

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE RECICLAJE DE AGUAS GRISES DE UN
PROYECTO DE EDIFICACIÓN MULTIFAMILIAR**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de BACHILLERA EN CIENCIAS CON
MENCION EN INGENIERÍA CIVIL**

AUTORAS:

Samanta Sasha Espinal Gallegos

Lilian Roxana Gamarra Palomino

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de BACHILLER EN CIENCIAS CON
MENCION EN INGENIERÍA CIVIL**

AUTORES:

Yampier Pol Ramos Lobato

Gilmer Efraín Rodríguez Infantes

Santiago Rosas Cabrera

ASESOR:

Gregory Javier Naveda Alva

Lima, octubre, 2021

Resumen

El agua potable es uno de los recursos más importantes para la humanidad. Actualmente, el uso doméstico de agua potable es ineficiente en la mayoría de edificaciones multifamiliares de nuestro país, ya que diversas actividades no requieren de agua potable, y se puede optar por usar agua reciclada.

En la presente investigación se discuten la viabilidad y los beneficios de la implementación de sistemas de reciclaje de aguas grises en edificaciones multifamiliares, con especial consideración en el contexto peruano. Se concluye que los sistemas de reciclaje son métodos eficientes de ahorro de agua, por lo que pueden tener una alta viabilidad económica y ambiental a largo plazo, y agregan valor a los proyectos de edificaciones de vivienda.

Adicionalmente, se comparan los tipos de tratamiento de aguas grises predominantes en la literatura, que incluyen tratamiento biológico de reactores secuenciales y reactores de membrana, y los métodos de desinfección posterior al tratamiento de cloración, ozonización y radiación ultravioleta. Estas alternativas se compararon según la inversión inicial requerida, costos de mantenimiento, capacidad de volumen de tratamiento, calidad de agua resultante y efectos en el medio ambiente. Se concluye que los reactores secuenciales y la cloración son los métodos más apropiados para edificaciones de vivienda de mediana escala en Perú.

ÍNDICE

1	Generalidades	1
1.1	Introducción	1
1.2	Justificación.....	1
1.3	Alcance.....	1
1.4	Objetivos	2
1.4.1	<i>Objetivo General:</i>	2
1.4.2	<i>Objetivos Específicos:</i>	2
1.5	Metodología	2
2	Revisión de literatura.....	3
2.1	Impacto Ambiental de Sistemas de Reciclaje de Aguas Grises	3
2.1.1	<i>Importancia del Agua</i>	3
2.1.2	<i>Estadísticas de Consumo de Agua</i>	3
2.1.3	<i>Beneficios de Reciclaje de Aguas Grises</i>	4
2.2	Detalles de Sistemas de Reciclaje de Agua en Edificaciones	6
2.2.1	<i>Sistema de Recolección</i>	6
2.2.2	<i>Origen y Uso de Aguas Grises</i>	8
2.2.3	<i>Recomendaciones de Sistema de Distribución</i>	8
2.3	Tratamiento de Aguas Grises, Tecnología y Posibles Usos.....	9
2.3.1	<i>Riesgo Sanitario y Necesidad de Tratamiento</i>	9
2.3.2	<i>Proceso de Tratamiento</i>	9
2.3.3	<i>Tratamiento Físico</i>	10
2.3.4	<i>Tratamiento Químico</i>	11
2.3.5	<i>Tratamiento Biológico</i>	11
2.3.6	<i>Tratamiento Extenso</i>	12
2.3.7	<i>Desinfección en el Tratamiento de Aguas Grises</i>	13
2.3.8	<i>Objetivos del Tratamiento</i>	15
2.4	Análisis económico de sistemas de reciclaje de aguas grises	17
2.4.1	<i>Métodos de Determinación de Viabilidad</i>	17
2.4.2	<i>Casos de Evaluaciones Económicas de Sistemas de Reciclaje de Aguas Grises</i> ...	17
3	Desarrollo de la investigación	19

3.1	Comparación Teórica de Sistemas de Tratamiento: Beneficios Económicos y Ambientales.....	19
3.1.1	<i>Descripción del Sistema de Reciclaje</i>	19
3.1.2	<i>Calidad de Agua e Impacto Ambiental</i>	22
3.1.3	<i>Costos</i>	25
3.1.4	<i>Información sobre Modelos Escogidos</i>	26
3.2	Resultados	27
3.3	Discusión Crítica de Principales Hallazgos	27
3.3.1	<i>Tratamiento Biológico</i>	27
3.3.2	<i>Desinfección</i>	28
4	Conclusiones y Recomendaciones.....	29
4.1	Conclusiones	29
4.1.1	Generalidades.....	29
4.1.2	Sobre el Sistema de Reciclaje.....	29
4.1.3	Sobre el Tratamiento.....	30
4.1.4	Sobre la Desinfección	30
4.1.5	Sobre la Edificación Propuesta.....	31
4.2	Recomendaciones.....	31
5	Referencias	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Calidad de agua de entrada.	15
Tabla 2. Características recomendadas para uso residencial de aguas recicladas.	16



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Utilización de agua potable en el hogar.	4
Figura 2 Esquema de sistema de reciclaje de aguas grises en edificación residencial.	7
Figura 3 Esquema de sistema de distribución de agua tratada con recirculación.	8
Figura 4 Etapas de tratamiento de aguas grises.	10
Figura 5 Etapas de tratamiento de aguas grises.	10
Figura 6 Tipo de tratamiento recomendado según carga de contaminantes.	14



1 Generalidades

1.1 Introducción

En los últimos años, la contaminación y el uso irresponsable del agua se ha vuelto un problema incrementalmente importante. Al analizar la distribución de agua potable en el día a día, se puede notar una significativa ineficiencia en el agua de un solo uso.

Hoy en día, es factible dar un tratamiento a las aguas grises para que sean reutilizadas en diversas actividades que no requieren agua potable, como el riego de jardines. Implementar un sistema de reciclaje de aguas grises en proyectos de edificaciones multifamiliares, implica tanto un impacto positivo para el medio ambiente, como un aumento en el valor del proyecto.

1.2 Justificación

En la actualidad, tanto la sostenibilidad y la eficiencia económica son temas de alta importancia. Un sistema de reciclaje de aguas grises presenta una manera de incorporar estos conceptos en la ingeniería, ya que el reciclaje de agua ayuda a conservar un recurso no renovable y efectivamente reducir su consumo en una edificación, beneficiando a los residentes, y aumentando valor a la misma construcción. Se estima que estos sistemas pueden traer un ahorro diario de 96 a 240 litros por familia (Baquero, 2013). Al considerar un mayor número de usuarios, se puede visualizar que cada edificio multifamiliar que emplee un sistema de reciclaje de aguas representará una reducción significativa en el consumo de agua potable.

En el caso específico de Perú, donde el sector de construcción es tan amplio y el abastecimiento de agua suele ser problemático, popularizar el uso de este tipo de sistemas traería grandes beneficios económicos y ambientales.

1.3 Alcance

En esta investigación se tratan distintos temas, los cuales deben ser estudiados para comprender su importancia y la factibilidad de su implementación.

Empezando con una mirada a gran escala, la sostenibilidad es un concepto directamente relacionado a la investigación, puesto que se trata del uso de un recurso limitado y muy importante. Para analizar el impacto ambiental de estos sistemas, se tratan conceptos como evaluación de ciclo de vida, consumo de energía, y reducción de gases de efecto invernadero.

También, se explicará cuáles son los detalles de estos sistemas, cómo funcionan, qué se necesita para implementarlo y qué herramientas existen para ello. Se tendrá especial consideración por explicar los diferentes procesos de tratamiento de aguas grises.

Finalmente, se explicará la relación entre la reducción del consumo de agua potable y beneficios en costos a largo plazo, con el fin de esclarecer las herramientas que utilizan empresas constructoras para determinar la factibilidad de su implementación.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General:

Identificar el sistema de tratamiento de aguas grises para edificios multifamiliares más apto para el contexto de Perú.

1.4.2 Objetivos Específicos:

- Definir los diferentes tipos de sistemas de tratamientos de aguas grises implementados en edificaciones multifamiliares.
- Comparar los distintos sistemas de tratamientos a través del costo, capacidad, calidad de agua y beneficios ambientales.
- Determinar cuál o cuáles de los sistemas pueden ser implementados en una edificación multifamiliar de 6 departamentos ubicada en Perú.

1.5 Metodología

La presente investigación es descriptiva cualitativa, puesto que compara distintas características y fenómenos presentes en los diversos tipos de tratamiento de aguas grises.

Para lograr los objetivos propuestos, en este trabajo se describirá, a través de una investigación bibliográfica, el método de recolección de aguas grises a través de las instalaciones en la edificación, el proceso de tratamiento de agua, posibles usos y beneficios de reutilización.

2 Revisión de literatura

2.1 Impacto Ambiental de Sistemas de Reciclaje de Aguas Grises

2.1.1 *Importancia del Agua*

Nuestro país cuenta con un volumen anual promedio de 2 046 287 MMC de agua. En cuanto a recursos hídricos, está considerado entre los 20 países más ricos del mundo, pues cuenta con 72,510 metros cúbicos anuales de agua por cada habitante. Sin embargo, esto no se traduce en un abastecimiento alto para todos los peruanos. La vertiente del Pacífico, que abastece de agua al 65% de la población, solamente cuenta con 1,8% del volumen de agua en Perú (Ministerio de Agricultura, 2011). Es así que, para gran parte de los peruanos, el agua es considerada un recurso limitado, e incluso escaso.

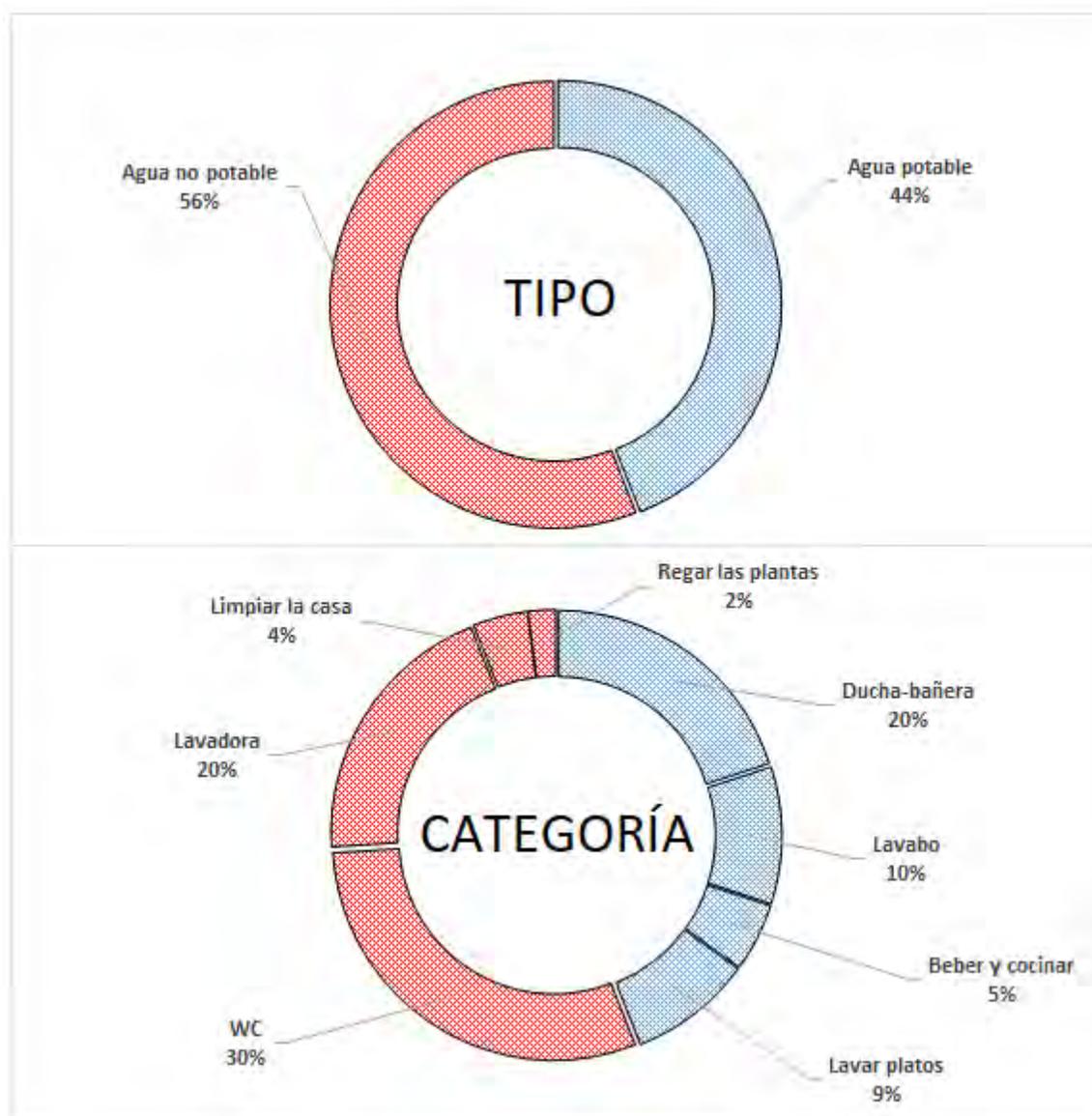
2.1.2 *Estadísticas de Consumo de Agua*

El consumo de agua potable varía mucho para cada individuo, ya que las personas hacen uso del agua para distintas actividades y en distintas proporciones. Como un estimado, Sedapal indica que el peruano promedio consume 163 litros por día. Sin embargo, en el distrito de San Isidro en Lima, se consume en promedio 254 litros por habitante cada día. A comparación, la OMS recomienda que la consunción de agua por habitante no debe exceda de 100 litros por día (Gestión, 2019).

Una estadística importante para analizar el posible impacto de los sistemas de reciclaje de aguas grises es el porcentaje de agua usada en hogares correspondiente a cada actividad. Un análisis en España halló que el 56% del agua utilizada no necesita ser potable, pues se usa en descargas de inodoros, lavadoras, para limpiar la casa o regar plantas, como se ilustra en la Figura 1 (Suárez et al., 2012). Por otro lado, Galeano indica que este porcentaje sería de 40.8% aproximadamente, si se toman estimaciones de Bogotá, Barcelona y Madrid (Galeano, 2017). Si bien, las estadísticas presentadas pueden variar para nuestro contexto, nos ayudan a comprender el impacto que pueden tener los sistemas de reciclaje de agua al ser utilizados en edificaciones multifamiliares de Lima.

Figura 1

Utilización de agua potable en el hogar.



2.1.3 Beneficios de Reciclaje de Aguas Grises

Al emplear sistemas de reciclaje de aguas grises, se reduce considerablemente el consumo de agua potable. Esto se traduce en ahorros en energía, costos, y en reducciones en emisiones de gases de efecto invernadero. Es importante notar que las reducciones en consumo de agua varían para cada caso, por lo que se deben evaluar individualmente. A continuación, se presentan estadísticas de ahorros recopiladas de distintos proyectos.

Un estudio realizado en edificaciones residenciales en Sudáfrica, concluye que el reciclaje de aguas grises puede conservar aproximadamente 23.5% del agua, resultando en un ahorro de 32.3% en el costo de agua mensual. Además, el modelo de control predictivo de circuito abierto usado en este estudio presenta un ahorro de 59.2% de ahorro en costos de energía a comparación de otros sistemas de reciclaje de agua (Wanjiru y Xia, 2017).

Otro estudio realizado en Los Ángeles, concluye que la demanda de agua potable para hogares de una familia y multifamiliares se reduce en 27% y 38% respectivamente. Señala además que el agua gris disponible equivale al 25% de la demanda de agua de la ciudad, y que un nivel de participación de 10% llevaría a reducir la energía usada en tratamiento y suministro de agua en 43 000 MW·h/año. (Yu et al., 2015)

Finalmente, un estudio realizado en un edificio residencial de 72 departamentos en Portugal, concluye que se puede alcanzar un ahorro anual de 3352 m³ de agua lo cual representa un ahorro en el consumo de agua de aproximadamente 25.6% (Meléndez-Pérez et al., 2019).

En cuanto al rubro ambiental, es necesario hacer un estudio de los sistemas de reciclaje y todo el proceso que éste implica, el cual incluye la energía necesaria para el abastecimiento de agua, y el impacto ambiental originado por el tratamiento de las aguas grises.

A partir de un estimado donde el 40% de agua utilizada en una vivienda es considerada agua gris, Galeano calcula que se obtiene un ahorro total de 660.09 kg de CO₂ equivalente por usuario en un periodo de 20 años, el cual representa la vida útil del sistema de reciclaje de agua que se consideró para ese trabajo de investigación. Este valor es comparable a la captura de carbono que realizan 1.7 robles (Galeano, 2017). Es importante notar que se restó 374.64 kg de CO₂eq del ahorro total, correspondientes a las emisiones generadas por el tratamiento de aguas grises, las cuáles son mayormente generadas por la energía que requiere el proceso. Estas emisiones pueden ser mitigadas si se hace uso de energía renovable para el proceso de tratamiento.

Un análisis de ciclo de vida de sistemas de reciclaje de aguas grises en Malasia halló que presentan bajos niveles en agotamiento abiótico, potencial de eutroficación y agotamiento de capa de ozono. Sin embargo, a comparación de alternativas como recolección de agua de lluvias y sistemas híbridos que fusionan ambos conceptos, los sistemas de reciclaje de aguas grises son considerados menos factibles por el autor, ya que presentan mayor impacto ambiental (Leong et al., 2019).

Una investigación acerca de reciclaje de aguas grises en hogares de Colombia encontró que el 30% del agua usada es apta para ser reciclada y reutilizada en descargas de inodoros. Estimó además que el ahorro promedio alcanzaría los 14 275 dólares por hogar. Otros beneficios hallados incluyen la preservación del medio ambiente al disminuir la carga contaminante vertida al alcantarillado y el hecho que los constructores están muy dispuestos a implementar sistemas de reciclaje de aguas grises en proyectos, ya que aumenta valor a la edificación y genera ventaja competitiva (Hernández y Díaz, 2014).

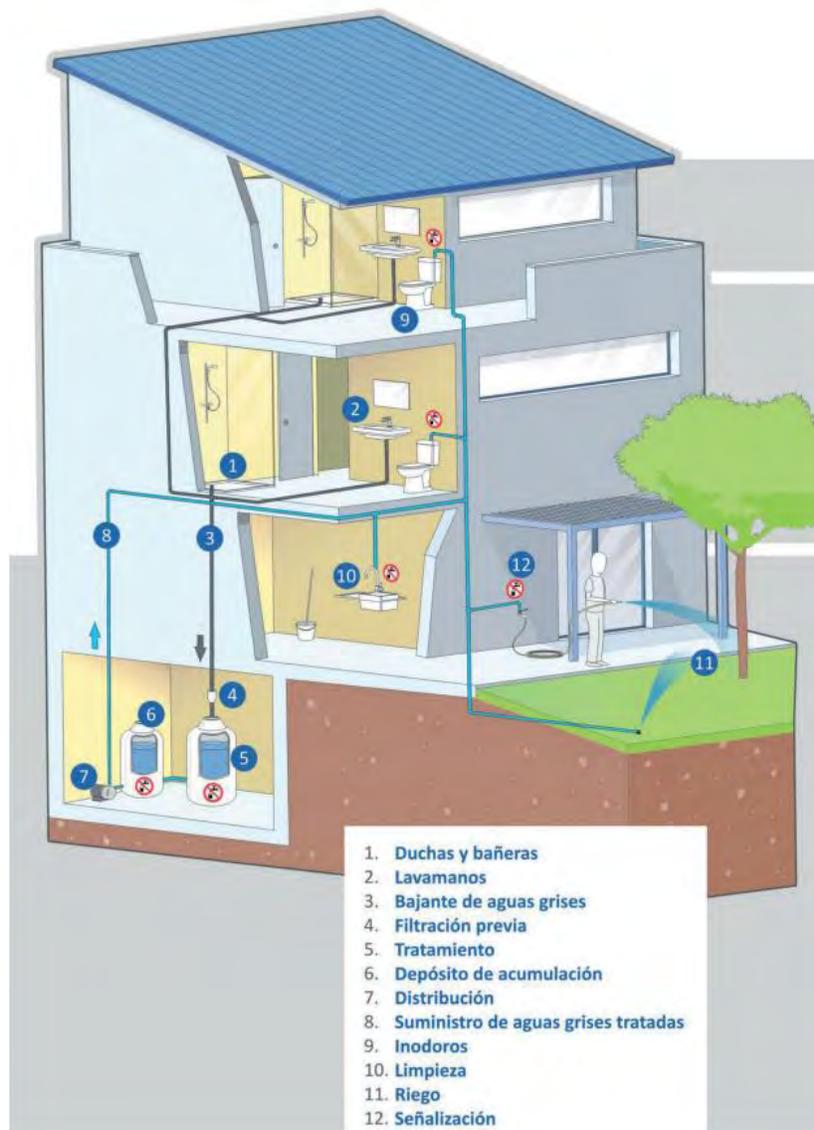
2.2 Detalles de Sistemas de Reciclaje de Agua en Edificaciones

2.2.1 Sistema de Recolección

El proceso de reciclaje de aguas grises empieza por la recolección de las mismas, para lo cual es necesario tener una conexión de los desagües de distintos implementos que producen aguas grises. Estos pueden incluir lavamanos, duchas, bañeras o lavaplatos que cuenten con una trampa de grasa (Baquero, 2013). Según el sistema de reciclaje, el agua es almacenada en un depósito donde serán tratadas y, posteriormente, empleada para el riego de jardines, descargas de inodoros, y limpieza; este sistema de reciclaje de aguas grises, para una edificación residencial, se ilustra en la Figura 2 (AQUA España, 2016).

Figura 2

Esquema de sistema de reciclaje de aguas grises en edificación residencial.



Sin embargo, esta no es la única forma de realizar el proceso de recolección. Las aguas grises recolectadas pueden ser transportadas a plantas de tratamiento y ser redistribuidas. Este es el caso en la ciudad de Tokio, donde las plantas de tratamiento de aguas grises distribuyen diariamente más de 70 mil metros cúbicos de agua reciclada para su uso en viviendas, principalmente en inodoros. Otros usos incluyen refrigeración, riego de plantas y sistemas contra incendios (Galeano, 2017).

2.2.2 Origen y Uso de Aguas Grises

El origen y uso de las aguas grises son factores muy importantes para el proceso, puesto que afectan el tratamiento que será necesario y pueden generar descontento en los usuarios. Suárez et al. (2012) clasifica las aguas grises en tres tipos según su procedencia: aguas de baja carga, que provienen de duchas, bañeras y lavabos, aguas de media carga, procedentes de lavadoras, y aguas de alta carga, procedentes de lavavajillas y fregaderos de cocina. Una encuesta a residentes de una edificación en Portugal determinó que los usuarios tienen mayor aceptación por reutilizar aguas provenientes de lavamanos, duchas, bañeras y bidés, y que tienen mayor preferencia por reutilizarla en descargas de inodoros y en riego de jardines (Meléndez et al., 2018).

2.2.3 Recomendaciones de Sistema de Distribución

Según AQUA España (2016), se debe evitar tener agua estancada en el sistema, ya que puede generar malos olores, para lo cual se recomienda no almacenar el agua por más de 24 horas, tomar precauciones en casos de ausencia de habitantes, como en viajes, y minimizar los tramos de recorrido de agua, que se puede lograr mediante un sistema de recirculación, como se ve en la Figura 3 (AQUA España, 2016).

Figura 3

Esquema de sistema de distribución de agua tratada con recirculación.



2.3 Tratamiento de Aguas Grises, Tecnología y Posibles Usos

2.3.1 Riesgo Sanitario y Necesidad de Tratamiento

El almacenamiento de aguas grises presenta un riesgo sanitario. En un estudio bacteriológico de aguas grises en una planta de tratamiento en la provincia de Trujillo, se encontró que estas aguas contenían las bacterias *E. coli* y *Staphylococcus*, las cuales pueden ocasionar enfermedades potencialmente mortales. Al recibir un tratamiento de aireado mecánico, descarga microbiana controlada, y transportadas a un reactor donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión, el contenido bacteriano de las aguas es mínimo, volviéndolas aptas para uso en la agricultura (Carranza et al., 2015).

2.3.2 Proceso de Tratamiento

Existen distintos tipos de tratamiento para la reutilización de aguas grises. Según Obando, se deben considerar varios factores para seleccionar el tipo de tratamiento que es necesario: características de las aguas grises a tratar, uso del agua tratada, especificaciones requeridas en el agua tratada, otros aportes de agua a recuperar, y aspectos económicos (Obando, 2019).

El tratamiento de aguas grises sigue un proceso, y este se debe elegir según las necesidades del propietario. Según Aguilar, este proceso empieza con el pretratamiento, que consiste en la eliminación de constituyentes en el agua que puedan causar problemas de mantenimiento y funcionamiento de las operaciones a seguir, como el desbaste para eliminar sólidos gruesos, flotación para eliminar grasas y aceites, y el desarenado para eliminar otra materia en suspensión gruesa. La siguiente fase se trata del tratamiento primario, el cual consiste en la eliminación de una fracción de sólidos en suspensión y materia orgánica, normalmente a través de operaciones físicas, como el tamizado o la sedimentación. En tercer lugar, está el tratamiento secundario, el cual consiste en la eliminación de sólidos en suspensión y compuestos orgánicos biodegradables, y en la desinfección del agua. Luego, se tiene la fase de control y eliminación de nutrientes, que suele darse en combinación con el tratamiento secundario, donde se busca eliminar nutrientes como el nitrógeno y el fósforo a través de procesos químicos, biológicos o una combinación de ambos. Finalmente, el tratamiento avanzado, consiste en la eliminación de constituyentes que ameritan atención especial, tales como los nutrientes, compuestos tóxicos, materia orgánica y sólidos en suspensión (Aguilar, 2010). Las etapas de tratamiento según Aguilar se resumen en la Figura 4.

Figura 4

Etapas de tratamiento de aguas grises.



Según Oh et al. (2017), el tratamiento de aguas grises sigue un proceso de tres etapas, empezando por la sedimentación, seguida del mismo tratamiento realizado con procesos físicos, químicos, biológicos o extensos. Una vez tratada el agua con estos procesos, se procede a desinfectar el agua, para lo cual, también existen diversos métodos. Las etapas de tratamiento según Oh se resumen en la Figura 5 (Oh et al., 2017).

Figura 5

Etapas de tratamiento de aguas grises.



En la literatura hay formas ligeramente distintas para clasificar el tratamiento de aguas grises. Por lo general, los autores se basan en cuatro clasificaciones, explicadas a continuación.

2.3.3 Tratamiento Físico

Según Aguilar, las operaciones físicas son los métodos de tratamiento en los cuales predomina la acción de fuerza, y fueron los primeros en ser aplicados en aguas residuales. Estos incluyen el desbaste, mezclado, sedimentación, flotación, transferencia de gases y filtración (Aguilar, 2010).

Estos sistemas se pueden subdividir en las categorías de filtros de arena o membranas, según señala Galeano. Los sistemas de arena permiten filtrar materiales gruesos que se encuentren en las aguas grises a tratar, y se pueden emplear solos o combinados con un sistema de desinfección o carbón activado. A pesar de que el empleo de desinfección o carbón activado presentan una mayor

reducción en contenido de microorganismos a comparación de usar únicamente arena, se necesitan otros procesos para cumplir con los requisitos de calidad de agua (Galeano, 2017).

Un tratamiento físico común es el de biorreactores de membrana (MBR), el cual, debe ser seguido de una etapa de desinfección para cumplir con los requisitos en microbiología, sólidos en suspensión y turbidez, ya que los tratamientos físicos por sí solos son insuficientes para reducir materia orgánica (Suárez et al., 2012). Como señala Oh et al. (2017), se ha intentado en los últimos años, usar tecnología más amigable con el ambiente en el proceso de tratamiento, tal como lo son membranas fabricadas a partir de desechos de comida y materiales biodegradables, como la membrana de polielectrolitos de dos capas (PCBM), desarrollada por el mismo autor a partir de quitosano y alginato.

2.3.4 Tratamiento Químico

Los tratamientos químicos son aquellos que consiguen eliminar o convertir contaminantes mediante la adición de productos químicos o mediante el desarrollo de reacciones químicas. Estos incluyen la desinfección y fenómenos de precipitación, donde se produce un precipitado que se recoge por sedimentación, y adsorción, en la cual se emplean fuerzas de atracción entre cuerpos, al eliminar compuestos de las aguas residuales sobre superficies sólidas (Aguilar, 2010).

Otros procesos químicos incluyen coagulación y floculación, fotooxidación catalítica, intercambio iónico, o el uso de carbón activo granular (Suárez et al., 2012).

2.3.5 Tratamiento Biológico

Son aquellos procesos que utilizan actividad biológica para eliminar contaminantes, y su principal función es eliminar sustancias orgánicas biodegradables que se encuentren en las aguas grises, convirtiéndolas en gases que se liberan a la atmósfera y en tejido celular biológico, que se elimina con la sedimentación. (Aguilar, 2010).

Los procesos de tratamiento biológicos incluyen a los reactores de película fija, discos biológicos giratorios (RBC), filtros anaeróbicos, reactores discontinuos secuenciales (SBR), filtros aireados biológicos (BAF). Estos procesos logran eliminar casi en su totalidad la materia orgánica y sólidos en suspensión, y suelen ser antecidos por un tratamiento físico y desinfección (Galeano, 2017).

Obando clasifica los principales sistemas de tratamiento biológicos en reactores secuenciales, que utilizan fangos activos para un tratamiento discontinuo en varias etapas (llenado, aireación,

decantación y separación), reactores biológicos de membrana, y sistemas biológicos naturalizados, que utilizan vegetación para aportar oxígeno a microorganismos que se encuentran en una biocapa (Obando, 2019).

Una solución para proporcionar vegetación eficiente en el espacio son living walls y techos verdes para edificios. Estas tecnologías mejoran la calidad ambiental en zonas urbanas ubicadas en climas secos y proveen enfriamiento continuo. Además de estos beneficios, se está estudiando su potencial en el tratamiento de aguas grises, puesto que las plantas instaladas en estos sistemas tienen la habilidad de absorber contaminantes gaseosos, mejorando la calidad de agua. Sin embargo, las aguas grises tratadas de esta manera conllevan un alto riesgo conectado a la cantidad de patógenos que se mantienen en el agua, por lo que el uso recomendado para estas aguas se limita a descargas de inodoros. Además, requieren tecnologías de desalinización que conllevan un alto consumo energético (Pradhan et al., 2019).

2.3.6 Tratamiento Extenso

Estos métodos de tratamiento requieren grandes áreas, se utilizan espacios como lagunas, humedales, juncuales y estanques, y pueden ser necesarios para cumplir con altos estándares de calidad de agua (Oh et al., 2017).

Los humedales artificiales son muy eficaces en la disminución de concentración de DBO y sólidos en suspensión, pero tienen desventajas muy importantes respecto al costo y área necesaria. Los humedales artificiales se clasifican en dos grupos, humedales de flujo superficial libre, que funcionan imitando procesos de un humedal natural, en el cual el agua transcurre a través de una serie de canales, haciendo que las partículas se asienten al fluir lentamente por el humedal y los microorganismos son usados como nutrientes por las plantas, y humedales de flujo horizontal subsuperficial, en los cuales, el agua fluye a través de vegetación acuática, las cuales remueven partículas de contaminantes (Galeano, 2017).

Otras clasificaciones incluyen combinaciones de estos procesos, por lo que se debe tener muchas consideraciones al momento de elegir el tratamiento a darse. Sin embargo, AQUA España (2016) presenta las siguientes consideraciones referentes a sistemas de tratamiento que suelen usarse en edificaciones: Los sistemas físicos presentan menor costo y mantenimiento, pero hoy en día son usados como pretratamiento. Los sistemas químicos ya no son ampliamente usados debido a su

alto costo de mantenimiento y bajo rendimiento comparados a las nuevas tecnologías encontradas en los sistemas biológicos.

2.3.7 Desinfección en el Tratamiento de Aguas Grises

Existen varias formas de desinfección de aguas grises. Este proceso puede ser tan simple como usar botellas de plástico PET y dejarlas en el sol, puesto que la bacteria *E. coli* puede ser desinfectado por la luz solar. Otro método sencillo de desinfección es el filtrado empleando material grueso, como piedras de cal y zeolita, sin embargo, estos métodos no son apropiados para uso comercial ya que necesitan de un periodo de 24 horas (Oh et al., 2017).

Otra forma de desinfección de aguas grises es la desinfección a través de luz ultravioleta, que es muy eficiente en la erradicación de *E. coli*. Sin embargo, algunas bacterias tienen una mayor resistencia a irradiación ultravioleta que otras, como coliformes fecales, por lo que se debe optimizar el tiempo de contacto e intensidad de la luz ultravioleta en el proceso de desinfección (Oh et al., 2017).

Una de las tecnologías de desinfección más populares es la cloración. Por lo general, el cloro es un químico disponible en muchos lugares, asequible y es más fácil de dosificar que otras alternativas. Un beneficio específico al cloro es que deja un residuo en el agua que impide el crecimiento de nuevas bacterias tiempo después que se haya agregado. El cloro se puede agregar al agua en forma de hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio o cloro gaseoso, este último es menos usado debido a su complejidad para transportar y guardar. El mayor problema del uso de cloro en la etapa de desinfección es la optimización de la concentración empleada, pues se puede dar una desinfección ineficaz si se usa una concentración baja, mientras que una mayor dosis puede llevar a la formación de subproductos dañinos al mezclarse con otros contaminantes en el agua (Oh et al., 2017).

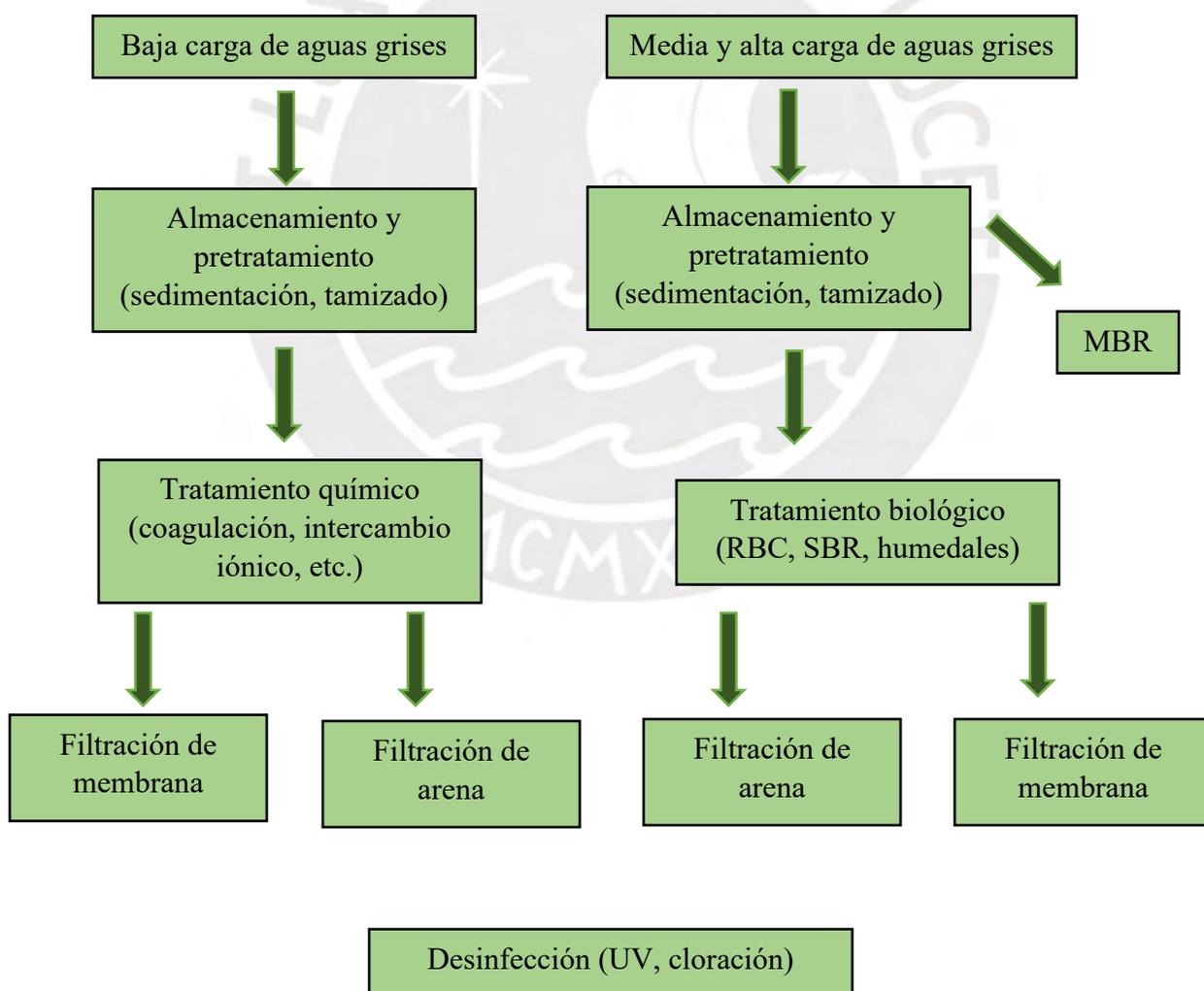
El desinfectante más eficiente es el ozono, puesto que se necesita menor concentración para la desinfección de aguas grises que otros desinfectantes. A pesar de no contar con un desinfectante residual como el cloro, se encontró que la bacteria *E. coli* no creció nuevamente en un periodo de 15 días de haber implementado 1 mg/L de ozono; este mismo resultado se obtuvo con 10 mJ/cm² de irradiación UV (Oh et al., 2017). Según Gray, el ozono es una alternativa menos asequible comparada a la cloración o rayos ultravioleta, debido a que debe producirse in situ. Gray indica además que, a pesar de la alta efectividad que posee el ozono, generalmente se emplea una

cloración de baja intensidad para garantizar la desinfección residual necesaria para el tiempo en que el agua es distribuida al usuario (Gray, 2014).

Dada la cantidad de los procesos existentes y posibles combinaciones de los mismos, existe dificultad para elegir la opción más adecuada. Para facilitar el proceso de selección de tratamiento, Suárez presenta dos configuraciones de tratamientos propuestos según la carga de contaminantes de las aguas grises, en la que recomienda tratamientos químicos para aguas grises de baja carga, y tratamiento biológico para aguas grises de alta carga, como se ilustra en la Figura 6 (Suárez et al., 2012).

Figura 6

Tipo de tratamiento recomendado según carga de contaminantes.



2.3.8 *Objetivos del Tratamiento*

Para reconocer que el agua gris tratada es apta para ser reutilizada, existen parámetros que se deben cumplir. Sin embargo, no existe un consenso mundial sobre cuáles deben ser estos parámetros, ni la cantidad que se permite. Usualmente, se toman distintas fuentes como guía para determinar los valores adecuados de estos parámetros que debe tener el agua después de ser tratada. Para propósitos de esta investigación, se considerarán los requisitos de aguas tratadas para uso residencial, es decir, descargas de aparatos sanitarios y riego de jardines.

Como se observó anteriormente, la calidad del agua gris recolectada antes de ser tratada, también denominada agua de entrada, es importante para determinar qué tipo de tratamiento es más apto para cada situación. En cada caso, se puede indicar que el agua recolectada mostrará distintos rangos de cada parámetro; AQUA España presenta valores usuales para la calidad de agua de entrada en la tabla 1 (AQUA España, 2016).

Tabla 1. Calidad de agua de entrada.

Parámetro	Valor
Sólidos en suspensión	45-330 mg/l
Turbidez	22-200 NTU
DBO ₅ (O ₂)	90-290 mg/l
Coliformes totales	10 ¹ -10 ⁶ UFC/100 ml
Escherichia Coli	10 ¹ -10 ⁵ UFC/100 ml
Nitrógeno Kjeldahl (N)	2.1-31.5 mg/l

En la tabla 2, se muestra una recopilación de consideraciones de calidad de agua recomendadas por distintos autores.

Tabla 2. Características recomendadas para uso residencial de aguas recicladas.

Referencia	AQUA	Suárez et	ANQIP (s/f)	Oh et al.
	España (2016)	al. (2012)	citado en Meléndez-Pérez et al. (2018)	(2017)
Parámetro	Valor			
Turbidez (NTU)	<5	2	<1	<5
E. Coli (UFC/100 ml)	No detectado	0	0	<10
Huevos de Nematodos (huevo/10 l)	-	-	<1	-
Biocida activo. En caso de cloro residual libre, si se adiciona cloro (CL ₂ mg/l)	0.5-2.0	<1	-	-
pH, si se adiciona cloro	7.8-8.0	6-9	-	6-9
DBO ₅ (mg/l)	-	<10	<15	<20
DQO (mg/l)	-	-	<50	<100
Sólidos en suspensión totales SST (mg/L)	-	-	<2	<20
Coliformes fecales (UFC/100 ml)	-	<10 ³	-	<10 ³
Coliformes totales (UFC/100 ml)	-	<10 ⁴	-	-

2.4 Análisis económico de sistemas de reciclaje de aguas grises

2.4.1 Métodos de Determinación de Viabilidad

Para calificar la rentabilidad de cualquier proyecto, se analiza el valor del dinero en el tiempo. En el caso de sistemas de reciclaje de aguas grises, un concepto que se toma en cuenta es el tiempo que demora la recuperación de la inversión, dado que implica un ahorro económico a través de la disminución de uso de agua a cambio de una inversión inicial y costos a lo largo del tiempo, que incluyen mantenimiento y costos de energía del sistema.

Obando explica el proceso para determinar el periodo de la recuperación de la inversión: “se suman los flujos futuros de efectivo de cada año hasta que el costo inicial del proyecto de capital quede por lo menos cubierto. La cantidad total de tiempo que se requiere para recuperar el monto original invertido, incluyendo la fracción de un año en caso de que sea apropiada, es igual al período de recuperación” (Obando, 2019). Obando señala además que se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\text{Periodo de Recuperación de Inversión} = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Ingresos promedios}}$$

El método más conocido para medir la rentabilidad del proyecto es el Valor Actual Neto (VAN), y lo hace en valores monetarios, en vez de en función al tiempo. Obando explica que este método implica realizar la suma de todos los beneficios y costos de cada periodo y actualizarlo al valor que representan en el presente. Se puede aceptar el proyecto si el valor del VAN es mayor a cero (Obando, 2019).

2.4.2 Casos de Evaluaciones Económicas de Sistemas de Reciclaje de Aguas Grises

Obando realizó una evaluación económica de realizar un proyecto de reciclaje de aguas grises en las instalaciones del Grupo Monje S.A., para lo cual se recopiló los principales usos del agua potable en la empresa, el control histórico del gasto de agua, el registro de consumo de agua en metros cúbicos (a partir de la facturación mensual) y el costo promedio mensual y anual del agua. A partir de estos datos se puede calcular el ahorro que significaría implementar un sistema de reciclaje de aguas grises, ya que se conoce tanto la cantidad de agua que se puede reciclar como su costo. (Obando, 2019). Para este caso, el periodo de recuperación calculado fue de 6 años 4 meses, el cuál supera el periodo de análisis. Asimismo, el VAN del proyecto calculado fue de -17

031.98 dólares para un periodo de 6 años y de -4 665.33 dólares para el periodo de vida útil del sistema, por lo que realizar el proyecto no es recomendable para la empresa.

De forma similar, Meléndez realiza la evaluación económica de un sistema de reutilización de aguas grises, en el que se comparan dos opciones, una en la que se distribuye el agua tratada para descargas de inodoro y riego de jardín, y otra en la que solo se distribuye para descargas de inodoro. Se eligió la primera opción dado que representa un ahorro 16.5% mayor, resultante de analizar la cantidad de agua ahorrada, los costos de mantenimiento y tratamiento, y los costos que provienen de las cargas energéticas de los sistemas de bombeo. En este caso, se determinó que la implementación de este sistema es viable a pesar de los altos costos. Se calculó un periodo de recuperación de inversión de 23.70 años y un VAN de 14 775.18 dólares. (Meléndez et al., 2018).



3 Desarrollo de la investigación

3.1 Comparación Teórica de Sistemas de Tratamiento: Beneficios Económicos y Ambientales

En la presente investigación se comparan los métodos de tratamiento biológicos de biorreactores de membrana (MBR) y reactores aerobios biológicos con fangos activos para un tratamiento en varias etapas (MBBR, RBC). Además, se comparan los métodos de desinfección de cloración, ozonización y radiación ultravioleta.

Además, dado que cada método de tratamiento y desinfección tiene distintas propiedades que pueden ser útiles en distintos casos específicos, se decidió realizar la comparación de estos procedimientos tomando las consideraciones especiales de una edificación específica.

Esta edificación es de uso mixto y cuenta con cuatro pisos. Se tienen tiendas en el primer nivel, donde la tienda más grande es una cafetería, y apartamentos en los tres pisos superiores. La edificación posee un área en planta de 260 m², y un amplio retiro que incluye estacionamientos, veredas y áreas verdes.

A partir de estas características, se define que el agua gris reciclada proviene únicamente de lavatorios y duchas, dado que presentan la menor carga de contaminantes; y podrá ser reutilizada para el riego de jardines y descargas de inodoro.

Considerando que se recicla el 40% del agua utilizada, se puede estimar una oferta de 3650 litros por día. Para evitar posibles problemas relacionados a una alta demanda, se propone emplear el agua reciclada en el riego de los jardines y en descargas de inodoros ubicados únicamente en los departamentos.

3.1.1 Descripción del Sistema de Reciclaje

El agua gris será recolectada de los desagües de duchas y lavatorios, y transportada a un almacén de agua donde será tratada. El proceso de tratamiento consiste de sedimentación o desbaste, seguido del tratamiento biológico y la desinfección. El agua tratada es almacenada y posteriormente usada en el riego de jardines, o transportada mediante una bomba para ser usada en descargas de inodoros.

3.1.1.1 Reactores Biológicos de Lecho Móvil MBBR.

Este tipo de tratamiento se basa en la degradación de materia orgánica a través de la existencia de microorganismos en un medio rico en oxígeno. Para mantener este medio, es necesario mantener un proceso de aireación, por el cual se inyecta oxígeno al reactor, favoreciendo la reproducción de los microorganismos que tratan el agua.

Este es el caso de las Plantas de Tratamiento de Aguas Domesticas (PTAR-D) de la compañía Ingeniería en Aguas S.A.S., en Colombia, las cuales tienen capacidad para reciclar edificaciones de siete, quince, o treinta habitantes (3,000 a 8,000 litros por día). El proceso de reciclaje de aguas grises empieza con un pretratamiento que consiste en un cribado grueso y una trampa de grasa. En la primera cámara de reactor se da la sedimentación primaria, en la segunda, la oxidación con biopelícula de lecho móvil (MBBR), en la tercera, sedimentación acelerada de los sólidos generados en los procesos biológicos. Finalmente, se da el proceso de desinfección mediante tabletas de cloro, y filtración en un accesorio opcional (Ingeniería en Aguas S.A.S., 2021).

3.1.1.2 Reactores Biológicos de Membrana MBR.

De igual manera, se basa en lograr la descomposición biológica de contaminantes orgánicos debido a la presencia de microorganismos aerobios en un medio rico en oxígeno.

Sin embargo, los MBR se diferencian de otros sistemas en el proceso de tratamiento de las aguas grises, que incluyen tecnologías de membrana. Este es el caso de la Estación regeneradora de aguas grises GREM, de la compañía REMOSA, en España, cuyos distintos modelos tienen capacidad de tratamiento de 500 a 10,000 litros por día. El proceso de reciclaje de aguas grises empieza en la estación, la cual está conectada directamente a la red de recolección de aguas grises. Al ingresar a la estación, el agua pasa por un proceso de desbaste, por el cual un filtro de 1mm de paso retiene sólidos gruesos. Inmediatamente después, el agua es tratada mediante el proceso de oxidación biológica y filtrada a través el sistema de membranas mediante un sistema de succión. Finalmente, el agua es desinfectada y almacenada (REMOsa, 2019).

3.1.1.3 Cloración.

La cloración es el método de desinfección más común, y es usado en agua potable, sistemas de purificación de aguas residuales y piscinas. La cloración se logra principalmente mediante la adición de hipoclorito de sodio, distribuido comercialmente en forma de tabletas, e hipoclorito de calcio, distribuido en forma líquida. Los efectos tóxicos del hipoclorito de sodio y de calcio se deben principalmente a las propiedades corrosivas del hipoclorito, y se generan a partir de contacto de estos químicos con la piel o mediante ingestión (ASTDR, 2016).

Las dosis de cloro se expresan en concentración (mg/L), y tiempo de contacto (min). Para aplicaciones en aguas grises, se usa un rango de 60 a 90 mg.min/L (Oh et al., 2017).

3.1.1.4 Ozonización.

El ozono es un gas inestable, a partir de concentraciones de 23% se vuelve cada vez más inestable, llegando a explotar, por lo que no puede ser almacenado en envases presurizados y transportado. Por este motivo, el ozono debe ser generado en el sitio de tratamiento (Gray, 2014).

Se produce a partir del oxígeno o el aire, los cuales deben ser sujetos a corriente alternante de alto voltaje entre dos electrodos. Una porción del oxígeno molecular se divide en dos átomos o en moléculas de oxígeno excitadas, las cuales se combinan con el oxígeno molecular remanente y forman ozono (Gray, 2014).

El proceso de desinfección empieza con la preparación del aire o el oxígeno, seguida de la generación del ozono, la transferencia de ozono al agua tratada en dosis adecuadas, que se realiza a través de difusores de burbujas finas o inyectoros de corriente lateral, y finaliza con la destrucción de ozono remanente (Gray, 2014).

El ozono requiere concentraciones muy bajas para obtener los resultados necesarios de calidad de agua. Un estudio encontró que 0.4 a 4.3 mg.min/L redujeron mayores cantidades de coliformes fecales que 30 mg.min/L de cloro (Oh et al., 2017)

3.1.1.5 Luz UV.

Este sistema de desinfección es ampliamente usado por su adaptabilidad, menor tamaño y bajo consumo energético. El agua pasa a través de un pequeño reactor, donde la irradiación ultravioleta generada por lámparas de mercurio, la desinfecta de bacterias, virus y otros microorganismos.

La irradiación ultravioleta se mide en energía por área de superficie (mJ/cm^2) o intensidad UV promedio (mW/cm^2), donde una dosis de $114\text{mW}/\text{cm}^2$ demostró desinfectar efluentes de aguas grises a cantidades aceptables (Oh et al., 2017).

La desinfección a través de irradiación de luz ultravioleta no necesita de lugares de almacenamiento, dosificación continua y reabastecimiento de químicos, a diferencia de otras alternativas tal como la cloración (Friedler y Gilboa, 2010).

3.1.2 Calidad de Agua e Impacto Ambiental

3.1.2.1 Reactores Secuenciales con Fangos Activados.

Debido a la sedimentación primaria y secundaria, se permite separar gran cantidad de los SST. El sistema de PTAR-D elimina hasta un 90% de la materia orgánica del agua gris, convirtiéndola, según la empresa fabricante, en apta para el riego de jardines. Además, estudios de calidad de agua tratada por la PTAR-D indican que se obtiene hasta $18\text{ mg}/\text{L}$ de DBO_5 y 5 NTU de turbidez (Ingeniería en Aguas S.A.S., 2021). Según los rangos de carga de contaminantes en el agua de entrada presentados en la tabla 3, esta reducción en materia orgánica es suficiente para permitir su uso en el riego de jardines, pero se encuentra en los límites superiores de estos parámetros, por lo que se tiene que verificar que el agua tratada cumpla con las exigencias respectivas. Además, a partir de este análisis, se recomienda añadir accesorios adicionales como trampas de grasa, filtración y desinfección.

3.1.2.2 Reactores Biológicos de Membrana MBR.

En este sistema, el agua pasa por membranas de ultrafiltración de 0.1 micras de paso, obteniendo agua con turbidez inferior a 2 NTU y contenido de E. coli no detectable, por lo que se permite usar en el riego de jardines (REMOSA, 2019).

La membrana de ultrafiltración actúa como una barrera física para las bacterias, por lo que las bacterias encontradas en el agua después de pasar por la membrana son resultantes de un “fenómeno de salto”, el cual explica que las bacterias son transportadas a través de aerosoles, derrames y otros recipientes, a causa de mantener el contenedor de agua cerca al reactor de

tratamiento. Sin embargo, la presencia de esta barrera física presenta una considerable ventaja frente a otros sistemas de tratamiento (Friedler y Gilboa, 2010).

3.1.2.3 Comparación.

Un estudio experimental sobre el tratamiento de aguas residuales indica que la remoción de DQO total y SST para un sistema MBR fueron de 90% y 89.71% respectivamente. Estos valores, a pesar de ser menores que los obtenidos en otros estudios, representan una gran mejora a los resultados obtenidos de sistemas que emplean sedimentación y tratamiento de lodos activados, los cuales removieron 54.41% de SST y 77.5% de DQO total (Flores et al., 2019).

Otro estudio similar, donde se comparan los sistemas MBR y RBC, encontró que estos tratamientos removieron un valor menor de DQO (aproximadamente 70% para ambos casos), pero alcanzaron remover 99% y 96% de DBO para sistemas MBR y RBC respectivamente. Además, la turbidez residual fue de 0.21 y 1.5 NTU respectivamente, consolidando que el tratamiento MBR es más exhaustivo (Friedler y Gilboa, 2010).

3.1.2.4 Cloración.

El cloro es un desinfectante altamente eficaz. Un estudio determinó que 1 mg/L de hipoclorito en un tiempo promedio de 6 horas, removió completamente coliformes fecales y la bacteria *S. aureus*. Además, el uso de cloro deja en el agua un residuo que previene el crecimiento de bacterias en el futuro, lo cual es altamente conveniente para su transporte. El decaimiento de este residuo se puede retrasar adicionando amoníaco (Oh et al., 2017). El autor menciona, además, que una dosificación excesiva de cloro puede resultar en la formación de subproductos dañinos al reaccionar con contaminantes presentes en aguas grises.

3.1.2.5 Ozonización.

Debido a su alta capacidad oxidante, el ozono es un químico altamente efectivo en el tratamiento de aguas contaminadas. Es mucho más efectivo como desinfectante que el cloro, en especial contra quistes, y no altera los niveles de pH del agua, por lo que es una buena alternativa para el tratamiento de aguas sujetas a estándares más estrictos respecto a algunos subproductos del cloro (Gray, 2014). Estas cualidades son apropiadas para tratamiento de aguas altamente contaminadas, o para el tratamiento de agua destinada para el consumo humano.

El ozono, a pesar de proteger a la tierra de radiación ultravioleta, es un químico muy corrosivo y peligroso a nivel del suelo, por lo que no se puede liberar a la atmósfera. El ozono creado en exceso

debe ser recolectado y destruido a través de oxidación térmica o catalítica en un espacio separado (Gray, 2014).

3.1.2.6 Luz UV.

La desinfección a través de luz ultravioleta es altamente eficaz en la eliminación de microorganismos. Según Friedler y Gilboa (2010), remueve una gran cantidad de patógenos, incluyendo aquellos resistentes al cloro, y no crea subproductos dañinos, por lo que ofrece mayor seguridad a las personas encargadas de operar el sistema.

En un estudio sobre la eficacia de la luz ultravioleta como desinfectante de aguas grises tratadas biológicamente, se encontró que el agua desinfectada tenía concentraciones de coliformes fecales menores en una orden de magnitud que aquellas que no fueron desinfectadas, mientras que la bacteria *S. aureus* fue completamente eliminada. A comparación, muestras de inodoros que funcionan con agua potable mostraron concentraciones de coliformes fecales y *S. aureus* mayores en una orden de magnitud que aguas grises tratadas biológicamente, y mayores en dos órdenes de magnitud que aguas grises tratadas y desinfectadas con luz UV. Al emplear desinfección a través de luz ultravioleta, no se encontró mejorías en cantidades de la bacteria *P. aeruginosa* ni en el recuento heterotrófico en placas; sin embargo, se concluyó que el riesgo a la salud añadido por el uso de este sistema de tratamiento es insignificante (Friedler y Gilboa, 2010).

Como el agua desinfectada con luz UV no contiene cloro residual, necesario para evitar crecimiento de microorganismos en tuberías o tanques de agua, este método de desinfección puede tener mayor aplicabilidad en aguas destinadas al riego de jardines (do Couto et al., 2015). Para evitar este problema, se puede minimizar los tramos de recorrido del agua desinfectada y evitar mantener agua estancada, como lo recomienda AQUA España para todo tipo de sistema de reciclaje de aguas grises, o adicionar al agua desinfectada pequeñas cantidades de cloro.

3.1.3 Costos

3.1.3.1 Reactor Secuencial PTAR-D MBBR.

Tiene un bajo costo de uso, ya que implica únicamente el consumo eléctrico del Aireador, de 750W para el modelo más grande. El mantenimiento consiste en remover los sólidos y el lodo residuales del tratamiento, para lo cual, el tanque debe inspeccionarse cada seis meses. Además, se debe abastecer al reactor con microorganismos cada quince días, y de tabletas de cloro cada ocho días.

3.1.3.2 Reactores Biológicos de Membrana MBR.

Los sistemas MBR tienen un alto consumo energético relacionado al sistema de succión de agua. En el caso de una edificación de 76 departamentos en Portugal, los costos relacionados exclusivamente al tratamiento de reactor MBR alcanzaron una suma de 1110.09 dólares anuales, casi 6 veces mayor que el costo del sistema de bombeo, que alcanzó 192.37 dólares anuales. (Meléndez, 2018)

El mantenimiento consiste en la limpieza de las membranas y el vaciado de lodos, los cuales deben ser realizados por un técnico capaz cada seis meses. Existen otras actividades de mantenimiento relacionadas al funcionamiento del sistema que pueden ser realizadas por personal encargada del mantenimiento del edificio (Meléndez, 2018). Además, según Meléndez, el costo por la limpieza de las membranas (56.94 dólares anuales) aumenta en aproximadamente 38% el costo de mantenimiento, a comparación de considerar únicamente el costo de vaciado de lodos (148.66 dólares anuales), y sugiere hacer uso de otros métodos de tratamiento, como RBC, en caso se desee reducir los costos.

3.1.3.3 Cloración.

El cloro es ampliamente usado como desinfectante en diversas actividades, por lo que es la opción más asequible y fácil de conseguir, tanto en forma líquida, como hipoclorito de sodio, o en tabletas, como hipoclorito de calcio.

3.1.3.4 Ozonización.

El proceso de generación de ozono necesita una gran cantidad de energía, en el cual menos del 10% de la energía consumida se usa en la producción de ozono, y el resto perdido como calor y luz (Gray, 2014). Como se debe producir en el lugar de tratamiento, significa un considerable aumento en costos comparada a la cloración. Sin embargo, debido a su alta eficiencia, se puede alcanzar la dosificación adecuada empleando modelos más sencillos de generadores de ozono.

3.1.3.5 Luz UV.

La generación de luz ultravioleta no presenta un alto consumo de energía. Un estudio que empleó desinfección con luz UV y cloro para el tratamiento de aguas grises estimó que este proceso de desinfección consume entre 0,20 y 0,63 kWh por metro cúbico (Galeano, 2017).

3.1.4 Información sobre Modelos Escogidos

Para el caso de edificación propuesto para esta investigación, se escogió el modelo de MBR GREM 2500 S, de dimensiones 1.6x1.6x2.9 m, y el modelo de MBBR PTAR-D 0.05 LPS, de dimensiones 1.5x1.8x2.6 m. Estos modelos fueron elegidos por su capacidad y según las recomendaciones por parte de sus respectivos fabricantes. Ambos modelos poseen dimensiones muy similares, y se pueden operar en la superficie o enterrados.

En cuanto a los desinfectantes, el cloro es un material que debe ser reabastecido a lo largo del tiempo, mientras que los reactores de luz ultravioleta y generadores de ozono requieren equipo adicional. Las tabletas de cloro recomendadas para las PTAR-D presentan un costo adicional de aproximadamente 67 dólares anuales.

En el caso de desinfección mediante rayos UV, el tamaño de los reactores está relacionado con el caudal y la intensidad de la lámpara de mercurio. Para el estudio citado previamente, Friedler y Gilboa emplearon reactores WaterTec, de aproximadamente 15 cm de longitud y 6 cm de radio, con lámparas de mercurio de baja presión de 4 W de potencia. Modelos de similares características se encuentran en un rango de precios de 70 a 200 dólares.

Para este proyecto, se necesitan cantidades menores de ozono para una desinfección adecuada, por lo que se pueden emplear generadores de ozono de 1 a 4 g/hr de rendimiento, como el modelo HTU-500 de Oxidation Technologies, LLC, que tiene un rendimiento de 1 g/hr de ozono, y dimensiones 38x18x10 cm. Este modelo se vende por 695 dólares.

3.2 Resultados

Todos los procedimientos referentes al tratamiento de aguas grises analizados en esta investigación cumplen con los requisitos de calidad de agua especificados en la literatura para su uso en descargas de inodoro y riego de jardines. El tratamiento de membrana MBR consigue mejores resultados de calidad de agua, pero presenta un costo substancialmente mayor, tanto en inversión inicial como costos de mantenimiento y operación, comparado a tratamientos biológicos en varias etapas como MBBR o RBC.

Los desinfectantes se dosifican para alcanzar la calidad de agua requerida para su uso. La cloración es el método de desinfección más empleado, por su alta efectividad, disponibilidad y asequibilidad. Además, la utilización de cloro permite mantener el agua libre de bacterias por más tiempo, ya que deja un residuo desinfectante. La ozonización es la alternativa de mayor costo para desinfección, ya que representa una inversión inicial mayor y tiene un alto consumo de energía; además, presenta un riesgo de salud en caso sea liberado accidentalmente al ambiente. La desinfección mediante rayos UV es muy eficaz y consume poca energía.

3.3 Discusión Crítica de Principales Hallazgos

3.3.1 Tratamiento Biológico

A través del tratamiento mediante membranas de ultrafiltración se consigue una calidad de agua excepcionalmente buena, y se tiene la certeza que se cumplirá con los requisitos indicados en la literatura. A comparación, los sistemas de tratamiento en varias etapas que emplean lodos activados analizados en esta investigación, como MBBR o RBC, poseen un costo inicial menor y requieren de menos energía para operar, pero obtienen una calidad de agua cercana a los límites máximos de DBO₅ y turbidez. Sin embargo, como el agua tratada será destinada para actividades que no requieren de agua potable y no están relacionadas al consumo humano, no presentan un mayor riesgo sanitario. Entonces, se puede establecer que el tratamiento MBR es el más deseable en términos de calidad, pero podría presentar problemas en relación a los costos, en especial para proyectos de menor escala, como el que se analiza en esta investigación.

3.3.2 *Desinfección*

Los sistemas de tratamiento biológico que se presentaron en esta investigación hacen uso del cloro para su proceso de desinfección, pero existen muchos ejemplos de sistemas que emplean rayos UV para la desinfección de las aguas tratadas. El cloro es un químico altamente conocido y empleado como desinfectante, y se espera que sea el método de desinfección más usado en el tratamiento de aguas grises en lo que concierne a reciclaje de aguas grises en proyectos de edificaciones en Perú. Los procesos de desinfección mediante ozono y rayos ultravioleta son más sofisticados, y ayudan a automatizar el proceso de reciclaje de agua, puesto que no es necesario constantemente abastecer de cloro al agua tratada.

Como las distintas formas de desinfección se dosifican para cumplir con los mismos parámetros de calidad de agua, las diferencias considerables entre estos métodos son problemas relacionados a altos niveles de pH y subproductos dañinos en el agua en el caso del cloro, y la falta de residuos de cloro beneficiosos para controlar el crecimiento de bacterias en el tiempo en el caso de la ozonización e irradiación UV. Estos problemas se pueden resolver con una correcta dosificación en caso de la cloración, y la falta de residuos de cloro no presenta problemas mientras el agua se reutilice en un tiempo menor a 24 horas de ser desinfectado, como recomienda AQUA España; alternativamente, se puede añadir cantidades pequeñas de cloro al agua desinfectada para obtener este efecto.

Los beneficios que presenta el uso de ozono en la desinfección de aguas respecto a otras alternativas, como alta eficacia contra contaminantes, no son tan relevantes para el tratamiento de aguas grises para una edificación multifamiliar, puesto que el agua tratada se va a reutilizar en actividades que no requieren parámetros de calidad de agua muy estrictos. Además, la ozonificación trae consigo muchas desventajas, ya que se debe generar el ozono in-situ, generando costos de mantenimiento, aumentando el área necesaria para el tratamiento, y presentando un riesgo considerable en caso sea liberado al ambiente. Como la ozonización es altamente eficiente, se pueden emplear modelos más simples de generadores de ozono, el cual debe ser transferido al agua tratada mediante difusores de burbujas; a pesar de esto, es la alternativa de desinfección que presenta una mayor inversión inicial, y necesita constante uso de energía y mantenimientos.

4 Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

4.1.1 Generalidades

Los sistemas de reciclaje de aguas grises presentan una serie de beneficios económicos y ambientales al implementarse en distintos tipos de edificaciones, ya que reducen el consumo de agua potable. Ejemplos en la literatura indican que se lograron ahorros de agua en un rango de 23.5% a 38%, valor que depende de la oferta de aguas grises en la edificación. La reducción en emisiones de gases de efecto invernadero es muy significativa, por lo que la implementación de sistemas de reciclaje de agua es de alta importancia.

El uso de estos sistemas aumenta el valor de las edificaciones, y generan una ventaja competitiva para las empresas constructoras. Además, se pueden obtener reducciones considerables en costos a largo plazo, relacionadas al ahorro de agua. Para su implementación, es necesario hacer una evaluación económica del proyecto, para la cual, las principales herramientas empleadas son el periodo de retorno de inversión y el valor actual neto.

4.1.2 Sobre el Sistema de Reciclaje

Se tiene mayor aceptación de sistemas de reciclaje de agua recolectada de implementos cuyos desagües tienen bajas cargas de contaminante, tales como duchas y lavamanos, pero existen sistemas que también obtienen agua de lavatorios y lavadoras. De forma similar, las aguas grises tratadas se usan mayormente en descargas de inodoro y riego de jardines, pero se puede utilizar para otras actividades que no requieren de agua potable, como la limpieza de interiores. Además de afectar la comodidad de los usuarios, el origen y futuro uso de aguas grises son factores que deben considerarse en el análisis económico.

Para analizar la viabilidad de estos sistemas, se debe estudiar la oferta de aguas grises y demanda de agua no potable. Estos valores se pueden estimar con ejemplos de edificaciones similares. Los casos revisados en esta investigación indican que 30% a 40% del agua utilizada en el hogar puede ser reciclada, mientras que 34% a 56% del agua utilizada no necesita ser potable. Es pertinente notar que los sistemas de tratamiento pueden contar con una conexión de agua potable para satisfacer la demanda de agua no potable.

4.1.3 Sobre el Tratamiento

El objetivo del tratamiento es mejorar la calidad del agua a niveles adecuados para su futura reutilización. Los principales parámetros a analizar son cantidades de la bacteria *E. coli*, DBO_5 y turbidez. El riesgo sanitario que añade la reutilización de aguas grises propiamente tratadas es mínimo o insignificante.

Existe una gran variedad de procedimientos para el tratamiento de aguas grises, puesto que se pueden combinar procesos distintos para alcanzar la calidad de agua requerida. Se usa mayormente el tratamiento biológico, ya que es muy eficaz en la reducción de contaminantes y tiene menores costos a comparación de otros tipos de tratamiento. El tratamiento empieza con un proceso de sedimentación o desbaste, para eliminar los sólidos gruesos, seguido del tratamiento mediante actividad biológica y de la desinfección.

En este trabajo de investigación se compararon los métodos de tratamiento biológico de reactores secuenciales, como MBBR o RBC, con reactores de membrana MBR. Se encontró que los reactores de membrana obtienen una calidad de agua significativamente superior debido a su etapa de ultrafiltración, Sin embargo, a causa de esta etapa, se presentan mayores costos de operación, relacionados a la energía necesaria para succionar el agua a través de la membrana, y de mantenimiento, relacionado a los componentes únicos de este sistema.

4.1.4 Sobre la Desinfección

En este trabajo de investigación se compararon los métodos de desinfección de cloración, ozonización y mediante luz ultravioleta. Se encontró que el uso de cloro o de luz UV son las opciones más viables.

La cloración es la alternativa de menor costo, y provee al agua tratada más tiempo de desinfección debido al cloro residual, mientras que el uso de luz UV ayuda a automatizar el proceso de tratamiento de agua, puesto que no se tiene que reabastecer de químicos, y no consume mucha energía para su operación. Ambos métodos son comúnmente empleados en sistemas de tratamiento de agua, pero se espera que la cloración sea el método más popular para futuros sistemas de reciclaje de aguas grises en edificaciones de Perú, debido a su mayor disponibilidad.

La ozonización trae diversas desventajas en el tratamiento de aguas grises a pequeña escala, como mayor dificultad para conseguir el equipo generador de ozono adecuado, costos elevados de

operación relacionados al consumo de energía, y riesgo relacionado a posibles fugas. Sin embargo, este método de desinfección tiene un mayor mérito en sistemas de mayor escala, que pueden realizar un tratamiento de agua cuyos propósitos requieran cumplir con parámetros de calidad de agua más estrictos.

4.1.5 Sobre la Edificación Propuesta

Para la edificación propuesta en esta investigación, se realizaron estimaciones de oferta y demanda de aguas recicladas basado en los rangos de producción de aguas grises encontrados en la literatura y de acuerdo a la cantidad probable de usuarios. Se concluye que la alternativa más apta es un tratamiento biológico, de lodos activados en varias etapas, seguida por desinfección mediante cloración, ya que son las alternativas de menor costo, y cumplen con los requisitos mínimos de calidad de agua necesarios para el riego de jardines y descarga de inodoros.

4.2 Recomendaciones

Para futuras edificaciones en Perú, se debe considerar la posibilidad de implementar sistemas de recaudación de aguas pluviales, y de sistemas híbridos que combinan los conceptos de recaudación de aguas pluviales y aguas grises, ya que pueden tener una viabilidad mayor en los ámbitos económicos y ambientales, dependiendo de la ocurrencia y volumen de lluvias en la ubicación del proyecto.

En caso de implementar sistemas de reciclaje de aguas grises, se recomienda realizar encuestas en la zona para obtener valores precisos de oferta de aguas grises y demanda de agua no potable en la edificación, de modo que se pueda analizar con mayor precisión el ahorro de agua y volumen necesario del reactor de tratamiento. Además, se recomienda adicionar una conexión de agua potable al sistema de tratamiento para evitar problemas relacionados a la falta de agua.

Para evitar problemas relacionados al crecimiento de microorganismos tiempo después de ser tratada, que pueden existir principalmente en aguas desinfectadas con rayos UV o mediante ozonización, se recomienda hacer uso del agua reciclada en un periodo de tiempo corto después de su desinfección. Además, se recomienda no mantener el agua estancada por un tiempo mayor a 24 horas, para lo cual se pueden emplear sistemas de distribución de agua con recirculación.

5 Referencias

- Aguilar Tumax, C. H. (2010). *UTILIZACIÓN DE AGUAS GRISES TRATADAS Y APROVECHAMIENTO DE AGUAS PLUVIALES EN EDIFICACIONES UN ENFOQUE ECOENÉRGICO* [UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA].
[http://www.repositorio.usac.edu.gt/5279/1/Carlos Humberto Aguilar Tumax.pdf](http://www.repositorio.usac.edu.gt/5279/1/Carlos%20Humberto%20Aguilar%20Tumax.pdf)
- ATSDR. (2016). *ToxFAQs™: Hipoclorito de calcio e hipoclorito de sodio (Calcium Hypochlorite/Sodium Hypochlorite) | ToxFAQ | ATSDR*.
https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts184.html
- AQUA ESPAÑA. (2016). *Guía Técnica de recomendaciones para el reciclaje de aguas grises en edificios*.
www.aquaespana.org/sites/default/files/documents/files/Guia.tecnica%20grises.pdf
- Baquero, M. T. (2013). Vista de Ahorro de agua y reutilización en la edificación en la ciudad de Cuenca, Ecuador. *Estoa*, 3.
<https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/estoa/article/view/313/266>
- Carranza, A., Gonzales, D., Mendocilla, C., Rojas, A., Sánchez, L., Vejarano, A. (2015). *Análisis de riego sanitario en aguas grises en la provincia de Trujillo, Urbanización Covicorti*.
- Galeano Díaz, A. (2017). *Optimización del recurso hídrico en nuevas construcciones para vivienda a través de la reutilización de aguas grises*. [Universidad Nacional de Colombia].
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/62382/AnnyGaleanoDiaz.2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- GESTIÓN, N. (2019). *San Isidro consume más agua por habitante al día, afirma Sedapal*. Retrieved October 31, 2021, from <https://gestion.pe/economia/empresas/san-isidro-consume-agua-habitante-dia-afirma-sedapal-258439-noticia/>
- Gray, N. F. (2014). Ozone Disinfection. *Microbiology of Waterborne Diseases: Microbiological Aspects and Risks: Second Edition*, 599–615. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415846-7.00033-0>

- Hernández Amaya, B. C., Díaz Salazar, L. F. (2014). *Sistemas de reciclaje de aguas grises, como alternativa de comercialización en la ciudad de Bogotá*. Recuperado de https://ciencia.lasalle.edu.co/maest_administracion/459
- INGENIERIA EN AGUAS. (2021). *Plantas de Tratamiento de Aguas Domesticas*. <https://www.ingenieriaenaguas.com/plantas/ptar-domesticas>
- Leong, J. Y. C., Balan, P., Chong, M. N., & Poh, P. E. (2019). Life-cycle assessment and life-cycle cost analysis of decentralised rainwater harvesting, greywater recycling and hybrid rainwater-greywater systems. *Journal of Cleaner Production*, 229, 1211–1224. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.046>
- Meléndez-Pérez, J. A., Lemos-Lima, M. M. C., Domínguez, I., Oviedo-Ocaña, R., “Reutilización de aguas grises domésticas para el uso eficiente del recurso hídrico: aceptación social y análisis financiero. Un caso en Portugal,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 18, no.1, pp. 223-236, 2019. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n1-2019020>
- MINISTERIO DE AGRICULTURA. (2011). *AGUAS RESIDUALES EN EL PERÚ, PROBLEMÁTICA Y USO EN LA AGRICULTURA*. <https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/4516/ANA0003016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Obando Mora, X. (2019). *Valorización financiera implementación de sistema de reciclaje de aguas grises en grupo Monge S.A. en el periodo 2020-2025*. [Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua]. <https://repositorio.unan.edu.ni/14213/1/14213.pdf>
- Oh, K. S., Leong, J. Y. C., Poh, P. E., Chong, M. N., & Lau, E. Von. (2018). A review of greywater recycling related issues: Challenges and future prospects in Malaysia. *Journal of Cleaner Production*, 171, 17–29. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.09.267>
- Pradhan, S., Al-Ghamdi, S. G., & Mackey, H. R. (2019). Greywater recycling in buildings using living walls and green roofs: A review of the applicability and challenges. *Science of The Total Environment*, 652, 330–344. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.10.226>

REMOSA. (2019). *Catálogo General*.

https://www.saneamientosdimasa.es/descargas/REMOSA_CATALOGO_2020.pdf

Suárez López, J., Jácome Burgos, A., del Río Cambeses, H., Torres Sánchez, D., & Ures

Rodríguez, P. (2012). El reciclaje de aguas grises como complemento a las estrategias de gestión sostenible del agua en el medio rural. In *Río Mandeo, cuenca fluvial y desarrollo sostenible*. [https://www.researchgate.net/profile/Pablo-Ures-](https://www.researchgate.net/profile/Pablo-Ures-2/publication/324039859_El_reciclaje_de_aguas_grises_como_complemento_a_las_estrategias_de_gestion_sostenible_del_agua_en_el_medio_rural/links/5aba68f3aca2728f4fa4983d/El-reciclaje-de-aguas-grises-como-complemento-a-las-estrategias-de-gestion-sostenible-del-agua-en-el-medio-rural.pdf)

[2/publication/324039859_El_reciclaje_de_aguas_grises_como_complemento_a_las_estrategias_de_gestion_sostenible_del_agua_en_el_medio_rural/links/5aba68f3aca2728f4fa4983d/El-reciclaje-de-aguas-grises-como-complemento-a-las-estrategias-de-gestion-sostenible-del-agua-en-el-medio-rural.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Pablo-Ures-2/publication/324039859_El_reciclaje_de_aguas_grises_como_complemento_a_las_estrategias_de_gestion_sostenible_del_agua_en_el_medio_rural/links/5aba68f3aca2728f4fa4983d/El-reciclaje-de-aguas-grises-como-complemento-a-las-estrategias-de-gestion-sostenible-del-agua-en-el-medio-rural.pdf)

Wanjiru, E., & Xia, X. (2017). Optimal energy-water management in urban residential buildings through grey water recycling. *Sustainable Cities and Society*, 32, 654–668.

<https://doi.org/10.1016/J.SCS.2017.05.009>

Yu, Z. L. T., Deshazo, J. R., Stenstrom, M. K., & Cohen, Y. (2015). Cost–Benefit Analysis of Onsite Residential Graywater Recycling: A Case Study on the City of Los Angeles. *Journal - American Water Works Association*, 107(9), E436–E444.

<https://doi.org/10.5942/JAWWA.2015.107.0124>