



Universidad de Concepción

EL CLARO-OSCURO DE LAS AGUAS GRISES PARA SER CONSIDERADAS COMO UNA NUEVA FUENTE DE AGUA

Valentina Carrillo / Yenifer González / Gloria Gómez
Verónica Droppelmann / Eduardo Holzapfel
Leopoldo Gutiérrez / Gladys Vidal



Serie Comunicacional CRHIAM

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

El claro-oscuro de las aguas grises para ser consideradas como una nueva fuente de agua.

Valentina Carrillo, Yenifer González, Gloria Gómez,

Verónica Droppelmann, Eduardo Holzapfel,

Leopoldo Gutiérrez y Gladys Vidal.

Junio 2023.

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl



Universidad de Concepción

EL CLARO-OSCURO DE LAS AGUAS GRISES PARA SER CONSIDERADAS COMO UNA NUEVA FUENTE DE AGUA

Valentina Carrillo / Yenifer González / Gloria Gómez / Verónica Droppelmann
Eduardo Holzapfel / Leopoldo Gutiérrez / Gladys Vidal

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU-Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Valentina Carrillo

Ingeniera Civil Ambiental.
Doctora en Ciencias Ambientales
con mención en Sistema Acuáticos Continentales,
Universidad de Concepción.
Investigadora postdoctoral CRHIAM,
Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental
(GIBA-UDEC).



Yenifer González

Ingeniera Ambiental.
Candidata a doctora en Ciencias Ambientales
con mención en Sistema Acuáticos Continentales,
Universidad de Concepción.
Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental
(GIBA-UDEC).



Gloria Gómez

Bioingeniera.
Colaboradora CRHIAM.
Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental
(GIBA-UdeC),
Facultad de Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.



Verónica Droppelmann

Ingeniero Civil Bioquímico.
Profesional del Departamento de Conservación de
Ecosistemas Acuáticos,
División de Recursos Naturales y Biodiversidad,
Ministerio de Medio Ambiente.



Eduardo Holzapfel

PhD en Ingeniería,
Universidad de California Davis,
Estados Unidos.
Profesor Titular/Emérito,
Facultad de Ingeniería Agrícola,
Universidad de Concepción.
Investigador Asociado CRHIAM.

**Leopoldo Gutiérrez**

Ingeniero Civil Metalúrgico.
Doctor of Philosophy in Mineral Processing,
University of British Columbia, Canadá.
Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería
Metalúrgica, Universidad de Concepción.
Investigador Principal CRHIAM.

**Gladys Vidal**

Doctor en Ciencias Químicas.
Programa en Biotecnología Ambiental,
Universidad Santiago de Compostela, España.
Profesora Titular Facultad de Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.
Directora CRHIAM.

RESUMEN

En un contexto de escasez hídrica, en el que hay que explorar mecanismos de adaptación frente al cambio climático, la búsqueda de nuevas fuentes de agua se torna imprescindible. Ante esto, las aguas grises surgen como una nueva fuente de agua que puede ser factible de reutilizar dado que presentan, en general, una menor carga de contaminantes que las aguas residuales domésticas. Las aguas grises corresponden a las aguas que provienen de los diversos orígenes dentro de los hogares, a excepción de las aguas negras, que son aquellas provenientes de los inodoros. La alta generación de éstas y su posterior reutilización podría contribuir a disminuir la presión existente por los recursos hídricos provenientes de cuerpos de agua superficiales o subterráneos y satisfacer con ella, algunos requerimientos dentro de los hogares o en diversas zonas productivas.

Sin embargo, las aguas grises, al igual que las aguas residuales, presentan diversos contaminantes que deben ser eliminados adecuadamente a través de un tratamiento idóneo para ello, existiendo tratamientos físicos, químicos o biológicos que podrían ayudar a disminuir los posibles riesgos que un reúso directo pudiera provocar en los diferentes lugares en donde sea dispuesto.

Diferentes países ya han avanzado en la reutilización de las aguas grises y su institucionalidad. Particularmente, en Chile existe la ley 21.075 del año 2018 que regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises para diferentes usos. Sin embargo, aún no tiene reglamentación vigente.

INTRODUCCIÓN

A medida que la población mundial ha crecido exponencialmente en las últimas décadas, nos hemos visto enfrentados a un aumento de la demanda de agua y consecuentemente a una escasez hídrica que ha afectado a gran parte del mundo. Actualmente, casi 4 mil millones de personas viven bajo condiciones de escasez hídrica y 1,6 mil millones de personas se enfrentarán a la escasez económica del agua. Al mismo tiempo, se estima que para el año 2050, debido al cambio climático, alrededor de 685 millones de personas se enfrentarán a una disminución adicional de disponibilidad de agua dulce de por lo menos un 10%, según el informe de las Naciones Unidas para el Desarrollo Mundial del Agua (UNESCO, ONU-Agua, 2020). No obstante, no sólo la alta demanda de agua dulce ha incrementado la crisis y escasez hídrica mundial, sino que el cambio climático también ha jugado un papel clave; principalmente por la disminución en las precipitaciones, la desertificación, la explotación de acuíferos y la tala excesiva. Por tanto, la crisis hídrica podría ser aún más devastadora de lo que se ha estimado.

En este contexto, y en búsqueda de nuevas alternativas, han nacido las oportunidades de gestión sostenibles para la recuperación de recursos hídricos que podrían ayudar a minimizar las necesidades de agua dulce y preservar así mismo los cuerpos de agua continentales (Quispe *et al.*, 2022). Es así, como surge la opción de reutilizar las aguas grises, buscando a través de su utilización lograr una reducción de la demanda de agua y la carga sobre el tratamiento de aguas residuales convencionales, convirtiéndose desde un desecho a un valioso recurso hídrico y, en definitiva, en una nueva fuente de agua (Uthirakrishnan *et al.*, 2022).

La reutilización de las aguas grises puede proporcionar la utilización de agua al menos dos veces, e incluso hasta un tercer uso (riego agrícola), lo que permite un ahorro de 10-20% del consumo de agua urbana (Gross *et al.*, 2015). Las aguas grises se definen como las aguas residuales domésticas a excepción de la descarga de inodoros, es decir, producidos en tinajas, duchas, lavadoras y lavaplatos (Gross *et al.*, 2015). En comparación con las aguas servidas, las aguas grises se presentan como una mejor alternativa para su reutilización, debido a que presentan generalmente una menor carga contaminante. Para la reutilización de este recurso, se hace necesario evaluar las características que ésta posee como también la tecnología que sería idónea de implementar, para lograr disminuir los posibles riesgos a los que se exponga el ecosistema o las personas que tengan contacto con esta nueva fuente de agua.

Como se observa en la Figura 1, las aguas grises pueden tener diferentes fuentes de origen, así como también posibles reúsos como domésticos, recreativos, industrial, agricultura y ecológico. Sin embargo, para cada reuso se hace necesario dimensionar los riesgos que esto presenta. En particular, en el caso del reuso agrícola, una de las preocupaciones más importantes está relacionado con los aspectos de salud humana y ambiental, es decir, la calidad y seguridad de los alimentos producidos y los problemas de salud de los trabajadores agrícolas. Otras preocupaciones incluyen la salinidad y la tasa de infiltración de agua en el suelo, así como la acumulación de metales pesados y la contaminación causada por la lixiviación de nutrientes (Norton-Brandão *et al.*, 2013).

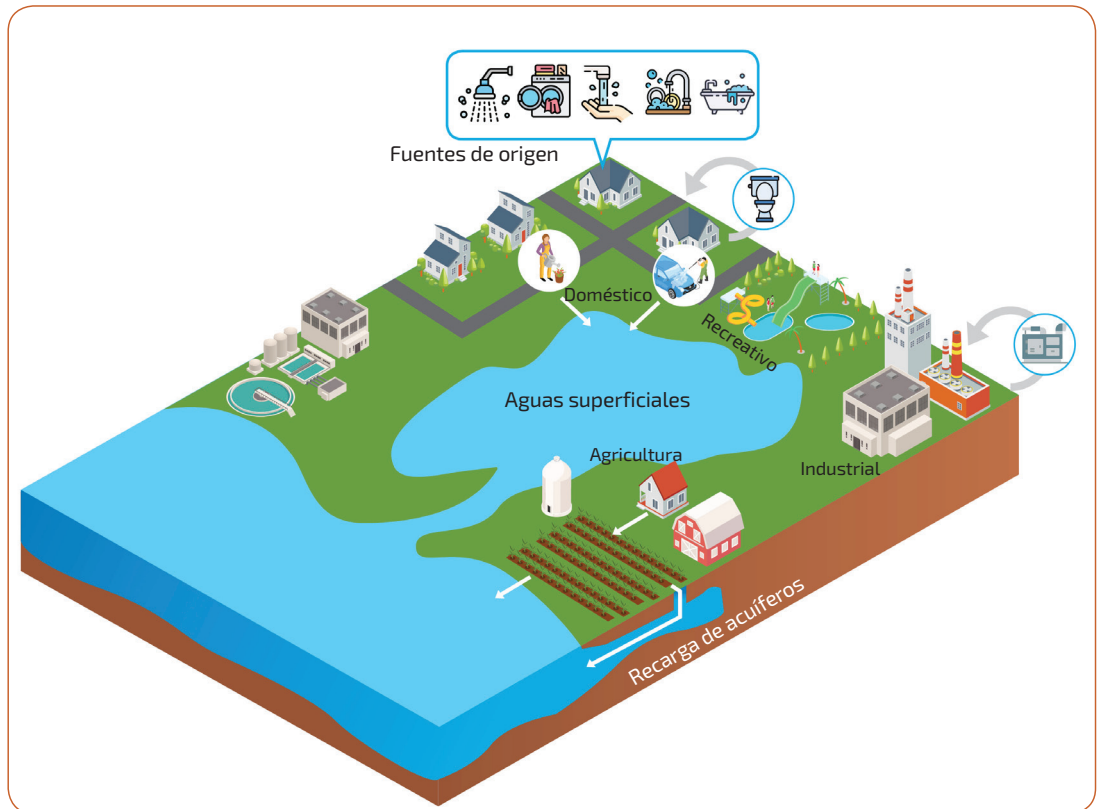


Figura 1.

Esquema global de fuentes de origen y posibles reúsos de las aguas grises.
Fuente: Elaboración propia.

ORIGEN Y CARACTERIZACIÓN DE AGUAS GRISES

Las aguas grises corresponden a las aguas residuales domésticas a excepción de los flujos provenientes del inodoro, las cuáles se denominan aguas negras. Se estima que las aguas grises constituyen aproximadamente un 70-80% del total de las aguas servidas domésticas (Eriksson *et al.*, 2002). La Figura 2 muestra el origen y clasificación de las aguas residuales domésticas, las cuáles se pueden distinguir entre aguas grises claras y aguas grises oscuras (Boano *et al.*, 2020). Las aguas grises claras incluyen las aguas residuales provenientes de las duchas, tinas y lavamanos. Mientras que las aguas grises oscuras consisten en aguas residuales de la cocina y lavandería, como lavaplatos y lavadoras.

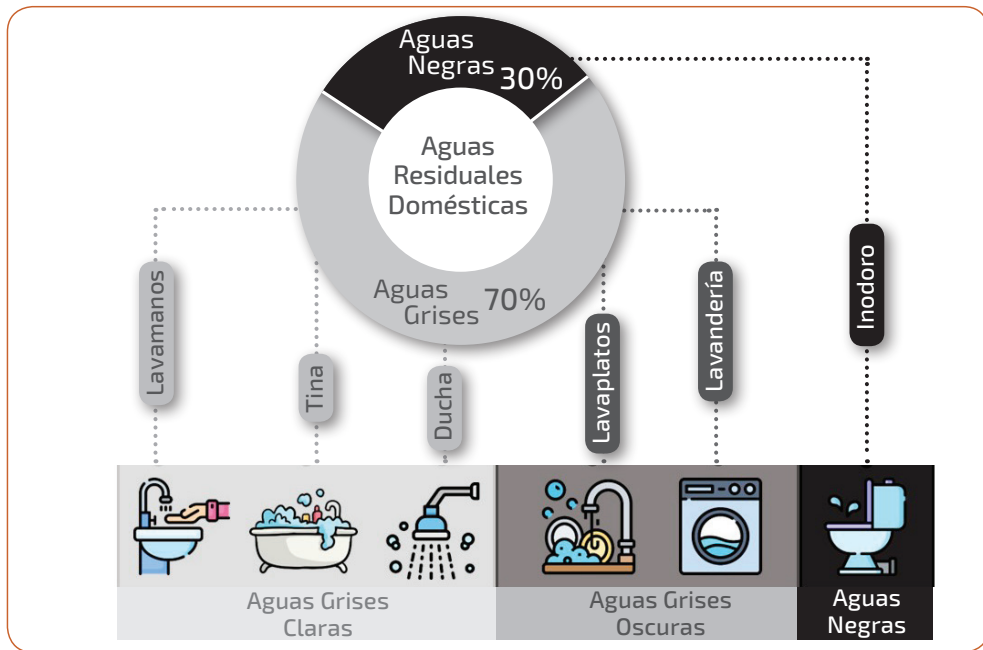


Figura 2.

Tipos de aguas grises según su origen.
Fuente: Elaboración propia.

Dado que el efluente de aguas negras que contiene orina, heces y papel higiénico no ingresa a la corriente de aguas grises, esta última se considera menos contaminadas. Se ha estimado que, las aguas grises contienen un menor contenido de materia orgánica y patógenos. Esto, genera un mayor potencial de reúso, dado que es una corriente más segura de manipular y más fácil de tratar para una reutilización en fines no potables como: el riego de cultivos, el riego del jardín, recarga de acuíferos, descarga de inodoros o la descarga en cuerpos de agua (Quispe *et al.*, 2022). Se considera que utilizando aguas grises tratadas para la recarga de los inodoros se podría ahorrar hasta un 30% del consumo total de agua potable en los hogares (Eriksson *et al.*, 2002). Además, una separación en origen de las aguas grises puede reducir el volumen enviado a las plantas de tratamiento de aguas residuales y minimizar la energía requerida para tratar las aguas servidas (Boano *et al.*, 2020).

Sin embargo, las aguas grises mixtas (conjunto de aguas grises claras y oscuras) pueden mostrar concentraciones similares de materia orgánica y nutrientes que las aguas residuales. La Figura 3 muestra las características de las aguas según su tipo, ya sea gris o agua residual doméstica. Como observamos, las características de las aguas grises pueden ser muy variables de una fuente a otra. Dependen del estilo de vida de las personas, sexo, edades y actividades, calidad del suministro de agua potable, productos domésticos, ubicación, economía y origen del hogar. Estudios realizados en diferentes países han permitido conocer la composición aproximada de las aguas grises, observando que presenta diferencias en la calidad; esto, posiblemente atribuido a las diferentes costumbres entre países, ciudades, pueblos y familias, lo cual radica en que no se pueda estandarizar la caracterización de las aguas grises (Eriksson *et al.*, 2002). Además, pueden variar a lo largo del tiempo por el clima predominante en el origen (Gross *et al.*, 2015).

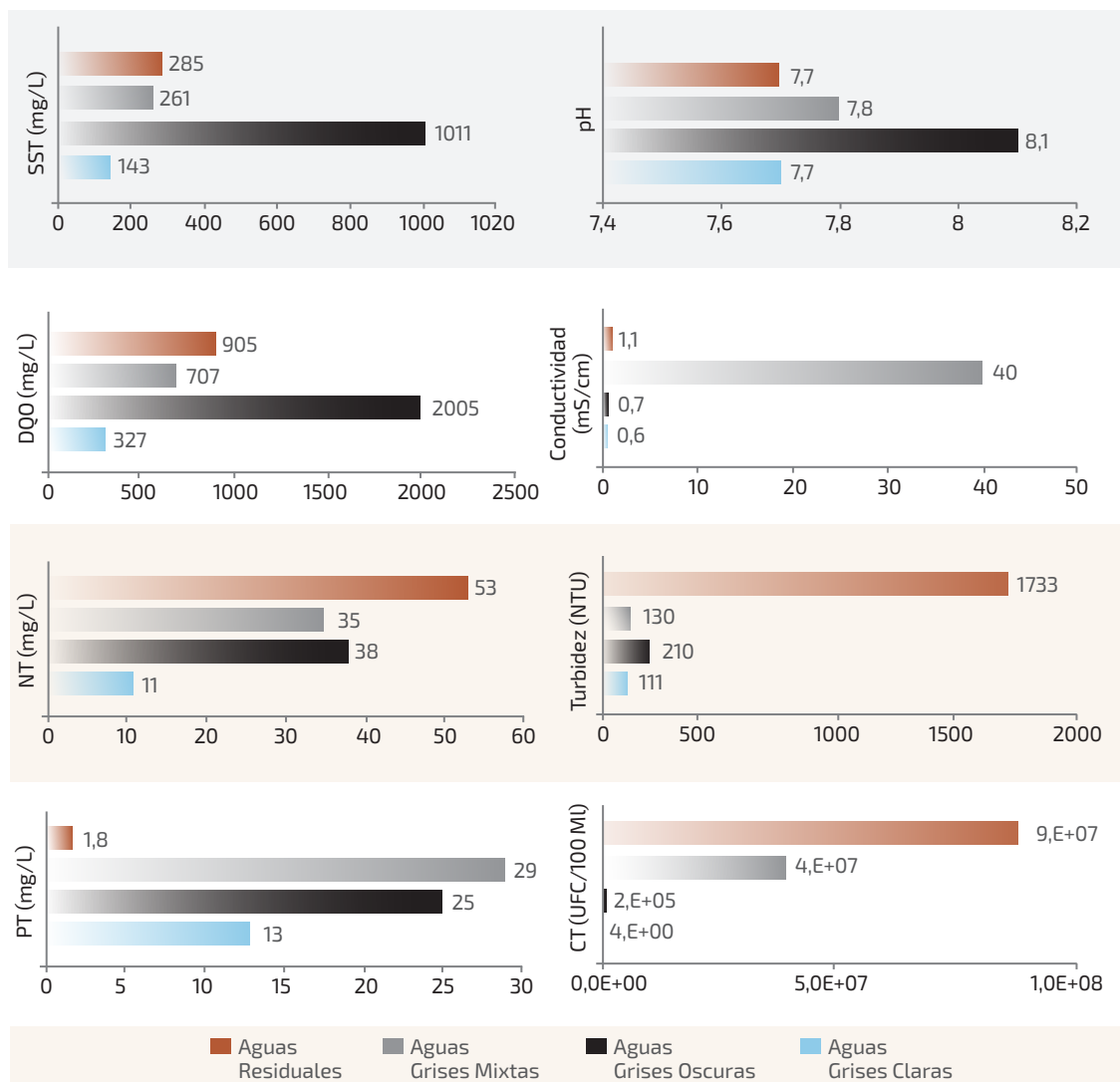


Figura 3.

Caracterización de las aguas grises según su origen. Fuente: Elaboración propia en base a datos de Eriksson *et al.*, (2002); Araya y Vidal, (2014); Gross *et al.*, (2015); Arden y Ma, (2018); Shaikh y Ahammed, (2020). Nota: SST: Sólidos Suspendidos Totales; DQO: Demanda Química de Oxígeno; DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno; NT: Nitrógeno total; PT: Fósforo total; CT: Coliformes totales.

Las aguas grises están compuestas principalmente por partículas, materia orgánica, nutrientes, sustancias inorgánicas (por ejemplo: K^{+1} , Na^{+1} , Ca^{+2} , Mg^{+2} y Cl^{-1}) y microorganismos patógenos como las bacterias. Además, es posible encontrar la presencia de productos químicos tóxicos, recalcitrantes y/o bioacumulativos (ej., metales traza, xenobióticos y compuestos naturales o semisintéticos), aunque éstos representan componentes menores, a menudo designados como microcontaminantes.

Las aguas grises claras contienen una carga orgánica aproximada de 43-305 mg Demanda Biológica de Oxígeno y una menor concentración de Coliformes Totales entre 1-7,4 Unidad Formadora de Colonias/100 mL considerándose unas de las aguas grises menos contaminadas. Algunos de los principales constituyentes de las aguas grises claras son: shampoo, jabón, pasta de dientes, restos de orina, productos de cuidado personal, cabellos, células de piel, aceite capilar, grasas corporales y partículas de arena/arcilla (Shaikh y Ahammed, 2020).

Por otro lado, las aguas grises oscuras tienen mayor carga de materia orgánica de 260-1363 mgDBO₅/L, y sólidos que alcanzan los 1852 mgSST/L y tienden a tener mayor conductividad y una alcalinidad cercana a pH 10. Esto, se atribuye a cargas pesadas de detergente o desechos de alimentos asociadas con fuentes de lavandería o cocina (Arden y Ma, 2018). Los principales constituyentes de este tipo de agua gris son: detergentes, aceites y grasas, residuos de alimentos, lavado de carne cruda, cáscaras de frutas y verduras, té o café, restos de conservantes de alimentos, partículas de arena y arcilla, productos químicos de detergentes, solventes, blanqueadores, pinturas, cabello y fibras no biodegradables de la ropa (Shaikh y Ahammed, 2020).

Las concentraciones de SST (29-256 mg/L) en aguas grises claras a menudo son menores que las aguas grises oscuras. Más importante aún, numerosos autores han notado una asociación entre sólidos en suspensión y patógenos más grandes, incluidas bacterias, indicadores bacterianos y protozoos. En términos de microorganismos, los CT en las aguas grises oscuras llegan a 230-4,3·10⁵ UFC/100mL, lo que se atribuye al lavado de ropa contaminada, como también que en la cocina se podría producir un rebrote de bacterias entéricas, como los indicadores fecales, generando así una posible sobreestimación de las cargas fecales (Arden y Ma, 2018). La evaluación de patógenos se basa principalmente en indicadores de contaminación fecal, como Coliformes Totales, Coliformes Fecales (CF) o *Escherichia coli* (Norton-Brandão *et al.*, 2013).

En cuanto a los nutrientes, las principales fuentes de nitrógeno son pequeñas concentraciones de orina, aseo humano y restos de comida (Gross *et al.*, 2015). Mientras que el contenido de fósforo cobra una mayor relevancia, debido a que puede encontrarse en una mayor cantidad en aguas grises oscuras debido al uso de detergentes ricos en fósforo. Sin embargo, suele ser variado debido a las legislaciones existentes en distintos países en materia de detergentes a base de fosfato (Arden y Ma, 2018). En las aguas grises oscuras, se han obtenido concentraciones medias de 12 y 9 mg/L de fósforo respectivamente, mientras que, en las aguas grises claras, las concentraciones se encuentran bajo los 2,0 mg/L (Shaikh y Ahammed, 2020).

RIESGOS ASOCIADOS AL USO DE AGUAS GRISES

Aunque el uso de aguas grises puede ser una solución a la escasez de agua y su reutilización se considera relativamente segura, puede implicar algunos peligros potenciales debido a la calidad del agua por los contaminantes presentes. El principal problema es el entorno afectado, que puede ser el interior de las viviendas, el ecosistema (suelo, agua) y afectar a la salud de las personas y los seres vivos, así como a las plantas y los cultivos. Aun así, estos problemas pueden extrapolarse más allá de las instalaciones locales y afectar a zonas vecinas, convirtiéndolo en un problema más global. Los problemas pueden estar relacionados con contaminantes de naturaleza física, química o biológica. Los problemas físicos incluyen el volumen, la turbidez del agua y los contaminantes sólidos. Los problemas químicos incluyen sales, alcalinidad, metales, materia orgánica, nutrientes y productos químicos de diversas fuentes, como los contaminantes emergentes o microcontaminantes. Los problemas biológicos se deben a patógenos, bacterias y coliformes presentes en las aguas grises (Edwin *et al.*, 2014). Por tanto, una mala gestión o un tratamiento inadecuado de las aguas grises puede tener riesgos asociados a una fuente de peligro para la salud humana y el medio ambiente (Maimon y Gross, 2018).

SALUD DE LAS PERSONAS

En general, hay menores riesgos para la salud asociados a la reutilización de aguas grises que con las aguas residuales sin tratar. Sin embargo, estos estándares a menudo se basan en el conocimiento existente de todas las aguas residuales domésticas, lo que la podría hacer más adecuada para su

reutilización, pero aun así no garantiza su seguridad. En la Figura 4 se observan los riesgos asociados a la salud de las personas, los cuales son principalmente debido a la presencia de microorganismos patógenos, metales pesados y microcontaminantes cuando se está en contacto con las aguas grises no tratadas.

Las principales fuentes potenciales de contaminación microbiana son la contaminación fecal, el lavado de manos después de ir al baño, el lavado de pañales, los restos alimenticios crudos y el lavado de la ropa de los niños (Quispe *et al.*, 2022). Entre ellos se pueden encontrar la presencia de organismos patógenos como *Escherichia coli*, rotavirus, *Pseudomonas*, *Salmonella*, *Legionella* y *Cryptosporidium* (Maimon y Gross, 2018).

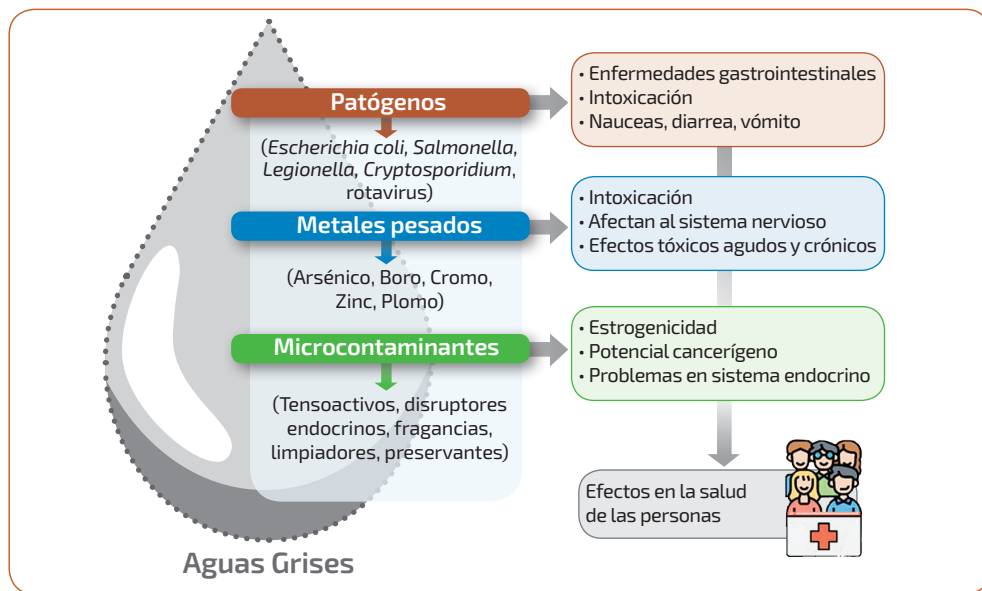


Figura 4.

Riesgos asociados a la salud de las personas debido a la presencia de contaminantes en aguas grises. Fuentes: Elaboración propia.

Una forma de evaluar la calidad de aguas grises es mediante los indicadores microbianos bacterianos estándar como lo son los CT y CF. Otros indicadores específicos entéricos fecales son *Escherichia coli* y *Enterococos*. La última, una bacteria oportunista asociada con la piel y las membranas mucosas humanas. También se encuentran *Pseudomonas aeruginosa* y *Staphylococcus aureus*, bacterias propuestas como indicadores de la inactiva-

ción de virus entéricos y cuyas esporas asociadas se han propuesto como indicador de protozoos parásitos *Clostridium perfringens*. Asimismo, se encuentra una bacteria acuática transmitida por aerosol que puede causar enfermedades respiratorias como *Legionella*, una bacteria gastrointestinal y, a veces, patógena como es la *Salmonella* (Maimon y Gross, 2018; Shaikh y Ahammed, 2020).

La presencia de *Salmonella* y *Campylobacter* está asociada con intoxicación alimentaria que se puede atribuir a carne, mariscos y otros artículos domésticos parcialmente cocidos que ya portan la bacteria. Esta última pueden producir enfermedades gastrointestinales, mientras que *Legionella* se relaciona al reúso de aguas grises y un entorno propicio podría estimular el crecimiento potencial de ésta, conduciendo así a un mayor riesgo de enfermedades transmitidas por la exposición o ingesta de cantidades mínimas o significativas (Shaikh y Ahammed, 2020). Estos patógenos y microorganismos podrían afectar gravemente la salud pública. Se han encontrado concentraciones de CF en aguas grises con valores entre 0 y 10^6 - 10^7 UFC/100 mL, teniendo además recuentos de placas heterotróficas inferiores al límite permisible que suele estar en el rango de 10^5 a 10^7 UFC/100 mL (Quispe et al., 2022).

Otro contaminante que puede generar riesgos a la salud a largo plazo o riesgos secundarios son los metales pesados. Si bien algunos metales son esenciales para el crecimiento, los niveles elevados pueden afectar la salud de la población. Los metales pesados también se encuentran habitualmente en aguas grises en forma de arsénico, boro, cromo, cobre, y zinc, los cuáles generalmente se encuentran en altas concentraciones (Shaikh y Ahammed, 2020). Algunos metales pesados se pueden encontrar en productos del hogar como cuidado personal y de cocina (detergentes, jabón, cloro, etc.) y restos de ropa. También, algunos metales como plomo pueden atribuirse a las tuberías de plomo en el sistema de distribución de agua potable. Sin embargo, la mayoría de las concentraciones de metales pesados en aguas grises no son prioridad de estudios o motivo de preocupación en la salud de las personas, como sí lo son en suelos agrícolas o ambientes acuáticos debido a la posible bioacumulación de éstos (Shaikh y Ahammed, 2020).

Por último, se ha reportado sobre los contaminantes emergentes en las aguas grises que suelen incluir disruptores endocrinos, tensoactivos, fragancias, colorantes, conservantes, limpiadores y disolventes (Boano et al., 2020). En efecto, las concentraciones más altas de estos compuestos generalmente se encuentran en las aguas grises de la cocina y la lavandería. Asimismo, se han encontrado estas sustancias en la orina de adultos, las

cuáles han ido en aumento progresivamente desde el año 2010 al 2014 (Mu *et al.*, 2018). Los riesgos asociados con estos compuestos, es que a pesar de que se encuentran en concentraciones trazas, son altamente bioacumulables. Así, pueden generar problemas de salud humana basado en su potencial cancerígeno, alteración de hormonas estrogénicas y problemas en el sistema endocrino, entre otros (Shaikh y Ahammed, 2020).

ECOSISTEMAS

Los riesgos asociados al ecosistema están relacionados con la contaminación de las aguas superficiales y/o subterráneas, así como con los efectos en el crecimiento de las plantas y comunidades microbianas del suelo. La Figura 5 muestra que los principales problemas se deben al pH, materia orgánica, microcontaminantes y sustancias inorgánicas como metales e iones presentes. Algunos de los riesgos más comunes son problemas de retención de agua, salinidad, alcalinidad de suelos, bioacumulación de contaminantes y retención de nutrientes; en definitiva, problemas de crecimiento en la vegetación y microbiota de suelo irrumpiendo los ciclos biogeoquímicos y funciones ecológicas (Maimon y Gross, 2018).

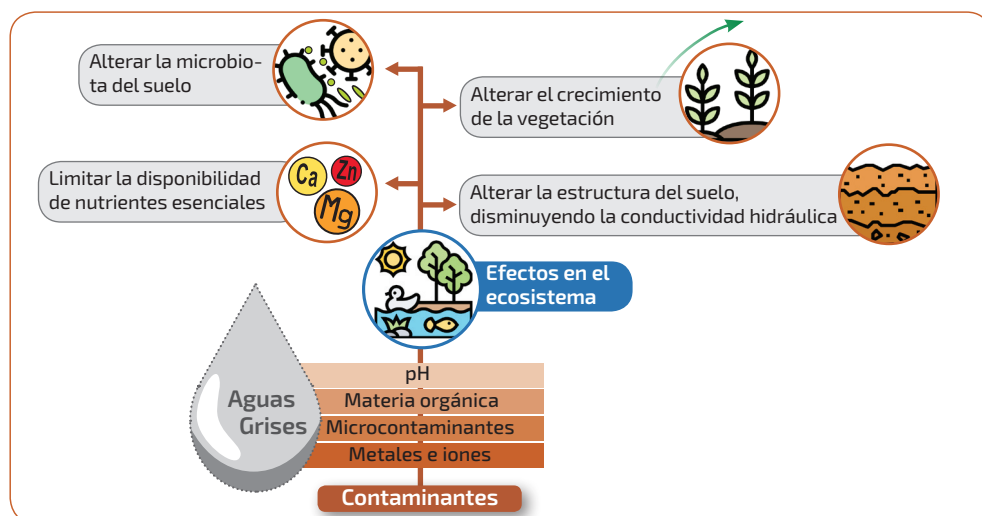


Figura 5.

Riesgos asociados a la salud de las personas debido a la presencia de contaminantes en aguas grises. Fuentes: Elaboración propia.

Un pH alcalino cercano a 9 como en el caso de las aguas grises mixtas puede limitar la disponibilidad de nutrientes esenciales para la planta y ocasionar deficiencias de fósforo y zinc, y hasta, posiblemente, la disolución de metales pesados. Asimismo, la salinidad puede alterar la estructura del suelo reduciendo la conductividad hidráulica en especial en arcillas. Otro factor importante es el boro el cual en exceso causa toxicidad en la vegetación. La fuente de este elemento se encuentra en blanqueadores utilizados en lavandería, como también en tabletas de lavado (Gross *et al.*, 2015). La presencia de estos compuestos puede generar repercusiones en la vegetación y microbiota del suelo, como también pueden repercutir en aguas superficiales aledañas o aguas subterráneas (Maimon y Gross, 2018).

La concentración de materia orgánica en aguas grises es un factor importante en el control de calidad, pues afecta el ambiente de tal manera que termina modificando propiedades del agua y el suelo. Cuando tenemos materia orgánica en exceso modifica la capacidad de retención de agua del suelo, como también el flujo de partículas de éste, además de provocar una mala conductividad hidráulica, entre otros problemas (Eriksson *et al.*, 2002; Shaikh y Ahammed, 2020).

Los microcontaminantes han demostrado ser tóxicos o posiblemente disruptores endocrinos y, bajo ciertas condiciones, pueden tener un efecto adverso en la microbiota del suelo y el agua. Los tensoactivos o agentes espumantes, están compuestos de una parte hidrofóbica y otra hidrofílica, lo que les brinda un potencial persistente y bioacumulativo que contribuye a la repelencia de agua en suelos, irrumpiendo en su productividad. En el caso de las aguas grises, se ha encontrado su origen en los detergentes; presentan propiedades antimicrobianas por lo que pueden estimular la evolución y crecimiento de bacterias resistentes. Además, inhiben la microbiota del suelo para absorber los minerales presentes en él y se ha demostrado que son capaces de adsorberse fuertemente en los lodos, suelo y sedimentos. Incluso, se han reportado cambios en la estructura de comunidades bacterianas del suelo debido a la contaminación con tensoactivos (Maimon y Gross, 2018).

TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTOS PARA AGUAS GRISES

Dada la complejidad y riesgos de los contaminantes presentes en las aguas grises, se hace fundamental caracterizar los contaminantes presentes para determinar la eliminación total requerida, el potencial reúso y seleccionar los trenes de tratamiento apropiados. Dado el tipo de reutilización, siempre es difícil predecir completamente los efectos que pueden derivarse. Sin embargo, en general se reutilizan en sitios rurales o alejados de la población, por lo que la tecnología implementada para su tratamiento es operada o mantenida por unas pocas personas, en su mayoría no profesionales (Maimon y Gross, 2018). Por lo tanto, la tecnología escogida debe ser robusta, confiable y capaz de soportar grandes variaciones en la calidad y cantidad del agua, y debe tratar el agua a un nivel seguro para su reutilización.

La Figura 6 muestra un esquema de las alternativas de tratamiento de las aguas grises que deben ser tratadas siguiendo un tren de tratamientos físicos, químicos y biológicos. Como tratamiento primario, principalmente se utilizan mecanismos fisicoquímicos como la filtración, sedimentación, coagulación y floculación para reducir los sólidos suspendidos, color y turbidez.

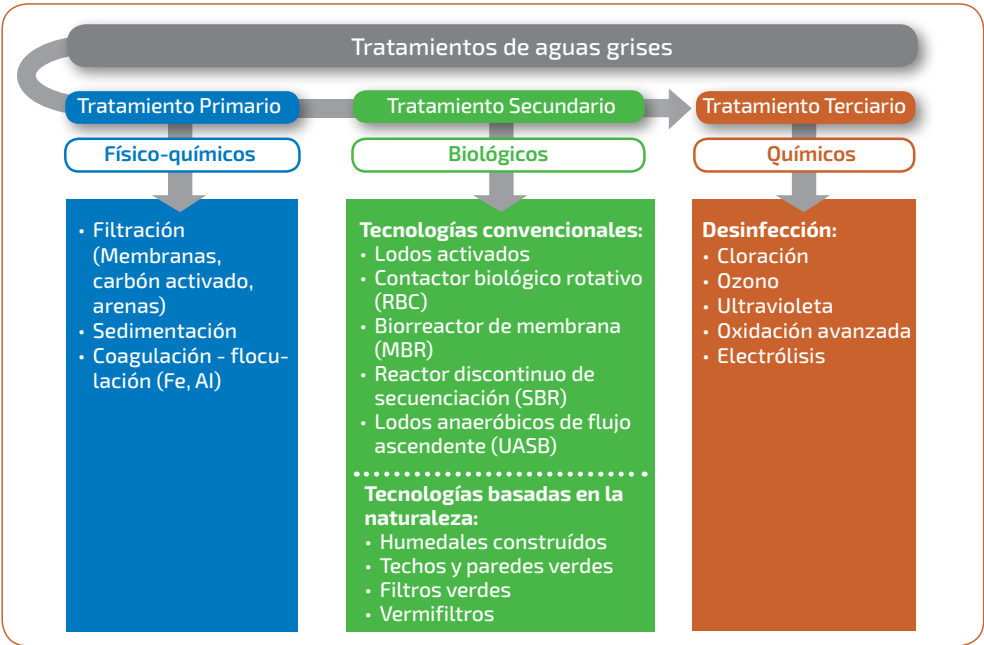


Figura 6.

Tecnologías para el tratamiento de aguas grises.
Fuente: Elaboración propia.

Como tratamiento secundario destacan los mecanismos biológicos, los cuales se enfocan en la eliminación de materia orgánica y, en menor medida, de nutrientes. Los tratamientos secundarios se pueden clasificar como tecnologías convencionales y no convencionales o últimamente llamados Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN). Las tecnologías convencionales son intensivas en energía e implementación; en éstas destacan los lodos activados, contactor biológico rotativo, biorreactor de membrana, reactor discontinuo de secuenciación y lodos anaerobios de flujo ascendente (Norton-Brandão *et al.*, 2013; Edwin *et al.*, 2014; Boano *et al.*, 2020; Kurniawan *et al.*, 2021). Por el contrario, las tecnologías no convencionales se basan en procesos naturales de baja manipulación como humedales construidos, techos y paredes verdes, filtros verdes como fitorremediación o vermifiltros basados en la degradación de la materia orgánica por la acción de lombrices (Arden y Ma, 2018).

La Tabla 1 muestra un resumen de las eficiencias de eliminación de contaminantes en diferentes tipos de tecnologías para el tratamiento de aguas grises. Los tratamientos fisicoquímicos, como la filtración, han demostrado ser eficientes para eliminar la turbidez hasta en un 88% y los sólidos hasta un 93% dependiendo del medio filtrante y tamaño de poros. Los filtros más comunes son los de arena, seguido por los de carbón activado y otros menos utilizados son el biochar o corteza de pino (Boano *et al.*, 2020; Kurniawan *et al.*, 2021). Otro método de filtración es a través de membranas, las cuáles logran una buena eliminación de sólidos y patógenos hasta en un 100%. Sin embargo, pueden ser sensibles al rebrote de patógenos por medio de incrustaciones y son altamente costosos (Maimon y Gross, 2018).

A pesar de ser bastante efectivos para la reducción de sólidos en aguas grises, tienden a degradar menos materia orgánica (57%) y nutrientes como el nitrógeno (50-53%), por lo que se hace necesario un paso previo como es la sedimentación o trampa de grasas para evitar la colmatación del filtro (Edwin *et al.*, 2014). Otro tratamiento alternativo puede ser agregar un proceso post filtración como la coagulación y floculación. Este tratamiento implica la adición de coagulantes químicos como cloruro de hierro (FeCl_3) y sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) para aumentar la eliminación de materia orgánica o nutrientes como el fósforo. Sin embargo, la adición del coagulante afecta el valor del pH, lo cual se convierte en una limitante para tratar las aguas grises (Kurniawan *et al.*, 2021).

Tabla 1.

Eficiencias de eliminación en diferentes tecnologías para el tratamiento de aguas grises.

Tecnología	Eficiencias de eliminación (%)									Referencias
	Turbi- dez	SST	DBO ₅	DQO	NT	PT	CT	CF	Tenso- activo	
Filtración + sedimentación	25-88	14-93	57-98	20-94	50-53	70-99	98-100	-	80-98	Boano <i>et al.</i> , 2020 Kurniawan <i>et al.</i> , 2021
Coagulación (Fe, Al)	90-94	-	85-94	63-91	1-12	94-96	-	-	-	Boano <i>et al.</i> , 2020
Humedales construidos	47-77	25-84	63-87	35-74	44-59	24-58	28-40	38-50	-	Arden y Ma, 2018
Vermifiltros	-	70-99	85-97	32-93	70	31	-	-	-	Chowdhury <i>et al.</i> , 2022
Techos y paredes verdes	-	-	86-98	81-92	31-92	60-99	98-99	92-96		Boano <i>et al.</i> , 2020
Biorreactor de membrana (MBR)	90-98	>90	48-95	51-80	37-97	18-60	>95	-	95-96	Boano <i>et al.</i> , 2020; Kurniawan <i>et al.</i> , 2021
Contactador biológico rotativo (RBC)	>66	11-87	52-93	60-80	57-85	12-60	-	-	-	Boano <i>et al.</i> , 2020; Kurniawan <i>et al.</i> , 2021
Lodos anaerobios de flujo ascendente (UASB)	-	-	-	51-70	35-37	31-50	-	-	-	Kurniawan <i>et al.</i> , 2021
Sistema aerobio + anaerobio	-	5-24	37-40	45-90	35-70	31-66	-	-	97	Kurniawan <i>et al.</i> , 2021

Nota: SST: Sólidos suspendidos totales; DBO₅: Demanda biológica de oxígeno; DQO: Demanda química de oxígeno; NT: Nitrógeno total; PT: Fósforo total; CT: Coliformes totales; CF: Coliformes fecales.

Los tratamientos biológicos para aguas grises pueden ser del tipo aeróbicos o anaeróbicos. Dentro de los tratamientos aerobios destacan los lodos activados (LA), biorreactores de membrana (MBR), contactador biológico rotativo (RBC) y reactor secuencial por lotes (SBR) que alcanzan eliminaciones de materia orgánica sobre un 90%. Sin embargo, en relación a la eliminación de DQO las eficiencias alcanzan un 51-80% debido a la presencia de compuestos orgánicos más recalcitrantes que contienen las aguas grises (Arden y Ma, 2018). Para ello, una combinación de sistemas aerobios con anaerobios como la conexión de SBR y UASB ha demostrado una eliminación de DQO de un 90%, sumado a la eliminación de tensoactivos de un 97% mediante el método SBR. En general, los sistemas de aireación son óptimos para eliminar material tensoactivo en aguas grises (Kurniawan *et al.*, 2021).

Los MBR, un tratamiento biológico aeróbico con técnicas de filtración tienen la ventaja de tener buena eliminación de materia orgánica (95%), sólidos en suspensión (>90), turbidez (98%) y patógenos (>95) teniendo la ventaja de ocupar poco espacio (Maimon y Gross, 2018). Sin embargo, estos tipos de sistemas implican mayores costos operativos, mantención y de capital (Edwin *et al.*, 2014). Asimismo, las desventajas de estos tratamientos biológicos puede ser la baja eliminación de nutrientes, debido a la relación materia orgánica: nutrientes. En general, el nitrógeno en las aguas grises proviene de la orina y se presenta principalmente en forma de amonio, mientras que el fosfato proviene del uso de detergentes (Kurniawan *et al.*, 2021).

Las tecnologías basadas en la naturaleza como humedales construidos, techos verdes o vermifiltros están demostrando ser una mejor alternativa para el tratamiento de agua grises y están ganando popularidad. Son tecnologías que se destacan por bajos costos de mantenimiento y uso de energía, sin formación de subproductos (Maimon y Gross, 2018). En cuanto a la eliminación de materia orgánica alcanzan eficiencias de eliminación de 53-98%, con una mayor eficiencia de eliminación de DQO de 93% por los vermifiltros. Esto se debe a que las lombrices en los vermifiltros degradan compuestos orgánicos gruesos en partículas más finas mejorando la biodegradabilidad para el proceso en general (Chowdhury *et al.*, 2022).

Una de las desventajas de estos sistemas es la limitada eliminación de sólidos, turbidez y patógenos. Lo que indica que se debe contar con un tratamiento primario con la finalidad de reducir los sólidos y la turbidez de las aguas grises. Para la eliminación de patógenos, los humedales construidos muestran una reducción de patógenos de un 28-51% (Maimon y Gross, 2018). Mientras que los techos y paredes verdes están por sobre el 90%. Por lo tanto, una solución para el posible reúso podría ser la adición de una unidad de desinfección para alcanzar los límites estándar de reutilización (Boano *et al.*, 2020).

Finalmente, como tratamiento terciario destacan las tecnologías de desinfección que se basan principalmente en tratamientos químicos efectuados con cloro, ozono, ultravioleta, oxidación avanzada y electrolisis. Estos son altamente eficientes en la destrucción de microorganismos que causan enfermedades y otros patógenos presentes (Edwin *et al.*, 2014; Kurniawan *et al.*, 2021). Entre las técnicas nombradas, la desinfección basada en cloro es una de las más económicas y fácil de utilizar y almacenar. Sin embargo, puede tener una baja eficiencia de inactivación debido a un mal tratamiento previo ya que el alto pH, la turbidez y sólidos suspendidos pueden influir (Edwin *et al.*, 2014). Se ha informado que un cloro residual más alto de al-

rededor de 0,15 a 0,2 mg/L puede conducir a una reducción de bacterias de tres órdenes de magnitud.

Otras tecnologías de desinfección son más eficaces como el ozono, oxidación avanzada, fotocátalisis y electrólisis. Sin embargo, tienen altos costos de operación, mantenimiento, operación y la posible generación de subproductos tóxicos o cancerígenos (Maimon y Gross, 2018). Por ejemplo, los tratamientos basados en procesos de oxidación avanzada utilizan ozono o peróxido de hidrógeno (H_2O_2), el cuál es un producto químico tóxico y peligroso (Kurniawan *et al.*, 2021).

Pocos estudios son los que evalúan microcontaminantes, desde su caracterización hasta su tratamiento lo que complica la evaluación de riesgos que puede estar asociado a su reutilización. A pesar de esto, la mayoría de estos compuestos no son tóxicos para los humanos, pero la acumulación de estos microcontaminantes a lo largo del tiempo en un sistema de circuito cerrado puede ser un problema.

NORMATIVA DE REÚSO DE AGUAS GRISES

A nivel mundial, los estándares de reutilización del agua son variables y se rigen por el uso previsto del efluente tratado. Sin embargo, hay ciertas barreras que impiden la implementación exitosa de la reutilización de aguas grises: las barreras administrativas (institucionales y legales), tecnológicas (limitaciones financieras, cantidad y calidad de aguas) y barreras de percepción pública (limitaciones sociales y culturales) (Vuppaladadiyam *et al.*, 2019).

Las normativas legales e institucionales son de vital importancia debido a que garantizan la utilización segura de las aguas grises a la población. Además, estas instituciones se deben encargar del costo de los tratamientos y mantenciones del sistema. La restricción tecnológica y económica se enfoca en la accesibilidad de tecnologías de tratamientos que aseguren aguas tratadas de una calidad óptima según el uso que se quiera dar. Por último, la percepción pública es un obstáculo común para la reutilización de aguas grises por varias razones, como sesgos culturales, grupos sociales y estéticos que difieren en los distintos países. Las mayores preocupaciones son por la calidad del agua, la salud humana y las implicaciones ambientales de la reutilización de aguas grises (Vuppaladadiyam *et al.*, 2019).

El tipo de tratamiento debe ir enfocado en la aplicación del reúso de aguas grises y centrarse en los estándares de calidad e impactos a la salud de las personas y el ecosistema. Entre los tipos de reúso destacan usos recreativos y paisajísticos, agricultura y urbano, agua para embalses o lagos, para mantener el caudal ecológico, uso industrial o construcción, recarga de inodoros, lavados de autos o caminos, descarga a aguas superficiales o infiltración a aguas subterráneas (Norton-Brandão *et al.*, 2013; Edwin *et al.*, 2014; Arden y Ma, 2018; Vuppaladadiyam *et al.*, 2019; Boano *et al.*, 2020)

Algunos casos importantes de reúso de aguas grises en riego se han implementado en países como Corea, Estados Unidos y Australia generando beneficios económicos y ambientales en las comunidades agrícolas, ahorrando costos en bombeo de agua y fertilización. Al mismo tiempo, se preservan los escasos recursos de agua dulce existentes. En regiones del medio oriente se trata el 43% de las aguas grises generadas debido a la escasez hídrica presente en países como Jordania, Túnez, e Israel. Estos países, emplean una variedad de sistemas convencionales y no convencionales y tienen normas y reglamentos nacionales para su potencial reutilización (Norton-Brandão *et al.*, 2013).

Este reúso, debe estar regulado bajo una normativa. Así, en la actualidad, no existen estándares de calidad uniformes para la reutilización de aguas grises a nivel mundial, y las tecnologías de tratamiento disponibles son en su mayoría patentadas y poco claras en muchos aspectos. Además, no existen leyes ni reglamentos sobre el tratamiento y la reutilización de aguas grises en muchos países (Edwin *et al.*, 2014).

No obstante, algunos países ya han planteado la posibilidad de reutilizar el agua gris para diferentes actividades. En general, para cada actividad a realizar la normativa se hace más o menos estricta en cuanto a la concentración de diferentes parámetros. La tabla 2 presenta las actuales legislaciones utilizadas en diversos países. En ésta se observa que los parámetros que son regulados se concentran en la medición de sólidos, materia orgánica biodegradable, patógenos y en algunos casos nutrientes.

El claro-oscuro de las aguas grises para ser consideraras como una nueva fuente de agua

Tabla 2.

Normativa vigente para el reúso de aguas grises.

Parámetro	Unidad	Australia	Israel	E.E.U.U.	Italia	Nueva Gales	Reino Unido	Canadá	Japón	España	China
Tipo de reúso	-	Riego de superficie, descarga del inodoro, uso de lavandería, lavado de coches	-	Riego paisajístico, descarga de inodoros, protección contra incendios, aire acond. comercial	Aguas grises tratadas calidad para la reutilización	Descarga del inodoro	Riego aspersores, descarga del inodoro	Descarga del inodoro		Calidad del agua para agricultura	Para las aguas residuales
pH	-	6-9	-	6-9	6-9,5	-	5-9,5	7-9	6-9		6-9
Conductividad	dS/m				0,03					3	-
Índice de adsorción de sodio									6	10	-
SST	mg/L	<10	<10	-	<10	<20	-	<20	-	<20	10-50
Turbidez	NTU	-	-	<2-5	-	2	<10	<2	Clara	-	<10
DQO	mg/L	-	<100	-	<100	-	-	-	-	-	<15
DBO ₅	mg/L	<20	<10	<10	<20	<20	-	<20	<20	-	10-20
NT	mg/L	-	-	-	<15	-	-	-	20-30	-	15-20
PT	mg/L	-	-	-	<2	-	-	-	1-4	-	1-5
Tensoactivos	mg/L				0,5				30	-	0,5-1
E. coli	UFC/100 mL	-	-	-	<10	-	25	-		-	-
Coliformes fecales	UFC/100 mL	10	-	N.D	-	<1	1000	<200	<1*10 ⁴	100	-

Nota: SST: Sólidos suspendidos totales; DBO₅: Demanda biológica de oxígeno; DQO: Demanda química de oxígeno; NT: Nitrógeno total; PT: Fósforo total.

Para el caso específico de SST, en general, se aceptan valores máximos de 20 o 10 mg/L, al igual que lo que ocurre en la materia orgánica biodegradable medida como DBO₅.

En Chile, el año 2018 se promulgó la Ley 21.075, la cual regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises (Ley 21.075, 2018). En este caso, se contempla el reúso de aguas grises para los siguientes destinos:

- Urbanos: riego de jardines o descarga de aparatos sanitarios.
- Recreativos: riego de áreas verdes públicas, campos deportivos u otros con libre acceso al público.
- Ornamentales: áreas verdes y jardines ornamentales sin acceso al público.
- Industriales: uso en todo tipo de procesos industriales no destinados a productos alimenticios y fines de refrigeración no evaporativos.
- Ambientales: riego de especies reforestadas, mantención de humedales y otros usos que contribuyan a la conservación y sustentabilidad ambiental.

Esta ley contempla que las aguas grises se pueden utilizar para diferentes actividades. Incluso, se pueden incluir usos potables y no potables, como es el caso de la descarga de inodoros o el uso en la agricultura. Aun así, se deben tener las siguientes consideraciones para su implementación:

- Los estanques y tuberías de las aguas grises deben estar señalizadas y deben ir bajo las tuberías de agua potable.
- Se debe tener independencia de los servicios de agua potable y alcantarillado.
- Conexión con alcantarillado en caso de tener que evacuar las aguas grises por emergencia o mantención.
- Los puntos de reutilización deben estar señalizados.
- Se debe tener una planta de tratamiento. Ésta y los dispositivos del sistema de reutilización deben estar protegidos del acceso de personas extrañas y animales.

En definitiva, las directrices para la reutilización de aguas grises debieran incluir al menos parámetros como pH, Demanda Bioquímica de Oxígeno de 5 días (DBO_5), SST, turbidez, Coliformes fecales y totales, y ojalá también parámetros como nitrógeno, NH_4^+ y fósforo (Vuppaladadiyam *et al.*, 2019). No obstante, parámetros como tensoactivos y contaminantes emergentes son necesarios pensando en el potencial de bioacumulación que podrían tener y el posible daño a la salud pública y ecosistemas que generarían.

CONSIDERACIONES FINALES

En general, el uso de aguas grises como una nueva fuente de agua, presenta potencial de reúso de y podría aliviar la utilización de agua potable para realizar actividades diarias como la recarga de inodoros, el riego de jardines, árboles y otras actividades que no impliquen un contacto directo. Sin embargo, es de vital importancia, utilizar un tratamiento adecuado para eliminar diferentes contaminantes que contienen las aguas grises, tales como, la materia orgánica, nutrientes, patógenos y avanzar en la eliminación de contaminantes emergentes o microcontaminantes que pueden generar efectos adversos en la salud pública y los ecosistemas. Por otra parte, el uso por parte de la comunidad de productos domésticos ecológicos que posean una alta biodegradabilidad podría disminuir el riesgo asociado con estos microcontaminantes. Para esto, iniciativas de educación ambiental que muestren las implicancias de las decisiones del diario vivir se hace muy urgente.

La idoneidad de cada tecnología a implementar dependerá de la situación específica en donde ésta se requiere, dado que dependerá de los costos económicos, de mantención y operación de dichos procesos para tener un agua de calidad para su reutilización posterior. Esto se encuentra contextualizado bajo la normativa vigente. En Chile, el año 2018 fue promulgada la ley 21.075 que "Regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises". Sin embargo, hasta inicios del año 2023 aún no se encuentra vigente debido a su falta de reglamentación.

REFERENCIAS

- Arden, S., & Ma, X. 2018. Constructed wetlands for greywater recycle and reuse: a review. *Science of the Total Environment*, 630, 587-599. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.218>
- Becerra-Castro, C., Lopes, A. R., Vaz-Moreira, I., Silva, E. F., Manaia, C. M., & Nunes, O. C. 2015. Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. *Environment international*, 75, 117-135. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.001>
- Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F., & Masi, F. 2020. A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. *Science of the total environment*, 711, 134731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134731>
- Chowdhury, S. D., Bhunia, P., & Surampalli, R. Y. 2022. Sustainability assessment of vermifiltration technology for treating domestic sewage: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 50, 103266. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103266>
- Edwin, G. A., Gopalsamy, P., & Muthu, N. 2014. Characterization of domestic gray water from point source to determine the potential for urban residential reuse: a short review. *Applied Water Science*, 4(1), 39-49. <https://doi.org/10.1007/s13201-013-0128-8>
- Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., & Ledin, A. 2002. Characteristics of grey wastewater. *Urban water*, 4(1), 85-104. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00064-4)
- Gross, A., Maimon, A., Alfiya, Y., & Friedler, E. 2015. Greywater reuse. CRC Press. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.159>
- Kurniawan, S., Yuliwati, E., Ariyanto, E., Morsin, M., Sanudin, R., & Nafisah, S. 2021. Greywater treatment technologies for aquaculture safety. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.014>
- Ley-21075 15-FEB-2018 MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS - Ley Chile - Biblioteca del Congreso Nacional. (n.d.). Disponible en <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1115066&idParte=9886827&idVersion=2018-02-15>

- Maimon, A., & Gross, A. 2018. Greywater: Limitations and perspective. *Current opinion in environmental science & health*, 2, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.11.005>
- Mu, X., Huang, Y., Li, X., Lei, Y., Teng, M., Li, X., & Li, Y. 2018. Developmental effects and estrogenicity of bisphenol A alternatives in a zebrafish embryo model. *Environmental science & technology*, 52(5), 3222-3231.
- Norton-Brandão, D., Scherrenberg, S. M., & van Lier, J. B. 2013. Reclamation of used urban waters for irrigation purposes—a review of treatment technologies. *Journal of environmental management*, 122, 85-98.
- Oron, G., Adel, M., Agmon, V., Friedler, E., Halperin, R., Leshem, E., & Weinberg, D. 2014. Greywater use in Israel and worldwide: Standards and prospects. *Water Research*, 58, 92-101. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2014.03.032>
- Quispe, J. B., Campos, L. C., Mašek, O., & Bogush, A. 2022. Use of biochar-based column filtration systems for greywater treatment: A systematic literature review. *Journal of Water Process Engineering*, 48, 102908. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102908>
- Rodríguez, C., Sánchez, R., Rebolledo, N., Schneider, N., Serrano, J., & Leiva, E. 2021. Life cycle assessment of greywater treatment systems for water-reuse management in rural areas. *Science of the Total Environment*, 795, 148687. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.148687>
- Shaikh, I. N., & Ahammed, M. M. 2020. Quantity and quality characteristics of greywater: a review. *Journal of environmental management*, 261, 110266. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110266>
- UNESCO, ONU-Agua. 2020. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático, París, UNESCO.
- Vuppaladadiyam, A. K., Merayo, N., Prinsen, P., Luque, R., Blanco, A., & Zhao, M. 2019. A review on greywater reuse: quality, risks, barriers and global scenarios. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18, 77-99. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9487-9>



Universidad de Concepción

EL CLARO-OSCURO DE LAS AGUAS GRISES PARA SER CONSIDERADAS COMO UNA NUEVA FUENTE DE AGUA



Serie Comunicacional CRHIAM