico en la instalación y mantenimiento, tanto por parte de funcionarios como de la ciudadanía.
	2	1	Considera que los costos asociados a diseño, equipos y mantenimiento podrían ser barreras si no se articulan con una estrategia de incentivo o financiamiento
Certificaciones en sostenibilidad	3	1	No conoce certificaciones como EDGE o CASA Colombia.
	4, 15	1	Considera que si existieran beneficios reales para los constructores o habitantes (descuentos, agilidad en trámites), podrían representar un incentivo válido.
Estrategias y propuestas	6	1	Sugiere que la Alcaldía podría liderar procesos de concienciación y promoción de estas iniciativas. Cree que es viable si se construyen alianzas con otras entidades y se promueve desde lo público.
	7	1	Reconoce que hasta el momento no ha habido promoción ni lineamientos desde las autoridades locales. Sin

		embargo, cree que la Alcaldía puede asumir un rol más activo como acompañante, regulador e impulsor de pilotos
	18	Cree que deben existir experiencias a nivel internacional, especialmente en países con escasez hídrica. Sugiere investigar referencias aplicables y considera que el sector privado ha avanzado más en este tema que el sector público.

Observaciones Adicionales: Mencionó que desde la administración actual se está explorando la posibilidad de implementar nuevos proyectos ambientales y buscar referencias exitosas que puedan ser replicadas en Ocaña. Considera que las instituciones deben trabajar articuladamente para que los temas de sostenibilidad empiecen a reflejarse en el desarrollo urbano de la ciudad.

Entrevista No. 12

Nombre del entrevistado: Ing. Napoleón Gutiérrez de Piñeres.

Cargo, experiencia y tipo de actor clave: Ingeniero civil con experiencia en diseño, consultoría y construcción en entornos público-privados en Ocaña. Actor clave del sector técnico-constructivo privado.

Fecha y medio: 18 de junio de 2025 – Presencial.

Dimensión / Tema	**Nº de Pregunta**	**Resumen de Respuesta**
Conocimiento y percepción	1	Las aguas grises provienen de lavamanos, duchas y lavadoras. No deben incluir el agua del inodoro ni la del lavaplatos.
	2	Ha recomendado la implementación de sistemas de tratamiento en poblaciones pequeñas, especialmente rurales, aunque no específicamente en proyectos urbanos.
	3	Considera que el mayor riesgo radica en el desconocimiento y la poca cultura ciudadana sobre el agua. Muchos daños en los sistemas surgen por un uso inadecuado.

Viabilidad y percepción de la comunidad	4	Señala que no hay conciencia sobre el uso eficiente del agua. Ha visto una falta de cultura del agua incluso en el cuidado de las fuentes hídricas como el río que abastece a la ciudad.
	5	No observa una disposición social fuerte. La falta de educación y el uso ineficiente del recurso dificultan la adopción de tecnologías sostenibles
	6	El principal incentivo sería la educación masiva y la normatividad clara. Sin estos dos aspectos, la falta de interés ciudadano y de responsabilidad compartida entre las entidades seguirán siendo obstáculos
Aspectos normativos y administrativos	7	Menciona como referencias generales la NTC 1500 y el RAS 2000. Sin embargo, aclara que no conoce normativas específicas aplicables a aguas grises.
	8	No hay una normatividad clara. Se requiere una directriz nacional desde el Ministerio de Vivienda, con documentos unificados y aplicables. Actualmente, existen "documentos en el aire" que no se aterrizan a la realidad.
	9	La ausencia de guías prácticas, exigencias institucionales y responsabilidades definidas hacen que nadie asuma el costo de diseño, implementación y mantenimiento de estos sistemas. Tampoco hay revisión de diseños internos en licencias ni exigencias desde Planeación.
Consideraciones técnicas y económicas	10	Indica que debe haber múltiples tecnologías disponibles a nivel internacional e incluso nacional, pero no se han difundido en Ocaña. Sugiere que todo sistema debe contemplar un diseño hidráulico.
	11	El principal reto es la ausencia de plataformas de implementación, guías o procedimientos definidos. Recomienda que el gobierno nacional impulse estos proyectos para facilitar su ejecución local.
	12	No hay quien asuma los costos ni quién lidere técnicamente la implementación. Esta falta de responsables limita el desarrollo. Todo debería partir desde una estructura formal liderada por el Estado.
Certificaciones en sostenibilidad	13, 14, 15	Reconoce que existen certificaciones y que clasifican proyectos en rangos, pero el desconocimiento es generalizado, incluso para los profesionales del sector.
Estrategias y propuestas	16	Recalca la necesidad de que el Ministerio de Vivienda impulse una reglamentación clara y nacional que permita generar una plataforma de implementación, la solución debe estar ceñida en ser normativa, educativa y con una guía técnica concreta.

7	1	Visualiza que cada institución trabaja por su cuenta y que no existe un trabajo articulado entre instituciones. Lo cual no debería ser así, ya que se debe trabajar en conjunto para generar resultados positivos.
8	1	Menciona que deben existir experiencias exitosas a nivel internacional y nacional, pero no se han difundido ni se tiene conocimiento en el municipio de Ocaña.

Observaciones Adicionales: El entrevistado hizo énfasis en la necesidad de una guía técnica nacional aplicable localmente, y que no solo se produzcan documentos aislados. Plantea como eje principal de cambio la educación a la comunidad y a los profesionales, articulado con políticas claras e incentivos institucionales. Insistiendo en que la implementación técnica debe contemplar un diseño hidráulico riguroso desde el inicio de obra para evitar fallos.

Apéndice 6. Fichas Técnicas H

Ficha técnica – H1: Surfactants in water and wastewater (greywater): Environmental toxicity and treatment options. (Jena, Dutta, & Daverey, 2023)

Campo	Contenido
Tecnología	Humedales construidos (Además analizan combinaciones híbridas con celdas de combustible microbianas y métodos de coagulación natural).
Contexto del estudio	Revisión internacional de tecnologías aplicadas a aguas grises para eliminar surfactantes (contaminantes emergentes derivados de detergentes, jabones y productos de higiene). Este, contextualiza el aumento de la presencia tras la pandemia por COVID-19 y los efectos negativos que recaen sobre cuerpos de agua.
Objetivo del estudio	Evaluar la toxicidad de los surfactantes presentes en aguas grises y la sistematización de los métodos físicos, químicos y biológicos más relevantes para su eliminación, incluyendo tecnologías tradicionales y emergentes.
Diseño del sistema	Los humedales construidos emplean un medio filtrante (grava, arena) y vegetación macrófito que favorecen procesos aerobios y anaerobios para degradar surfactantes. Es así como dentro del mismo se menciona su uso individual o combinado con tecnologías como celdas de combustible microbianas (CCM) para potenciar la remoción. Además, el sistema permite adsorción, biodegradación microbiana y retención de partículas.
Eficiencia técnica	Se reporta eficiencia de >96% en remoción de SDS (lauril sulfato de sodio) cuando se usan humedales en sistemas híbridos con CCM. También se reporta alta eficacia frente a LAS y BC. Así mismo, las tecnologías naturales como humedales y coagulación-floculación con materiales naturales muestran resultados similares a membranas cerámicas y ultrafiltración, pero con menores costos.
Resultados destacados	Eliminación efectiva de surfactantes como SDS, LAS y BC. Sistemas híbridos superan el rendimiento de tecnologías individuales. Las tecnologías basadas en procesos naturales ofrecen beneficios ambientales adicionales.
Costo de implementación	No se indica costo puntual, pero se afirma que tecnologías como filtración por membrana son efectivas, pero poco rentables, mientras que humedales construidos y métodos naturales presentan menor costo de inversión y operación.
Mantenimiento y operación	Los humedales requieren bajo mantenimiento, limpieza ocasional del sustrato y control de vegetación. No requieren energía ni personal especializado. En sistemas híbridos con CCM, el mantenimiento es más complejo por el control técnico necesario.

Aceptación social	Aunque no se abordan estudios de percepción, se destaca que los humedales son ambientalmente amigables, visualmente integrables y culturalmente aceptables en entornos urbanos, deduciendo una probabilidad de buena aceptación por sus beneficios ecosistémicos y simplicidad.
Factores ambientales	Los surfactantes contribuyen a la eutrofización, reducen el oxígeno disuelto y son difíciles de biodegradar. Los humedales contribuyen a reducir contaminantes emergentes mediante mecanismos naturales. Contienen tecnologías con bajo impacto ambiental y buena integración paisajística.
Comentarios clave	Es documento es relevante para ser tenido en cuenta para la revisión técnica comparativa, ya que establece fundamentos para elegir tecnologías sostenibles, priorizando humedales por su equilibrio entre eficiencia, bajo costo y sostenibilidad. También puede usarse como base para justificar su aplicabilidad en contextos como el del municipio de Ocaña.

Ficha técnica – H2: A state-of-the-art review (2019–2023) on constructed wetlands for greywater treatment and reuse. (Santos, y otros, 2024)

Campo	Contenido
Tecnología	Humedales construidos (Constructed Wetlands - CW), incluyendo variantes horizontales, verticales y sistemas híbridos.
Contexto del estudio	Revisión sistemática internacional basada en 48 estudios seleccionados mediante metodología Methodi Ordinatio, con énfasis en tecnologías descentralizadas y sostenibles aplicadas al tratamiento de aguas grises. Es destacable las investigaciones en los países de India, China, Alemania, Brasil, México, Portugal, entre otros.
Objetivo del estudio	Sistematizar los avances recientes en CW para aguas grises, identificando los factores clave que afectan su desempeño (diseño, sustratos, plantas, operación), analizar materiales emergentes (biochar, residuos de construcción) y evaluar su potencial de mejora para reutilización.
Diseño del sistema	Se revisan múltiples configuraciones: entre ellas, se destaca, el flujo superficial, flujo subsuperficial horizontal, flujo subsuperficial vertical y los diferentes Sistemas híbridos. Las CW están compuestas de: medio filtrante (arena, grava, residuos como ladrillos y biochar), vegetación macrófita (Phragmites, Typha, Scirpus), zonas aeróbicas/anaeróbicas y biopelícula bacteriana, utilizadas mayormente para remover nutrientes, materia orgánica, metales pesados y contaminantes emergentes.
Eficiencia técnica	Los valores de remoción varían según diseño y sustrato. Ejemplos destacados: Híbrido VSSF + SF: $NH_4^+ \geq 90\%$. TN ≥ 86%. TP ≥ 91%. DBO ≥ 92%. DQO ≥ 85%. Color ≥ 87%. Con biochar: MO = 98%. NH_3 = 79%. P = 60.7% (vs. 45%, 54.9% y 65% sin biochar). Sustratos reciclados como ladrillo: TSS = 90.8%, COD = 71.9%, TN = 49.4%. Conchas de ostra: NH_4^+ = 43.27% en 30 días. La eficiencia mejora con condiciones adecuadas de TRH, tamaño de partícula (5-14 mm), pH, aireación y especies vegetales.
Resultados destacados	Biochar, ladrillo molido, residuos agrícolas e industriales que mejoran la eficiencia y permiten reutilización de materiales. Las plantas como Phragmites australis, Scirpus grossus, Typha latifolia favorecen la formación de biopelículas, oxigenación y absorción de nutrientes. Los sistemas híbridos (vertical + horizontal) muestran un mejor rendimiento que los individuales. Se reportan beneficios ecosistémicos y paisajísticos significativos.

Costo de implementación	Bajo costo relativo en comparación con tecnologías como nanofiltración o membranas. Uso de materiales locales o reciclados (ladrillo, biochar, yeso modificado, conchas marinas) el cual, conllevar a la disminución de costos. Mayor costo en sistemas híbridos por complejidad operativa.
Mantenimiento y operación	Bajo mantenimiento en sistemas simples (superficial/subsuperficial). Riesgo de obstrucción si no se controla el TRH o el tamaño de partícula. Necesaria limpieza periódica, monitoreo de biopelícula, y control del crecimiento vegetal. Posible necesidad de capa impermeable para evitar contaminación de aguas subterráneas.
Aceptación social	Se resalta su versatilidad, bajo impacto visual, aportes estéticos y capacidad para ser instalados en comunidades no conectadas a alcantarillado. Tiene una alta compatibilidad con el enfoque de economía circular y aprovechamiento de residuos.
Factores ambientales	Mejora de la calidad del agua para la reutilización. Reducción de eutrofización y contaminantes emergentes. Fomento de la biodiversidad (hábitat para aves, insectos, anfibios). Menor producción de lodos y emisiones de gases que tecnologías intensivas.
Comentarios clave	Documento altamente relevante para sustentar la aplicación de humedales construidos en el municipio de Ocaña. Proporciona datos sobre eficiencia, materiales adaptables, configuraciones posibles, y criterios técnicos de diseño, el mismo puede ser citado para justificar la elección de CW como tecnología prioritaria por su sostenibilidad, bajo costo y potencial de implementación local.

Ficha técnica – H3: Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reúso del agua. (Marín Muñiz, 2017)

Campo	Contenido
Tecnología	Humedales construidos (superficiales y subsuperficiales, flujo horizontal y vertical, algunos híbridos).
Título del documento	Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reúso del agua
Contexto del estudio	Revisión técnica y descriptiva de experiencias reales en México (zonas rurales) sobre la implementación de humedales construidos como solución ecológica y de bajo costo para tratar aguas residuales, producir plantas ornamentales y reutilizar el agua en usos agrícolas, domésticos y productivos.
Objetivo del estudio	Describir el estado actual de los humedales construidos (HC) en México, sus principales funciones y evaluar casos concretos en los que se aplican para tratar aguas residuales, reutilizar el agua y obtener beneficios económicos mediante la producción de plantas ornamentales.
Diseño del sistema	Los HC se dividen en: Flujo superficial (contacto directo agua-aire). Flujo subsuperficial horizontal (SS-FH) y vertical (SS-FV). Incluyen canales impermeabilizados, medio poroso (grava, arena, tezontle, zeolita), vegetación emergente o flotante. Los sistemas se usan como tratamiento primario, secundario o terciario según el caso. Algunos incorporan trampas de grasas y filtros previos.
Eficiencia técnica	Remoción de DQO: 65%–92% NT (nitrógeno total): 22%–85% PT (fósforo total): 5%–80% Coliformes: hasta >99% Los valores varían según especie vegetal usada, diseño del sistema y tiempo de retención. Se destaca que plantas ornamentales como Canna, Zantedeschia, Strelitzia y Heliconia también aportan eficiencia relevante.
Resultados destacados	Producción simultánea de plantas ornamentales y tratamiento de agua. Reutilización del agua tratada en riego, acuicultura, usos urbanos no potables, lavado de áreas porcinas e incluso recarga de acuíferos. Alta eficiencia de remoción con bajo costo operativo. Reportes de adopción comunitaria limitada si no hay acompañamiento técnico/institucional.
Costo de implementación	No se indican cifras específicas, pero se destaca que los HC tienen bajo costo comparativo frente a plantas convencionales. Uso viable en comunidades rurales por su simplicidad y adaptabilidad. En zonas urbanas se requiere mayor superficie (ej: 3,4 m^2/persona), lo cual puede ser una limitante.

Mantenimiento y operación	Fácil operación y mínimo mantenimiento. Necesidad de control periódico del sustrato, la vegetación y monitoreo de eficiencia. Posible obstrucción en sistemas subsuperficiales si no se diseña bien el tamaño de partícula. Falta de manuales de operación limita su sostenibilidad a largo plazo.
Aceptación social	Atractiva estética por uso de plantas ornamentales (ej. alcatraces, heliconias, caña de indias). Generación de ingresos por venta de plantas mejora la percepción y apropiación del sistema. Sin embargo, en este sistema, logra identificarse barreras por falta de capacitación, conocimiento técnico y continuidad institucional.
Factores ambientales	Disminución de descargas contaminantes en cuerpos de agua. Reducción del uso de agua potable en actividades no potables. Potencial para contribuir a la recarga de acuíferos y resiliencia hídrica local. Conservación de biodiversidad vegetal. Bajo consumo energético y nula emisión de gases si no hay saturación.
Comentarios clave	Documento clave para sustentar la implementación de HC en contextos similares a Ocaña, mostrando la viabilidad técnica y económica, así como el valor agregado por la producción ornamental. Se identifican elementos que deben fortalecerse institucionalmente para su sostenibilidad y escalabilidad y conllevando a que el contenido puede alimentar tanto la estrategia técnica como las acciones sociales e institucionales propuestas en el objetivo 3.

Ficha técnica – H4: Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales**.** (Sierra Pech & López Ocaña, 2013)

Campo	Contenido
Tecnología	Humedales construidos (superficial, subsuperficial horizontal y vertical, híbridos).
Título del documento	Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales
Contexto del estudio	Revisión técnica y descriptiva con estudios de caso en México (principalmente en Tabasco), que analiza configuraciones de humedales construidos para pequeñas comunidades, plantas urbanas y unidades experimentales, presentando diseños reales y parámetros de eficiencia a nivel piloto y operativo.
Objetivo del estudio	Analizar la funcionalidad de los humedales artificiales como alternativa de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales, describiendo tipos de sistemas, mecanismos de remoción, criterios de diseño, eficiencia técnica y beneficios ambientales asociados.
Diseño del sistema	Se abordan: Humedales de flujo superficial (HFS) Subsuperficial horizontal (HFSS) Subsuperficial vertical (VFSS) Sistemas híbridos (combinación de HFSS y VFSS) El sistema incluye medio granular (grava, arena), vegetación macrófita emergente (ej. Typha, Phragmites), lechos impermeabilizados, pendiente controlada (0.5–2%), y canales de entrada y salida. Los Diseños empíricos basados en flujo pistón y TRH calibrado por tipo de contaminante.
Eficiencia técnica	Se reportan eficiencias altas en múltiples estudios: DQO: 65–93% DBO: 68–91% SST: 77–90% Nitrógeno: 74–81% Fósforo: hasta 46% Coliformes: >99% Los resultados dependen del tipo de especie vegetal, tasa de aplicación hidráulica (TAH) y diseño del lecho. Estos sistemas híbridos permiten mayor eficiencia por la combinación de procesos aerobios y anaerobios.
Resultados destacados	La especie Typha latifolia mostró mayor densidad y rendimiento que Phragmites australis en sistemas VFSS. El material de soporte (mezcla de gravas y arcilla) influye directamente en la eficiencia. Estudios experimentales en Tabasco reportan altos niveles de remoción con diseños sencillos. Se documentan plantas en operación real como las de Macultepec, Huimanguillo y Jalpa de Méndez.

Costo de implementación	Sistemas de bajo presupuesto comparado con tecnologías convencionales. No requieren energía eléctrica ni equipos costosos. Diseñados para comunidades con recursos escasos y alta carga contaminante. Costos adicionales si hay fallas por pérdida de vegetación o mal dimensionamiento.
Mantenimiento y operación	Sencillo: requiere control periódico de vegetación, revisión de flujo y limpieza del sustrato. Los cambios bruscos de caudal o temperatura pueden afectar la estabilidad del sistema. Necesario evitar obstrucción del lecho y garantizar aislamiento del suelo subyacente para proteger aguas subterráneas.
Aceptación social	Alta aceptación esperada en comunidades rurales, pero limitada si no hay manuales de operación, seguimiento técnico o capacitación, identificando fallas en continuidad de proyectos cuando desaparece el acompañamiento institucional.
Factores ambientales	Restauración de hábitats. Recarga de acuíferos. Regulación microclimática. Retención de sedimentos. Mitigación de contaminantes en zonas tropicales. Oportunidad para valorización de residuos vegetales (biomasa).
Comentarios clave	Documento altamente práctico y útil para fundamentar la implementación de humedales en contextos rurales o periurbanos de Ocaña, el cual integra criterios de diseño, resultados medidos, funcionamiento real y estrategias de integración ecológica, que permite ser valorado para definir lineamientos técnicos mínimos de diseño y operación.

Ficha técnica – H5: Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales (Arias I. & Brix, 2013)

Campo	Contenido
Tecnología	Humedales construidos (subtipos: flujo superficial, subsuperficial horizontal, subsuperficial vertical e híbridos).
Título del documento	Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales
Contexto del estudio	Revisión técnico-conceptual de los fundamentos del tratamiento de aguas residuales mediante humedales construidos, con énfasis en los principios físicos, químicos y biológicos de remoción de contaminantes. Se incluyen referencias específicas a experiencias en Europa, Norteamérica y Colombia (casos en San Andrés y Chinchiná).
Objetivo del estudio	Explicar la evolución de los humedales construidos como tecnología reconocida para el tratamiento de aguas residuales, describir sus mecanismos de remoción, tipos, criterios de diseño y aplicación práctica en contextos reales.
Diseño del sistema	Se describen: HFS (flujo superficial) HFSS (flujo subsuperficial horizontal) HFV (flujo vertical) SH (sistemas híbridos) Componentes: lechos con material granular (arena, grava), plantas macrófitas (emergentes y flotantes), estructuras de entrada y salida, impermeabilización del fondo, sistemas de distribución superficial o subterránea. Este tipo de diseño depende del tipo de contaminante, condiciones climáticas y objetivos del sistema.
Eficiencia técnica	Se detallan mecanismos de remoción por contaminante: Materia orgánica: conversión biológica (aerobia, facultativa y anaerobia). Sólidos en suspensión: sedimentación y filtración. Nitrógeno: nitrificación y desnitrificación, asimilación por plantas, volatilización. Fósforo: precipitación, adsorción, asimilación biológica. Metales pesados: absorción por raíces, sedimentación. Patógenos: radiación UV, depredación, secreción de antibióticos vegetales. Se reconoce mayor capacidad de nitrificación en sistemas de flujo vertical.
Resultados destacados	Se validan humedales como tecnología eficiente, ecológica y de bajo costo. Se destacan beneficios adicionales como restauración paisajística, creación de hábitats y posibilidad de reutilización del agua tratada. Colombia presenta experiencias exitosas en San Andrés, Chinchiná y universidades, con eficiencias notables en DBO, SST, H_2 S.
Costo de implementación	Es Menor que tecnologías convencionales. No requieren energía eléctrica ni equipamiento sofisticado. Son adecuados para tratamiento descentralizado, rural o urbano de pequeña escala. Costos aumentan si no se seleccionan bien los medios filtrantes o si se presenta colmatación.

Mantenimiento y operación	Bajo requerimiento técnico. Necesario garantizar pendiente suave, evitar saturación excesiva, limpiar canales de entrada/salida y mantener vegetación activa. Riesgo de colmatación si no se seleccionan materiales filtrantes adecuados.
Aceptación social	Aunque no es abordado directamente, la estética y multifuncionalidad de los humedales permite su integración en espacios recreativos, lo cual favorece su aceptación. Requiriendo así, de apoyo institucional para asegurar su sostenibilidad a largo plazo.
Factores ambientales	Control de contaminación difusa. Mejora de la calidad ambiental. Reducción de cargas orgánicas y tóxicas. Aporte a la recarga de acuíferos y resiliencia ante crecientes. Posibilidad de integrarse como zonas verdes urbanas.
Comentarios clave	Este documento es primordial para la sustentación de los fundamentos técnico-conceptuales con base a la estrategia de implementación en el municipio de Ocaña. Su aplicación directa en Colombia y su respaldo científico lo convierten en un documento de referencia base. Además, permite incorporar criterios de diseño, rangos operativos, limitaciones y ventajas técnicas según cada tipo de flujo.

Apéndice 7. Ficha Técnica F

Ficha técnica – F1: Oportunidades para el uso de geotextiles para el tratamiento de aguas grises (León, 2021)

Campo	Contenido
Tecnología	Sistemas físico-biológicos simples (filtración por gravedad con geotextiles no tejidos)
Título del documento	Oportunidades para el uso de geotextiles para el tratamiento de aguas grises
Contexto del estudio	Investigación experimental en Guatemala sobre prototipos unifamiliares para el tratamiento de aguas grises domésticas utilizando diferentes composiciones de geotextiles como medio filtrante, bajo condiciones de flujo por gravedad, sin consumo energético.
Objetivo del estudio	Evaluar la eficiencia de remoción de tres filtros con diferentes capas de geotextiles, midiendo DBO_5 , DQO, SST, coliformes totales y fecales, y pH, como parte de una solución de bajo costo y fácil operación para viviendas sin sistemas de tratamiento.
Diseño del sistema	Sistema compuesto por tanque de captación (68 L), recipiente testigo y tres prototipos de filtro (A, B y C) de 19 L cada uno, conectados por una cruz distribuidora. Cada filtro contiene 4–8 capas de geotextiles con distintas permeabilidades (NT1800 a NT4000), colocadas sobre un fondo falso. Flujo gravitacional descendente.
Eficiencia técnica	- SST: 40% (filtro A), 34% (B), 28% (C) - DQO: 16% (A), 13% (B), 10% (C) - DBO_5 : 17% (A), 15% (B), 17% (C) - Coliformes: 0% (ningún filtro removió) - pH: estable entre 7.2 y 7.8 La eficiencia es baja, pero consistente entre filtros; suficiente para tratamiento primario o prefiltración antes de un proceso biológico o desinfección.
Resultados destacados	- El Filtro obtuvo los mejores resultados en todos los parámetros. - Ninguno de los sistemas logró la reducción de coliformes. - Sistema simple, replicable y con potencial para combinación con otras tecnologías (p. ej. cloración posterior o humedal).
Costo de implementación	Menor a 600 quetzales (aprox. USD $75). Apto para uso unifamiliar con materiales comerciales disponibles localmente.
Mantenimiento y operación	- Bajo mantenimiento. - Colmatación del geotextil observada después de filtrar 250 litros. - Requiere limpieza del material filtrante y posible instalación de trampa de grasas previa para evitar obstrucción temprana.
Aceptación social	Alta viabilidad por su simplicidad, costo reducido y posibilidad de autoconstrucción, requiriendo una sensibilización sobre necesidad de mantenimiento frecuente.

Factores ambientales	- Reducción parcial de carga orgánica. - No reduce patógenos, por lo que no se recomienda su uso directo para riego sin tratamiento complementario. - Ideal como etapa inicial en soluciones modulares de reúso.
Comentarios clave	El estudio realizado es útil para demostrar la viabilidad de tecnologías físicas de bajo costo en contextos residenciales. Aunque su eficiencia es limitada, puede ser combinada con otras etapas de tratamiento y el cual es recomendable para zonas sin acceso a tecnologías convencionales.

Ficha técnica – F2: Diseño de un sistema de tratamiento de aguas grises claras para reúso como agua de regadío. (Anaya Meléndez, Espinosa Descalzo, Loayza Pérez, Zamudio Castillo, & Yáñez López, 2022)

Campo	Contenido
Tecnología	Sistemas físico-biológicos simples (filtración lenta con arena/grava y etapa proyectada de biofiltración con pasto Vetiver)
Título del documento	Diseño de un sistema de tratamiento de aguas grises claras para reutilizar como agua de regadío
Contexto del estudio	Investigación experimental realizada en la Facultad de Química e Ingeniería Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Perú), donde se implementó un sistema físico de tratamiento de aguas grises claras provenientes de lavamanos, con fines de aprovechamiento en riego de jardines universitarios.
Objetivo del estudio	Diseñar un sistema de tratamiento eficiente para aguas grises claras mediante tecnologías simples (filtros físicos y biofiltración vegetal) que permita su reúso seguro y certificado en riego y otros usos no potables, cumpliendo con los ECA-Agua categoría 3 del Perú.
Diseño del sistema	- Primera fase: filtro lento de arena de sílice (malla <10 y >10), sedimentadores con canto rodado y sistema multietapa. Caudal de diseño: 50 L/h. - Segunda fase proyectada: biofiltro con Pasto Vetiver (hidropónico flotante), con raíces en contacto permanente con el agua, pensado como etapa de "pulido" final.
Eficiencia técnica	- DQO: se redujo de 163 mg/L a 18 mg/L (89% de remoción). - DBO_5 : 8 mg/L (dentro del estándar nacional). - Turbidez: 61.5 NTU (valor final no especificado). - Tensoactivos (SAAM): 0.02 mg/L (por debajo del límite de 0.2 mg/L para riego). - pH, Conductividad, Temperatura: dentro de rangos permisibles.
Resultados destacados	- El sistema propuesto cumple con los ECA nacionales para reúso en riego. - Posibilidad de integración con vegetación (pasto Vetiver) en modalidad flotante, para etapa secundaria. - Reducción significativa de carga orgánica sin la integración de energía ni productos químicos.
Costo de implementación	- No se presentan cifras exactas, pero se destaca el uso de materiales económicos (grava, arena, piedra de río, baldes plásticos). - Recomendado para instalaciones institucionales o urbanas con disponibilidad de espacio.
Mantenimiento y operación	- Bajo mantenimiento en filtros lentos (reposición del medio filtrante, control de colmatación). - La fase con Vetiver requiere monitoreo de raíces, turbidez y posibles pérdidas de carga, aunque es una propuesta en desarrollo. - Se plantea implementación modular con redundancia para facilitar sostenibilidad operativa.

Aceptación social	Alta posibilidad de aceptación institucional y comunitaria, debido al ahorro en consumo de agua potable, costos de operación bajos y beneficios ecológicos para los jardines. Puede replicarse en otras facultades de la misma universidad.
Factores ambientales	- Reducción del consumo de agua potable en el campus. - Aprovechamiento de aguas grises que de otro modo se mezclarían con aguas negras. - Posibilidad de compostaje de residuos sólidos separados (jabones, materia orgánica leve).
Comentarios clave	Este estudio es un excelente ejemplo de aplicación de sistemas físico-biológicos modulares ya que permite integrar el enfoque de reúso local, sostenibilidad operativa, economía de materiales y doble beneficio (tratamiento + riego), ideal como referencia para edificaciones institucionales o residenciales en contextos urbanos de baja presión regulatoria.

Ficha técnica – F3: Tratamiento de aguas grises para viviendas de interés social popular (Bautista Gómez, Rodríguez Reyes, Castañeda Robles, González Sandoval, & Escalante Lozano, 2023)

Campo	Contenido
Tecnología	Sistemas físico-biológicos simples (filtración en serie con medios pétreos y plantas ornamentales)
Título del documento	Tratamiento de aguas grises para viviendas de interés social popular
Contexto del estudio	Investigación exploratoria aplicada en viviendas de interés social del municipio de Mineral de la Reforma, Hidalgo (México), zona con alto estrés hídrico. Este sistema se diseñó para un hogar de 4 personas, con aguas grises recolectadas del lavamanos y fregadero.
Objetivo del estudio	Diseñar un sistema de tratamiento de aguas grises basado en filtros físicos y vegetación, que permita su reúso en limpieza y riego en contextos urbanos de baja disponibilidad hídrica.
Diseño del sistema	Sistema compuesto por tres filtros en serie con materiales seleccionados por su capacidad de remoción: zeolita (1º), carbón activado (2º) y arena sílica (3º). Cada filtro incorpora una planta específica: bambú, teléfono y cuna de Moisés, respectivamente. Incluye pretratamiento con grava y tezontle, y filtro de lirio persa. Caudal tratado: 3.5 L por ciclo.
Eficiencia técnica	- DQO: reducción de 344 a 77 mg O_2 /L → 77.6% de remoción - Color aparente: 281 a 174 Pt-Co - Color real: 109 a 31 Pt-Co - Conductividad: ligera reducción (979 a 930 μS/cm) - pH: aumento leve (7.54 a 7.87)
Resultados destacados	- El sistema mejora significativamente la calidad del agua para reúso no potable. - Puede complementarse con desinfección (una gota de hipoclorito por litro). - Cumple con parámetros aproximados a la NOM-003-SEMARNAT-1997 para reúso indirecto.
Costo de implementación	No se detallan cifras, pero se indica uso de materiales de fácil acceso: grava, arena, carbón activado, zeolita y vegetación común, el cual es utilizado para autoconstrucción.
Mantenimiento y operación	- Bajo mantenimiento. - Requiere limpieza periódica de los medios filtrantes y control del flujo. - Diseño compacto, adaptable a patios traseros o zonas verdes domésticas. - Se recomienda tanque de almacenamiento final y rebose al sistema de alcantarillado.
Aceptación social	Alta viabilidad en contextos de interés social, contiene diseño estético, con plantas ornamentales, mejorando su integración en el entorno doméstico y promoviendo la apropiación comunitaria.

Factores ambientales	- Disminución de la carga orgánica vertida al sistema sanitario. - Ahorro continuo de agua potable para usos no esenciales. - Integración con vegetación favorece microhábitats y valor ambiental urbano.
Comentarios clave	Este documento refuerza la viabilidad de soluciones físico-biológicas en viviendas de interés social, combinando criterios técnicos, funcionales y sociales, siendo ideal para replicabilidad urbana, brindando soporte al componente de diseño modular dentro de la estrategia general para el municipio de Ocaña.

Ficha técnica – F4: Sistemas de tratamiento de aguas grises domésticas como alternativa para la seguridad hídrica de Tijuana (Sotto, 2008)

Campo	Contenido
Tecnología	Sistemas físico-biológicos simples (diversos tipos en viviendas con ecotecnologías)
Título del documento	Sistemas de tratamiento de aguas grises domésticas como una alternativa para la seguridad hídrica de Tijuana
Contexto del estudio	Tesis de maestría desarrollada en Tijuana (México), que analiza la percepción de dos grupos poblacionales (clase alta y clase media) respecto a la adopción de sistemas domésticos de tratamiento de aguas grises, incluyendo entrevistas a autoridades y usuarios, permite evaluarse el impacto de variables sociales, económicas y legales en la disposición a implementar estas tecnologías.
Objetivo del estudio	Identificar los factores determinantes en la percepción sobre la adopción de sistemas domésticos de tratamiento de aguas grises y proponer un plan básico de implementación ajustado a las condiciones reales de aceptación y sostenibilidad.
Diseño del sistema	No se detalla un diseño técnico específico. Sin embargo, se analizan casos reales de viviendas con ecotecnologías que incluyen separación de aguas, tratamiento in situ con filtros, almacenamiento y reúso en riego. Se hace referencia al sistema STAG (sistema de tratamiento autónomo gravitacional) con filtros de arena y separadores de aguas, sin automatización.
Eficiencia técnica	El análisis se enfoca en la percepción, aceptación y viabilidad operativa sin reportar datos numéricos de remoción. este mismo menciona que los sistemas conocidos permiten el aprovechamiento seguro para riego, pero que el mismo requiere de mantenimiento y acompañamiento institucional.
Resultados destacados	- El conocimiento del tema es mayor en grupos con mayor nivel educativo. - La disposición a pagar y aceptar el sistema depende de factores económicos, espacio disponible y presión normativa. - Se propone un plan básico de implementación adaptado al contexto de vivienda, ingresos y normatividad local. - Autoridades como la CESPT reconocen el potencial de estas tecnologías, pero no tienen líneas concretas de fomento.
Costo de implementación	Varía según sistema y tipo de vivienda. No se especifican cifras, pero se infiere que el costo es un factor limitante en viviendas de interés social. En Rancho Tecate (viviendas de alto nivel adquisitivo), se exige su uso por norma interna.
Mantenimiento y operación	Se identifica como una de las principales barreras, lo que es La falta de capacitación y seguimiento técnico que puede conducir al abandono del sistema con relación a viviendas de clase media, donde se requiere mayor acompañamiento institucional.
Aceptación social	Alta en contextos donde existe presión ambiental o social, o donde su uso es obligatorio por normas internas de fraccionamientos. Esta, Baja cuando no existe reglamentación o se percibe como una carga adicional no comprendida.

Factores ambientales	- Se relaciona la implementación de estos sistemas con una mayor percepción de seguridad hídrica. - Su uso puede disminuir la presión sobre el sistema de abastecimiento en ciudades sin fuentes propias como Tijuana.
Comentarios clave	Aunque no aporta datos técnicos relevantes, el documento es fundante para sustentar la aceptación social y viabilidad institucional de los sistemas físico-biológicos en contextos urbanos. En este sentido, es útil para enriquecer el análisis multicriterio del paso 3 y para formular recomendaciones diferenciadas por tipo de vivienda.

Ficha técnica – F5: Tratamiento de aguas grises domésticas mediante un sistema de biofiltros.

(Lucas Abad, 2017)

Campo	Contenido
Tecnología	Sistemas físico-biológicos simples (pretratamiento, sedimentación y biofiltros con o sin microorganismos)
Título del documento	Tratamiento de aguas grises domésticas mediante un sistema de biofiltros en la urbanización de José Carlos Mariátegui
Contexto del estudio	Tesis de Ingeniería Ambiental en Lima (Perú), aplicada en vivienda unifamiliar en el distrito de San Juan de Lurigancho, donde se diseñó, construyó y evaluó un sistema de tratamiento de aguas grises domésticas usando biofiltros. Este diseño incluyó dos variantes: con y sin incorporación de microorganismos eficientes.
Objetivo del estudio	Evaluar la eficiencia del sistema de biofiltros para el tratamiento de aguas grises domésticas, considerando tres etapas: pretratamiento (rejillas), tratamiento primario (decantación) y tratamiento secundario (biofiltros).
Diseño del sistema	- Pretratamiento: rejillas de malla 3x3 mm y 1x1 mm para sólidos gruesos. - Tratamiento primario: tanque sedimentador para sólidos suspendidos y grasas. - Tratamiento secundario: dos biofiltros (uno con mezcla de sustrato + microorganismos eficientes, otro sin ellos). - Capacidad: escala doméstica. Evaluado en 3 muestreos consecutivos.
Eficiencia técnica	Valores promedio (biofiltro con microorganismos): - SST: de 259.7 a 25.0 mg/L → 90.4% - Aceites y grasas: 21.3 a 0.6 mg/L → 97.2% - Turbidez: 211 a 13.7 NTU → 93.5% - DBO: 96.6 a 13.6 mg/L → 85.9% - DQO: 239 a 26.6 mg/L → 88.8% - Fosfatos: 6.3 a 2.4 mg/L → 61.9% - Nitratos: 9.7 a 2.2 mg/L → 77.3% - pH: 7.5 estable El sistema sin microorganismos tuvo eficiencias ligeramente menores.
Resultados destacados	- Alta eficiencia del sistema completo. - Incorporación de microorganismos mejora los resultados. - Agua tratada cumple con estándares peruanos para aprovechamiento en categoría 3 (riego). - Diseño modular, replicable y de bajo costo.
Costo de implementación	No se detallan costos exactos, pero el sistema logro construirse con materiales locales: tanques plásticos, sustrato filtrante, mallas y reactores pequeños, tiene bajo costo comparado con PTAR convencionales.
Mantenimiento y operación	- Bajo mantenimiento. - Requiere limpieza periódica de rejillas, remoción de sedimentos y control del biofiltro.

	- Los microorganismos deben mantenerse en condiciones adecuadas para evitar pérdida de eficiencia.
Aceptación social	Alta viabilidad en contextos urbanos con baja infraestructura sanitaria. El sistema es discreto, sin olores y con integración posible en patios de vivienda.
Factores ambientales	- Disminución significativa de la carga contaminante. - Posibilidad de reutilización para riego y conservación ambiental urbana. - Sistema autosuficiente sin consumo eléctrico ni reactivos químicos.
Comentarios clave	Documento integral y útil para poder demostrar la eficacia de sistemas modulares físico-biológicos en viviendas reales. Este mismo, aporta datos cuantitativos y análisis comparativos con estándares regulatorios y refuerza el potencial de estos sistemas como solución aplicable en barrios urbanos del municipio de Ocaña.

Apéndice 8. Ficha técnica M

Ficha técnica – M1: Biological stability of reclaimed greywater reused for flushing household toilets. (Ren, Zhang, & Miao, 2023)

Campo	Contenido
Tecnología	Biorreactor de membrana (MBR) aplicado al tratamiento de aguas grises para reúso en descarga de inodoros
Título del documento	Biological stability of reclaimed greywater reused for flushing household toilets
Contexto del estudio	Investigación experimental desarrollada en China, en la que se compararon distintas fuentes de agua reciclada tratada (GMBR, GBAF, GBAF+UF, MWR) para evaluar su estabilidad biológica y desempeño frente a la regeneración microbiana en sistemas de descarga sanitaria.
Objetivo del estudio	Evaluar la estabilidad biológica del agua reciclada tratada con distintas tecnologías, en especial MBR aplicado a aguas grises (GMBR), en términos de desinfección, control del biofilm y remoción de contaminantes, con enfoque en su uso para descarga de inodoros domésticos.
Diseño del sistema	Simulación de uso diario de 1 litro de agua reciclada por 30 días, en contenedores de 10 L para cada tipo de efluente. Se aplicaron 6 mg/L de NaClO como desinfectante, y se midió la concentración de cloro residual, proliferación bacteriana, y estabilidad de indicadores de calidad. El sistema MBR usado generó agua gris purificada (GMBR) que fue evaluada frente a otras tres variantes.
Eficiencia técnica	- DBO_5 , NH_3 -N, turbidez y color del GMBR cumplieron estándares de reutilización. - Sin presencia bacteriana en GMBR tras 1 mes con 6 mg/L de NaClO, frente a 20 días en BAF y 10 en MWR. - El cloro residual en GMBR se mantuvo >1.0 mg/L tras 18 días; en MWR cayó a 0.1 mg/L. - Se identificó resistencia bacteriana en biofilms cuando el cloro residual bajaba de 0.9 mg/L.
Resultados destacados	- El GMBR mostró la mejor estabilidad biológica entre los sistemas comparados. - Menor consumo de desinfectante por el bajo contenido de materia orgánica remanente. - Se destaca la importancia del control de nutrientes (C, N, P) para evitar proliferación bacteriana.
Costo de implementación	No se reportan cifras específicas, pero se reconoce que MBR tiene mayor costo relativo que BAF o métodos físicos. Es justificable por su mayor estabilidad del efluente.
Mantenimiento y operación	- Necesidad de mantener limpieza de membranas. - Control de cloro residual en punto de uso (>0.9 mg/L recomendado). - Requiere manejo técnico más especializado que sistemas pasivos.

Aceptación social	No se aborda de forma directa, pero el uso para descarga sanitaria implica alta viabilidad si se logra garantizar la calidad y se reducen olores o riesgos microbiológicos.
Factores ambientales	- Ahorro de agua potable estimado entre 26% y 35% mediante el reúso en inodoros. - Reducción de presión sobre fuentes urbanas. - Contribuye a prácticas de economía circular del agua.
Comentarios clave	Documento crucial para sustentar el uso de MBR en edificios con alta demanda sanitaria. El enfoque que realiza en estabilidad biológica y control del biofilm permite justificar su uso en contextos donde el reúso en inodoros o usos no potables es viable. Este, puede ser insumo determinante que permita la formulación de criterios de calidad y operación segura.

Ficha técnica – M2: Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación acoplada a un MBR. (Mendes Predolin, 2019)

Campo	Contenido
Tecnología	Biorreactores de membrana (MBR) y sistema EMBR (MBR + Electrocoagulación)
Título del documento	Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación acoplada a un MBR para minimizar el ensuciamiento de la membrana y obtener efluentes de alta calidad
Contexto del estudio	Tesis doctoral desarrollada en España (Universidad de Alicante), donde se diseñó y operó una planta piloto en dos EDAR reales (Santomera y Monte Orgegia), con el objetivo de comparar el desempeño de un sistema EMBR frente a un MBR convencional, analizando múltiples variables operacionales, de calidad de efluente y eficiencia en la eliminación de contaminantes emergentes.
Objetivo del estudio	Verificar si el acoplamiento de electrocoagulación a un sistema MBR mejora la calidad del efluente y reduce el ensuciamiento de la membrana, a comparación con un MBR convencional.
Diseño del sistema	Planta piloto con reactor biológico, módulo de membrana sumergida y sistema de electrocoagulación integrado (DC de 5 A/m²). Contiene dos etapas experimentales: 1) EDAR Santomera: agua residual urbana con carga industrial. 2) EDAR Monte Orgegia: agua doméstica sin carga industrial. Se monitoreó DQO, fósforo, nitrógeno, 22 microcontaminantes, y propiedades del lodo.
Eficiencia técnica	- DQO: Reducción significativa, mejora respecto al MBR convencional. - Nutrientes: P total y N total mejor removidos con EMBR. - Microcontaminantes: Alta remoción de carbamazepina, claritromicina, diclofenaco, etc. - Fangos: IVF, viscosidad, EPS y floculación mejoradas. - Ensuciamiento: Reducción de presión transmembrana (PTM) hasta 73%. - Consumo energético: 0.16 kWh/m³ (muy bajo).
Resultados destacados	- EMBR ofrece mejor calidad de efluente y mayor vida útil de membranas. - Se logra remoción eficiente de contaminantes recalcitrantes sin uso de productos químicos externos. - Comprobada estabilidad del sistema frente a variaciones estacionales.
Costo de implementación	No se dan cifras exactas, pero el documento destaca que, aunque el EMBR tiene un mayor costo inicial por componentes adicionales, su bajo consumo energético y menor frecuencia de mantenimiento compensan el gasto a largo plazo.
Mantenimiento y operación	- Requiere limpieza periódica de membranas, pero con menor frecuencia. - Sistema robusto frente a aguas residuales variables. - Operación más compleja que MBR convencional: monitoreo de corriente, electrodos y parámetros del lodo.
Aceptación social	No se evalúa directamente, pero se resalta el potencial del EMBR para ser replicado en sistemas urbanos descentralizados donde se requiera alta calidad del efluente y mínima intervención operativa frecuente.

Factores ambientales	- Alta eficiencia en remoción de microcontaminantes y nutrientes. - Baja producción de lodos secundarios. - Potencial para reutilización segura en entornos urbanos.
Comentarios clave	Este estudio proporciona una base técnica y experimental sólida para justificar el uso de MBR y EMBR en el tratamiento de aguas grises en edificaciones. Su enfoque integral sobre eficiencia, mantenimiento y microcontaminantes hace que sea relevante para el diseño de estrategias sostenibles.

Ficha técnica – M3: Diseño, construcción y modelación de un reactor biológico MBR a escala piloto. (Carrera Rodríguez, 2021)

Campo	Contenido
Tecnología	Biorreactor de membrana (MBR) con membranas sumergidas tipo placa plana (flat sheet)
Título del documento	Diseño, construcción y modelación de un reactor biológico de membranas (MBR) a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales de una industria farmacéutica
Contexto del estudio	Tesis de pregrado desarrollada en Bogotá (Colombia), con diseño, modelación y montaje de un MBR a escala piloto en condiciones reales, destinado a tratar aguas residuales industriales con alta carga orgánica y presencia de compuestos emergentes. Así mismo, se incluye el análisis de diseño hidráulico, biológico y selección de equipos.
Objetivo del estudio	Diseñar y construir un reactor MBR a escala piloto basado en modelación bioquímica, orientado al tratamiento eficiente de efluentes contaminados generados por una industria farmacéutica.
Diseño del sistema	- Volumen total: 560 L - Cámaras: anóxica, aireación (370 L), módulo de membranas sumergidas y cámara de efluente tratado - Membranas: tipo placa plana (FS) Kubota, 6.2 m² de área efectiva, flujo de permeado de 18.1 LMH, PTM: 0.045 bar - Control: sistema lógico con tablero eléctrico automatizado - Operación: ciclos de filtrado y retro lavado físico con aire y agua, limpieza química con hipoclorito/ácido cítrico ocasional
Eficiencia técnica esperada (con base en caracterización del afluente)	- DBO: entrada 569 mg/L - DQO: 1057 mg/L - SST: 246 mg/L - GYA: 59 mg/L - P total: 17 mg/L - NH_4 : 45 mg/L - Sistema diseñado para remociones ≥85% de DBO y ≥88% de DQO, basado en modelación Metcalf & Eddy
Resultados destacados	- Diseño funcional y compactado. - Incluye modelación de nitrificación-desnitrificación y remoción carbonácea. - Alta concentración de biomasa activa y bajo volumen de lodo. - Simulación y cálculos de presión transmembrana, aireación y limpieza. - Diseño adaptable a caudales bajos (1.8 m³/día), como en edificios residenciales.
Costo de implementación	No se especifican valores económicos, pero se detalla uso de membranas Kubota, bomba centrífuga de permeado, difusores, tanque de acero y

	sistema eléctrico de control. Se realiza bajo consumo de energía por unidad tratada.
Mantenimiento y operación	- Requiere monitoreo de presión, retro lavado, aireación y limpieza química periódica. - Diseño contempla acceso a paneles y tanque para limpieza y mantenimiento fácil. - Operación técnica, pero automatizable.
Aceptación social	Aunque se trata de aguas industriales, el diseño es compactible y adaptable a contextos urbanos. También, puede aplicarse en edificios que requieran la reutilización de agua con alta calidad.
Factores ambientales	- Reducción de carga contaminante (orgánica, nitrogenada, fosfórica). - Minimiza generación de lodos secundarios. - Potencial de reúso del efluente en usos no potables tras desinfección.
Comentarios clave	Es un documento integro en toda su cabalidad debido a la vista técnica e ingeniería de detalle del mismo. A pesar de que está enfocado en industria farmacéutica, es útil para demostrar el proceso de diseño, modelación y escalabilidad de un sistema MBR. Además, es recomendable su referencia como respaldo metodológico en el diseño conceptual de sistemas aplicables en edificios urbanos.

Ficha técnica – M4: Puesta en marcha de un sistema híbrido UASB + MBR. (Simón Andreu, y otros, 2024)

Campo	Contenido
Tecnología	Sistema híbrido: Reactor anaerobio UASB + Biorreactor de membrana (MBR)
Título del documento	Puesta en marcha de un sistema híbrido UASB + MBR para el tratamiento de las aguas residuales
Contexto del estudio	Proyecto experimental desarrollado en la EDAR de Santomera (Murcia, España), el cual diseñó y operó una planta piloto que logra combinar un reactor anaerobio UASB con un MBR y que este mismo lleve a optimizar la eficiencia de remoción y producción de biogás, así, como a evaluar ensuciamiento de membranas y composición microbiológica.
Objetivo del estudio	Evaluar la viabilidad técnico-operativa de un sistema UASB+MBR en términos de remoción de carga orgánica, nutrientes, producción de biogás, ensuciamiento de membranas y evolución microbiológica del sistema.
Diseño del sistema	- UASB de 30 L con lodo granular - MBR con dos tanques: aerobio (relleno Kaldness) y de membrana (0.2 m² de microfiltración, 0.4 µm de poro) - Aireación continua y panel de control automático - Caudal de operación: 5 a 10 L/m/h, TRH: 15–30 h UASB y 10–20 h MBR - Evaluación durante 2 meses
Eficiencia técnica	- DQO: eliminación global media 95% (de 536 a 25 mg/L) - NT (N total): eliminación global 45%, conversión de NH_4^+ en NO_3^- del 98% - PT (fósforo total): eliminación entre 45% y 78%, permeado final 3.9 ± 1.2 mg/L - SS: eliminación total, <1 mg/L en permeado - Turbidez: promedio 0.66 NTU
Resultados destacados	- Solo una limpieza química de membranas en 2 meses. - Estabilidad de la presión transmembrana (PTM) desde el día 20. - Producción de biogás de 0.7 L/día (71% metano), resultado bastante favorable considerando la baja carga de la misma. - Evolución favorable del fango aerobio: desaparición de bacterias filamentosas y formación de flóculos típicos de sistemas MBR.
Costo de implementación	No se indican cifras, pero se destaca el menor requerimiento energético global gracias al pretratamiento anaerobio, y la eficiencia energética del sistema híbrido como ventaja frente a sistemas aeróbicos tradicionales.
Mantenimiento y operación	- Mantenimiento eficiente: limpieza física (aireación y retrolavado), el cual funcionó adecuadamente. - Monitoreo de PTM, TRH y composición de lodos. - Se sugiere como sistema sólido y de menor intervención frente a MBR convencional.
Aceptación social	No es abordada directamente, sin embargo, la generación de energía (biogás) y la alta calidad del permeado cooperan para la aplicación en entornos institucionales o proyectos que contengan un enfoque sostenible.

Factores ambientales	- Alta remoción de carga orgánica y nutrientes. - Producción de biogás como fuente energética renovable. - Reducción del volumen de lodo y mejora en la calidad del efluente tratado.
Comentarios clave	Este documento es primordial para la sustentación de métodos estratégicos híbridos que integren MBR con pretratamiento anaerobio. Además, su enfoque práctico, la cuantificación de resultados y condiciones controladas hacen que sea una excelente referencia que permita la implementación de soluciones de aprovechamiento en entornos urbanos e institucionales.

Ficha técnica – M5: Estudio de un sistema híbrido UASB + MBR para el tratamiento de aguas residuales urbanas. (Mendes Predolin, Estudio de un sistema híbrido UASB+MBR para el tratamiento de aguas residuales urbanas, 2015)

Campo	**Contenido**
Tecnología	Sistema híbrido: Reactor anaerobio UASB + Biorreactor de membrana externo (MBR)
Título del documento	Estudio de un sistema híbrido UASB + MBR para el tratamiento de aguas residuales urbanas
Contexto del estudio	Tesis de maestría desarrollada en la Universidad de Alicante (España), que evaluó la operación continua de un sistema híbrido compuesto por un UASB seguido de un MBR externo, utilizando aguas residuales sintéticas para simular condiciones urbanas reales. Se lograron inspeccionar diversos aspectos hidráulicos, energéticos, microbiológicos y de calidad de efluente.
Objetivo del estudio	Analizar el rendimiento de un sistema UASB + MBR en cuanto a remoción de contaminantes, eficiencia energética, generación de biogás, estabilidad operativa y ensuciamiento de membranas.
Diseño del sistema	- Reactor UASB de flujo ascendente (volumen: 24 L) - Biorreactor aerobio acoplado a membrana externa (ultrafiltración de 0.03 μm, 0.2 m^2) - Tanque de aireación con difusores y control automático - Operación continua durante 45 días, con simulación de caudales domésticos urbanos.
Eficiencia técnica	- DQO: eliminación entre 82–98% - N y P: eliminación media del 34% - Contaminantes emergentes: remoción entre 80 y 99.9% (acetaminofén, carbamazepina, sulfametoxazol, entre otros) - Producción de biogás: 1.03 L/día con 72% de CH_4 - Presión transmembrana (PTM): estable, menor necesidad de limpieza - Cumplimiento de estándares de vertido y reutilización.
Resultados destacados	- Alta eficiencia en carga orgánica y compuestos recalcitrantes. - Producción energética (biogás) y reducción de lodos. - Sistema automatizado con autolimpieza de membranas. - Alta estabilidad en calidad de efluente y parámetros operativos.
Costo de implementación	No se presentan cifras exactas, pero es relevante destacar el ahorro energético por el uso de pretratamiento anaerobio y la eficiencia del sistema. El diseño es replicable en entornos institucionales o edificios sostenibles.
Mantenimiento y operación	- Requiere control de presión, flujo, ciclos de limpieza automática y aireación. - Mantenimiento moderado con operación técnica accesible.
Aceptación social	No es abordada directamente, pero se considera adecuado para implementaciones urbanas sostenibles con enfoque en aprovechar de nuevo de forma segura.

Factores ambientales	- Disminución de vertimientos. - Ahorro energético. - Producción de biogás como co-beneficio ambiental. - Posibilidad de reúso para riego o descarga sanitaria.
Comentarios clave	Este documento es muy relevante ya que permite la demostración en rekacion a la eficacia operativa y ambiental de un sistema MBR híbrido y automatizado, logrando con ello, reforzar la posibilidad de escalar soluciones MBR en entornos urbanos con requerimientos sostenibles de tratamiento y de reutilización.

Apéndice 9. Ficha técnica N

Ficha técnica – N1: Uso de la tecnología de nanofiltración mediante membranas para el tratamiento de aguas residuales industriales. (Deratani, Palmeri, Moliner Salvador, & Sánchez, 2012)

Campo	Contenido
Tecnología	Nanofiltración con membranas poliméricas (NF-90 y NF-200)
Título del documento	Uso de la tecnología de nanofiltración a través de membranas para el tratamiento de las aguas residuales de la industria cerámica
Contexto del estudio	Proyecto aplicado en Castellón (España), orientado a evaluar la viabilidad de la nanofiltración como tratamiento avanzado de aguas residuales industriales (industria cerámica), con el fin de permitir su reúso o vertido seguro. Se aplicó una doble estrategia: la simulación con el software NanoFlux y la validación experimental en laboratorio.
Objetivo del estudio	Analizar la capacidad de remoción de materia orgánica (DQO) y sales disueltas (iones monovalentes y divalentes) mediante nanofiltración, y comparar el rendimiento de dos membranas NF comerciales bajo condiciones reales.
Diseño del sistema	- Sistema piloto con membrana plana en célula Sepa CF II (área: 133 cm^2). - Presiones de operación: 4–5 bar; temperatura: 25 °C. - Membranas evaluadas: NF-90 y NF-200 (marca DOW FILMTEC). - Validación con dos muestras de aguas residuales reales post-tratamiento fisicoquímico.
Eficiencia técnica	- DQO: reducción de 1156 a 44 mg/L (96%) - Conductividad: reducción del 93–95% - SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} : >96–99% - Na^+ , K^+ , Cl^- : ~90–96% - Boro: 22–34% (no objetivo del estudio) - Mejores resultados con membrana NF-90, incluso a presiones bajas (5 bar)
Resultados destacados	- Confirmación de que la NF puede generar agua apta para reúso industrial. - La simulación con NanoFlux predijo adecuadamente los resultados reales. - Se cumplió el objetivo de reducir la DQO y STD a niveles aceptables para reutilización.
Costo de implementación	No se presentan cifras, pero se revela como opción eficiente en comparación con la ósmosis inversa, ya que presenta menor presión requerida y mayor permeabilidad. Implica ahorro energético y posibilidad de escalamiento modular.
Mantenimiento y operación	- Requiere limpieza periódica y monitoreo del flujo de permeado. - Uso de membranas comerciales con buena disponibilidad. - Recomendable acondicionamiento previo de la membrana.
Aceptación social	No es abordada directamente, pero el potencial de reúso y ahorro en consumo de agua lo hacen viable para entornos industriales y residenciales sostenibles.

Factores ambientales	- Reducción de carga orgánica e iónica. - Mejora la posibilidad de reúso. - Disminución de impacto ambiental por vertimientos. - Evita el uso de reactivos químicos adicionales.
Comentarios clave	Es un documento robusto en términos técnicos, a pesar de que se enfoca en aguas industriales, también puede ser aplicable a aguas grises urbanas por similitud en la carga salina y DQO. La verificación con dos membranas, más el uso de simulación predictiva, aporta una base confiable para sustentar el uso de NF en edificaciones con enfoque de reutilización.

Ficha técnica – N2: Nanofiltración combinada con procesos avanzados de oxidación para remoción de micro-contaminantes. (Miralles Cuevas, 2015)

Campo	Contenido
Tecnología	Nanofiltración (NF90) combinada con AOP (foto-Fenton solar y ozonización)
Título del documento	Eliminación de micro-contaminantes mediante combinación de sistemas de membrana (nanofiltración) y procesos avanzados de oxidación
Contexto del estudio	Tesis doctoral desarrollada en la Plataforma Solar de Almería (España), con aplicación en aguas residuales urbanas reales (efluente de EDAR), simulando condiciones típicas de reúso, en la misma medida se implementaron procesos de nanofiltración en discontinuo, con tratamientos posteriores a los concentrados por ozonización y foto-Fenton solar (modificado para pH neutro).
Objetivo del estudio	Evaluar la eficiencia técnico-económica de la combinación NF + AOP para la remoción de micro-contaminantes emergentes en aguas urbanas, considerando la reducción de toxicidad y el cumplimiento de estándares de que permitan la reutilización.
Diseño del sistema	- Membrana: NF90-2540, operación en discontinuo - Evaluación de varios FCV (factores de concentración volumétrica) - Matrices: agua natural, desmineralizada y efluente de EDAR - AOP: foto-Fenton solar a pH 3 y modificado a pH ~6 con EDDS - Comparación con ozonización directa e indirecta
Eficiencia técnica	- Micro-contaminantes modelo (5 fármacos): remoción >90% con NF + AOP - Concentraciones reales: LC/MS/MS detectó eliminación de múltiples sustancias entre 80–99.9% - DQO: reducida sustancialmente tras combinación - Toxicidad: reducida en dilución 1:2, incluso en ozonización; mejor desempeño con NF + foto-Fenton a pH ~6
Resultados destacados	- El sistema combinado NF + AOP resultó más eficiente y económico que el tratamiento directo del efluente. - Remoción efectiva en tiempos <20 min con dosis moderadas de ozono o H_2 O_2 . - El agente EDDS permitió operar foto-Fenton en pH cercano a la neutralidad.
Costo de implementación	- NF + foto-Fenton (FCV4): €0.40–0.44/m³ - NF + ozonización: €0.47–0.58/m³ - Menores costos comparados con AOP directo (≥€0.50–0.75/m³). - Ahorros por reducción de superficie de captadores solares y menor consumo de oxidantes.
Mantenimiento y operación	- Requiere limpieza periódica de membrana y control de condiciones de pH y dosificación. - Menor mantenimiento en NF + AOP respecto a sistemas directos. - Potencial de automatización.
Aceptación social	No está evaluada directamente, pero la baja toxicidad final y el potencial de reúso sugieren buena viabilidad social e institucional.

Factores ambientales	- Alta eficiencia sin subproductos tóxicos cuando se controla pH y oxidantes. - Reducción del volumen a tratar mediante NF. - Posibilidad de implementación modular con bajo impacto ambiental.
Comentarios clave	Esta tesis proporciona evidencia técnica y económica sólida para sustentar el uso combinado de nanofiltración con tratamientos avanzados de oxidación, especialmente en zonas urbanas con presión hídrica. Su enfoque a pH neutro mejora la viabilidad operativa y ambiental del sistema propuesto.

Ficha técnica – N3: Modelado y control de una planta piloto de nanofiltración. (Sánchez Pelegrina, Rodríguez, Oller, Berenguel, & Malato, 2018)

Campo	Contenido
Tecnología	Nanofiltración con membranas configuradas en serie
Título del documento	Modelado y control de una planta piloto de nanofiltración aplicada a la reutilización de aguas residuales en agricultura
Contexto del estudio	Trabajo aplicado en la Plataforma Solar de Almería (España), centrado en el análisis dinámico, modelado matemático y diseño de controladores para una planta piloto de nanofiltración, con fines de reutilización del agua en riego agrícola, lo cual conlleva a simular a condiciones reales con aguas de diferentes conductividades (hasta 6300 µS/cm).
Objetivo del estudio	Determinar el punto óptimo de operación y proponer un sistema automático de control multivariable que optimice el funcionamiento de la planta, maximizando caudal de permeado y minimizando presión y desgaste de membranas.
Diseño del sistema	- Planta con tres membranas en serie, válvulas de control de recirculación y concentrado - Bomba centrífuga de presión regulable - Sensores de presión, caudal y conductividad - Sistema SCADA para adquisición de datos - Frecuencia de operación: 25–35 Hz; presión máxima: 6 bar; CE entrada: hasta 6300 µS/cm
Eficiencia técnica	- Punto óptimo identificado: 35.5 L/h de caudal de permeado con 4.3 bar - Alta sensibilidad del caudal ante cambios en la conductividad de entrada - Controladores PI con anti-windup lograron estabilizar las variables - Ensayos confirmaron comportamiento estable, incluso ante perturbaciones
Resultados destacados	- Desarrollo de modelo de primer orden con retardo para cada variable controlada - Desacopladores propuestos para reducir interferencias entre lazos de control - Regulación eficiente del sistema frente a variaciones en presión y salinidad - Recomendaciones para futuras mejoras como los sensores adicionales y control anticipativo
Costo de implementación	No se reportan costos, pero el estudio destaca la viabilidad energética del sistema y la reducción de intervención operativa gracias a la automatización.
Mantenimiento y operación	- Requiere limpieza periódica de membranas y calibración de sensores - Control automático reduce el error humano y permite operación prolongada estable - Bajo consumo energético comparado con RO
Aceptación social	Aunque el estudio se centra primordialmente en la agricultura, el modelo puede ser transferible a contextos urbanos y residenciales donde se requiera control automatizado y alta eficiencia.
Factores ambientales	- Permite reutilización de agua con altos niveles de calidad - Reduce presión sobre fuentes convencionales - Contribuye al desarrollo de tecnologías inteligentes de tratamiento de agua

Comentarios clave	Este estudio aporta un enfoque altamente técnico y replicable, ideal para justificar la incorporación de nanofiltración en sistemas urbanos automatizados. Dicha incorporación de control multivariable permite la implementación en edificios con requerimientos sostenibles y mínimo mantenimiento.

Ficha técnica – N4: Aplicación de membranas de nanofiltración y ósmosis inversa en la eliminación de contaminantes orgánicos (Sotto, 2008)

Campo	Contenido
Tecnología	Nanofiltración (NF 90 y NF 270) comparada con ósmosis inversa (OI)
Título del documento	Aplicación de membranas de nanofiltración y ósmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos fenólicos y ácidos carboxílicos
Contexto del estudio	Tesis doctoral realizada en la Universidad Rey Juan Carlos (España), dentro de un proyecto cofinanciado por la Comunidad de Madrid y el Ministerio de Ciencia. Se realiza el estudio de la viabilidad de membranas comerciales de NF y OI para remover contaminantes prioritarios como fenoles y ácidos carboxílicos.
Objetivo del estudio	Analizar el desempeño de membranas NF y OI en la remoción de compuestos orgánicos tóxicos (fenoles, ácidos) en aguas contaminadas, valorando la influencia de variables como pH, temperatura, presión y adsorción.
Diseño del sistema	- Membranas: NF 90, NF 270 (nanofiltración); TFC-HR, BW30 (ósmosis inversa) - Configuración: flujo cruzado - Operación: presiones entre 4–35 bar, estudio de flujo de permeado y rechazo por tiempo - Análisis: espectroscopía FTIR, HPLC, AFM, SEM, contacto, modelos termodinámicos (Spiegler-Kedem)
Eficiencia técnica	- Rechazo de fenoles y ácidos: hasta >90% en membranas NF 90 y BW30 - Influencia del pH: rechazo mínimo cerca del punto isoeléctrico de la membrana - Flujo permeado el cual se disminuye con compuestos más hidrofóbicos (clorofenoles) - Adsorción correlacionada con mayor rechazo
Resultados destacados	- NF 90 mostró mejor relación entre rechazo y caudal frente a otras membranas. - Se modelaron isotermas de adsorción tipo Langmuir y Freundlich. - A mayor hidrofobicidad del soluto, mayor adsorción y mayor pérdida de flujo. - El efecto de la presión sobre el rechazo fue lineal hasta saturación.
Costo de implementación	No se dan valores económicos, pero se destaca el uso de membranas comerciales estándar, disponibles y replicables. El estudio recomienda NF sobre OI porque tiene menor requerimiento energético y buena eficiencia.
Mantenimiento y operación	- Las membranas requieren acondicionamiento y limpieza periódica - Se analizó la compactación, pérdida de flujo y retención salina - Influencia marcada de la química superficial (carga, hidrofobicidad)
Aceptación social	No es abordado directamente, pero el enfoque ambiental y el uso de contaminantes prioritarios lo hacen relevante para aplicaciones en saneamiento y reutilización.
Factores ambientales	- Retención de contaminantes prioritarios - Uso sin químicos agresivos - Compatible con procesos híbridos tipo oxidación-membrana
Comentarios clave	Es uno de los estudios más completos en caracterización de membranas NF, ideal para sustentar los mecanismos de rechazo (adsorción, repulsión, tamaño) en aguas grises con contaminantes orgánicos. Realiza aportaciones a criterios avanzados

	para diseño y escogencia de membranas según el tipo de soluto y condiciones de operación.

Ficha técnica – N5: Sistema LEGIO.filter para tratamiento de aguas grises y agua lluvia. (Patiño Salinas, 2024)

Campo	Contenido
Tecnología	Nanofiltración (membrana capilar de polisulfona de 0.02 µm, sistema LEGIO.filter)
Título del documento	DERSA - Propuesta de sistema para tratamiento de aguas grises y lluvia mediante tecnología LEGIO.filter
Contexto del estudio	Propuesta técnica y comercial aplicada a la empresa DERSA (Detergentes Ltda., Colombia) en relación a tratamiento de aguas grises y lluvia con fines de reutilización. Se realiza la descripción del sistema modular, su configuración operativa, requerimientos eléctricos, mantenimiento, caudal de diseño y beneficios. Está respaldado por la empresa colombiana LEGIO SAS y el fabricante europeo LEGIO WATER GmbH.
Objetivo del estudio	La implementación de un sistema compacto, modular y automatizado para la filtración fina de aguas grises y lluvia, con membranas de nanofiltración de poro 0.02 µm, que permita la reutilización segura del agua tratada para actividades no potables como el riego, limpieza y descarga sanitaria.
Diseño del sistema	- Módulo LEGIO.filter LFFB-4-4-1 de filtración por membranas capilares - Material: polisulfona, poro de 0.02 µm (nanofiltración fina) - Caudal nominal: 4 m^3/día - Incluye bomba, PLC de control, válvulas automáticas, sensores de presión y caudal - Dimensiones: 1.8 x 1.5 x 2.1 m aprox. - Funcionamiento continuo, con limpieza automática cada 48 h y opción de retrolavado manual semanal
Eficiencia técnica	- Remoción de sólidos suspendidos, grasas, tensoactivos y partículas coloidales - Reducción significativa de turbidez, olor, color y materia orgánica ligera - Requiere desinfección final (ej. cloración, UV o peróxido de hidrógeno) - No especifica remoción de contaminantes emergentes, pero es aplicable con pretratamiento adecuado
Resultados destacados	- Agua tratada apta para descarga de inodoros, limpieza de áreas comunes, lavado de vehículos, y riego - Modular y expandible por bloques - Diseño silencioso, compacto y estéticamente neutro (apto para zonas internas de edificios)
Costo de implementación	- Valor comercial aproximado del módulo: USD $8.500 – $9.800 (según fuente del proveedor, no incluido en ficha) - Costos operativos bajos: consumo de energía 150–250 W, limpieza automática que no tengan químicos agresivos
Mantenimiento y operación	- Limpieza automática programada cada 48 h - Retrolavado manual cada 7–10 días - Cambio de membranas cada 1.5 a 2 años

	- Monitoreo básico vía sensores integrados en PLC - Requerimiento de un operador entrenado para inspecciones periódicas y protocolos de limpieza
Aceptación social	Se logra una alta aceptación esperada en contextos empresariales y edificaciones residenciales o institucionales, por ser una tecnología limpia, compacta y sin ruido. Su uso como solución llave en mano facilita la adopción.
Factores ambientales	- Disminución de consumo de agua potable - Reducción de vertimiento de aguas residuales - Reutilización segura con menor impacto ambiental - No se generan subproductos tóxicos y el sistema no necesita químicos continuos
Comentarios clave	Esta propuesta concreta y adaptable logra que se transfiera directamente la tecnología de nanofiltración al entorno urbano colombiano. Su utilidad se basa tanto como ejemplo de aplicación real como para proponer modelos replicables en edificaciones residenciales y comerciales en el municipio de Ocaña. Su portabilidad, modularidad y facilidad de instalación la han convertido en un referente técnico aplicable dentro de la estrategia.