UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

INGENIERÍA CIVIL

"Propuesta de diseño y comparación de sistemas de tratamiento de aguas grises para recirculación en usos no potables: Un enfoque convencional y basado en la naturaleza aplicado a edificios académicos"

Trabajo previo a la obtención del grado académico de:

Ingeniero/a Civil

Autor/es:

Danna Belén Urgilés Andrade

William Mateo Tenemea Sánchez

Directora:

Ing. Patricia Alejandra Palacios Romero, M.Sc.

Cuenca - Ecuador

2025

Dedicatoria

Para Cecy y Paúl, mis padres, quienes toda mi vida han llenado mi alma y corazón de amor y valentía; la razón de escribir estas palabras este momento.

Mis hermanos, Sofía y Esteban; compañeros ideales en este viaje.

Mi segunda mamá, Mercedes; quien es la dueña de los recuerdos más preciados de mi ser.

A todas las personas con las que he coincidido y disfrutado estos instantes de vida, en especial a Jacky, Titi, Jota, Chris, Emi, Karen y Vic; quienes han llegado a mostrarme el significado de amistad y amor.

Para mi Ahinoa, quien me enseñó que los animales no necesitan una voz para transmitir la imponente magnitud del amor; a ella que se fue cambiándome la vida.

Y, para mi yo pequeña; quien admiraba a su papá, deseando seguir sus pasos, y lo hacen aún. A ella, quien siempre quiso y quiere que el regalo que Dios nos dio, el entorno natural, sea cuidado.

Para ella, quien quiere comerse el mundo.

Danna Belén Urgilés Andrade.

Dedicatoria

A mis padres William y Mayra, por ser mi guía y fortaleza. Gracias por su amor inmenso, por sus sacrificios silenciosos, por cada palabra de aliento, por estar ahí cuando más lo necesité y por enseñarme que todo sacrificio vale la pena.

A mi hermana Nicole, por estar siempre a mi lado con una sonrisa, con apoyo sincero y con el cariño que solo los hermanos saben dar. Tu presencia ha sido una luz constante en mi camino.

Y toda mi familia, que ha compartido conmigo cada paso de este largo recorrido. Gracias por sus oraciones, por sus abrazos, su fe en mí y sobre todo gracias por celebrar mis logros como si fueran suyos y por recordarme siempre de dónde vengo.

William Mateo Tenemea Sánchez.

Agradecimientos

Agradecemos en primer lugar a Dios, por guiarnos en cada paso de este camino, brindándonos fortaleza, sabiduría y perseverancia para culminar esta etapa tan importante de nuestras vidas.

Nuestro sincero agradecimiento a la ingeniera Patricia Palacios, nuestra directora, por su constante acompañamiento, orientación y compromiso con nuestro trabajo; a quien admiramos desde siempre

A la Universidad del Azuay, expresamos nuestra gratitud por el respaldo brindado a lo largo de la carrera y por el apoyo institucional durante el desarrollo de nuestra investigación, así como el acceso a laboratorios y recursos técnicos.

Al Proyecto MACCARD - Universidad del Azuay, cofinanciado por el programa Erasmus+ de la Unión Europea, agradecemos por la información proporcionada que enriqueció significativamente nuestro estudio.

Al Ing. Andrés Cabrera, le extendemos nuestro reconocimiento por su colaboración, seguimiento técnico y consejos a lo largo de este proyecto.

Queremos también agradecer profundamente a nuestros amigos, quienes nos acompañaron en este proceso; con su apoyo, ánimo y compañía: Titi, Jacky, Jota, Chris C., Emi, Karen, Caro, Vale, Mateo M., Carlos, Ricardo, Fernando, Juan Francisco, Víctor, Chris B., Paula y Jeisson. Cada uno de ustedes dejó una huella importante en este recorrido.

Finalmente, nos agradecemos mutuamente, Danna y Mateo, por el esfuerzo, compromiso y dedicación compartida que nos permitió llegar hasta aquí, demostrando que el trabajo en equipo, la confianza y la constancia son clave para lograr nuestros objetivos. Y como resultado este gran proyecto concluido.

Danna y Mateo.

Resumen

La presente investigación plantea el diseño y la comparación de dos sistemas de tratamiento de aguas grises destinados a su recirculación en usos no potables en el edificio académico C1 de la Universidad del Azuay. El estudio considera dos enfoques tecnológicos: un sistema convencional, basado en procesos físico-químicos, y otro fundamentado en soluciones basadas en la naturaleza, mediante un muro verde. Se analizaron los caudales de oferta de agua gris generada en lavamanos, así como fuentes hídricas complementarias (agua pluvial y subterránea), y se evaluaron los caudales de demanda correspondientes a sanitarios y urinarios. El balance entre oferta y demanda evidenció una relación favorable de 524 %. La caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua gris permitió definir los parámetros críticos de diseño y seleccionar los tratamientos adecuados. El sistema convencional alcanzó elevadas eficiencias de remoción (DBO_5: 89.74 %, sólidos suspendidos: 98.38 %, coliformes fecales: 99.99 %), mientras que el sistema con muro verde, si bien presentó una eficiencia ligeramente inferior en DBO_5 (84.54 %), superó al convencional en remoción de turbidez (98.07 %) y coliformes fecales (99.99%). Ambos sistemas cumplen con los criterios normativos para su uso en descargas sanitarias, siendo el sistema convencional más compacto y el muro verde una alternativa ecoeficiente con beneficios ambientales adicionales. Esta comparación integral demuestra la viabilidad técnica, sanitaria y ambiental de incorporar estrategias sostenibles de gestión hídrica en edificaciones educativas.

Palabras Clave: aguas grises, reúso, tratamiento convencional, muro verde, sostenibilidad hídrica

Abstract

This research proposes the design and comparison of two greywater treatment systems intended for non-potable reuse within the academic building C1 at Universidad del Azuay. The study considers two technological approaches: a conventional system based on physicochemical processes, and a nature-based solution through a green wall. Greywater flow rates from washbasins were analyzed, along with alternative water sources (rainwater and groundwater) and the corresponding demand from toilets and urinals. The supply-demand analysis revealed a favorable ratio of 524%. Physicochemical and microbiological characterization of greywater enabled the identification of critical design parameters and the selection of appropriate treatment processes. The conventional system achieved high removal efficiencies (BOD_5: 89.74%, suspended solids: 98.38%, fecal coliforms: 99.99%), while the green wall system, despite slightly lower BOD_5 removal (84.54%), demonstrated superior performance in turbidity (98.07%) and fecal coliform removal (99.99%). Both systems meet the regulatory criteria for toilet flushing reuse, with the conventional system being more compact, and the green wall offering an eco-efficient alternative with additional environmental benefits. This comprehensive comparison demonstrates the technical, sanitary, and environmental feasibility of implementing sustainable water management strategies in educational facilities.

Keywords: greywater, reuse, conventional treatment, green wall, water sustainability

Índice de contenidos

Dedicatoria i

Agradecimientos iii

Resumen iv

Abstract v

Índice de figuras x

Índice de anexos xi

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1. Antecedentes 1

1.2. Problemática y justificación 5

1.3. Objetivos 5

1.3.1. Objetivo general: 5

1.3.2. Objetivos específicos: 6

2. MARCO TEÓRICO 6

2.1. Caracterización de agua residual 6

2.2. Tratamiento convencional de aguas residuales 9

2.2.1. Pretratamiento-Rejilla 10

2.2.2. Trampa de grasas 12

2.2.3. Filtración 14

2.2.4. Cloración por goteo 15

2.3. Tratamiento de agua residual basado en la naturaleza 15

2.3.1. Muro verde 16

2.3.2. Plantas y sustrato 20

2.4. Métodos de evaluación de caudales de agua lluvia 21

2.5. Normativa y requerimientos 22

3. METODOLOGÍA 26
3.1. Área de estudio 26
3.2. Dispositivos de medición y lectura 28
3.3. Métodos aplicados para la recolección de datos sobre consumo de agua potable 30
3.4. Fuentes hídricas alternativas 31
3.5. Caracterización del agua gris y sistemas de tratamientos 33
4. ANÁLISIS DE LA OFERTA Y DEMANDA DE AGUA 33
4.1. Oferta y demanda de agua gris 34
4.1.1. Oferta de agua gris 34
4.1.2. Demanda de agua gris 35
4.2. Análisis de la oferta de fuentes hídricas alternativas 36
4.2.1. Agua subterránea 36
4.2.2. Agua pluvial 38
4.3. Comparación de la oferta y demanda 41
5. DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO 43
5.1. Caracterización del agua gris 43
5.2. Diseño del sistema de tratamiento convencional 44
5.2.1. Trampa de grasas 45
5.2.2. Sedimentador 46
5.2.3. Filtración 47
5.2.4. Desinfección 48
5.3. Diseño del sistema de tratamiento basado en la naturaleza 49
5.4. Comparación de los sistemas de tratamiento 54
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 56
7. BIBLIOGRAFÍA 59

ANEXOS 64

Índice de tablas

Tabla 1: Contaminantes presentes en las aguas residuales domésticas 7
Tabla 2: Características de las aguas grises 8
Tabla 3: Diseño y eficiencia de plantas 17
Tabla 4: Directrices sugeridas para reutilización de agua 23
Tabla 5: Criterios de calidad para la reutilización de aguas grises según sus usos 24
Tabla 6: Parámetro contaminantes y mínimos exigidos para riego e inodoros 25
Tabla 7: Descripción especificaciones baterías sanitarias hombres del edificio C1 27
Tabla 8: Descripción especificaciones baterías sanitarias hombres del edificio C1 27
Tabla 9: Descripción especificaciones baterías sanitarias mujeres del edificio C1 27
Tabla 10: Descripción especificaciones baterías sanitarias mujeres del edificio C1 27
Tabla 11: Descripción especificaciones baterías sanitarias sala de reuniones del edificio C1 28
Tabla 12: Reporte de resultados de la caracterización de aguas grises 43
Tabla 13: Eficiencia de remoción rejilla 45
Tabla 14: Especificaciones técnicas rejilla 45
Tabla 15: Eficiencias de remoción trampa de grasas 46
Tabla 16: Especificaciones técnicas trampa de grasas 46
Tabla 17: Eficiencias de remoción sedimentador 46
Tabla 18: Especificaciones técnicas sedimentador 47
Tabla 19: Eficiencia de remoción filtración 47
Tabla 20: Especificaciones técnicas filtro carbón activado 47
Tabla 21: Especificaciones técnicas cloración por goteo del método convencional 48
Tabla 22: Eficiencias de remoción cloración por goteo método convencional 49
Tabla 23: Especificaciones técnicas muro verde 50
Tabla 24: Eficiencias de remoción muro verde 51
Tabla 25: Especificaciones técnicas cloración por goteo método muro verde 52
Tabla 26: Eficiencias de remoción cloración por goteo muro verde 53
Tabla 27: Eficiencias generales método convencional y muro verde 55

Índice de figuras

Figura 1: Porcentaje de aguas residuales no tratadas en países con niveles de ingresos y aspiraciones diferentes para 2030 (50% de reducción respecto al punto de referencia de 2015) 2
Figura 2: Costo del reúso del agua en comparación con el uso de agua de primer uso 4
Figura 3: Mapa campus Universidad del Azuay 26
Figura 4: Ubicación contadores de agua en planos as-built 29
Figura 5: Contadores de agua 30
Figura 6: Estación Meteorológica MACCARD 31
Figura 7: Ubicación Pozo tres 32
Figura 8: Gráfica serie de tiempo caudal promedio mensual de lavamanos (lt/día) 34
Figura 9: Gráfica de serie temporal del caudal promedio mensual de los sanitarios y urinarios (lt/día) 35
Figura 10: Serie de tiempo promedio caudal año agua subterránea (lt/día) 37
Figura 11: Gráfica de Serie de Tiempo de Caudal Promedio (lt/día) mensual 39
Figura 12: Gráfica serie de tiempo caudales promedios históricos de lluvia 40
Figura 13: Gráfica de serie temporal del caudal promedio anual por mes agua pluvial 41
Figura 14: Gráfica serie de tiempo de caudal promedio mensual por año de agua pluvial, subterránea, lavamanos, sanitarios y urinarios (lt/día) 42
Figura 12: Esquema de tratamientos método convencional 49
Figura 13: Esquema de tratamientos muro verde 53
Figura 14: Muro verde 54

Índice de anexos

Anexo 1: Volumen de abatimientos y caudales del Pozo 3 año 2023 64
Anexo 2: Datos precipitaciones agua lluvia 64
Anexo 3: Caudales promedio agua pluvial 94
Anexo 4: Caudales diarios de la oferta y demanda de agua gris 96
Anexo 5: Caudales promedios mensual de oferta y demanda de agua gris 99
Anexo 6: Gráfica de Serie de Tiempo para la variable Caudal (lt/día) 99

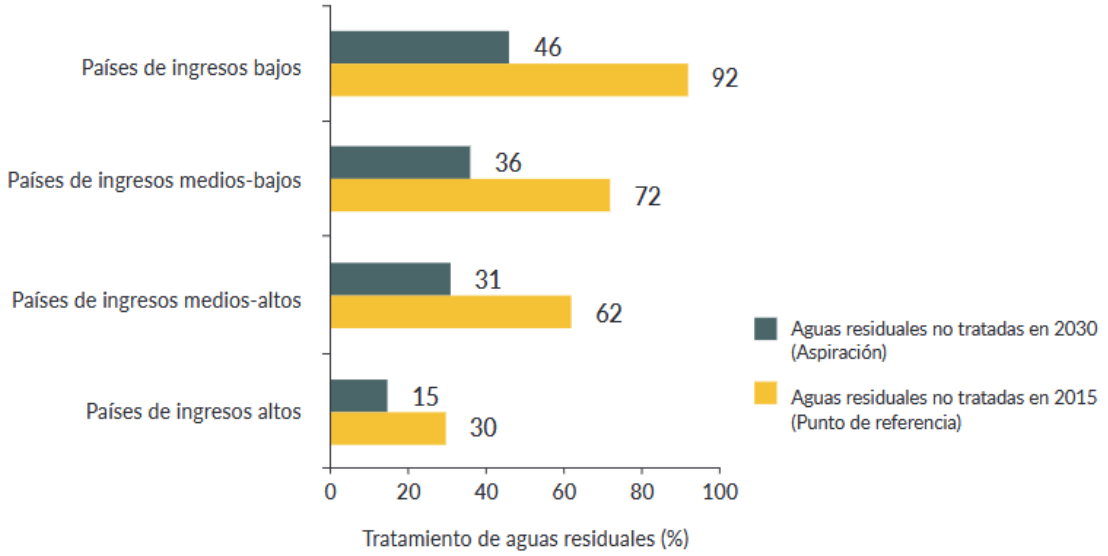
1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El agua, como elemento vital para la supervivencia de toda especie, constituye un recurso esencial tanto para la vida humana como para el equilibrio y funcionamiento de los ecosistemas. Su importancia se refleja en su uso indispensable en múltiples actividades industriales, agrícolas y domésticas (Beltrán-Conlago et al., 2024). No obstante, la disponibilidad de agua dulce es sumamente limitada; se estima que solo el 2,5% del agua en el planeta es dulce, y de esta, una fracción reducida está accesible para el consumo humano (Oxfam México, 2020). Además, el consumo global de agua se ha triplicado desde 1950, lo que ha generado un considerable estrés hídrico en diversas regiones. Actualmente, un tercio de la población mundial enfrenta condiciones de estrés hídrico, y se proyecta que para el año 2050, dos tercios de la población estarán en una situación de estrés hídrico moderado a alto, mientras que la mitad de la población mundial experimentará problemas graves de acceso al agua (Navarro, 2005). Este panorama resalta la urgencia de adoptar estrategias eficientes de gestión y reutilización del recurso hídrico con el fin de garantizar su sostenibilidad.

Las aguas grises son efluentes generados a partir del uso de duchas, lavamanos, fregaderos, lavadoras y lavaderos. Estas representan una fuente significativa para la optimización del recurso hídrico, ya que constituyen entre el 50 % y 80 % del consumo total de agua en una vivienda. No obstante, un alto porcentaje de este recurso es desaprovechado debido a la falta de sistemas adecuados de recolección y tratamiento. La Figura 1 ilustra el porcentaje de aguas residuales no tratadas en distintos países en función de su nivel de ingresos para el año 2015, así como la proyección de reducción esperada para 2030. Se evidencia que, en naciones de ingresos bajos y medios-bajos, la falta de tratamiento de aguas residuales continúa siendo un desafío crítico, lo que subraya la necesidad de implementar estrategias efectivas de reutilización y saneamiento. Si bien las aguas grises pueden parecer inservibles a simple vista, su adecuado tratamiento y reutilización pueden generar un ahorro del 30 % al 50 % en el consumo de agua potable, contribuyendo a la sostenibilidad del recurso hídrico y a la mitigación del impacto ambiental (Niño & Martínez, 2013).

Figura 1: Porcentaje de aguas residuales no tratadas en países con niveles de ingresos y aspiraciones diferentes para 2030 (50% de reducción respecto al punto de referencia de 2015)



Fuente: (UNESCO, 2017)

En este contexto, la reutilización de aguas residuales tratadas ha cobrado un papel fundamental, ya que representa una alternativa viable para aumentar la oferta hídrica de los ecosistemas y reducir la contaminación de las fuentes de agua. Dichos proyectos adquieren especial relevancia en periodos de estiaje prolongados, los cuales pueden ser exacerbados por eventos de variabilidad climática extrema. Así, la reutilización de aguas residuales se ha consolidado como una estrategia clave de adaptación al cambio climático, promoviendo una gestión ambiental más sostenible (Escobar Rojas et al., 2016). Además, esta práctica ofrece múltiples beneficios, tales como la conservación de las fuentes hídricas, el incremento en la disponibilidad de agua, la regulación de la competencia entre diferentes usos del agua, la preservación de la integridad de cuerpos de agua, humedales y biodiversidad y la reducción de costos de tratamiento, lo que contribuye a hacer más rentable el saneamiento (Navarro-Sousa & Estruch-Guitart, 2023).

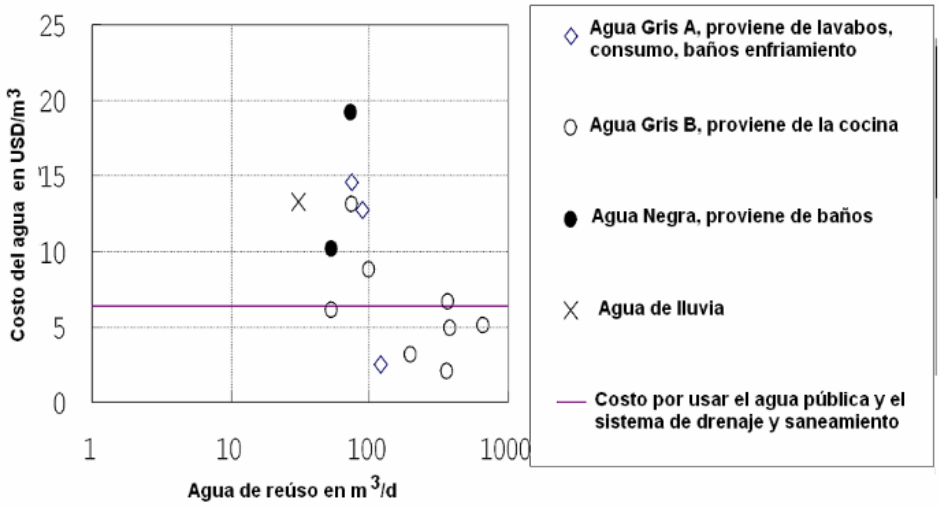
La reutilización de aguas grises, provenientes de lavabos, duchas y lavadoras, se ha consolidado como una estrategia efectiva dentro de los entornos urbanos para optimizar el uso del agua. La implementación de sistemas de tratamiento de aguas grises en edificaciones académicas no solo disminuye la demanda de agua potable, sino que también reduce el volumen de aguas residuales

vertidas al medio ambiente, favoreciendo la conservación de los recursos hídricos y la protección de los ecosistemas (AZUD, 2023).

Existen diversas fuentes hídricas alternativas que pueden ser aprovechadas para la reutilización, entre las cuales destacan el agua pluvial y subterránea. En el contexto ecuatoriano, a pesar de contar con abundantes recursos hídricos, la captación y reutilización del agua de lluvia representa una oportunidad significativa para optimizar el consumo de agua potable y fomentar un uso más eficiente del recurso en áreas urbanas. Esta práctica no solo reduce la dependencia de fuentes convencionales, sino que también promueve una gestión hídrica más sostenible. La recolección y reutilización del agua pluvial emerge como una estrategia clave para disminuir la demanda de agua potable, al tiempo que mitiga el impacto sobre los cuerpos hídricos naturales. Aunque en algunos países no existen regulaciones estrictas sobre su aprovechamiento, la implementación de tecnologías adecuadas para su captación y tratamiento permite su utilización en una variedad de aplicaciones, garantizando una gestión hídrica más responsable. En este sentido, los sistemas híbridos, que integran la captación de agua pluvial con la reutilización de aguas grises, han demostrado ser los más eficientes tanto desde una perspectiva ambiental como económica, ya que brindan beneficios a largo plazo superiores a aquellos proporcionados por sistemas independientes (Lozano-Mendoza et al., 2025; Monteiro & Lima, 2020; Navarro-Sousa & Estruch-Guitart, 2023; Niño & Martínez, 2013)

La Figura 2 ilustra el costo del reúso de agua en comparación con el uso de agua potable y su tratamiento. Se observa que a partir de un umbral de 100 m^3/día, el costo del reúso es menor que el de usar agua de primer uso y tratarla. Esto refuerza la viabilidad económica de la reutilización del agua en proyectos de gran escala, promoviendo una gestión hídrica más eficiente y sustentable.

Figura 2: Costo del reúso del agua en comparación con el uso de agua de primer uso



Fuente: (Navarro, 2005)

En el caso de la Universidad del Azuay, la adopción de sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises constituye una medida significativa hacia la sostenibilidad institucional. Esta iniciativa se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, en particular con el ODS 6, que busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos (Naciones Unidas, 2023). Además, la incorporación de estas tecnologías en infraestructuras académicas funcionaría como un modelo educativo y práctico para los estudiantes y la comunidad universitaria, fomentando una cultura de responsabilidad ambiental y eficiencia en el uso de los recursos hídricos.

Antes de analizar los sistemas de tratamiento específicos, es crucial destacar la importancia de evaluar y comparar diferentes enfoques tecnológicos para la reutilización del agua. La comparación entre los enfoques convencionales y los basados en la naturaleza para el tratamiento de aguas grises permite identificar soluciones óptimas adaptadas al contexto local. Mientras que los métodos convencionales suelen emplear procesos físico-químicos, los enfoques basados en la naturaleza utilizan mecanismos naturales que imitan los ciclos ecológicos para abordar problemáticas ambientales y urbanas (Beltrán-Conlago et al., 2024). Evaluar la eficacia, costos y beneficios ambientales de ambos enfoques proporcionará a la Universidad del Azuay las herramientas necesarias para implementar sistemas de tratamiento de aguas grises eficientes, sostenibles y acordes con su compromiso hacia un futuro más sostenible.

1.2. Problemática y justificación

De acuerdo con la Empresa de Telecomunicaciones, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA EP, 2023), el consumo diario de agua por persona en Cuenca es de 160 litros; mientras que la Organización de las Naciones Unidas (ONU) recomienda 100 litros. Esto implica un derroche de 60 litros por habitante cada día. Lo que representa un 77% por encima de la cantidad recomendada por la ONU. Según el último censo, existen 417.632 habitantes en Cuenca, así se genera al mes un consumo aproximado de 9.513.600 litros de agua potable en la ciudad (Alcaldía de Cuenca 2023-2027, 2022).

Según Cabrera Ordóñez, M (2023), la Universidad del Azuay no presenta ningún tipo de sistema de reutilización de agua en la actualidad, desaprovechando el recurso hídrico, valores considerables de pago por el servicio del mismo y una cultura ambiental reducida sobre sostenibilidad. Específicamente, en el campus de Ciencia y Tecnología de la Universidad del Azuay, se registró un consumo promedio mensual de 311 m^3 de agua potable desde julio de 2021 hasta diciembre de 2022, representando esta cantidad casi la mitad del consumo total de agua de la universidad; por lo tanto, la implementación de un sistema de reutilización es fundamental para disminuir el consumo de la misma.

En este contexto, la academia debe estar comprometida con la búsqueda de soluciones a los problemas ambientales actuales, fomentando un manejo más eficiente en la reutilización y aprovechamiento de los recursos hídricos. La Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del Azuay representa una oportunidad estratégica para enfrentar esta problemática mediante la implementación de un sistema de reutilización de aguas grises, pluvial y subterránea en el edificio denominado C1, promoviendo un impacto positivo en la sociedad y contribuyendo a la formación de una cultura ambiental orientada hacia un futuro sostenible.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general:

Diseñar y comparar dos sistemas de tratamiento de reutilización de aguas grises para su recirculación en usos no potables para un edificio de uso académico. Caso de estudio edificio C1 de la Universidad del Azuay.

1.3.2. Objetivos específicos:

- Analizar los volúmenes de oferta y demanda de aguas grises y fuentes alternativas de agua para el edificio C1 de la Universidad del Azuay.
- Diseñar los sistemas de tratamiento para reutilización de aguas en usos no potables: uno convencional y uno basado en la naturaleza.
- Evaluar y comparar ambos sistemas en términos técnicos, económicos y ambientales para seleccionar la alternativa más viable.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Caracterización de agua residual

Según su origen, las aguas residuales domésticas se dividen en aguas grises y aguas negras. Las primeras son aquellas que no contienen cantidades significativas de residuos fecales ya que provienen de actividades como el lavado de manos, duchas, y lavaplatos, mientras que las aguas negras contienen altos niveles de materia orgánica y microorganismos patógenos, lo que requiere tratamientos más complejos para su reutilización (Manga et al., 2021; Villa Hoyos, 2020).

Las aguas grises constituyen aproximadamente entre el 50 % y 80 % del total de las aguas residuales domésticas y se caracterizan por su menor carga de contaminantes en comparación con las aguas negras (Castillo et al., 2025). Estas aguas contienen concentraciones variables de sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), grasas, aceites y detergentes. Los valores típicos de DBO_5 en aguas grises oscilan entre 90 y 290 mg/L, mientras que la DQO varía entre 200 y 600 mg/L, dependiendo de la fuente específica (Castillo et al., 2025). Su baja concentración de patógenos y nutrientes en comparación con las aguas negras facilita su tratamiento mediante sistemas descentralizados como filtros de arena, humedales construidos y reactores biológicos, permitiendo su reutilización en riego, descargas sanitarias y limpieza, lo que contribuye a la reducción del consumo de agua potable en hasta un 40 % en edificaciones sostenibles (Friedler, 2004; Ghaitidak & Yadav, 2013).

Las aguas negras, en contraste, representan entre el 20 % y 50 % del volumen total de aguas residuales domésticas, pero contienen una carga contaminante significativamente mayor debido a su origen en inodoros y urinarios (Hernández-Salazar Aurora B et al., 2017). Estas aguas presentan concentraciones de DBO_5 en el rango de 300 a 600 mg/L y DQO entre 500 y 1,200 mg/L, además de una alta presencia de sólidos suspendidos, 250-400 mg/L, nutrientes como nitrógeno total,35-

80 mg/L, fósforo total,4-15 mg/L, y una elevada cantidad de microorganismos patógenos, incluyendo bacterias coliformes y virus entéricos. Su tratamiento requiere procesos avanzados, combinando etapas físicas (cribado, sedimentación), biológicas (lodos activados, reactores anaerobios) y químicas (desinfección con cloro, ozono o radiación UV) para garantizar su depuración antes de su descarga o reutilización en aplicaciones controladas, como riego agrícola de cultivos no alimentarios o producción de biogás mediante digestión anaerobia (Hernández-Salazar Aurora B et al., 2017).

La generación de residuos como resultado de las actividades humanas es un proceso inevitable, y una proporción considerable de estos desechos termina en las aguas residuales. La cantidad y composición de dichas aguas están condicionadas por diversos factores, ya que no todas las personas o industrias producen residuos en las mismas proporciones. En el ámbito doméstico, la generación de desechos está influenciada por el comportamiento y hábitos de los habitantes, su nivel socioeconómico y el marco normativo y técnico que regula su entorno (Henze et al., 2017).

En la Tabla 1 se presentan los principales contaminantes presentes en las aguas residuales domésticas, su origen y los efectos que pueden generar en el medio ambiente y la salud humana.

Tabla 1: Contaminantes presentes en las aguas residuales domésticas

CONTAMINANTES DE LAS AGUAS RESIDUALES		
Microorganismos	Organismos patógenos como bacterias, virus y huevos de helminto	Riesgo para actividades acuáticas, baños y el consumo de mariscos
Materia orgánica biodegradable	Disminución del oxígeno disuelto en ríos, lagos y fiordos	Muerte de peces, olor
Otros compuestos orgánicos	Detergentes, plaguicidas, grasas y aceites, colorantes, solventes, fenoles, cianuro	Efectos tóxicos, inconvenientes estéticos, bioacumulación en la cadena alimenticia
Nutrientes	Nitrógeno, fósforo, amoniaco	Eutrofización, agotamiento del oxígeno disuelto, efectos tóxicos
Metales	Hg, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni	Efectos tóxicos, bioacumulación
Otros compuestos inorgánicos	Ácidos, por ejemplo, sulfuro de hidrógeno, bases	Corrosión, efectos tóxicos
Efectos térmicos	Agua caliente	Cambios en las condiciones de vida de la flora y fauna
Olor (y gusto)	Sulfuro de hidrógeno	Inconvenientes estéticos, efectos tóxicos
Radioactividad	-	Efectos tóxicos, acumulación

Fuente:(Henze et al., 2017)

Es importante destacar que la presencia de estos contaminantes en las aguas residuales resalta la necesidad de implementar tratamientos adecuados según su uso. En la Tabla 2**,**se muestra la caracterización de aguas grises según su origen, que son objeto del presente estudio.

Tabla 2: Características de las aguas grises

CARACTERIZACIÓN DEL AGUA GRIS

ORIGEN	CARACTERÍSTICAS
Lava vajillas	-Altamente contaminada con partículas de comida, aceite y grasas -Cantidades variables de coliformes -Generalmente presenta mayor cantidad de SST que las aguas servidas -Crecimiento de microorganismos. Descomposición rápida. Mal olor. -Contiene detergentes, blanqueadores. Espumas. -Alta demanda de oxígeno. -Usualmente se lo considera como agua negra.
Ducha Tina y Lavamanos	-Generalmente corresponde al agua menos contaminada (aguas grises claras) -Ducha y tina presentan coliformes. -Puede contener orina, que es estéril en personas sanas, no obstante, algunas infecciones en la vejiga pueden hacer que exista presencia de microorganismos, el potencial de estos para sobrevivir y causar infecciones es considerado remoto. -Contiene pelos y productos de limpieza como jabón, shampo y pasta de dientes. -Baja demanda de oxígeno.
Lavadora	-Contiene coliformes -Contiene detergentes (Sodio, Fósforo, Boro, Amonio, Nitrógeno) Espumas. -Alto pH. -Alta salinidad. -Alta cantidad de solidos suspendidos (pelusas). Alta turbiedad.

Fuente: (NSW., 2000; Imhof, Muhlemann, 2005)

De la Tabla 2 se evidencia que el agua proveniente de duchas y lavamanos es la de menos carga contaminante. Debido a esto, su tratamiento y reutilización resultan más viables para usos no potables, como sistemas de riego o descarga de aparatos sanitarios. Varios estudios indican que los sistemas de reutilización de aguas grises pueden reducir hasta un 40% el consumo de agua

potable en edificios residenciales y comerciales, contribuyendo significativamente a la disminución de la demanda de este recurso (Pérez Solares, 2013).

2.2. Tratamiento convencional de aguas residuales

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales pueden clasificarse en dos grupos: sistemas convencionales y sistemas basados en la naturaleza.

Los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales utilizan una serie de procesos físicos, químicos y bilógicos diseñados para eliminar contaminantes. Según Herrera, H., & García, P. (2021), el tratamiento convencional incluye una separación preliminar de sólidos, seguida de tratamientos primario, secundario y terciario.

El tratamiento preliminar de aguas residuales elimina sólidos grandes y arenas para evitar daños en los equipos. Generalmente se emplea un pozo de gruesos para separar materiales pesados y rejas para el desbaste de sólidos finos (10-25 mm) y gruesos (50-100 mm).

El tratamiento primario de aguas residuales busca reducir sólidos en suspensión y materia biodegradable mediante procesos físicos o fisicoquímicos. A través de la sedimentación gravitacional, se eliminan sólidos sedimentables, evitando demandas excesivas de oxígeno en etapas posteriores. La decantación primaria permite una reducción del 50% en sólidos en suspensión y al menos un 20% en DBO5. Además, los tratamientos fisicoquímicos emplean coagulación y floculación con reactivos químicos para mejorar la eficiencia en la remoción de partículas y materia orgánica. Los procesos de filtración en soportes ranurados reducen sólidos en suspensión (0,2-3 mm), mientras que el desarenado retira partículas mayores a 0,2 mm, previniendo sedimentación y abrasión en tuberías y bombas. Estos procesos aseguran eficiencia operativa y cumplimiento normativo en la planta de tratamiento (Herrera, 2018)

El tratamiento secundario de aguas residuales se basa en procesos biológicos que utilizan microorganismos para degradar la materia orgánica. Mediante reacciones de oxidación y respiración bacteriana en condiciones aerobias, los contaminantes son transformados en lodos que luego sedimentan en los decantadores secundarios. Este proceso permite eliminar entre el 80-90% de los sólidos en suspensión, reducir la DBO5 en un 80-95% y eliminar hasta un 98% de Escherichia coli, logrando una clarificación eficiente del efluente antes de su disposición final (Herrera, 2018).

El tratamiento terciario de aguas residuales complementa las etapas anteriores para lograr una mayor calidad del efluente, especialmente cuando se requiere reutilización. Permite eliminar hasta el 95% de sólidos en suspensión, reducir la DBO5 en un 95-98% y eliminar el 99% de Escherichia coli. Se emplean procesos fisicoquímicos como coagulación, floculación, decantación, filtración y desinfección con radiación UV u ozono. Además, la eliminación de nitrógeno se logra mediante procesos secuenciales de oxidación y anoxia, mientras que el fósforo es retenido en microorganismos y extraído con los lodos (Herrera, 2018).

- Tratamientos convencionales de aguas grises

Los tratamientos convencionales de aguas grises se caracterizan por procesos tecnológicos de mayor complejidad, como la filtración mecánica, el uso de reactivos químicos y la desinfección mediante sistemas de luz ultravioleta. Estas técnicas suelen ser eficaces para la eliminación de contaminantes y permiten un control más preciso de la calidad del agua tratada. No obstante, presentan desventajas como el alto costo de operación, la dependencia de recursos energéticos y la necesidad de mantenimiento especializado (García-Rodríguez, P y Herrera-Novoa, H. 2021).

2.2.1. Pretratamiento-Rejilla

Lozano-Mendoza et al. (2025), enuncia las siguientes formulaciones para el diseño de rejillas como pretratamiento de aguas residuales..

Fórmula 1 caudal máximo:

$$\text{Qmax} = \text{Qmd} \cdot (1.2 + \frac{2.6}{(Qmd)^{0.25}})$$

Donde:

Qmax= Caudal máximo

Qmd= Caudal medio

Fórmula 2 velocidad:

$$V = \frac{Q}{A}$$

Donde:

V=velocidad

Q=caudal

A=área

Fórmula 3 Área:

$$A = \frac{Q}{V}$$

Donde:

A=área

Q= caudal

V=velocidad de paso entre barrotes

Fórmula 4 número de barrotes:

$$N = \frac{B_R - L}{b + L}$$

Donde:

N=número de barrotes

Br=ancho del canal en la zona de la rejilla

L= luz o espacio entre barrotes

B=ancho de los barrotes

Fórmula 5 perdida de carga de rejilla:

$$\Delta h = (\frac{1}{\varepsilon^2} - 1) \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

Δh: pérdida de carga

ε: coeficiente de área libre

V: velocidad del flujo

g: aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

Fórmula 6 Manning:

$$\frac{1}{0.013} \cdot 0.1y \cdot (\frac{0.1y}{0.1 + 2y})^{\frac{2}{3}} \cdot 0.1 = 5.3488895 \times 10^{-5}$$

Cada tratamiento cumple con una eficiencia de remoción, en base a la literatura Metcalf & Eddy. (2003), nos indican que tenemos una eficiencia de 5-10% en la remoción de DBO5, del 15-30% de solidos suspendidos (SS) y de 5-15% de turbidez.

2.2.2. Trampa de grasas

Según Ayquipa (2021), el diseño de una trampa de grasas se basa en las siguientes formulas y parámetros de diseño:

La velocidad de ascensión de partículas debe ser igual a 4mm/s.

El tiempo de retención para un caudal menor a 2(L/s) es de 3 min. Debe tener una Relación 2:1 la cual significa la proporción entre las dimensiones geométricas de cierto tratamiento es decir que el largo debe ser dos veces mayor que su ancho para cumplir parámetros de diseño.

Fórmula 8 de volumen:

$$Vol = Q * trh$$

Donde:

Vol= volumen

Q= caudal

Trh= tiempo de retorno

Fórmula 9 Base de trampa:

$$\mathrm{B} = \sqrt{(\frac{2}{3} \cdot A)}$$

Donde:

B= base

A= área

Fórmula 10 largo:

$$L = \frac{3}{2} \cdot B$$

Donde:

L=largo

B=base

Fórmula 11 altura:

$$H = \frac{Vol}{A}$$

Donde:

H=altura

Vol=volumen

A=área

Cumplir diseño relación 2:1

La eficiencia de remoción obtenida para un DBO5 de 5-20%, solidos suspendidos de un 10-30% y turbidez de 5-10%.2.2.3 Sedimentador

Para el diseño de sedimentador, además de las formulaciones propies del diseño, Lozano-Mendoza et al. (2025) indica la importancia de verificar que el número de Reynolds sea inferior a 20,000 para garantizar que el flujo sea laminar (ordenado y predecible). Esto asegura que las partículas tengan tiempo suficiente para sedimentar sin ser arrastradas por turbulencias.

Fórmula 12 Reynolds:

$$\mathrm{Re} = \frac{V \cdot D_h}{v}$$

Donde:

V = velocidad del flujo (m/s)

Dh= diámetro hidráulico o profundidad efectiva del sedimentador (m)

ν = viscosidad cinemática del agua (m^2/s) (~1.0 x 10^{-6} m^2/s para agua a 20°C)

De igual manera se debe verificar que el número de Froude pertenezca a un flujo estable, que no se vea afectado por pequeñas perturbaciones gravitacionales, se busca que sea mayor que $1*10^{-5}$.

Fórmula 13 Froude:

$$\mathrm{Fr} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D_h}}$$

Donde:

V = velocidad del flujo (m/s)

g = aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

Dh = profundidad hidráulica del sedimentador (m)

Fórmula 14 TRH:

$$TRH = \frac{Q}{Vol}$$

Donde:

TRH=tiempo de retención

Q=caudal

Vol=volumen

Para la eficiencia de remoción en este tratamiento, se da un porcentaje de remoción teórico el cual es de 5-20% para DBO5, 50-70% para (ss), 30-60% de turbidez y de un 5-20% de coliformes fecales.

2.2.3. Filtración

Según Benitez Mendoza & Gonzales Aviles. (2024), un filtro de carbón activado es un dispositivo de tratamiento terciario diseñado para remover compuestos orgánicos, contaminantes químicos, sólidos finos y eliminar olores y sabores del agua.

Para este proceso se utiliza formulas similares a los procesos anteriores se utilizará la Fórmula 3 para el cálculo de su Área, cálculo de volumen y tiempo de retorno con una altura recomendada de 0.55m. En este caso tenemos tipos de filtros ya sean por velocidad entre lentos y rápidos o el medio filtrante que se utiliza. Para este caso de estudio se ha escogido un filtro rápido de arena y carbón el cual va contar con 40cm de arena fina, 5cm de carbón activado y 5cm de grava fina.

La eficiencia de remoción en este proceso es alta Herrera y García (2021), nos indica que el porcentaje de remoción para DBO5 es de 80-95%, para (ss) de 90-95%, turbidez de 85- 98% y coliformes fecales de 90-99.9%.

2.2.4. Cloración por goteo

Para el proceso de cloración, Metcalf & Eddy. (2003), afirma que este proceso consiste en añadir una solución de cloro concentrado de forma continua o intermitente al flujo de agua, permitiendo un tiempo de contacto adecuado para lograr la oxidación de contaminantes orgánicos y la destrucción de organismos como bacterias, virus y protozoos.

Fórmula 15 dosificación de cloro:

$$q = \frac{D \cdot Q}{d}$$

Donde:

D = Dosis requerida (mg/L)

Q = Caudal de agua (L/h)

d = Concentración de solución madre (mg/L)

Fórmula 16 cantidad de solución madre para caudal:

$$C = \frac{q \cdot 24}{1000}$$

La eficiencia de remoción de este tratamiento presenta eficiencias de remoción para un DBO5 5-10%, de 0% para (SS), de 5-10% para turbidez y de 99.9% para coliformes fecales.

2.3. Tratamiento de agua residual basado en la naturaleza

Las soluciones basadas en la naturaleza (SBN) se definen como estrategias diseñadas para proteger, gestionar y restaurar ecosistemas con el objetivo de proporcionar beneficios tanto al medio ambiente como a las comunidades (Mora et al., 2023).Estas soluciones son especialmente útiles para abordar problemas relacionados con el cambio climático, la seguridad hídrica y la gestión sostenible de las zonas urbanas (Quevedo & Sotomayor, 2023). Estos sistemas son más sostenibles en términos de costos y energía, pero requieren grandes áreas de terreno y pueden tener limitaciones en cuanto a la velocidad del tratamiento (Meléndez, Lemos, Domínguez, & Oviedo, 2019).

Las (SBN) ofrecen beneficios significativos, como una mayor eficiencia en el uso de recursos, simplicidad operativa y un impacto positivo en la biodiversidad (Agudelo et al., 2020). Además, contribuyen a integrar el entorno natural en espacios urbanos, transformando áreas verdes en zonas funcionales y sostenibles.

El tratamiento de aguas residuales a través de métodos basados en la naturaleza fundamenta procesos que eliminan contaminantes presentes en el agua mediante mecanismos físicos, como la filtración; procesos químicos, como la adsorción y reacciones específicas; y procesos biológicos. A medida que el agua atraviesa el medio filtrante, se desarrollan distintas interacciones microbianas que contribuyen a la depuración del recurso hídrico.

Las (SBN) ofrecen un rendimiento similar o ligeramente superior en la eliminación de ciertos parámetros. Estos sistemas muestran una capacidad significativa para remover nutrientes, con eficiencias que varían dependiendo del diseño y la vegetación utilizada. Sin embargo, su rendimiento puede fluctuar debido a factores climáticos y biológicos, lo que hace que, aunque sean más sostenibles y de menor consumo energético, puedan requerir un tiempo de estabilización mayor en comparación con los métodos convencionales (Mora et al., 2023).

2.3.1. Muro verde

Como caso de estudio los muros verdes, también denominados fachadas vegetales o sistemas de biofiltración vertical, son infraestructuras ecológicas diseñadas para integrar vegetación en superficies verticales mediante sistemas modulares. Estos sistemas pueden clasificarse en muros verdes adheridos, que utilizan sustratos o paneles modulares, y fachadas verdes, que emplean plantas trepadoras con estructuras de soporte (Pérez et al., 2013).

Como (SBN), los muros verdes mejoran la calidad ambiental al mitigar el efecto de isla de calor, reducir la contaminación del aire y gestionar eficientemente el agua de lluvia mediante su retención y filtración (López, M. y Montesinos, V., 2020). Además, su implementación en edificaciones contribuye al aislamiento térmico y acústico, generando ahorros energéticos y promoviendo la sostenibilidad urbana.

Diversos estudios han evaluado la eficiencia de los sistemas basados en la naturaleza en la remoción de contaminantes clave presentes en las aguas residuales. Entre los parámetros más relevantes se encuentran la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), el nitrógeno total (N) y el fósforo total (P), cuya reducción es fundamental para garantizar la calidad del agua tratada. La siguiente Tabla 3 presenta un resumen de la eficiencia de diseños según sus tipos de plantas y especificaciones sistemas de tratamiento natural de tipo muro verde:

Tabla 3: Diseño y eficiencia de plantas

PLANTAS

BIBLIOGRAFIA	PLANTAS	SUSTRATO	DBO	SST	TURBIDEZ	C.FECALES
ADDO-BANKAS ET AL.	Epipremnum aureum (Potos dorado), Asparagus sprengeri (Espárrago ornamental), Begonia tuberhybrida (Begonia tuberosa)	Perlita y fibra de coco. Combinaciones efectivas: 50/50 leca (arcilla expandida) + fibra coco y LECA con arena	70% en 6 horas, 85% en 24 horas y hasta 97.1% con biopelícula	80-90% Estas remociones dependen del sustrato utilizado, la formación de biopelícula, y el tiempo de retención hidráulica.	Más del 70% en diseños efectivos	-
BRESCIANI & MASI	-	LECA 0-2mm + arena fina de 1-2mm	80-90%	80-90%	-	Hasta 90%
MENDOZA	Lirio, aptenia cordifolia, nephrolepis obliterata	fibra + perlita y Fibra de coco + perlita + aditivos (biocarbón, compost, poliacrilato, carbón activado granular)	65.7% solo, 95% con aditivos (fibra+perlita+biocarbón) y (Aptenia y Nephrolepis)> 96.1%	64%	57.2% y (Aptenia y Nephrolepis) >96.7%	100% con buena biopelícula, plantas adecuadas, mantener pH de agua entre 6.5 y 8.5 para eficiencia de DBO

Fuente: (Addo-Bankas et al., 2021; Bresciani & Masi, 2015; Mendoza, 2023)

Se observa que la eficiencia de eliminación de contaminantes en sistemas basados en plantas varía según las condiciones operativas, el tipo de sustrato y las especies vegetales utilizadas. En términos generales, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) muestra una alta eficiencia de eliminación, con valores que oscilan entre el 95 % y el 98 % en algunos estudios. De manera similar, la demanda química de oxígeno (DQO) alcanza valores de remoción superiores al 96 %, lo que indica una significativa reducción de la materia orgánica biodegradable.

En cuanto a los nutrientes, el nitrógeno total (TN) presenta una variabilidad considerable en su eliminación, con rangos entre el 7 % y el 92 %, lo que sugiere que la eficiencia depende en gran medida de los procesos biológicos involucrados y las condiciones ambientales del sistema. Por otro lado, la remoción de fósforo total (TP) es también variable, con valores entre el 13 % y el 99

%, lo que puede estar influenciado por la composición del sustrato y la capacidad de adsorción de los materiales utilizados.

- Metodología de diseño

Los sistemas de paredes verdes requieren un diseño adecuado para optimizar la eliminación de contaminantes, incluyendo la selección de sustratos y especies vegetales, así como la configuración hidráulica para maximizar la eficiencia de remoción (Fowdar et al., 2017).

Al igual que en el sistema convencional, este enfoque también incluye etapas previas de pretratamiento, tratamiento primario y terciario, las cuales utilizan las mismas fórmulas y criterios técnicos previamente desarrollados para unidades como la rejilla, trampa de grasas y cloración.

A continuación, se presenta el diseño específico del muro verde:

Fórmula 17 Área requerida:

$$A = \frac{(\frac{Q \cdot 46800}{1000})}{HLR}$$

Donde:

Q= caudal

HLR= Carga hidráulica recomendada

Fórmula 18 largo modulo:

$$L = \frac{A}{Cm \cdot Am}$$

Donde:

A=área requerida

Cm=cantidad de módulo

Am=altura módulo

Fórmula 19 volumen de sustrato

$$Vs = Am \cdot L \cdot As$$

Donde:

Vs= Volumen sustrato

Am= altura del modulo

L=largo

As=altura del sustrato

Fórmula 20 área por planta:

$$Ap = Esp \cdot Esp$$

Donde:

Ap=área por planta

Esp=espacio efectivo entre plantas

Formula 21 plantas por modulo:

$$Pm = \frac{Area\ modulo}{Ap}$$

Pm=plantas por modulo

Ap=área por planta

Fórmula 22 goteros por modulo:

$$Gm = \frac{L}{espaciamiento\ goteros}$$

Donde:

L=largo

Fórmula 23 volumen por sesión:

$$Vs = \frac{Q}{seciones\ al\ dia}$$

Donde:

Q=caudal

Fórmula 24 Tiempo total ciclo:

$$Tc = (duracion\ x\ sesion \cdot sesion\ del\ dia) + total\ horas\ descanso$$

La eficiencia de remoción para un muro verde varía según sus diseños en este caso la literatura de Fowdar et al. (2017), nos indica un porcentaje de remoción de DBO5 de un 80-96%, de (ss) un 80-90% de turbidez de un 70-96% y de coliformes fecales de un 95%.

2.3.2. Plantas y sustrato

A continuación, se detallan diferentes plantas trepadoras aptas para ser incorporadas al muro verde. Aptenia es altamente tolerante a la sequía y prospera en suelos bien drenados con exposición solar directa o parcial. Su capacidad para cubrir rápidamente superficies la hace ideal para muros verdes, contribuyendo a la retención de humedad y a la reducción de la erosión del sustrato. En el clima de Cuenca, con temperaturas promedio de 14.7 °C y una humedad relativa del 69%, esta especie se adapta favorablemente, requiriendo un mantenimiento mínimo y ofreciendo una cobertura vegetal densa y atractiva (Alvarado, L., Andrea L.2019).

El Nephrolepis exaltata, conocido como helecho espada, es una planta perenne que prospera en ambientes con alta humedad y temperaturas moderadas. Investigaciones han evidenciado su capacidad para adaptarse a diferentes niveles de humedad y temperatura, lo que la hace adecuada para interiores y exteriores en climas como el de Cuenca. Además, su denso follaje contribuye a la mejora de la calidad del aire y proporciona una excelente cobertura en muros verdes (Alvarado, L., Andrea L.2019).

El Epipremnum aureum, comúnmente conocido como potus, es una liana perenne originaria del sudeste asiático. Su adaptabilidad a diversas condiciones de luz y su resistencia a temperaturas variables la han convertido en una planta popular para interiores y exteriores. En el clima de Cuenca, su capacidad para prosperar en ambientes con alta humedad y temperaturas moderadas la hace ideal para sistemas de muros verdes, contribuyendo a la purificación del aire y al embellecimiento del entorno (Jiménez & Acosta, 1997).

El Eucharis grandiflora, conocido como lirio del Amazonas, es una planta bulbosa perenne nativa del oeste de Colombia y Ecuador. Prefiere ambientes cálidos con alta humedad y luz indirecta, condiciones presentes en Cuenca. Además de su valor ornamental, esta especie ha sido utilizada en la medicina tradicional para tratar diversas afecciones, lo que resalta su importancia ecológica y cultural (Alvarado, L., Andrea L.2019).

El uso de un sustrato adecuado es importante ya que proporciona soporte físico a las plantas, facilita la retención de humedad y actúa como un medio para la adsorción y filtración de contaminantes presentes en las aguas grises. Una mezcla adecuada de componentes como bicarbonato, fibra de coco y perlita asegura una estructura estable, promueve la actividad microbiana beneficiosa y evita la compactación, garantizando así un tratamiento eficiente y sostenible a largo plazo.

El bicarbon, también conocido como bicarbonato de calcio, es un componente que ayuda a estabilizar el pH del sustrato, evitando que se vuelva demasiado ácido o alcalino, lo que podría afectar negativamente el crecimiento de las plantas. Además, el bicarbon es conocido por su capacidad para mejorar la retención de nutrientes y promover la formación de una estructura porosa, permitiendo una adecuada aireación de las raíces y el intercambio de gases esenciales para el metabolismo vegetal (Pellicer C. & Rincón L., 2005).

La fibra de coco es un sustrato orgánico altamente valorado en sistemas hidropónicos y verticales debido a su alta capacidad de retención de agua (hasta 8 veces su peso) y su excelente capacidad de aireación. Esto permite que las raíces de las plantas se mantengan hidratadas sin riesgo de asfixia radicular, promoviendo un crecimiento vigoroso y saludable. Además, la fibra de coco es un material sostenible, biodegradable y naturalmente resistente a plagas y enfermedades, lo que reduce la necesidad de pesticidas y tratamientos químicos adicionales (Puerta et al., 2012).

Por último, la perlita es un mineral volcánico expandido que actúa como un excelente agente aireador y drenante. Es ligera, estéril y no se descompone con el tiempo, lo que garantiza una estructura estable para las raíces a largo plazo. La perlita también ayuda a evitar el compactación del sustrato, mejorando la oxigenación de las raíces y facilitando el drenaje del exceso de agua, lo que es fundamental en sistemas verticales para evitar la saturación y la acumulación de agua estancada (Muñoz, 2007).

2.4. Métodos de evaluación de caudales de agua lluvia

El método racional es una simplificación del proceso precipitación-escorrentía que se usa para determinar el caudal máximo de descarga en cuencas hidrográficas. Para la evaluación de los sistemas de reutilización de agua lluvia, se puede considerar como cuenca hidrográfica el área de captación de agua lluvia en época de lluvia. De esta manera, se puede estimar el caudal disponible para estos sistemas.

Este método permite determinar el caudal pico de escorrentía a partir de la intensidad de precipitación, el coeficiente de escorrentía y el área de la cuenca, a través de la ecuación:

$$Q=C\cdot I\cdot A$$

Donde:

Q representa el caudal de escorrentía (L/s o m^3/s),

C es un coeficiente adimensional que refleja la capacidad de infiltración del suelo,

I es la intensidad de precipitación (mm/h)

A es el área de drenaje (ha o km²).

Por otro lado, para analizar el comportamiento del agua subterránea en el área de estudio, se recurrió a la evaluación de abatimientos. El agua subterránea es aquella que se encuentra almacenada en los poros y fracturas del subsuelo, formando acuíferos que pueden ser explotados para diversos usos. Su origen proviene de la infiltración de precipitaciones, ríos o lagos, y su movimiento está controlado por factores como la permeabilidad del suelo, la porosidad del medio y la presión hidrostática (Serrano, M., Guzmán, A., 2014).

El abatimiento del nivel freático es un fenómeno que ocurre cuando la extracción de agua subterránea mediante pozos o drenajes genera un descenso en la superficie piezométrica, formando un cono de depresión alrededor del punto de extracción (Serrano, M., Guzmán, A., 2014). Este análisis ayudó a conocer la oferta disponible que tenemos con este recurso hídrico.

2.5. Normativa y requerimientos

La normativa y los requerimientos para el proceso de tratamiento de aguas residuales varían según la región, pero generalmente los procesos de prevención, control y seguimiento de la contaminación se realiza por el Ministerio del Ambiente y por delegación, los gobiernos autónomos descentralizados provinciales, metropolitanos y/o municipales acreditados (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2017). Estas normativas especifican los límites permitidos para contaminantes en el agua tratada y establecen requisitos sobre el tipo de tratamiento necesario para diferentes tipos de usos, como el riego agrícola o el uso industrial.

El reúso de aguas grises para aplicaciones no potables, como la descarga de inodoros, se encuentra regulado de manera diferenciada en distintos países. En Ecuador, actualmente no existe una normativa específica que establezca los requisitos de calidad del agua para este tipo de reúso. La normativa ecuatoriana se enfoca principalmente en el tratamiento de agua potable mas no en parámetros específicos para el uso en inodoros. Debido a esta ausencia regulatoria, es necesario recurrir a normativas internacionales que han desarrollado estándares de calidad del agua para este propósito.

En Estados Unidos, la Environmental Protection Agency (EPA) ha establecido lineamientos sobre la reutilización de aguas residuales tratadas, los cuales incluyen recomendaciones para su uso en sistemas de descarga de inodoros. Según la (U.S. Environmental Protection Agency & U.S.

Agency for International Development, 2012), la calidad del agua para este tipo de reúso debe cumplir con criterios microbiológicos y físico-químicos que garanticen la salud pública. La EPA define el agua reutilizada como "agua residual tratada que ha sido procesada y desinfectada para cumplir con estándares específicos de calidad, permitiendo su uso en aplicaciones no potables como riego, descarga de inodoros y procesos industriales" (U.S. Environmental Protection Agency & U.S. Agency for International Development, 2012). Entre los parámetros más relevantes que establece la EPA para este tipo de reúso se encuentran los límites de turbidez (<2 NTU), sólidos suspendidos totales (<10 mg/L) y coliformes fecales (<200 UFC/100 mL), asegurando así un nivel de calidad adecuado para su implementación segura.

En el ámbito urbano, el reúso de agua puede clasificarse en aplicaciones restringidas y no restringidas, dependiendo del nivel de exposición humana. En la Tabla 4 podemos observar que, para cada categoría se establecen criterios de tratamiento, como la necesidad de desinfección y filtración, así como límites de calidad en términos de pH, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), turbidez y presencia de coliformes fecales.

Tabla 4: Directrices sugeridas para reutilización de agua

DIRECTRICES SUGERIDAS PARA REUTILIZACION DE AGUA

Categoría de Reúso y Descripción	Tratamiento	Calidad del Agua Reclamada	Monitoreo del Agua Reclamada	Distancia de Separación
Sin restricciones: Uso del agua tratada en aplicaciones no potables en entornos municipales donde el acceso público no está restringido.	- Tratamiento secundario- Filtración- Desinfección	- pH: 6.0 a 9.0- DBO_5 ≤ 10 mg/L- Turbidez ≤ 2 NTU- Coliformes fecales: no detectables en 100 mL- Cloro residual: 1 mg/L	- pH: semanal- DBO_5: semanal- Turbidez: continuo- Coliformes fecales: diario- Cloro residual: continuo	15 m (50 pies) a pozos de agua potable30 m (100 pies) si están en medios porosos
Con restricciones: Uso del agua tratada en aplicaciones no potables donde el acceso está restringido mediante barreras físicas o institucionales como cercas, señalización o controles temporales.	- Tratamiento secundario- Desinfección	- pH: 6.0 a 9.0- DBO_5 ≤ 30 mg/L- SST ≤ 30 mg/L- Coliformes totales ≤ 200 / 100 mL- Cloro residual: 1 mg/L	- pH: semanal- DBO_5: semanal- SST: diario- Coliformes: diario- Cloro residual: continuo	90 m (300 pies) a pozos de agua potable30 m (100 pies) a áreas accesibles al público (si hay riego por aspersión)
La filtración puede omitirse si el tratamiento secundario avanzado logra cumplir con los límites de turbidez.				
La medición de cloro residual debe ser continua para garantizar desinfección efectiva.				
Estas directrices corresponden a los estándares de la EPA de EE.UU. para reúso urbano no potable.				

Fuente: (U.S. Environmental Protection Agency & U.S. Agency for International Development, 2012)

Según esta tabla para aplicaciones sin restricciones, se requiere un tratamiento más avanzado con filtración y desinfección, asegurando una alta calidad del agua con baja turbidez, DBO ≤10 mg/L y ausencia de coliformes fecales. En usos restringidos, donde el acceso público es controlado, se permiten valores más altos de DBO (≤30 mg/L) y coliformes fecales (≤200 UFC/100 mL), con mayores distancias de seguridad respecto a fuentes de agua potable. Estos criterios garantizan un reúso seguro y eficiente.

Por otro lado, la normativa europea, específicamente la Directiva 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo, establece requisitos mínimos para la reutilización de aguas en distintos sectores, incluyendo el riego agrícola y usos urbanos. Aunque la directiva no regula explícitamente el uso en descarga de inodoros, proporciona criterios de calidad basados en la clasificación del agua según su nivel de tratamiento. Según esta normativa, "las aguas reutilizadas deben cumplir con estándares microbiológicos y de calidad química que minimicen riesgos para la salud humana y el medio ambiente, asegurando un control riguroso del proceso de tratamiento"(Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2020). Para aplicaciones urbanas, Tabla 5 indica ciertos criterios de calidad para la reutilización de agua:

Tabla 5: Criterios de calidad para la reutilización de aguas grises según sus usos

Criterio de calidad para la reutilización de aguas grises usos urbanos					
Uso delagua previsto	**Valor maximo admisible (VMA)**				
	Nematodos Intestinales	**Escherichia coli**	**Sólidos en Suspensión**	**Turbidez**	**Otros Criterios**
CALIDAD 1.1: RESIDENCIAL a) Riego de jardines privados b) Descarga de aparatos sanitarios	1 huevo/10 L	0 (UFC/100 mL)	10 mg/L	2 UNT	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente.En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. Legionella spp. 100 UFC/L (si existe riesgo de aerosolización)
CALIDAD 1.2: SERVICIOS a) Riego de zonas verdes urbanas b) Baldeo de calles c) Sistemas contra incendios d) Lavado industrial de vehículos	1 huevo/10 L	200 UFC/100 mL	20 mg/L	10 UNT	

Fuente: (Enze, Comeau, 2008)

En la tabla se presentan los valores máximos admisibles para el reúso de agua en usos urbanos según la normativa europea, dividiendo los criterios en calidad residencial (1.1) y calidad para servicios (1.2). Para aplicaciones residenciales, como el riego de jardines y la descarga de inodoros, se exige una calidad más estricta, con turbidez ≤2 UNT, ausencia de Escherichia coli y sólidos en suspensión ≤10 mg/L. Para usos en servicios, como el riego de parques, baldeo de calles y lavado de vehículos, se permite un límite más flexible de E. coli (≤200 UFC/100 mL) y turbidez ≤10 UNT. Además, se establecen controles sobre otros contaminantes, garantizando un reúso seguro en ambientes urbanos.

La literatura ha establecido estándares que regulan los parámetros físico-químicos y microbiológicos del agua reutilizada para garantizar su uso seguro en aplicaciones no potables. A continuación, la Tabla 6 ofrece información detallada sobre los límites aceptables de distintos componentes físico-químicos y microbiológicos para uso en descarga de inodoros hasta legar a los siguientes valores:

Tabla 6: Parámetro contaminantes y mínimos exigidos para riego e inodoros

Parámetro	Medida	Aguas grises	Inodoros	Riego	Reducción
DBO_5	mg/litro	55	≤10	<25	81.8
DQO	mg/litro	110	-	-	-
SS	mg/litro	42	≤10	<25	76.2
Turbidez	NTU	≥ 4	≤2	≤2	≥ 50
pH	-	7.36	6-9	6-9	-
N total	mg/litro	8.7	-	-	-
P total	mg/litro	2.3	-	-	-
Coli. Fecal.	Ud/100ml	-	0	≤200	-
Nematodos	Ud/litro	-	0	≤1	-

Fuente: (Bermejo, 2012)

Se muestran los parámetros contaminantes y los valores mínimos exigidos para el reúso de aguas grises en inodoros y riego, según Bermejo (2012). Se establecen límites para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), los sólidos suspendidos (SS), la turbidez y la presencia de microorganismos como coliformes fecales y nemátodos. En el caso del reúso en inodoros, se requiere una reducción significativa de la carga orgánica, con valores de DBO_5 ≤10 mg/L, SS ≤10 mg/L y turbidez ≤2 NTU, asegurando una calidad adecuada para su uso. Para el riego, se permiten límites más flexibles, con DBO_5 <25 mg/L y presencia de coliformes fecales ≤200 UFC/100 mL.

Estos criterios reflejan la importancia del tratamiento adecuado de las aguas grises antes de su reutilización, garantizando la reducción de contaminantes y minimizando riesgos para la salud y el medio ambiente.

3. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

El edificio C1 (Figura 3), objeto de estudio, se encuentra dentro del predio de la Universidad del Azuay, en la dirección Av. 24 de mayo 7-77 y, Cuenca. Este fue remodelado en el año 2023, lo que asegura que su infraestructura se encuentra en óptimas condiciones. Arquitectónicamente, se compone de 3 pisos: la planta baja con siete aulas; el primero piso con seis aulas, una oficina y una sala de reuniones y el segundo piso con dos salas de reuniones y una terraza, todas las aulas tienen una capacidad de 30 personas aproximadamente.

Figura 3: Mapa campus Universidad del Azuay

Fuente:(Página web Universidad del Azuay, 2025)

Respecto a las baterías sanitarias, consta de dos independientes para hombres y mujeres en cada piso, un ascensor y dos lavamanos en salas de reuniones. Actualmente, las redes de abastecimiento de agua del edificio están conformadas por dos sistemas principales, una red de abastecimiento de

agua potable destinada al suministro de lavamanos ubicados en los baños y en salas de reuniones y una red diseñada para la recirculación de agua que abastece a los sanitarios y urinarios; esta última es alimentada con agua potable debido a la ausencia de un sistema de reutilización de agua implementado en el edificio.

La red de suministro de agua potable, consta de tuberías destinadas al abastecimiento de los lavamanos con un diámetro de 50 mm (2 pulgadas); por otro lado, las tuberías que abastecen a los sanitarios poseen un diámetro de 40 mm (1 1/2 pulgadas).

El detalle de todas las baterías sanitarias se detalla a continuación:

Tabla 7: Descripción especificaciones baterías sanitarias hombres del edificio C1

No. de piso	Cantidad	Aparato sanitario
Planta baja	1	Inodoro con tanque de doble descarga
	0	Urinario con botón para descarga
1era planta	1	Inodoro con tanque de doble descarga
	2	Urinario con botón para descarga
2da planta	1	Inodoro con tanque de doble descarga
	2	Urinario con botón para descarga

Fuente: (Autor, 2025)

Tabla 8: Descripción especificaciones baterías sanitarias hombres del edificio C1

No. de piso	Cantidad	Aparato sanitario
Planta baja	1	Lavamanos con grifería mono comando
1era planta	1	Lavamanos con grifería mono comando
2da planta	1	Lavamanos con grifería mono comando

Fuente: (Autor, 2025)

Tabla 9: Descripción especificaciones baterías sanitarias mujeres del edificio C1

No. de piso	Cantidad	Aparato sanitario
Planta baja	1	Inodoro con tanque de doble descarga
1era planta	1	Inodoro con tanque de doble descarga
2da planta	1	Inodoro con tanque de doble descarga

Fuente: (Autor, 2025)

Tabla 10: Descripción especificaciones baterías sanitarias mujeres del edificio C1

No. de piso	Cantidad	Aparato sanitario
Planta baja	1	Lavamanos con grifería mono comando

1era planta	1	Lavamanos con grifería mono comando
2da planta	1	Lavamanos con grifería mono comando

Fuente:(Autor, 2025)

Tabla 11: Descripción especificaciones baterías sanitarias sala de reuniones del edificio C1

No. de piso	Cantidad	Aparato sanitario
Planta baja	0	Lavamanos con grifería mono comando
1era planta	1	Lavamanos con grifería mono comando
2da planta	1	Lavamanos con grifería mono comando

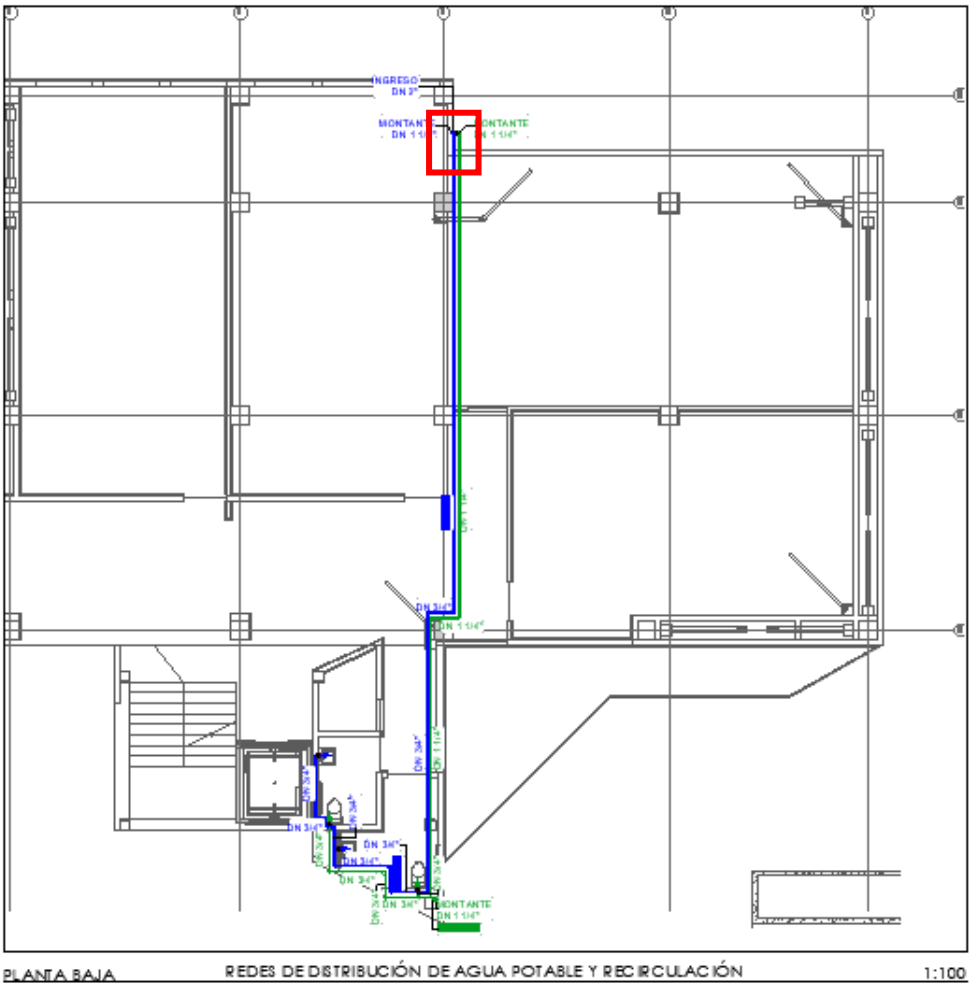
Fuente:(Autor, 2025)

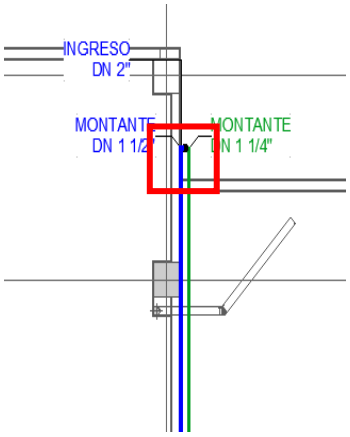
3.2. Dispositivos de medición y lectura

Se instalaron contadores de agua en las dos redes mencionadas con el objetivo de medir la demanda y oferta existente. Para este fin, se realizaron reducciones en las tuberías a 32 mm (1 pulgada), para adaptar el diámetro a los medidores empleados. Esta adecuación se implementó por parte de los autores, constituyéndose como un accesorio nuevo que complementa la infraestructura existente del edificio C1. Los puntos de instalación de los contadores están ubicados en la planta baja, lugar donde inicia la red de distribución de agua potable a todos los pisos (Figura 4). Este lugar fue considerado por ser el punto clave para tener un registro general de los volúmenes de agua potable requeridos.

La recopilación de datos luego de la implementación de los accesorios de medición fue de 5 meses, registrando información durante los 5 días laborables, una vez por día, usando una matriz de recopilación de datos, siendo la población usuaria las personas que usan el edificio en su máxima capacidad, con un aproximado de 550 personas.

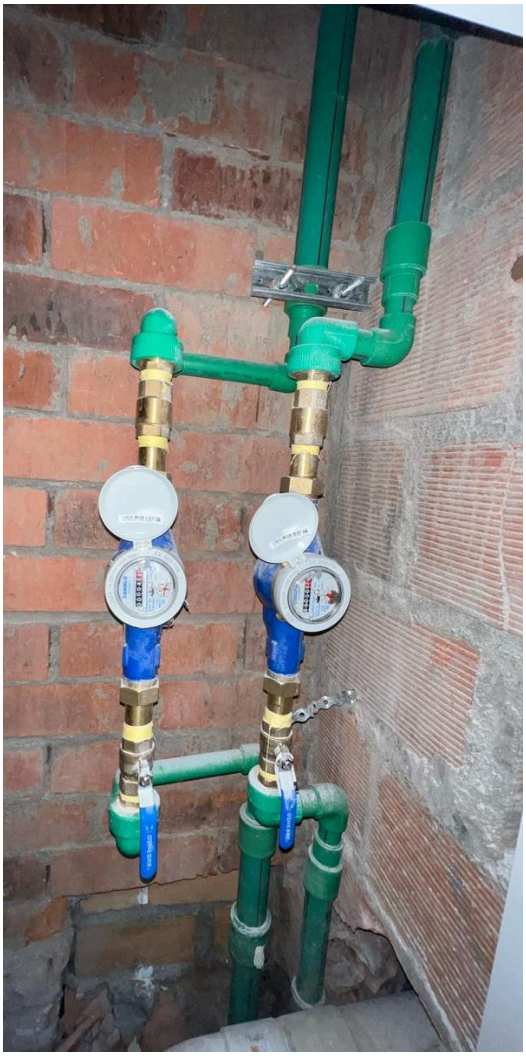
Figura 4: Ubicación contadores de agua en planos as-built





Fuente: (UDA CIVIL)

Figura 5: Contadores de agua



Fuente: (Autor, 2025)

3.3. Métodos aplicados para la recolección de datos sobre consumo de agua potable

Durante el período de recolección de datos, la información fue procesada de manera progresiva, lo que permitió identificar una tendencia preliminar en la demanda de agua potable. Una vez concluida esta etapa, los resultados fueron refinados y analizados estadísticamente, obteniendo series de tiempo del promedio de caudales y una representación mensual del comportamiento de la oferta y demanda del recurso hídrico. Estos datos fueron fundamentales para el desarrollo del proyecto, ya que permitieron establecer la relación porcentual entre la oferta y la demanda, así como definir un porcentaje del caudal de diseño correspondiente a la reutilización de aguas grises en los sistemas de tratamiento propuestos.

Un aspecto crítico del análisis fue la variabilidad en la generación de aguas grises, considerando que la ocupación del edificio está condicionada por el calendario académico de la universidad. En este sentido, se identificó que la actividad en el edificio se distribuye principalmente de lunes a viernes, con un período anual efectivo de aproximadamente ocho meses. Adicionalmente, se contemplaron factores como la existencia de días no hábiles dentro de la jornada laboral y la flexibilidad en los horarios de uso de las aulas, elementos que inciden directamente en la disponibilidad y generación de aguas grises para su posterior tratamiento y reutilización.

3.4. Fuentes hídricas alternativas

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis detallado de la oferta hídrica proveniente de fuentes alternativas, como el agua pluvial y subterránea. La estimación del caudal de agua pluvial se realizó a partir de los registros de precipitaciones obtenidos por la estación meteorológica MACCARD – UDA perteneciente a la Universidad del Azuay en el marco del proyecto "Máster en Cambio Climático, Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible (MACCARD)" financiado por la Unión Europea dentro del programa Erasmus Plus. Esta estación está ubicada en el campus de la Facultad de Ciencia y Tecnología. A través de la aplicación del método racional, se calcularon los caudales diarios con base en la información recopilada, permitiendo cuantificar el potencial de aprovechamiento de esta fuente.

Figura 6: Estación Meteorológica MACCARD

Fuente:(Página web Universidad del Azuay, 2025)

En cuanto al agua subterránea, su disponibilidad fue determinada mediante el análisis de los volúmenes extraídos de un pozo ubicado dentro de la facultad, identificado como Pozo Tres (Figura 7). Los datos correspondientes fueron suministrados por el Departamento de UDA Civil y posteriormente procesados para la obtención de los caudales de extracción.

Figura 7: Ubicación Pozo tres

Fuente:(Google Maps 2025)

El procesamiento de esta información permitió realizar evaluaciones estadísticas, incluyendo pruebas de normalidad, detección de datos atípicos y análisis de series temporales de caudales promedios. Estos estudios facilitaron la caracterización del comportamiento climático en los últimos años y proporcionaron una visión integral de la relación entre la oferta hídrica y la

demanda, información clave para la planificación y optimización del sistema de reutilización de agua.

3.5. Caracterización del agua gris y sistemas de tratamientos

Para determinar con precisión la caracterización de las aguas grises, se realizó un análisis fisicoquímico y microbiológico en los laboratorios de la Universidad del Azuay. Este estudio permitió identificar los distintos compuestos y contaminantes presentes en el agua residual, proporcionando información esencial para la selección del tratamiento más adecuado con el objetivo de obtener agua tratada apta para usos no potables.

Se tomaron dos muestras de agua gris: una proveniente del sifón de los lavamanos del baño de hombres y otra del baño de mujeres. La recolección se llevó a cabo durante una jornada matutina desde las 8 am hasta las 12 pm, utilizando una cubeta para recopilar el agua gris generada en cada baño durante este periodo de tiempo, y luego fueron llevadas al laboratorio en recipientes aptos para cada estudio (esterilizados y no esterilizados) para su análisis. Este procedimiento garantizó la obtención de muestras compuestas, permitiendo un análisis más preciso y realista de las características del agua gris en ambos entornos.

Posteriormente, se procedió a la selección de tecnologías para el diseño del sistema de tratamiento de aguas grises, pluviales y subterráneas. Esta fase incluyó la aplicación de tecnologías probadas en la literatura para evaluar la eficiencia de los sistemas propuestos y optimizar su desempeño. El diseño se estructuró considerando las distintas etapas necesarias para garantizar que el agua tratada cumpla con los estándares de calidad establecidos para su reutilización en aplicaciones no potables.

En lo que respecta al sistema de tratamiento mediante SBNs, se optó por la implementación de un muro verde tras un análisis detallado de la literatura científica relacionada con este tipo de tecnologías. La selección se fundamentó en la evaluación de factores ambientales y de sostenibilidad específicos del contexto local, particularmente de la ciudad de Cuenca. Este análisis permitió concluir que el muro verde constituye la alternativa más adecuada para el tratamiento de aguas grises en el presente proyecto, al ofrecer una solución eficiente, ecológica y adaptable a entornos urbanos, contribuyendo así a una gestión integral y sostenible del recurso hídrico

4. ANÁLISIS DE LA OFERTA Y DEMANDA DE AGUA

Este capítulo presenta el análisis de la disponibilidad y demanda de agua en el edificio objeto de estudio, con el fin de establecer las bases para el diseño de sistemas de reutilización. Se considera

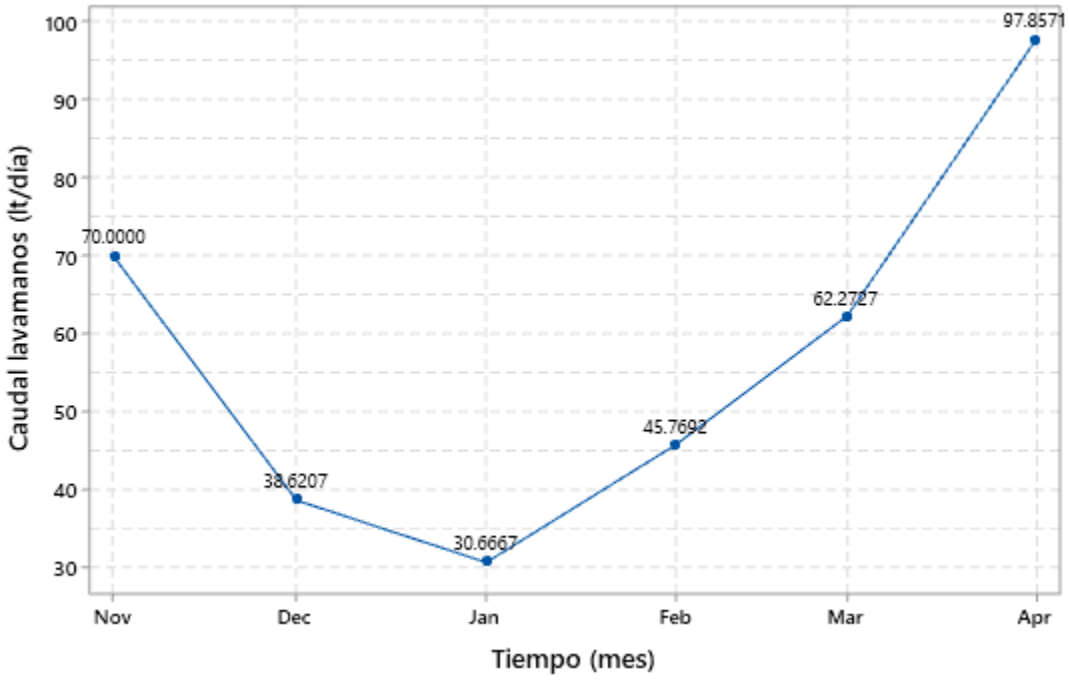
oferta hídrica a aquella proveniente de fuentes como aguas grises, agua pluvial y agua subterránea; y demanda de agua a aquella asociada al consumo de agua en sanitarios y urinarios. Este análisis permite comprender la relación entre oferta y demanda, aspecto esencial para el dimensionamiento de soluciones eficientes y sostenibles

4.1. Oferta y demanda de agua gris

4.1.1. Oferta de agua gris

La oferta de agua gris para este proyecto se refiere exclusivamente al agua proveniente de los lavamanos. Tal como se indicó en el subcapítulo 3.1, el edificio dispone de ocho lavamanos, los cuales constituyen la fuente de agua gris destinada a su reutilización. En la siguiente figura se muestra el caudal promedio mensual durante los meses en los que se recopiló la información de medición.

Figura 8: Gráfica serie de tiempo caudal promedio mensual de lavamanos (lt/día)



Fuente: (Autor, 2025)

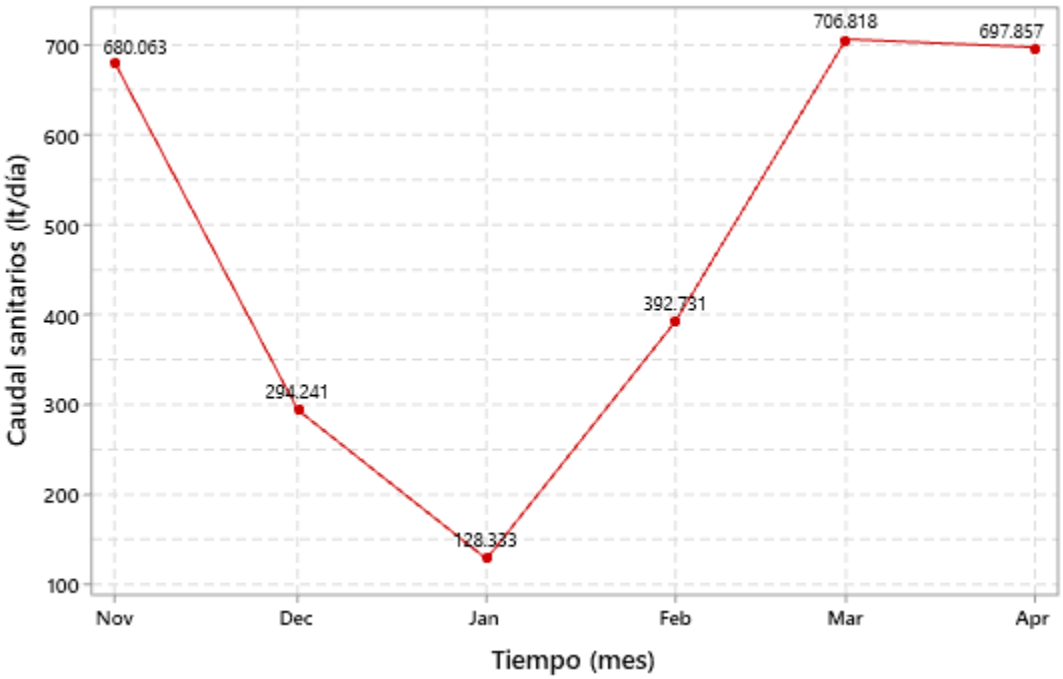
En la figura se observa que el mes de mayor oferta de agua gris (consumo de agua en lavamanos) es abril, con un caudal de 97.85 lt/día, mientras que el mes de menor consumo es enero, con un caudal de 30.66 lt/día y un promedio durante este periodo de tiempo de 51.75 lt/día. La interpretación de estos resultados sugiere que el incremento en noviembre se debe a la actividad

académica regular en la universidad, mientras que la reducción en enero se explica por la ausencia de clases regulares durante el período de vacaciones, a pesar de que la institución permaneció operativa.

4.1.2. Demanda de agua gris

En el siguiente apartado se encuentra el análisis de la demanda de agua gris, esta hace relación a los caudales provenientes de los sanitarios y urinarios del edificio, Tal como se indicó en el subcapítulo 3.1, existen 6 sanitarios y 4 urinarios que pertenecen a la demanda de agua gris en el edificio, a continuación, el resultado:

Figura 9: Gráfica de serie temporal del caudal promedio mensual de los sanitarios y urinarios (lt/día)



Fuente: (Autor, 2025)

En la siguiente gráfica (Figura 9) de serie temporal del caudal promedio mensual de los sanitarios y urinarios (demanda), expresado en litros por día, se observa que marzo registra la mayor demanda, con un valor de 706.81 lt/día, mientras que enero presenta la menor demanda, con 128.33 lt/día y con un promedio durante este periodo de tiempo de 429.16 lt/día. Este comportamiento se explica por la relación directa entre la actividad académica y el consumo de agua, evidenciando que la demanda es proporcional al período de funcionamiento regular de la universidad.

4.2. Análisis de la oferta de fuentes hídricas alternativas

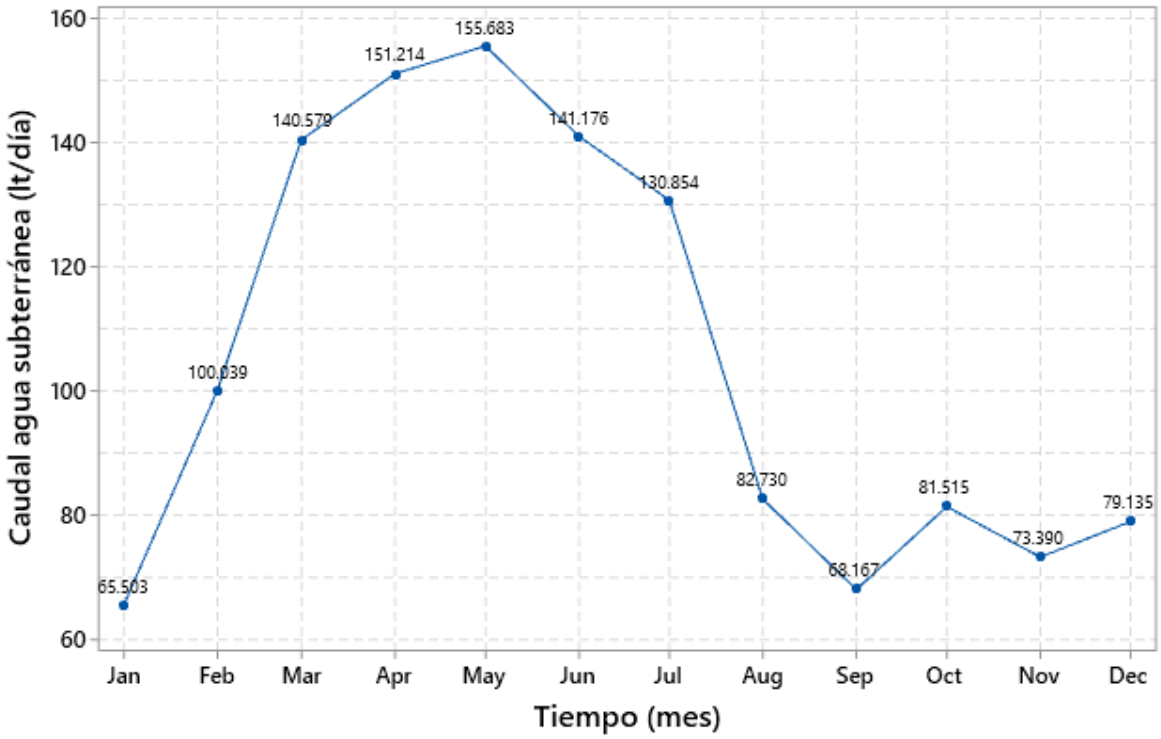
4.2.1. Agua subterránea

Este apartado expone el análisis de la disponibilidad de agua subterránea a partir de mediciones realizadas en el pozo 3 (Figura 7). A través de registros diarios obtenidos durante los años 2023 y 2024, así fue posible estimar los caudales extraídos y determinar el volumen de recurso disponible para su posible reutilización.

La aplicación de esta metodología permite una estimación de la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo, aspecto clave para evaluar su viabilidad en los sistemas de reutilización propuestos. El tratamiento estadístico previo de los datos posibilita verificar su validez y representatividad, asegurando que el comportamiento del caudal subterráneo sea estable, predecible y estadísticamente confiable. Esta etapa es esencial antes del cálculo de promedios o la construcción de series de tiempo, ya que garantiza una base sólida para el diseño hidráulico y el dimensionamiento técnico del sistema. Asimismo, este enfoque contribuye a una planificación más eficiente del aprovechamiento del recurso desde una perspectiva integral y sostenible

De esta manera, realizó un análisis estadístico de los caudales de agua subterránea extraídos, utilizando promedios mensuales durante un año, ya que no existe un registro continuo y completo desde el inicio de la lectura. Como paso inicial, se aplicó la prueba de normalidad de Anderson-Darling, con el fin de verificar si los datos cumplían con los supuestos necesarios para la aplicación de métodos estadísticos paramétricos en el análisis de consumo y disponibilidad hídrica. Los resultados indicaron una distribución normal (p-valor > 0.05), lo que permitió aplicar herramientas estadísticas descriptivas con validez técnica.

Figura 10: Serie de tiempo promedio caudal año agua subterránea (lt/día)



Fuente:(Autor, 2025)

El análisis en la gráfica de serie tiempo de caudal (Figura 10) en donde se muestra una variación estacional en el caudal a lo largo de un año (promedio de caudales por meses de la información disponible de los años 2023 y algunos meses del 2024). Se observa un incremento progresivo desde enero (65,50 lt/día) hasta alcanzar su punto máximo en junio (155,68 lt/día), lo que indica un aumento en la disponibilidad de agua en los primeros seis meses del año. A partir de julio, el caudal comienza a disminuir de forma constante, llegando a su nivel más bajo en noviembre (73,39 lt/día), seguido de una ligera recuperación en diciembre (79,13 lt/día). Esta tendencia podría estar relacionado con factores climáticos, de uso o disponibilidad del recurso hídrico en esta zona.

A partir del análisis de los datos disponibles, que comprenden el año completo 2023 y los meses de septiembre y octubre de 2024, y mediante el cálculo de promedios mensuales de caudal por año, se concluye que el mes de mayo presenta el mayor volumen de agua subterránea histórica (155.683 lt/día) en el Pozo 3, mientras que enero es el mes con el menor caudal registrado (65.503 lt/día) y finalmente el promedio anual es de 105.83 lt/día.

4.2.2. Agua pluvial

El método racional es uno de los métodos aplicables para el cálculo del caudal máximo de escorrentía en áreas de aporte pequeñas. como la cubierta del edificio C1 de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del Azuay. Este método permite estimar el caudal generado por las precipitaciones registradas. Con esta información, se puede determinar la cantidad de agua que se acumula en el área expuesta al agua lluvia. Al conocer el área de la cubierta y otros espacios aptos para albergar agua de lluvia incluyendo a la terraza, que totalizan 723.43 m², se utiliza el coeficiente de escorrentía C adecuado para reflejar las características de la superficie, la cual es impermeable, tiene una mínima rugosidad y drenaje eficiente. En este caso, se seleccionó un valor de (C = 0.9) debido a que la cubierta es mayormente impermeable, lo que implica que una alta proporción de las precipitaciones se convertirá en escorrentía superficial (Chow, 1988).

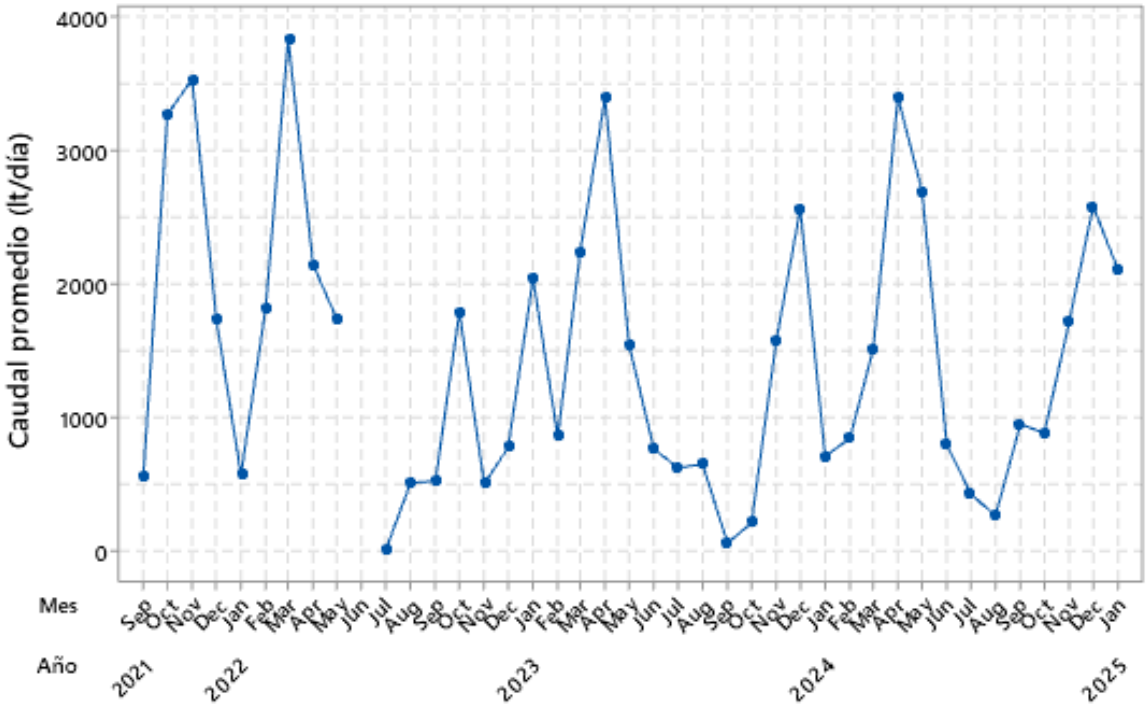
Con esta información, el método racional se aplica para calcular el caudal en litros por día, lo que permite estimar la cantidad de agua que se puede recolectar para el interés futuro de esta investigación. Destacando también que, la base de información sobre las precipitaciones presenta un vacío de información por un daño temporal en la estación meteorológica MACCARD-UDA, proporcionando así un registro y validez del 90% desde su inicio de funcionamiento; por lo que se verán en las figuras siguientes vacíos de dicha información. Con lo mencionado anteriormente, se obtuvieron los caudales litro por día de todos los datos de precipitación existentes. Los volúmenes de agua generados por MACCARD-UDA se encuentran en el Anexo 2, asimismo los caudales de estos en el Anexo 3.

En el caso del análisis de la oferta hídrica pluvial, se aplicaron procedimientos estadísticos preliminares con el objetivo de garantizar la calidad y confiabilidad de los datos antes de su uso en el diseño del sistema. Inicialmente, se utilizó la prueba de Grubbs para la detección de valores atípicos en la variable "Caudal (lt/día)", identificándose un valor extremo de 33.986,7 litros por día correspondiente al 18 de octubre de 2021. Al no existir evidencia de error instrumental o de registro, dicho valor fue conservado en el análisis.

Posteriormente, se aplicó la prueba de normalidad de Anderson-Darling sobre una muestra de 594 datos. Los resultados arrojaron un p-valor inferior al nivel de significancia ($p < 0.05$), lo que indica que la distribución de los caudales diarios no se ajusta a una distribución normal. Esta condición de asimetría justifica el uso de herramientas estadísticas no paramétricas para su caracterización. El análisis permitió establecer los valores máximos y mínimos registrados, con un mínimo de 65,1

litros por día y un máximo coincidente con el dato atípico previamente identificado. Este tratamiento estadístico previo resulta esencial para comprender la variabilidad del recurso pluvial y asegurar que su integración en el sistema de reutilización se fundamente en información robusta y representativa.

Figura 11: Gráfica de Serie de Tiempo de Caudal Promedio mensual (lt/día)



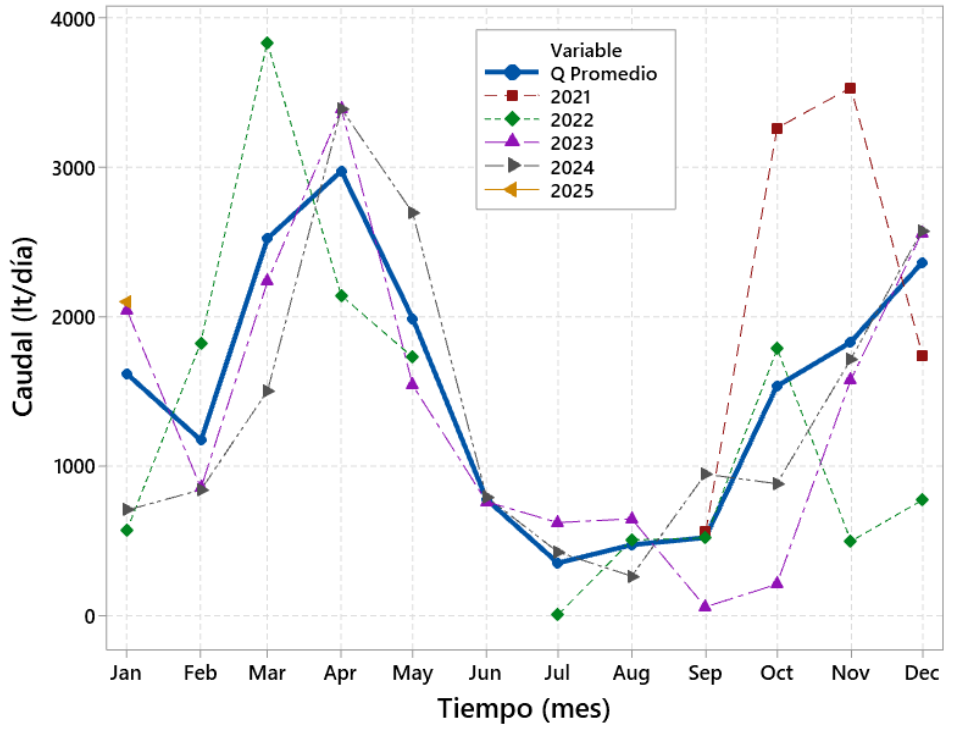
Fuente: (Autor, 2025)

Con los datos expresados en caudal diario (Anexo 6), se realizó un promedio mensual de los caudales diarios por mes, obteniendo una data de 41 valores de caudal (desde septiembre 2021 a enero 2025). Esta transformación se realizó con la finalidad de graficar de manera más clara e interpretativa los datos de los caudales. En la Figura 11 se presenta la gráfica de serie de tiempo para la variable "Caudal (lt/día)" en promedio mensual.

Cabe mencionar que el periodo de lecturas del pluviómetro va desde el mes de septiembre de 2021 a enero 2025. De 1232 días de lecturas, se tienen 1109 datos tomados con éxito, lo que significa un 90% de tomas son correctas. En este sentido, hay que destacar que existen gran cantidad de periodos donde no se realiza la toma de lecturas, destacando los meses de mayo, junio y julio de

2023 con un periodo sin lectura de datos por el daño temporal de la estación mencionado con anterioridad, reflejándose el vacío en la figura mencionada.

Figura 12: Gráfica serie de tiempo caudales promedios históricos de lluvia (lt/día)

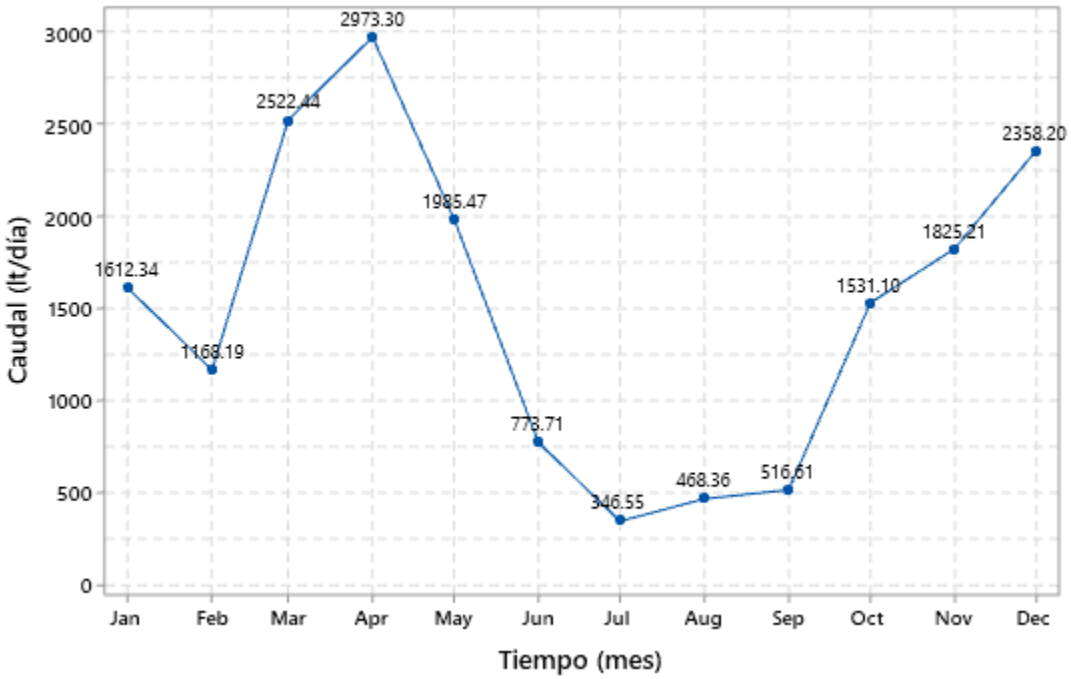


Fuente: (Autor, 2025)

En la gráfica serie de tiempo de caudales promedio históricos de lluvia (Figura 12) se puede visualizar el comportamiento de las lluvias desde el año 2021 hasta el 2025, incluido el promedio de caudales.

Finalmente, se elaboró una gráfica de serie temporal del caudal promedio anual para los meses con datos registrados (Figura 13).

Figura 13: Gráfica de serie temporal del caudal promedio anual por mes agua pluvial (lt/día)



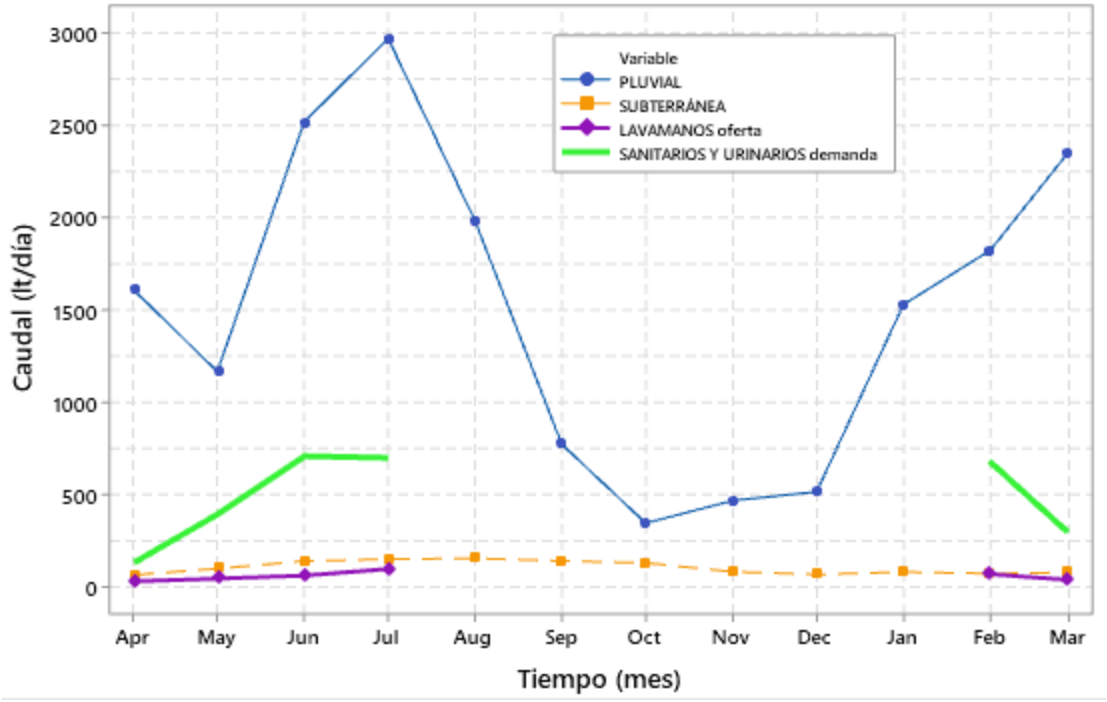
Fuente: (Autor, 2025)

Como resultado, se determinó que el mes de abril presenta el mayor registro de precipitación, con un valor de 2973.30 lt/día, mientras que el mes con menor precipitación es junio, con 346.55 lt/día y el promedio anual es 1506.78 lt/día.

4.3. Comparación de la oferta y demanda

En la Figura 14 presenta los caudales promedio mensuales por año de todas las fuentes de agua, exponiendo los caudales de oferta, incluyendo agua pluvial, subterránea y proveniente de lavamanos, así como la demanda, correspondiente exclusivamente al consumo de agua en sanitarios y urinarios.

Figura 14: Gráfica serie de tiempo de caudal promedio mensual por año de agua pluvial, subterránea, lavamanos, sanitarios y urinarios (lt/día)



Fuente: (Autor, 2025)

Durante los meses en los que coincidieron períodos vacacionales, la recolección de datos se realizó únicamente en ciertos días seleccionados. Para complementar la información faltante de dichos meses, se recurrió al uso de promedios representativos, lo que se refleja en las gráficas como valores constantes durante esos intervalos.

El análisis de la oferta de agua gris generada por los lavamanos, en relación con la demanda de agua potable destinada al uso en sanitarios y urinarios, evidenció que, tomando como base el promedio de los datos recolectados durante cinco meses, la disponibilidad de agua gris representa aproximadamente el 12 % de la demanda total. Este porcentaje evidencia una contribución limitada de esta fuente dentro del sistema de reutilización proyectado.

Este análisis integral permite visualizar la relación general entre la disponibilidad hídrica y los requerimientos de consumo dentro del campus universitario, facilitando la evaluación del potencial de aprovechamiento de las distintas fuentes de agua no potable. En este contexto, se identificó que la fuente pluvial constituye la principal oferta hídrica, cubriendo el 92,88 % del total disponible. Le siguen el recurso subterráneo con una participación del 4,54 %, y finalmente el agua gris proveniente de lavamanos, con una contribución del 2,57 % sobre el total anual.

De esta manera, se determinó que el sistema cuenta con una oferta hídrica promedio anual de 2235,79 litros por día, frente a una demanda promedio de 426,05 litros por día, lo cual representa una relación oferta/demanda del 524 %. En términos prácticos, esto indica que la disponibilidad de agua es 5,2 veces mayor que la demanda requerida para el uso proyectado.

5. DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

5.1. Caracterización del agua gris

Los resultados de las pruebas fisicoquímicas y microbiológicas se presentan a continuación.

Tabla 12: Reporte de resultados de la caracterización de aguas grises

REPORTE DE RESULTADOS CARACTERIZACIÓN AGUAS GRISES

REPORTE FISICOQUÍMICO				
PARÁMETRO	UNIDADES	MUESTRA BAÑO MUJERES	MUESTRA BAÑO HOMBRES	LÍMITES DE DETECCIÓN
pH	N/A	6.61	6.73	0.001 unidades de pH
Conductividad	us/cm	339	337.67	0.01 us/cm
Sólidos totales	mg/L	255	442.5	0.0001 mg/L
Sólidos totales disueltos	mg/L	171.57	168.63	0.01 mg/L
Sólidos sedimentables	mg/L	1.6	0.7	0.1 mg/L
Sólidos suspendidos	mg/L	81.83	273.15	0.01 mg/L
Turbidez	NTU	107.7	61.53	18.09 NTU
Nitratos	mg/L	6.6	7.37	0.17 mg/L
Nitritos	mg/L	0.065	0.134	0.014 mg/L
Fósforo	mg/L	71.2	54.5	0.25 mg/L
Nitrógeno amoniacal	ppm	<LD	<LD	0.07 mg/L
BDO5	mg O2/L	52	60	12 mg O_2/L
DQO	mg O2/L	110	114	25 mg O_2/L
REPORTE MICROBIOLÓGICO				
Coliformes totales	NMP/100ml	33000	39000	
Coliformes fecales	NMP/100ml	4500	24000	

Fuente: (UDA LABORATORIOS, 2025)

Con el objetivo de obtener resultados más representativos de la calidad del agua gris generada, se recolectaron dos muestras diferenciales, correspondientes a los baños de hombres y mujeres. Esta estrategia permitió considerar posibles variaciones en las características del afluente según el uso sanitario por género.

Previo a la utilización de las concentraciones totales de cada parámetro en el proceso de diseño, los valores obtenidos fueron transformados en cargas contaminantes, lo cual permitió posteriormente calcular las concentraciones totales integradas de manera más precisa.

Cabe señalar que, debido a la ausencia de registros diferenciados de caudales por cada uno de los baños (masculino y femenino), no se dispone de información exacta sobre el volumen de agua gris aportado por cada grupo. Por tal motivo, y con fines de diseño, se asumió una distribución equitativa del caudal, considerando que el 50 % del aporte total proviene de cada baño.

El análisis comparativo de la caracterización de aguas grises provenientes de los baños de mujeres y hombres evidencia diferencias significativas en varios parámetros clave de calidad. En términos generales, el agua gris del baño de hombres presenta mayores concentraciones de contaminantes, destacándose particularmente los valores de DBO_5 (60 mg O_2/L), sólidos suspendidos (273.15 mg/L) y turbidez (61.8 NTU), los cuales superan ampliamente a los registrados en el baño de mujeres (52 mg O_2/L, 81.83 mg/L y 7.7 NTU, respectivamente). Estos resultados indican una mayor carga orgánica y presencia de partículas en suspensión en el agua gris generada en el baño masculino. En cuanto al pH, ambos valores se encuentran dentro de un rango ligeramente ácido a neutro (6.61 en mujeres y 6.73 en hombres), sin diferencias relevantes. Por su parte, los coliformes fecales alcanzan concentraciones elevadas en ambas muestras, siendo más altos en el baño de hombres (24,000 NMP/100 ml frente a 4,500 NMP/100 ml en mujeres), lo que resalta la necesidad de un tratamiento eficiente previo a su eventual reúso. Cabe señalar que los resultados analizados corresponden a los parámetros que se consideran en el diseño del sistema de tratamiento propuesto, el cual debe garantizar el cumplimiento de los criterios establecidos para el reúso de aguas grises en aplicaciones no potables (Tabla 6).

5.2. Diseño del sistema de tratamiento convencional

El tratamiento convencional propuesto para las aguas grises recolectadas contempla una secuencia de procesos físicos y químicos orientados a reducir de manera eficiente la carga contaminante, con el fin de alcanzar los parámetros de calidad requeridos para su recirculación en sistemas sanitarios,

como inodoros y urinarios. Este sistema ha sido diseñado para operar por conducción a gravedad, lo cual optimiza el consumo energético, simplifica la operación y mantenimiento, y garantiza un funcionamiento continuo y eficiente a lo largo de todas las etapas del tratamiento.

El procedimiento se inicia con un sistema de pretratamiento mediante rejilla. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las eficiencias de remoción (Tabla 13) y las especificaciones técnicas correspondientes a este componente (Tabla 14).

Tabla 13: Eficiencia de remoción rejilla

EFICIENCIA DE REMOCIÓN REJILLA

PARÁMETRO	EFICIENCIA TEÓRICA (%)	CONCENTRACIÓN AFLUENTE	CONCENTRACIÓN FINAL	UNIDAD
DBO5	5-10%	112	103.04	mg O_2/L
Sólidos suspendidos (SS)	15-30%	177.49	136.66	mg/L
Turbidez	5-15%	84.615	76.15	NTU
pH	0%	6.67	6.67	N/A
Coliformes fecales	0%	14250	14250	NMP/100ml
Nematodos	0%	-	-	

Fuente: (Autor, 2025; Metcalf & Eddy, 2003)

Tabla 14: Especificaciones técnicas rejilla

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS REJILLA

Altura total canal	0.15	m
Ancho interno canal	0.1	m
Longitud canal	0.5	m
Separación entre barrotes	1.5	cm
Ancho total rejilla	0.1	m
Altura vertical efectiva	0.15	m
Inclinación rejilla	60	%
Espesor barrotes	0.5	cm
Número de barrotes	5	u

Fuente: (Autor, 2025)

5.2.1. Trampa de grasas

A continuación, el agua pasa a una trampa de grasas, donde se facilita la separación de aceites, grasas y otros compuestos flotantes, presentando a continuación los resultados de las eficiencias de remoción (Tabla 15) y las especificaciones técnicas (Tabla 16).

Tabla 15: Eficiencias de remoción trampa de grasas

EFICIENCIA DE REMOCIÓN TRAMPA DE GRASAS

PARÁMETRO	EFICIENCIA TEÓRICA (%)	CONCENTRACIÓN AFLUENTE	CONCENTRACIÓN FINAL	UNIDAD
DBO5	5-20%	103.04	89.64	mg O_2/L
Sólidos suspendidos (SS)	10-30%	136.66	109.33	mg/L
Turbidez	5-10%	76.15	70.44	NTU
pH	0%	6.67	6.67	N/A
Coliformes fecales	0%	14250	14250	NMP/100ml

Fuente: (Autor, 2025; Metcalf & Eddy, 2003)

Tabla 16: Especificaciones técnicas trampa de grasas

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS TRAMPA DE GRASAS

Altura del canal	0.7	m
Base del canal	0.1	m
Largo del canal	0.15	m
TRH	3	min
Volúmen	0.009	m3

Fuente: (Autor, 2025)

5.2.2. Sedimentador

Posteriormente, el flujo es conducido a un sedimentador, diseñado para remover sólidos sedimentables y una porción importante de los sólidos suspendidos, logrando además una reducción parcial de la DBO_5 y la turbidez del agua, las siguientes tablas presentan las eficiencias de remoción (Tabla 17) y especificaciones técnicas (Tabla 18).

Tabla 17: Eficiencias de remoción sedimentador

EFICIENCIA DE REMOCIÓN SEDIMENTADOR

PARÁMETRO	EFICIENCIA TEÓRICA (%)	AFLUENTE	CONCENTRACIÓN FINAL	UNIDAD
DBO5	5-20%	89.64	77.99	mg O2/L
Sólidos suspendidos (SS)	50-70%	109.33	38.26	mg/L
Turbidez	40-60%	70.44	35.22	NTU

pH	0%	6.67	6.67	N/A
Coliformes fecales	5-20%	14250	13537.5	NMP/100ml

Fuente: (Autor, 2025; Metcalf & Eddy, 2003)

Tabla 18: Especificaciones técnicas sedimentador

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SEDIMENTADOR		
Altura del canal	0.8	m
Ancho del canal	0.3	m
Largo del canal	2	m
Tiempo de retorno	1.57	h
Volúmen	0.31	m3

Fuente: (Autor, 2025)

5.2.3. Filtración

Adicionalmente, por la presencia de altas concentraciones de turbidez, solidos suspendidos y DBO5, se optó por añadir un tratamiento de filtración por carbón activado, obteniendo las eficiencias de remoción (Tabla 19) siguientes y las especificaciones técnicas (Tabla 20) de las mismas.

Tabla 19: Eficiencia de remoción filtración

EFICIENCIA DE REMOCIÓN FILTRACIÓN				
PARÁMETRO	EFICIENCIA TEÓRICA (%)	CONCENTRACIÓN AFLUENTE	CONCENTRACIÓN FINAL	UNIDAD
DBO5	80-95%	77.99	6.23	mg O2/L
Sólidos suspendidos (SS)	90-95%	38.26	2.87	mg/L
Turbidez	85-98%	35.22	2.11	NTU
pH	0%	6.67	6.67	N/A
Coliformes fecales	90-99.9%	13537.5	1083	NMP/100ml

Fuente: (Autor, 2025; Metcalf & Eddy, 2003)

Tabla 20: Especificaciones técnicas filtro carbón activado

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS FILTRO CARBON ACTIVADO		
Área	0.63	m2
Diámetro	0.13	m
Altura	1	m
Volúmen	0.63	m3

Tiempo de retorno	3.2	horas
Grava de soporte	5	cm
Grava fina	5	cm
Carbón activado	5	cm
Arena fina	40	cm

Fuente: (Autor, 2025)

5.2.4. Desinfección

Finalmente, el tratamiento concluye con un proceso de desinfección mediante cloración por goteo mediante 30 minutos, el cual garantiza la inactivación de microorganismos patógenos, especialmente coliformes fecales, asegurando así que el efluente final cumpla con las normativas para su uso en aplicaciones no potables interiores, las remociones se encuentran en la siguiente Tabla 21 y las especificaciones técnicas en la Tabla 22.

Tabla 21: Eficiencias de remoción cloración por goteo método convencional

EFICIENCIAS DE REMOCIÓN CLORACIÓN POR GOTEO MÉTODO CONVENCIONAL				
PARÁMETRO	EFICIENCIA TEÓRICA (%)	CONCENTRACIÓN AFLUENTE	CONCENTRACIÓN FINAL	UNIDAD
DBO5	5-10%	6.23	5.74	mg/L
Sólidos suspendidos (SS)	0%	2.87	2.87	mg/L
Turbidez	5-10%	2.11	1.94	NTU
pH	0%	6.67	6.67	N/A
Coliformes fecales	99.9%	1083	0.11	NMP/100ml

Fuente: (Autor, 2025; Metcalf & Eddy, 2003)

Tabla 22: Especificaciones técnicas cloración por goteo del método convencional

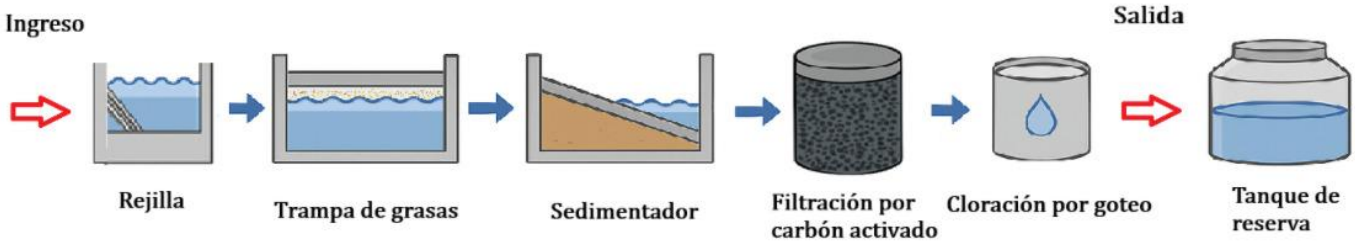
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS CLORACIÓN POR GOTEO MÉTODO CONVENCIONAL		
TANQUE SOLUCIÓN MADRE		
Hipoclorito de calcio al 65%		
Dosis cloro requerido	3	mg/L
Cloro residual libre	0.5	mg/L
Concentracion de solucion madre	5000	mg/L
Tiempo de contacto	30	min
Dosificación cloro para caudal de diseño	0	mL/h
Capacidad tanque para 7 días	25	L
Material de HDPE (grado químico)		
Instalación a un metro por encima de la canaleta para goteo		
GOTERO		

Gotero de baja presión	1	L/h
TUBO GOTERO		
Tubo para gotero PEBD 4x6 mm		
Longitud	0.8	m
Válvula de aguja 1/4 "		
CANALETA PARA GOTEO		
Longitud	0.8	m
Ancho interno	0.1	m
Altura interna	0.15	m
Pendiente longitudinal	1	%
Lugar instalación gotero (1/3 entrada)	0.3	m
TANQUE DE CONTACTO DE CLORO		
Capacidad tanque caudal maximo + solución madre	100	L
Material de HDPE o concreto revestido		

Fuente: (Autor, 2025)

El esquema del tratamiento convencional se resume en la siguiente ilustración.

Figura 15: Esquema de tratamientos método convencional



Fuente: (Autor, 2025)

5.3. Diseño del sistema de tratamiento basado en la naturaleza

El tratamiento mediante muro verde propuesto para las aguas grises constituye una alternativa sustentable basada en procesos naturales, orientada a mejorar la calidad del agua para su posterior reutilización en usos no potables. El esquema de tratamiento propuesto incluye una etapa de pretratamiento común con el sistema convencional, indispensable para garantizar la remoción inicial de sólidos y grasas antes del ingreso del flujo al muro verde. Esta etapa está conformada por tres unidades principales, cuyo propósito es acondicionar el agua gris para su adecuado funcionamiento dentro del sistema de biofiltración vegetal: la rejilla, la trampa de grasas y el

sedimentador. La rejilla, cuyas especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 14, permite la retención inicial de sólidos gruesos presentes en el afluente. Su eficiencia de remoción para sólidos suspendidos y turbidez se presenta en la Tabla 13. La trampa de grasas, descrita en la Tabla 16, contribuye a la eliminación de aceites y materiales flotantes, con eficiencias reportadas en la Tabla 15. El sedimentador, mostrado en la Tabla 18, completa esta etapa al remover los sólidos sedimentables y parte de la carga orgánica, como se evidencia en sus resultados de remoción en la Tabla 17. Todos los pretratamientos mencionados funcionan por conducción a gravedad hasta el ingreso al muro verde.

Como resultado del proceso de tratamiento propuesto, el afluente pretratado se encuentra en condiciones adecuadas para ser conducido hacia el sistema principal de depuración, mediante un sistema de impulsión con bomba, seguido de un descenso por gravedad a lo largo del tratamiento. A continuación, se presentan las especificaciones técnicas de construcción Tabla 24, las cuales definen las principales características estructurales y operativas del sistema, y las eficiencias de remoción Tabla 23.

Tabla 23: Eficiencias de remoción muro verde

EFICIENCIA DE REMOCIÓN MURO VERDE

PARÁMETRO	EFICIENCIA TEÓRICA (%)	AFLUENTE	CONCENTRACIÓN FINAL	UNIDAD
DBO5	80-96%	77.99	9.36	mg/L
Sólidos suspendidos (SS)	80-90%	38.26	5.74	mg/L
Turbidez	70-96%	35.22	1.76	NTU
pH	0%	6.67	6.67	N/A
Coliformes fecales	95%	13537.5	676.88	NMP/100ml

Fuente: (Autor, 2025; Metcalf & Eddy, 2003)

Tabla 24: Especificaciones técnicas muro verde

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MURO VERDE

ESTRUCTURA		
Número de módulos	3	u
ancho módulo	0.6	m
altura módulo	1.5	

Largo módulo	13.25	m
Separación entre módulos	0.3	m
Gotero autocompensante		
Caudal por gotero	2	L/h
Tubería PE 16 mm		
Largo tubería	13.25	m
Espaciamiento entre goteros	0.3	m
Goteros en el sistema	44	goteros
SUSTRATO		
Altura de sustrato por módulo	0.6	m
Volúmen sustrato por módulo	11.92	m3
Fibra de coco por módulo	4.77	m3
Fibra de perlita por módulo	4.77	m3
Biocarbón	2.39	m3
PLANTAS		
Módulo 1		
Potus	91	u
Lirio	91	u
Módulo 2		
Nephrolepis	182	u
Módulo 3		
Atenia	182	u
Espacio efectivo entre plantas	0.33	m
Área por planta	0.11	m2
Plantas por metro cuadrado	9	planta/m2
ESPECIFICACIONES DE FUNCIONAMIENTO		
Sesiones al dia	4	sesiones
Duracion por sesión	5.42	horas/sesión
Descanso entre sesiones	2.5	horas
Tiempo total del ciclo	29.20	horas

Fuente: (Autor, 2025)

Por consiguiente, con el fin de cumplir los criterios de calidad establecidos para el reúso de agua en aplicaciones no potables (Tabla 6), el sistema de tratamiento se concluye con una etapa de cloración por goteo. A continuación, se detallan las eficiencias de remoción correspondientes a este proceso en la Tabla 26 y las especificaciones técnicas del mismo en la .

Tabla 25: Eficiencias de remoción cloración por goteo muro verde

EFICIENCIA REMOCIÓN CLORACIÓN POR GOTEO MURO VERDE

PARÁMETRO	EFICIENCIA TEÓRICA (%)	CONCENTRACIÓN AFLUENTE	CONCENTRACIÓN FINAL	UNIDAD
DBO5	5-10%	9.36	8.65	mg O2/L
Sólidos suspendidos (SS)	0%	5.74	5.74	mg/L
Turbidez	5-10%	1.76	1.62	NTU
pH	0%	6.67	6.67	N/A
Coliformes fecales	99.9%	676.88	0.00	NMP/100 ml

Fuente: (Autor, 2025; Metcalf & Eddy, 2003)

Tabla 26: Especificaciones técnicas cloración por goteo método muro verde

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS CLORACIÓN POR GOTEO MÉTODO MURO VERDE

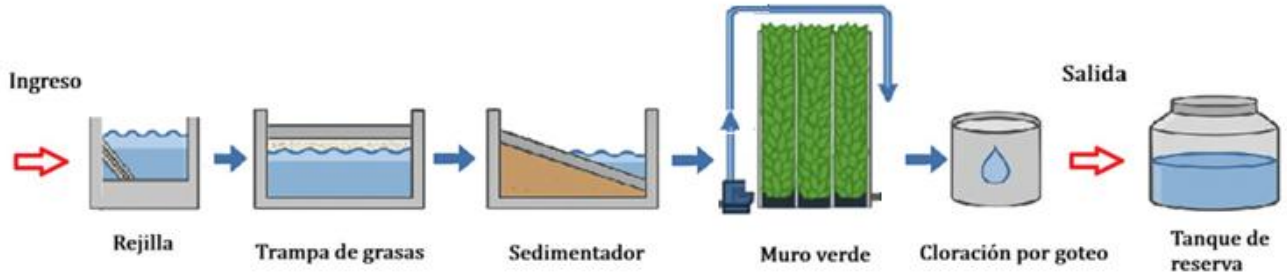
TANQUE SOLUCIÓN MADRE		
Hipoclorito de calcio al 65%		
Dosis cloro requerido	1	mg/L
Cloro residual libre	0.5	mg/L
Concentracion de solucion madre	5000	mg/L
Tiempo de contacto	30	min
Dosificación cloro para caudal de diseño	0	mL/h
Capacidad tanque para 7 días	7	L
Material de HDPE (grado químico)		
Instalación a un metro por encima de la canaleta para goteo		
GOTERO		
Gotero de baja presión	1	L/h
TUBO GOTERO		
Tubo para gotero PEBD 4x6 mm		
Longitud	0.8	m
Válvula de aguja 1/4 "		
CANALETA PARA GOTEO		
Longitud	0.8	m
Ancho interno	0.1	m
Altura interna	0.15	m
Pendiente longitudinal	1	%
Lugar instalación gotero (1/3 entrada)	0.3	m
TANQUE DE CONTACTO DE CLORO		
Capacidad tanque caudal máximob + solución madre	100	L

Material de HDPE o concreto revestido

Fuente: (Autor, 2025)

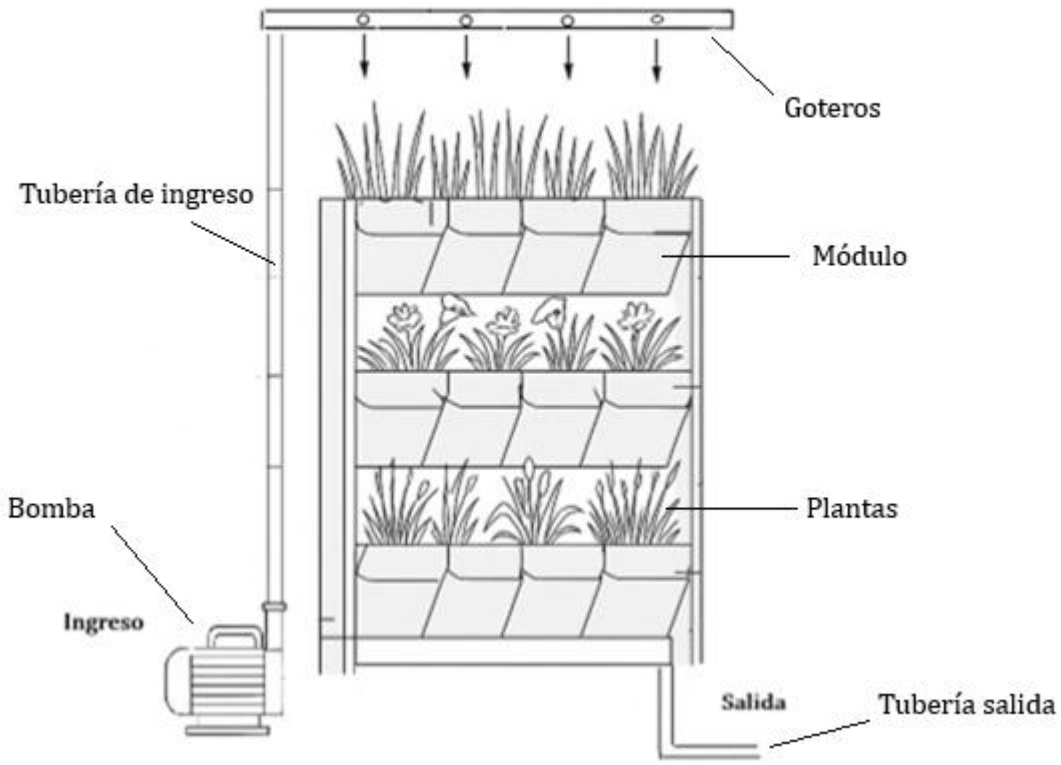
El esquema del tratamiento basado en la naturaleza, muro verde y una representación general de la misma se resume en la siguiente ilustración.

Figura 16: Esquema de tratamientos muro verde



Fuente: (Autor, 2025)

Figura 17: Muro verde



Fuente: (Autor, 2025)

5.4. Comparación de los sistemas de tratamiento

Desde una perspectiva de diseño hidráulico, el sistema convencional se caracteriza por incluir un total de cinco etapas de tratamiento, que comprenden una rejilla, una trampa de grasas, un sedimentador primario, un filtro de carbón activado y un sistema de cloración. Este enfoque asegura una remoción eficiente de sólidos, materia orgánica y patógenos antes de la reutilización del agua para descarga de inodoros. De igual manera, el sistema de muro verde, diseñado específicamente para este proyecto, integra solo cuatro etapas de tratamiento complementando con el SBN tipo muro verde para el tratamiento físico, químico y biológico de las aguas grises. Esta integración requiere una mayor planificación para garantizar que las plantas seleccionadas puedan soportar las cargas hidráulicas y contaminantes esperadas.

En términos de área, el sistema convencional ocupa un área total aproximada de 20 m² en planta, distribuidos entre sus diferentes componentes, los cuales pueden ser diseñados para adaptarse a

espacios confinados. A diferencia, el muro verde, debido a su naturaleza extensiva, requiere una superficie total de 56 m², de los cuales aproximadamente 16 m² corresponden al área en planta infraestructura base y 40 m² al área vertical efectiva de tratamiento muro verde. Aunque la diferencia total de área es considerable, la utilización de espacio vertical representa una ventaja significativa en entornos urbanos, donde la disponibilidad de superficie horizontal es limitada.

Desde el punto de vista de la innovación y sostenibilidad, el muro verde presenta ventajas claras al ofrecer beneficios adicionales como la reducción de la temperatura superficial, la mejora de la calidad del aire y la creación de microhábitats para la fauna urbana. Sin embargo, estos beneficios deben sopesarse frente a los desafíos técnicos que presenta su implementación, como el control de humedad, la selección adecuada de especies vegetales y el mantenimiento constante para evitar problemas de salinidad y deterioro del sustrato.

En el ámbito de la eficacia la Tabla 27 presenta los porcentajes de eficiencia general alcanzados para cada parámetro crítico, incluyendo demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), sólidos suspendidos (SS), turbidez, pH y coliformes fecales, en ambos sistemas:

Tabla 27: Eficiencias generales método convencional y muro verde

PARÁMETRO	EFICIENCIA GENERAL M. CONVENCIONAL (%)	EFICIENCIA GENERAL MURO VERDE (%)	UNIDAD
DBO5	89.74	84.54	mg O2/L
Sólidos suspendidos (SS)	98.38	96.76	mg/L
Turbidez	97.70	98.07	NTU
Coliformes fecales	99.99	99.99	NMP/100ml

Fuente: (Autor, 2025)

Se observó que el sistema convencional presentó una mayor eficiencia en la reducción de DBO5 (89.75%) y sólidos suspendidos (98.38%) en comparación con el muro verde, que alcanzó eficiencias de 84.54% y 96.77%, respectivamente. Esto se debe principalmente a la combinación de etapas físicas y químicas en el sistema convencional, que permiten una mayor retención de materia orgánica y partículas.

En el caso de la turbidez, el sistema de muro verde mostró una eficiencia ligeramente superior (98.07%) en comparación con el sistema convencional (97.70%), lo que refleja la efectividad del sustrato y las raíces de las plantas para filtrar partículas finas y mejorar la claridad del agua. Sin embargo, ambos sistemas mostraron eficiencias similares en la remoción de coliformes fecales, superando el 99.99%, gracias a la inclusión de una etapa de cloración en ambos diseños. A pesar de las diferencias en diseño y estructura, los resultados obtenidos en este estudio demuestran que las eficiencias de remoción de contaminantes entre el sistema convencional y el muro verde no son significativas. Aunque el sistema convencional mostró ligeras ventajas en términos de eliminación de sólidos suspendidos totales (SST) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO), ambos enfoques lograron cumplir con los parámetros de calidad requeridos para la reutilización de aguas grises.

En general, estos resultados destacan las fortalezas de cada sistema, con el diseño convencional mostrando un mayor control sobre los parámetros críticos y el muro verde aportando beneficios adicionales en términos de sostenibilidad y reducción del impacto ambiental. Sin embargo, se debe considerar que ambos enfoques requieren de pretratamiento y desinfección para garantizar la seguridad del efluente reutilizado.

Sin embargo, para poder concluir con mayor exactitud sobre la viabilidad económica de cada sistema, sería necesario realizar un análisis de costos real que considere no solo los gastos de construcción, sino también los costos de operación y mantenimiento a largo plazo, incluyendo la reposición de plantas, limpieza de sustratos y ajustes en las estructuras de soporte.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el desarrollo de esta tesis, se presentó una propuesta de diseño de dos sistemas de tratamiento y reutilización para las aguas grises generadas en el edificio C1 de la Universidad del Azuay, un edificio académico de tres plantas, diseñado para aulas, oficinas y laboratorios. El edificio cuenta con un total de 18 aparatos sanitarios, distribuidos en 8 lavamanos, 6 inodoros y 4 urinarios, los cuales se dividen en sanitarios para hombres y mujeres en cada planta.

La medición de los caudales se llevó a cabo durante un período de 5 meses en los 5 días laborables, considerando las horas pico de uso para capturar las máximas variaciones posibles en el flujo. Los datos se recopilaron para un total de aproximadamente 550 usuarios, lo que representa el uso típico del edificio en períodos académicos normales. Esta medición permitió establecer que la oferta de aguas grises es altamente variable a lo largo del año, con un máximo registrado de 97.85 L/día en

abril y un mínimo de 30.66 L/día en enero. Por otro lado, la demanda de aguas grises alcanzó su punto más alto en marzo, con 706.81 L/día, mientras que el consumo mínimo se observó en enero, con 128 L/día.

En cuanto a las fuentes hídricas alternativas analizadas, el recurso de agua subterránea, se tomaron datos del pozo tres, cuya extracción fue monitoreada durante los años 2023 y 2024. Se determinó que el consumo promedio diario de esta fuente es de 112.77 L/día, con un pico máximo de 155.68 L/día. Esta fuente representa un complemento importante para el sistema de reutilización, aunque su disponibilidad es limitada y variable según las condiciones climáticas y niveles freáticos. Respecto al agua pluvial, gracias al apoyo del MACCARD-UDA, se recopilaron datos precisos sobre las precipitaciones en el campus universitario. Los registros evidenciaron que el mes de abril presenta el mayor volumen de precipitación, con 2973.30 L/día, mientras que junio tiene el menor registro, con 346.55 L/día.

En general se concluye que, la oferta anual promedio de 2235.79 L/día, en contraste con una demanda promedio anual de 426.05 L/día. Esto representa una oferta hídrica 5.2 veces mayor que la demanda, lo que demuestra la viabilidad del proyecto de reutilización, siempre que se gestionen adecuadamente los recursos disponibles. Sin embargo, es importante señalar que esta relación favorable se basa en datos actuales que pueden variar considerablemente debido a la incertidumbre en la disponibilidad de las fuentes hídricas, incluyendo cambios en los patrones de precipitación, disminución de los niveles de agua subterránea y posibles impactos del cambio climático. Esta incertidumbre resalta la necesidad de implementar estrategias de manejo hídrico sostenible para garantizar la continuidad del suministro a largo plazo.

Para la caracterización de las aguas grises, se realizaron análisis físicos, químicos y microbiológicos en los laboratorios de la Universidad del Azuay. Las muestras de los baños de hombres presentaron mayores concentraciones de sólidos suspendidos 273.15 mg/L y sólidos totales 442.5 mg/L, mientras que las muestras de los baños de mujeres mostraron niveles más altos de fósforo 71.2 mg/L y turbidez 107.7 NTU. Ambos tipos de muestras registraron concentraciones elevadas de coliformes totales y fecales.

El diseño del sistema convencional incluyó una serie de unidades de tratamiento que consisten en una rejilla para remover sólidos gruesos, una trampa de grasas para separar aceites y grasas, un sedimentador para eliminar partículas sedimentables, un filtro de carbón activado para reducir la carga orgánica y una etapa de cloración por goteo para la desinfección final logrando una eficiencia

de 89.74% en la remoción de DBO, un 98,38% en (SS) y un 99.99% en coliformes fecales. Este sistema fue diseñado para maximizar la eficiencia en la remoción de contaminantes y cumplir con los estándares de calidad requeridos para usos no potables.

En el diseño del sistema basado en muro verde, se utilizaron las mismas unidades de pretratamiento (rejilla), trampa de grasas y sedimentador, reemplazando únicamente el filtro de carbón activado por un muro verde que actúa como biofiltro, aprovechando las propiedades naturales de las plantas para remover sólidos, nutrientes y materia orgánica. Sin embargo, se comprobó que este sistema, aunque innovador y estéticamente atractivo, requiere de un pretratamiento para evitar la saturación del sustrato y garantizar la longevidad del sistema, con esto obtenemos un porcentaje de remoción 84,54% para el DBO5, 96.76% en (SS) y 99,99% en coliformes fecales.

En cuanto a las eficiencias alcanzadas, se concluyó que el sistema convencional ofrece un mejor rendimiento en términos de remoción de contaminantes, dado que permite un mayor control sobre cada etapa del tratamiento y presenta menores requerimientos de área. Sin embargo, el sistema de muro verde destaca por su capacidad para integrar procesos naturales, mejorando el microclima y aportando beneficios ecológicos adicionales, aunque a un costo más elevado y con mayores desafíos de mantenimiento.

Se recomienda avanzar con el diseño hidráulico de las redes de tuberías para transportar el agua gris desde los puntos de recolección en los baños hasta las unidades de tratamiento, y posteriormente de regreso al edificio para su reutilización, la integración de sistemas de bombeo y la ubicación estratégica de las unidades para optimizar la eficiencia hidráulica y minimizar las pérdidas de presión.

Adicionalmente, es necesario realizar un análisis costo-beneficio integral que considere los costos de construcción, operación y mantenimiento, así como factores de sostenibilidad y eficiencia a largo plazo. Este análisis debe incluir el costo de instalación de tuberías, estructuras de soporte, sistemas de riego y el impacto económico de los beneficios ambientales asociados al muro verde, como la mejora de la calidad del aire y la reducción del efecto de isla de calor.

Finalmente, se recomienda que para futuros estudios se consideren pruebas piloto para validar los diseños teóricos, incluyendo la instalación de redes de tuberías, sistemas de bombeo y estructuras de soporte adecuadas para garantizar la eficiencia operativa y la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas propuestos.

7. BIBLIOGRAFÍA

Addo-Bankas, O., Zhao, Y., Vymazal, J., Yuan, Y., Fu, J., & Wei, T. (2021). Green walls: A form of constructed wetland in green buildings. Ecological Engineering, 169. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106321

Agudelo, R., Andrea, N., Anento, P., Junyet, V., & Bosch, R. (2020). L'EIX BESÒS: Una mirada desde las soluciones basadas en la naturaleza. https://urbanisme.amb.cat/pdu-metropolita

Alcaldía de Cuenca 2023-2027. (2022). Breve descripción socioeconómica de la ciudad.

Ayquipa, N. (2021). Evaluación de la eficiencia de una trampa de grasa (interceptor de grasa hidromecánico) para el pretratamiento de aguas residuales grises en viviendas unifamiliares del distrito de Lares-Cusco - 2021.

AZUD. (2023). Reutilización de aguas grises: el camino hacia la sostenibilidad y la Certificación LEED.

Beltrán-Conlago, A. C., Ledesma-Acosta, R. D., León-Fiallos, K. Z., & Paredes-Cepeda, E. R. (2024). Evaluación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Basados en Naturaleza: Potencial para Ciudades Sostenibles. MQRInvestigar, 8(4), 1558–1578. https://doi.org/10.56048/MQR20225.8.4.2024.1558-1578

Benitez Mendoza, R., & Gonzales Aviles, J. (2024). Influencia de la capacidad biocoagulativa del Opuntia ficus–indica en la disminución de coliformes de las aguas residuales domésticas del centro poblado de Huari, 2023.

Bermejo, D. (2012). Reutilización de aguas residuales domésticas. Estudio y comparativa de tipologías edificatorias: depuradoras naturales como alternativa sostenible.

Bresciani, R., & Masi, F. (2015). Vertical Garden for Greywater Treatment: Technical Note for Urbanised Areas in India (Version 1).

Cabrera Ordóñez, M. A. (2023). Estimación de ahorro en volumen de agua potable y costos, al implantar tecnologías de aprovechamiento en el reúso de aguas grises y subterránea en los edificios de la Universidad del Azuay. Universidad del Azuay.

Castillo, J., Moreira, Y., & Banchón, C. (2025). Electrocoagulación de aguas residuales domésticas: Revisión sistemática de efectos operacionales. Research, Society and Development, 14(5), e2814548700. https://doi.org/10.33448/rsd-v14i5.48700

Chow, V. T. (1988). Hidrología aplicada (J. Bosch I. Domenech, Trad.). McGraw-Hill. (Obra original publicada en 1964)

Escobar Rojas, M. C., Tovar Bonilla, L. F., & Romero Cuéllar, J. (2016). Diseño de un sistema experto para reutilización de aguas residuales tratadas. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 26(2), 21–34. https://doi.org/10.18359/rcin.1827

ETAPA EP. (2023). Agua Potable.

Friedler, E. (2004). Quality of Individual Domestic Greywater Streams and its Implication for On-Site Treatment and Reuse Possibilities. Environmental Technology, 25(9), 997–1008. https://doi.org/10.1080/09593330.2004.9619393

García-Rodríguez, P y Herrera-Novoa, H. (2021). Diseño de un prototipo para la reutilización de aguas grises en viviendas. Universidad Católica de Colombia.

Ghaitidak, D.M., Yadav, K.D. Characteristics and treatment of greywater—a review. Environ Sci Pollut Res 20, 2795–2809 (2013). https://doi.org/10.1007/s11356-013-1533-0

Harsha S. Fowdar, Belinda E. Hatt, Peter Breen, Perran L.M. Cook, Ana Deletic, Designing living walls for greywater treatment,Water Research,Volume 110,2017,Pages 218-232,ISSN 0043-1354, https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.018.

Henze, M., van Loosdrecht, M., Ekama, G., & Brdjanovic, D. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño (C. López, G. Buitrón, H. García, & F. Cervantes, Eds.).

Hernández-Salazar Aurora B, Moreno-Seceña J. C., & Sandoval-Herazo L.C. (2017, octubre 27). Tratamiento de aguas residuales industriales en México: Una aproximación a su situación actual y retos por atender.

Herrera, L. (2018). REUTILIZACIÓN DE AGUAS. DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES.

Henze, M. and Comeau, Y. (2008) Wastewater Characteristics. In: Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design, IWA Publishing, London.

Jiménez, K., & Acosta, F. (1997). EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN Y TIPO DE SEMILLA EN EL CULTIVO DE POTHOS (Epipremnum aureum). En BOLTEC (Vol. 30, Número 2).

Loera-Alvarado, Luz Andrea, Torres-Aquino, Margarita, Martínez-Montoya, Juan Felipe, Cisneros-Almazán, Rodolfo, & Martínez-Hernández, José de Jesús. (2019). Calidad del agua de escorrentía para uso agrícola captada en bordos de almacenamiento.

Ecosistemas y recursos agropecuarios, 6(17), 283-295. Epub 00 de mayo de 2019.https://doi.org/10.19136/era.a6n17.1867

López Machado, Nelson Andrés, Domínguez Gonzalez, Christian Gonzalo, Barreto, Wilmer, Méndez, Néstor, López Machado, Leonardo José, Soria Pugo, María Gabriela, Lizano, Ronnie, & Montesinos, Vanessa. (2020). ALMACENAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA EN MEDIOS URBANOS UTILIZANDO TECHOS VERDES. LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida , 32(2), 54-71. https://doi.org/10.17163/lgr.n32.2020.05

Lozano-Mendoza, H. P., Nieto-Cañarte, C. A., Cañar-Rivas, A. L., Ramírez-Montesdeoca, W. A., Vilela-Sabando, J. R., & Sinchi-Rivas, C. A. (2025). Modelización espacial para la protección de cauces hídricos en el cantón Quinsaloma, Los Ríos, Ecuador. Brazilian Applied Science Review, 9(1), e77612. https://doi.org/10.34115/basrv9n1-011

Manga, J., Logreira, N., & Serralt, J. (2021). Reuso de aguas residuales: Un recurso hídrico disponible.

Meléndez , J., Lemos, M., Domínguez, I., & Oviedo, R. (30 de Septiembre de 2019). Reutilización de aguas grises domésticas para el uso eficiente del recurso hídrico: aceptación social y análisis financiero. Un caso en Portugal.

Mendoza, G. (2023). Tratamiento de aguas grises mediante un sistema de paredes verdes como política ambiental para la mitigación del cambio climático. South Sustainability, 4(1), e073. https://doi.org/10.21142/ss-0401-2023-e073

Metcalf & Eddy, Inc. (2003). Wastewater Engineerimg treatment and reuse.

Ministerio del Ambiente del Ecuado. (2017). Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA). www.lexis.com.ec

Monteiro, O., & Lima, G. (2020). CAPTURA, TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE AGUA GRIS Y DE LLUVIA EN RESIDENCIA UNIFAMILIAR.

Mora, E. C., Cruz Zúñiga, N., & Vidal Rivera, P. (2023, agosto 15). Tratamiento de aguas residuales ordinarias en Costa Rica: perfil tecnológico y perspectivas de sostenibilidad. Ingeniería, 34(1), 7–22. https://doi.org/10.15517/ri.v34i1.55222

Muñoz, Z. del P. (2007). Comparación del sustrato de fibra de coco con los sustratos de corteza de pino compostada, perlita y vermiculita en la producción de plantas de Eucalyptus globulus (Labill).

Naciones Unidas. (2023). Agua y saneamiento | Objetivos de Desarrollo Sostenible. Naciones Unidas.

Navarro, I. (2005). El reuso del agua [Presentación inédita]. Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI)

Navarro-Sousa, S., & Estruch-Guitart, V. (2023). Ahorro hídrico y análisis económico del aprovechamiento del agua de lluvia y reutilización de aguas grises en edificios: estimación en una población del Levante mallorquín (España). Cuadernos Geograficos, 62(2), 5–29. https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v62i2.26054

Niño, E., & Martínez, N. (2013). ESTUDIO DE LAS AGUAS GRISES DOMÉSTICAS EN TRES NIVELES SOCIOECONÓMICOS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ.

NSW Health Department. (2000). Greywater reuse in sewered single domestic premises. NSW Government

Oxfam México. (2020). La importancia de cuidar el agua.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2020). Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de mayo de 2020, relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32020R0741

Pellicer C., & Rincón L. (2005, octubre 1). Fertirrigación y acidificación de disoluciones de riego.

Pérez Solares, R. (2013). UTILIZACION DEL EFLUENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON FINES DE RIEGO EN LA CIUDAD UNIVERSITARIA, USAC. https://doi.org/10.36829/08asa.v8i1.1477

Puerta, C., Russián, T., & Ruiz, C. A. (2012). Producción de plántulas de pimentón (Capsicum annuum L.) en sustratos orgánicos a base de mezclas con fibra de coco. Revista Científica UDO Agrícola, 12(2), 298–306.

Quevedo, M., & Sotomayor, D. (2023). SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA: UN ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE TENDENCIAS PASADAS, PRESENTES Y FUTURAS.

Serrano-Guzmán, María Fernanda, Pérez Ruiz, Diego Darío, Guzmán Arias, Diego Alejandro, & Forero Sarmiento, Juan Carlos. (2014). Modelo Físico de Acuífero: su implementación para un curso de aguas subterráneas.

UNESCO. (2017). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos, 2017. AGUAS RESIDUALES EL RECURSO DESAPROVECHADO. UNESCO.

U.S. Environmental Protection Agency & U.S. Agency for International Development. (2012). 2012 Guidelines for Water Reuse.

Villa Hoyos, J. F. (2020). REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES COMO ALTERNATIVA AL ESTRÉS HÍDRICO EN COLOMBIA.

ANEXOS

Anexo 1: Volumen de abatimientos y caudales del Pozo 3 año 2023

ABATIMIENTO 2023			
POZO #3			
Mes	volumen (lt)	Días	**Consumo caudal (lt/dia)**
ENERO	2030.59	31	65.503
FEBRERO	2801.1	28	100.039
MARZO	4357.96	31	140.579
ABRIL	4536.42	30	151.214
MAYO	4826.18	31	155.683
JUNIO	4235.27	30	141.176
JULIO	4056.48	31	130.854
AGOSTO	3862.21	31	124.587
SEPTIEMBRE	3285.37	30	109.512
OCTUBRE	2526.98	31	81.515
NOVIEMBRE	2201.69	30	73.390
DICIEMBRE	2453.18	31	79.135
TOTAL	41173.43		**1353.188372**

Fuente: (UDA CIVIL, 2025 & autor, 2025)

Anexo 2: Datos precipitaciones agua lluvia

Fecha	**Precipitación (mm)**
9/18/2021	0.2
9/19/2021	0.1
9/20/2021	0
9/21/2021	5.8
9/22/2021	0.5
9/23/2021	0
9/24/2021	0
9/25/2021	1.5
9/26/2021	0
9/27/2021	0
9/28/2021	0
9/29/2021	0.1

9/30/2021	2.9
10/1/2021	0.9
10/2/2021	0
10/3/2021	0
10/4/2021	0.4
10/5/2021	0
10/6/2021	2.5
10/7/2021	0
10/8/2021	0
10/9/2021	0
10/10/2021	15
10/11/2021	0.4
10/12/2021	0
10/13/2021	0
10/14/2021	0.1
10/15/2021	0.7
10/16/2021	0.1
10/17/2021	0
10/18/2021	52.2
10/19/2021	6.1
10/20/2021	17.2
10/21/2021	3.5
10/22/2021	7.9
10/23/2021	0
10/24/2021	0.3
10/25/2021	17.8
10/26/2021	4.6
10/27/2021	7.5
10/28/2021	2.3
10/29/2021	5.4
10/30/2021	8.4
10/31/2021	1.9
11/1/2021	0.3
11/2/2021	2.6
11/3/2021	19.1
11/4/2021	0
11/5/2021	0
11/6/2021	1
11/7/2021	0.4
11/8/2021	2.6
11/9/2021	0.3

11/10/2021	0
11/11/2021	1.1
11/12/2021	21.5
11/13/2021	0
11/14/2021	0
11/15/2021	3.8
11/16/2021	7.5
11/17/2021	0
11/18/2021	5.6
11/19/2021	0
11/20/2021	8.5
11/21/2021	0.7
11/22/2021	0
11/23/2021	8.9
11/24/2021	23.4
11/25/2021	9.8
11/26/2021	7.3
11/27/2021	0
11/28/2021	0
11/29/2021	26.3
11/30/2021	11.9
12/1/2021	10.6
12/2/2021	6.7
12/3/2021	0.4
12/4/2021	0
12/5/2021	0.8
12/6/2021	0.3
12/7/2021	0
12/8/2021	3.6
12/9/2021	0
12/10/2021	6.4
12/11/2021	0.1
12/12/2021	3.5
12/13/2021	0
12/14/2021	1.2
12/15/2021	2.1
12/16/2021	1.6
12/17/2021	0.4
12/18/2021	4
12/19/2021	2.2
12/20/2021	2.4

12/21/2021	11.2
12/22/2021	6.1
12/23/2021	0.6
12/24/2021	0
12/25/2021	0
12/26/2021	1.6
12/27/2021	0
12/28/2021	0.4
12/29/2021	15.2
12/30/2021	1.3
12/31/2021	0
1/1/2022	0
1/2/2022	0.5
1/3/2022	0
1/4/2022	0
1/5/2022	2.4
1/6/2022	0.6
1/7/2022	0
1/8/2022	0
1/9/2022	5.4
1/10/2022	0.3
1/11/2022	0
1/12/2022	0
1/13/2022	0
1/14/2022	0.5
1/15/2022	0
1/16/2022	0
1/17/2022	0
1/18/2022	0
1/19/2022	0
1/20/2022	0
1/21/2022	0
1/22/2022	1.2
1/23/2022	0
1/24/2022	0
1/25/2022	2
1/26/2022	4.9
1/27/2022	1.1
1/28/2022	6.6
1/29/2022	0
1/30/2022	0

1/31/2022	1.4
2/1/2022	0
2/2/2022	0
2/3/2022	0
2/4/2022	0
2/5/2022	1.9
2/6/2022	7.6
2/7/2022	1.6
2/8/2022	5.3
2/9/2022	0
2/10/2022	6.3
2/11/2022	13.1
2/12/2022	4.4
2/13/2022	4.9
2/14/2022	4.2
2/15/2022	0.1
2/16/2022	0
2/17/2022	0
2/18/2022	1.5
2/19/2022	0
2/20/2022	0
2/21/2022	0
2/22/2022	0
2/23/2022	8.7
2/24/2022	6.4
2/25/2022	0.2
2/26/2022	1.7
2/27/2022	7.4
2/28/2022	2.9
3/1/2022	8.6
3/2/2022	8.6
3/3/2022	18.9
3/4/2022	9.8
3/5/2022	1.1
3/6/2022	4.5
3/7/2022	0.7
3/8/2022	0
3/9/2022	0.1
3/10/2022	0
3/11/2022	0
3/12/2022	0

3/13/2022	0.1
3/14/2022	12.5
3/15/2022	4.2
3/16/2022	5.3
3/17/2022	5.8
3/18/2022	0
3/19/2022	1
3/20/2022	12.6
3/21/2022	1.6
3/22/2022	0.7
3/23/2022	0
3/24/2022	11.7
3/25/2022	0
3/26/2022	7.8
3/27/2022	1.1
3/28/2022	34.7
3/29/2022	10.3
3/30/2022	1.7
3/31/2022	19
4/1/2022	22.9
4/2/2022	3.4
4/3/2022	0
4/4/2022	0
4/5/2022	0
4/6/2022	1.5
4/7/2022	0
4/8/2022	1.5
4/9/2022	13.2
4/10/2022	0.2
4/11/2022	0
4/12/2022	0
4/13/2022	0
4/14/2022	3
4/15/2022	0.2
4/16/2022	0.1
4/17/2022	6.8
4/18/2022	3.1
4/19/2022	4.9
4/20/2022	18.7
4/21/2022	1.6
4/22/2022	0

4/23/2022	0.8
4/24/2022	0
4/25/2022	0
4/26/2022	1
4/27/2022	0
4/28/2022	8.6
4/29/2022	5
4/30/2022	2.1
5/1/2022	0
5/2/2022	0
5/3/2022	0
5/4/2022	2.1
5/5/2022	8.2
5/6/2022	7.9
5/7/2022	0.4
5/8/2022	0
5/9/2022	0
5/10/2022	6.9
5/11/2022	4.6
5/12/2022	9.7
5/13/2022	0.3
5/14/2022	18.1
5/15/2022	2.5
5/16/2022	1.5
5/17/2022	16.6
5/18/2022	3.4
5/19/2022	NA
5/20/2022	NA
5/21/2022	NA
5/22/2022	NA
5/23/2022	NA
5/24/2022	NA
5/25/2022	NA
5/26/2022	NA
5/27/2022	NA
5/28/2022	NA
5/29/2022	NA
5/30/2022	NA
5/31/2022	NA
6/1/2022	NA
6/2/2022	NA

6/3/2022	NA
6/4/2022	NA
6/5/2022	NA
6/6/2022	NA
6/7/2022	NA
6/8/2022	NA
6/9/2022	NA
6/10/2022	NA
6/11/2022	NA
6/12/2022	NA
6/13/2022	NA
6/14/2022	NA
6/15/2022	NA
6/16/2022	NA
6/17/2022	NA
6/18/2022	NA
6/19/2022	NA
6/20/2022	NA
6/21/2022	NA
6/22/2022	NA
6/23/2022	NA
6/24/2022	NA
6/25/2022	NA
6/26/2022	NA
6/27/2022	NA
6/28/2022	NA
6/29/2022	NA
6/30/2022	NA
7/1/2022	NA
7/2/2022	NA
7/3/2022	NA
7/4/2022	NA
7/5/2022	NA
7/6/2022	NA
7/7/2022	NA
7/8/2022	NA
7/9/2022	NA
7/10/2022	NA
7/11/2022	NA
7/12/2022	NA
7/13/2022	NA

7/14/2022	NA	
7/15/2022	NA	
7/16/2022	NA	
7/17/2022	NA	
7/18/2022	NA	
7/19/2022	NA	
7/20/2022	NA	
7/21/2022	NA	
7/22/2022	NA	
7/23/2022	NA	
7/24/2022	NA	
7/25/2022	NA	
7/26/2022	NA	
7/27/2022	NA	
7/28/2022		0.1
7/29/2022		0
7/30/2022		0
7/31/2022		0
8/1/2022		1.2
8/2/2022		0.2
8/3/2022		0.6
8/4/2022		1.9
8/5/2022		0.5
8/6/2022		0
8/7/2022		0
8/8/2022		2.8
8/9/2022		0.1
8/10/2022		1.8
8/11/2022		1
8/12/2022		0
8/13/2022		0
8/14/2022		0
8/15/2022		0
8/16/2022		0
8/17/2022		0.7
8/18/2022		0
8/19/2022		1.2
8/20/2022		0.2
8/21/2022		5.3
8/22/2022		0
8/23/2022		0

8/24/2022	0
8/25/2022	0
8/26/2022	0
8/27/2022	0
8/28/2022	0.5
8/29/2022	1.8
8/30/2022	4.1
8/31/2022	0.1
9/1/2022	0
9/2/2022	0
9/3/2022	0.2
9/4/2022	0.2
9/5/2022	0.5
9/6/2022	0
9/7/2022	0
9/8/2022	0
9/9/2022	0
9/10/2022	1.2
9/11/2022	0
9/12/2022	0
9/13/2022	0
9/14/2022	0
9/15/2022	0
9/16/2022	4
9/17/2022	1.4
9/18/2022	0
9/19/2022	0
9/20/2022	0
9/21/2022	0
9/22/2022	0
9/23/2022	1.9
9/24/2022	0
9/25/2022	7.8
9/26/2022	0
9/27/2022	0
9/28/2022	5.6
9/29/2022	0.7
9/30/2022	0.3
10/1/2022	0.2
10/2/2022	0
10/3/2022	0

10/4/2022	0
10/5/2022	1.5
10/6/2022	0.1
10/7/2022	0
10/8/2022	0.8
10/9/2022	0
10/10/2022	0
10/11/2022	0
10/12/2022	0
10/13/2022	0
10/14/2022	10
10/15/2022	12.3
10/16/2022	0.8
10/17/2022	0.3
10/18/2022	5.2
10/19/2022	3.3
10/20/2022	8.5
10/21/2022	0.9
10/22/2022	0.7
10/23/2022	10.2
10/24/2022	3.6
10/25/2022	26.5
10/26/2022	0
10/27/2022	0
10/28/2022	0
10/29/2022	0
10/30/2022	0
10/31/2022	0
11/1/2022	0
11/2/2022	0.7
11/3/2022	0
11/4/2022	0
11/5/2022	0
11/6/2022	0
11/7/2022	0.7
11/8/2022	8.4
11/9/2022	0
11/10/2022	0
11/11/2022	0
11/12/2022	0
11/13/2022	0

11/14/2022	0
11/15/2022	3.4
11/16/2022	3.9
11/17/2022	0.6
11/18/2022	0
11/19/2022	0
11/20/2022	0
11/21/2022	4.3
11/22/2022	0
11/23/2022	0
11/24/2022	0
11/25/2022	0.4
11/26/2022	0.4
11/27/2022	0
11/28/2022	0
11/29/2022	0
11/30/2022	0
12/1/2022	0
12/2/2022	0
12/3/2022	0
12/4/2022	0
12/5/2022	0
12/6/2022	2.9
12/7/2022	0
12/8/2022	0
12/9/2022	0
12/10/2022	0.5
12/11/2022	3.9
12/12/2022	0
12/13/2022	0.8
12/14/2022	1.7
12/15/2022	0
12/16/2022	1.6
12/17/2022	2.3
12/18/2022	4.6
12/19/2022	0
12/20/2022	0
12/21/2022	0.8
12/22/2022	1.3
12/23/2022	0.2
12/24/2022	0

12/25/2022	3.8
12/26/2022	0.1
12/27/2022	1.1
12/28/2022	0
12/29/2022	0
12/30/2022	11
12/31/2022	0.1
1/1/2023	2.3
1/2/2023	0
1/3/2023	0
1/4/2023	0
1/5/2023	0
1/6/2023	4.5
1/7/2023	2.5
1/8/2023	12.6
1/9/2023	6.8
1/10/2023	5.3
1/11/2023	20.3
1/12/2023	8.8
1/13/2023	3.7
1/14/2023	2.7
1/15/2023	2.3
1/16/2023	0.2
1/17/2023	0.5
1/18/2023	0
1/19/2023	6.7
1/20/2023	17
1/21/2023	0.1
1/22/2023	0
1/23/2023	0
1/24/2023	0
1/25/2023	0
1/26/2023	0
1/27/2023	0
1/28/2023	0
1/29/2023	0
1/30/2023	0.6
1/31/2023	0
2/1/2023	3.9
2/2/2023	0
2/3/2023	0

2/4/2023	0.3
2/5/2023	0.7
2/6/2023	0
2/7/2023	0
2/8/2023	2.1
2/9/2023	0
2/10/2023	0.2
2/11/2023	0.9
2/12/2023	0
2/13/2023	0
2/14/2023	0
2/15/2023	0
2/16/2023	11.8
2/17/2023	0.1
2/18/2023	6.3
2/19/2023	0
2/20/2023	4.5
2/21/2023	1.3
2/22/2023	0
2/23/2023	1.8
2/24/2023	0
2/25/2023	0
2/26/2023	0
2/27/2023	0
2/28/2023	2.6
3/1/2023	0.5
3/2/2023	0
3/3/2023	0.5
3/4/2023	2.2
3/5/2023	8.2
3/6/2023	14.4
3/7/2023	1.2
3/8/2023	3.5
3/9/2023	1.5
3/10/2023	0.4
3/11/2023	0.2
3/12/2023	0
3/13/2023	16.6
3/14/2023	4.9
3/15/2023	0
3/16/2023	2.8

3/17/2023	0
3/18/2023	0
3/19/2023	0
3/20/2023	0
3/21/2023	0
3/22/2023	0
3/23/2023	3.1
3/24/2023	22.2
3/25/2023	2.7
3/26/2023	0
3/27/2023	5.4
3/28/2023	7.8
3/29/2023	4.9
3/30/2023	2.1
3/31/2023	1.3
4/1/2023	0.1
4/2/2023	5.4
4/3/2023	11.5
4/4/2023	5.7
4/5/2023	2
4/6/2023	6.5
4/7/2023	2.6
4/8/2023	20.1
4/9/2023	0
4/10/2023	6.5
4/11/2023	15.3
4/12/2023	0.2
4/13/2023	0.2
4/14/2023	0
4/15/2023	1.4
4/16/2023	4.2
4/17/2023	1.3
4/18/2023	0
4/19/2023	12.5
4/20/2023	0.8
4/21/2023	10.9
4/22/2023	1
4/23/2023	3.7
4/24/2023	3.5
4/25/2023	5.2
4/26/2023	20.3

4/27/2023	11.1
4/28/2023	1.1
4/29/2023	3
4/30/2023	0.1
5/1/2023	0.1
5/2/2023	0
5/3/2023	0.5
5/4/2023	0
5/5/2023	0
5/6/2023	0
5/7/2023	0
5/8/2023	0
5/9/2023	1.6
5/10/2023	11.3
5/11/2023	0.1
5/12/2023	1.3
5/13/2023	0.6
5/14/2023	2
5/15/2023	0
5/16/2023	0
5/17/2023	0
5/18/2023	0
5/19/2023	6.4
5/20/2023	21.1
5/21/2023	0
5/22/2023	1.5
5/23/2023	9.7
5/24/2023	0
5/25/2023	10.2
5/26/2023	0
5/27/2023	1.2
5/28/2023	0.9
5/29/2023	0
5/30/2023	0
5/31/2023	4.7
6/1/2023	0
6/2/2023	0
6/3/2023	0
6/4/2023	0
6/5/2023	1.7
6/6/2023	6.8

6/7/2023	3.8
6/8/2023	0.2
6/9/2023	0.9
6/10/2023	7.9
6/11/2023	0.1
6/12/2023	0
6/13/2023	0
6/14/2023	0
6/15/2023	2.2
6/16/2023	0.3
6/17/2023	0.1
6/18/2023	0
6/19/2023	0
6/20/2023	0
6/21/2023	0
6/22/2023	0.1
6/23/2023	0
6/24/2023	9.3
6/25/2023	0
6/26/2023	0.2
6/27/2023	0
6/28/2023	0
6/29/2023	1.3
6/30/2023	0
7/1/2023	0
7/2/2023	0
7/3/2023	0
7/4/2023	0
7/5/2023	0.1
7/6/2023	0
7/7/2023	8.3
7/8/2023	12.6
7/9/2023	2.4
7/10/2023	0.1
7/11/2023	0
7/12/2023	0
7/13/2023	0
7/14/2023	0.3
7/15/2023	0.9
7/16/2023	1.6
7/17/2023	0.1

7/18/2023	0.3
7/19/2023	0.5
7/20/2023	0.2
7/21/2023	0.2
7/22/2023	0
7/23/2023	0
7/24/2023	0
7/25/2023	0
7/26/2023	0
7/27/2023	1.4
7/28/2023	0.4
7/29/2023	0
7/30/2023	0
7/31/2023	0
8/1/2023	0
8/2/2023	0
8/3/2023	0
8/4/2023	0
8/5/2023	0
8/6/2023	0
8/7/2023	0
8/8/2023	0
8/9/2023	0.9
8/10/2023	0
8/11/2023	0.4
8/12/2023	0
8/13/2023	2.5
8/14/2023	1.8
8/15/2023	0.9
8/16/2023	0.1
8/17/2023	0
8/18/2023	0
8/19/2023	0
8/20/2023	1.8
8/21/2023	17.8
8/22/2023	2.6
8/23/2023	0
8/24/2023	0
8/25/2023	0
8/26/2023	0
8/27/2023	0

8/28/2023		1.8
8/29/2023		0
8/30/2023		0
8/31/2023		0
9/1/2023		0
9/2/2023		0
9/3/2023		0
9/4/2023		0
9/5/2023		0.4
9/6/2023		0
9/7/2023		0
9/8/2023		0
9/9/2023		0
9/10/2023		0
9/11/2023		0
9/12/2023		0
9/13/2023		0
9/14/2023		0.3
9/15/2023		0.6
9/16/2023		0
9/17/2023		0
9/18/2023		0
9/19/2023		0.2
9/20/2023		0
9/21/2023		0
9/22/2023		0
9/23/2023		0
9/24/2023		0
9/25/2023		0
9/26/2023		0.7
9/27/2023		0
9/28/2023		0
9/29/2023		0.1
9/30/2023		0.1
10/1/2023		0
10/2/2023		0
10/3/2023		0
10/4/2023	NA	
10/5/2023	NA	
10/6/2023	NA	
10/7/2023	NA	

10/8/2023	NA	
10/9/2023	NA	
10/10/2023	NA	
10/11/2023	NA	
10/12/2023	NA	
10/13/2023	NA	
10/14/2023	NA	
10/15/2023	NA	
10/16/2023	NA	
10/17/2023		0
10/18/2023		0.3
10/19/2023		0
10/20/2023		0
10/21/2023		4.3
10/22/2023		0.1
10/23/2023		0
10/24/2023		0
10/25/2023		0
10/26/2023		0
10/27/2023		0.2
10/28/2023		0
10/29/2023		0
10/30/2023		4.7
10/31/2023		0.1
11/1/2023		0
11/2/2023		0
11/3/2023		0
11/4/2023		32.5
11/5/2023		11.6
11/6/2023		3.8
11/7/2023		0
11/8/2023		0
11/9/2023		0.6
11/10/2023		0.2
11/11/2023		0.1
11/12/2023		0
11/13/2023		0
11/14/2023		1
11/15/2023		7.7
11/16/2023		0.5
11/17/2023		0

11/18/2023	0
11/19/2023	0.8
11/20/2023	0.5
11/21/2023	0.1
11/22/2023	0.4
11/23/2023	4.8
11/24/2023	4
11/25/2023	0.8
11/26/2023	0
11/27/2023	0.3
11/28/2023	0.5
11/29/2023	0
11/30/2023	2.1
12/1/2023	0.1
12/2/2023	0
12/3/2023	0
12/4/2023	0
12/5/2023	0.7
12/6/2023	0
12/7/2023	0.1
12/8/2023	0.1
12/9/2023	0
12/10/2023	0
12/11/2023	0
12/12/2023	0
12/13/2023	0
12/14/2023	0
12/15/2023	14.2
12/16/2023	3
12/17/2023	4.8
12/18/2023	3.3
12/19/2023	0
12/20/2023	10.8
12/21/2023	0.1
12/22/2023	0
12/23/2023	16.1
12/24/2023	0.2
12/25/2023	0
12/26/2023	16.5
12/27/2023	34.1
12/28/2023	9.7

12/29/2023	4.8
12/30/2023	1.5
12/31/2023	1.7
1/1/2024	1.4
1/2/2024	1.4
1/3/2024	3
1/4/2024	8
1/5/2024	3.7
1/6/2024	0.2
1/7/2024	0
1/8/2024	0.1
1/9/2024	0.7
1/10/2024	0
1/11/2024	1.1
1/12/2024	0.6
1/13/2024	4.1
1/14/2024	8.4
1/15/2024	0.7
1/16/2024	NA
1/17/2024	NA
1/18/2024	NA
1/19/2024	NA
1/20/2024	NA
1/21/2024	NA
1/22/2024	NA
1/23/2024	NA
1/24/2024	NA
1/25/2024	NA
1/26/2024	NA
1/27/2024	NA
1/28/2024	NA
1/29/2024	NA
1/30/2024	NA
1/31/2024	NA
2/1/2024	NA
2/2/2024	NA
2/3/2024	NA
2/4/2024	NA
2/5/2024	NA
2/6/2024	NA
2/7/2024	NA

2/8/2024	NA	
2/9/2024	NA	
2/10/2024		2.1
2/11/2024		0
2/12/2024		2.4
2/13/2024		0.1
2/14/2024		0.6
2/15/2024		0
2/16/2024		1.9
2/17/2024		0.7
2/18/2024		0
2/19/2024		15.4
2/20/2024		8.2
2/21/2024		0
2/22/2024		0
2/23/2024		0
2/24/2024		0
2/25/2024		0
2/26/2024		0.6
2/27/2024		0
2/28/2024		0
2/29/2024		5.3
3/1/2024		19.8
3/2/2024		8.2
3/3/2024		0.8
3/4/2024		0.6
3/5/2024		0.1
3/6/2024		0.4
3/7/2024		0.1
3/8/2024		1
3/9/2024		0.3
3/10/2024		0.1
3/11/2024		0
3/12/2024		0
3/13/2024		0
3/14/2024		0.7
3/15/2024		0
3/16/2024		0
3/17/2024		0
3/18/2024		0
3/19/2024		0.4

3/20/2024	0
3/21/2024	33.4
3/22/2024	5.6
3/23/2024	0
3/24/2024	0
3/25/2024	0
3/26/2024	0
3/27/2024	0
3/28/2024	0
3/29/2024	0
3/30/2024	0
3/31/2024	0
4/1/2024	6.7
4/2/2024	12.7
4/3/2024	21.9
4/4/2024	0
4/5/2024	0.9
4/6/2024	0.1
4/7/2024	0
4/8/2024	0
4/9/2024	0
4/10/2024	0
4/11/2024	1.2
4/12/2024	0
4/13/2024	0
4/14/2024	0
4/15/2024	0
4/16/2024	2.3
4/17/2024	5.8
4/18/2024	0
4/19/2024	11
4/20/2024	0.5
4/21/2024	4.1
4/22/2024	1.9
4/23/2024	16.1
4/24/2024	11.7
4/25/2024	0.8
4/26/2024	4.4
4/27/2024	5.2
4/28/2024	3.4
4/29/2024	4.7

4/30/2024	0.1
5/1/2024	0
5/2/2024	0
5/3/2024	9.9
5/4/2024	11.2
5/5/2024	9.6
5/6/2024	0
5/7/2024	6.6
5/8/2024	7.4
5/9/2024	1.5
5/10/2024	0.2
5/11/2024	0.4
5/12/2024	0
5/13/2024	0.6
5/14/2024	15.6
5/15/2024	6.7
5/16/2024	13.1
5/17/2024	10.3
5/18/2024	0.2
5/19/2024	1.8
5/20/2024	0.5
5/21/2024	0
5/22/2024	0.1
5/23/2024	0.3
5/24/2024	0
5/25/2024	12.1
5/26/2024	0.1
5/27/2024	4.6
5/28/2024	15.2
5/29/2024	0.2
5/30/2024	0
5/31/2024	0
6/1/2024	0
6/2/2024	0
6/3/2024	0
6/4/2024	0
6/5/2024	0.7
6/6/2024	0.8
6/7/2024	0.1
6/8/2024	0
6/9/2024	0

6/10/2024	5.2
6/11/2024	2.7
6/12/2024	0
6/13/2024	0.5
6/14/2024	0
6/15/2024	3.5
6/16/2024	16.1
6/17/2024	0
6/18/2024	0
6/19/2024	0.6
6/20/2024	4.2
6/21/2024	1.1
6/22/2024	0.9
6/23/2024	0
6/24/2024	0
6/25/2024	0
6/26/2024	0
6/27/2024	0
6/28/2024	0
6/29/2024	0
6/30/2024	0
7/1/2024	0
7/2/2024	5.4
7/3/2024	0
7/4/2024	0.2
7/5/2024	1.7
7/6/2024	0.1
7/7/2024	0.4
7/8/2024	0
7/9/2024	0
7/10/2024	0
7/11/2024	0
7/12/2024	4.4
7/13/2024	7
7/14/2024	0.1
7/15/2024	0
7/16/2024	0
7/17/2024	0
7/18/2024	0
7/19/2024	0
7/20/2024	0

7/21/2024	0
7/22/2024	0
7/23/2024	0
7/24/2024	0
7/25/2024	0.6
7/26/2024	0
7/27/2024	0
7/28/2024	0
7/29/2024	0
7/30/2024	0.1
7/31/2024	0
8/1/2024	0.2
8/2/2024	0
8/3/2024	0
8/4/2024	0
8/5/2024	0
8/6/2024	1.2
8/7/2024	1.3
8/8/2024	0.1
8/9/2024	0
8/10/2024	0
8/11/2024	0
8/12/2024	0
8/13/2024	0
8/14/2024	0
8/15/2024	0
8/16/2024	NA
8/17/2024	0
8/18/2024	0
8/19/2024	0
8/20/2024	0
8/21/2024	0.1
8/22/2024	0
8/23/2024	0.2
8/24/2024	0
8/25/2024	0
8/26/2024	9.2
8/27/2024	0
8/28/2024	0
8/29/2024	0
8/30/2024	0

8/31/2024	0
9/1/2024	0
9/2/2024	2.6
9/3/2024	0
9/4/2024	0
9/5/2024	0.6
9/6/2024	0
9/7/2024	0
9/8/2024	0.2
9/9/2024	1.7
9/10/2024	0
9/11/2024	0
9/12/2024	0
9/13/2024	0
9/14/2024	0
9/15/2024	0.8
9/16/2024	0.1
9/17/2024	0
9/18/2024	0
9/19/2024	0.4
9/20/2024	0
9/21/2024	1.9
9/22/2024	1.2
9/23/2024	0
9/24/2024	0
9/25/2024	0
9/26/2024	0
9/27/2024	0
9/28/2024	5.8
9/29/2024	15.5
9/30/2024	12.6
10/1/2024	1.7
10/2/2024	0
10/3/2024	0
10/4/2024	3.7
10/5/2024	0.1
10/6/2024	0
10/7/2024	0
10/8/2024	0
10/9/2024	2.2
10/10/2024	21.1

10/11/2024	0
10/12/2024	0
10/13/2024	0
10/14/2024	1.2
10/15/2024	0.2
10/16/2024	0
10/17/2024	0
10/18/2024	0
10/19/2024	0
10/20/2024	0
10/21/2024	0
10/22/2024	0
10/23/2024	3.6
10/24/2024	0.1
10/25/2024	0
10/26/2024	0
10/27/2024	0.1
10/28/2024	7.8
10/29/2024	0
10/30/2024	0
10/31/2024	0
11/1/2024	0
11/2/2024	0
11/3/2024	0
11/4/2024	0
11/5/2024	35.1
11/6/2024	0
11/7/2024	0
11/8/2024	0
11/9/2024	0
11/10/2024	0
11/11/2024	0
11/12/2024	0
11/13/2024	3.6
11/14/2024	0
11/15/2024	0
11/16/2024	0
11/17/2024	0
11/18/2024	0
11/19/2024	0
11/20/2024	0

11/21/2024	0
11/22/2024	2.1
11/23/2024	3.4
11/24/2024	0
11/25/2024	0
11/26/2024	29.8
11/27/2024	4.3
11/28/2024	0.4
11/29/2024	0
11/30/2024	0
12/1/2024	0
12/2/2024	0
12/3/2024	6.3
12/4/2024	3.7
12/5/2024	10
12/6/2024	1.4
12/7/2024	4
12/8/2024	5.8
12/9/2024	0
12/10/2024	0.1
12/11/2024	0.1
12/12/2024	0
12/13/2024	1.9
12/14/2024	0.1
12/15/2024	28.3
12/16/2024	0.1
12/17/2024	0
12/18/2024	1.4
12/19/2024	0
12/20/2024	0
12/21/2024	0
12/22/2024	3.4
12/23/2024	4.5
12/24/2024	0.8
12/25/2024	11
12/26/2024	13.8
12/27/2024	7.2
12/28/2024	2.9
12/29/2024	6.7
12/30/2024	5.3
12/31/2024	3.8

1/1/2025	14
1/2/2025	12.2
1/3/2025	6.4
1/4/2025	4.7
1/5/2025	1.3
1/6/2025	1.2
1/7/2025	8.6
1/8/2025	13.3
1/9/2025	1.8
1/10/2025	0
1/11/2025	1.3
1/12/2025	0.1
1/13/2025	0
1/14/2025	1.9
1/15/2025	0.2
1/16/2025	4
1/17/2025	0.2
1/18/2025	0
1/19/2025	0.4
1/20/2025	0.1
1/21/2025	13.6
1/22/2025	0.3
1/23/2025	0.1
1/24/2025	0.4
1/25/2025	0.6
1/26/2025	0.4
1/27/2025	0

Fuente: (Estación Meteorológica MACCARD-UDA, 2025)

Anexo 3: Caudales promedio agua pluvial

Tiempo (meses)	**PROMEDIO caudal (lt/día)**
septiembre 2021	555.9281308
octubre 2021	3259.635561
noviembre 2021	3528.89154
diciembre 2021	1736.932094
enero 2022	564.9754935
febrero 2022	1818.392979
marzo 2022	3830.911897
abril 2022	2139.90594

mayo 2022	1726.43069
junio 2022	
julio 2022	2.100280645
agosto 2022	504.0673548
septiembre 2022	516.52902
octubre 2022	1783.138268
noviembre 2022	494.82612
diciembre 2022	770.8029968
enero 2023	2035.171945
febrero 2023	848.7384107
marzo 2023	2234.698606
abril 2023	3389.99298
mayo 2023	1537.405432
junio 2023	757.43121
julio 2023	617.4825097
agosto 2023	642.6858774
septiembre 2023	52.08696
octubre 2023	203.7272226
noviembre 2023	1569.11967
diciembre 2023	2558.141826
enero 2024	701.4937355
febrero 2024	837.4325897
marzo 2024	1501.700661
abril 2024	3389.99298
mayo 2024	2692.559787
junio 2024	789.98556
julio 2024	420.056129
agosto 2024	258.3345194
septiembre 2024	941.90586
octubre 2024	877.9173097
noviembre 2024	1708.01823
diciembre 2024	2574.944071
enero 2025	2100.358433

Fuente: (Autor, 2025)

Anexo 4: Caudales diarios de la oferta y demanda de agua gris

CAUDALES DIARIOS (lt/día)		
Tiempo (meses)	**Lavamanos**	**Sanitarios y urinarios**
12-Nov-24	70	270
13-Nov-2024	70	276
14-Nov-2024		
15-Nov-2024	70	280
16-Nov-2024	40	440
17-Nov-2024	40	445
18-Nov-2024		
19-Nov-2024	40	450
20-Nov-2024	110	1260
21-Nov-2024	180	1060
22-Nov-2024	60	1020
23-Nov-2024	40	1000
24-Nov-2024		
25-Nov-2024	20	90
26-Nov-2024	80	920
27-Nov-2024	70	1170
28-Nov-2024	110	1090
29-Nov-2024	90	880
30-Nov-2024	30	230
1-Dec-2024		
2-Dec-2024	30	230
3-Dec-2024	60	580
4-Dec-2024	90	640
5-Dec-2024	60	840
6-Dec-2024	40	800
7-Dec-2024	20	90
8-Dec-2024		
9-Dec-2024	20	90
10-Dec-2024	90	940
11-Dec-2024	70	720
12-Dec-2024	70	990
13-Dec-2024	30	135
14-Dec-2024	30	140
15-Dec-2024	30	138
16-Dec-2024	30	140
17-Dec-24	30	137
18-Dec-24	30	135
19-Dec-24	30	139

20-Dec-24	30	140
21-Dec-24	30	140
22-Dec-24	30	140
23-Dec-24	30	140
24-Dec-24	30	135
25-Dec-24	30	130
26-Dec-24	30	135
27-Dec-24	30	139
28-Dec-24	30	140
29-Dec-24	30	140
30-Dec-24	30	135
31-Dec-24	30	135
1-Jan-25	30	140
2-Jan-25	30	140
3-Jan-25	30	140
4-Jan-25	30	140
5-Jan-25	30	140
6-Jan-25	30	140
7-Jan-25	30	140
8-Jan-25	30	140
9-Jan-25	30	140
10-Jan-25	30	140
11-Jan-25	30	140
12-Jan-25	30	140
13-Jan-25	30	140
14-Jan-25	30	140
15-Jan-25	30	140
16-Jan-25	30	140
17-Jan-25	30	140
18-Jan-25	30	140
19-Jan-25	30	140
20-Jan-25		
21-Jan-25	30	140
22-Jan-25	50	150
23-Jan-25	30	100
24-Jan-25	30	100
25-Jan-25	30	100
26-Jan-25	30	100
27-Jan-25	30	100
28-Jan-25	30	100
29-Jan-25	30	100

30-Jan-25	30	100
31-Jan-25	30	100
1-Feb-25	30	100
2-Feb-25	30	100
3-Feb-25	30	100
4-Feb-25	30	100
5-Feb-25	30	100
6-Feb-25		
7-Feb-25	30	100
8-Feb-25	40	320
9-Feb-25	40	320
10-Feb-25	40	340
11-Feb-25	40	325
12-Feb-25	40	340
13-Feb-25	40	346
14-Feb-25	40	349
15-Feb-25	40	340
16-Feb-25	40	340
17-Feb-25	40	327
18-Feb-25	40	324
19-Feb-25	40	340
20-Feb-25	40	340
21-Feb-25	40	340
22-Feb-25	40	340
23-Feb-25		
24-Feb-25	40	340
25-Feb-25	120	1220
26-Feb-25	80	830
27-Feb-25	80	1550
28-Feb-25	90	640
1-Mar-25	10	80
2-Mar-25	10	80
3-Mar-25	10	80
4-Mar-25		
5-Mar-25	10	80
6-Mar-25	70	400
7-Mar-25	90	1100

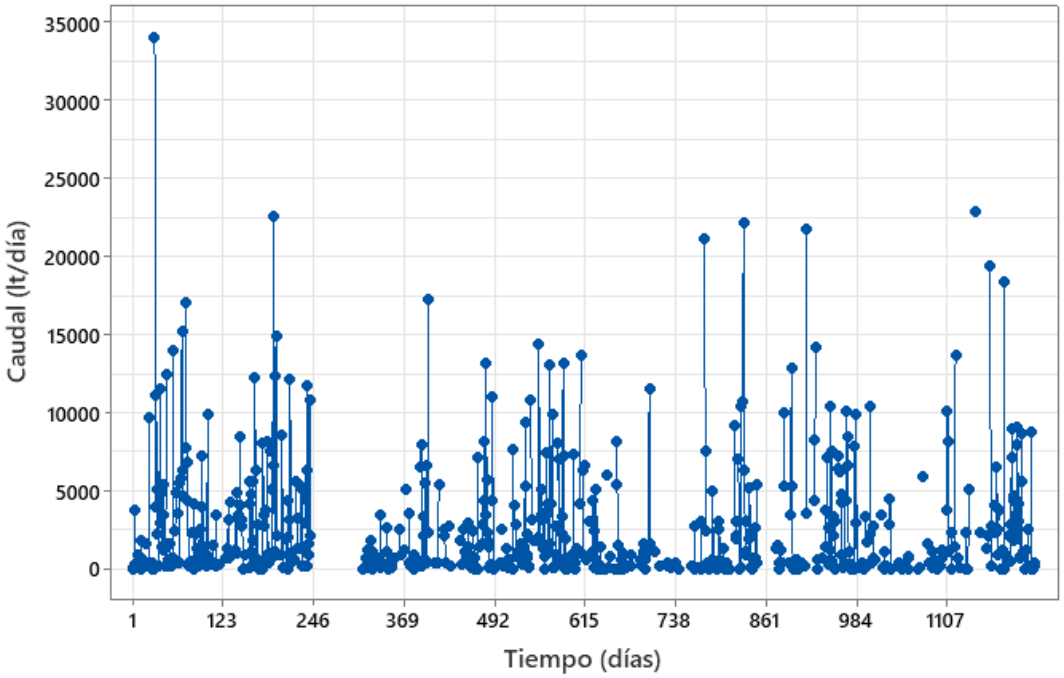
Fuente: (Autor, 2025)

Anexo 5: Caudales promedios mensual de oferta y demanda de agua gris

PROMEDIO MENSUAL caudal (lt/día)		
Tiempo (meses)	**lavamanos**	**sanitarios y urinarios**
diciembre 2024	38.62068966	294.2413793
enero 2025	30.66666667	128.3333333
febrero 2025	45.76923077	392.7307692
marzo 2025	33.33333333	303.3333333

Fuente: autor (2025)

Anexo 6: Gráfica de Serie de Tiempo para la variable Caudal (lt/día)



Fuente: (Autor, 2025)