



Buenas Prácticas en Tratamiento y Reúso de Aguas Residuales



Financiado por



Co-implementado por



Co-ejecutado por



OEA Más derechos
para más gente

Publicado por: GEF CReW+

Autores: Gustavo Heredia

Diseño: GEF CReW+ Project Corporate Design

Fecha: 30 de enero, 2022

Por encargo de: Cooperación alemana para el desarrollo (GIZ)
Sanitation for Millions
Proyecto CReW+

<https://academy.gefcrew.org>

Buenas prácticas en tratamiento y reúso de aguas residuales

Gustavo Heredia Deiters

Introducción

El presente documento “Buenas prácticas en tratamiento y reúso de aguas residuales” fue desarrollado en el marco del proyecto GEF CReW+ bajo el liderazgo de la Cooperación alemana para el desarrollo – GIZ - que a través de su programa Sanitation for Millions ejecuta sus actividades por encargo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

El documento sistematiza las buenas prácticas expuestas en el curso desarrollado por la Academia GEF CREW+ sobre “Reúso de Efluentes Domésticos Tratados”, el cual abordó el problema de contaminación de los cuerpos de agua y la importancia del tratamiento de las aguas residuales. Además, explicó los principales mecanismos de contaminación y descontaminación del agua, así como los aspectos fundamentales a que se deben tomar en cuenta a tiempo de encarar un proyecto de tratamiento y reúso de agua residuales incluyendo temas de gobernanza, normativa, costos, recuperación de nutrientes y economía circular.

El curso “Reúso de Efluentes Domésticos Tratados” se desarrolló entre agosto y octubre de 2021, gracias al trabajo conjunto entre la GIZ y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP por sus siglas en inglés).

El proyecto GEF CReW+ es un proyecto de colaboración financiado por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (FMAM/GEF por sus siglas en inglés) que es co-implementado por el BID y UNEP en 18 países de la Región del Gran Caribe: Barbados, Belice, Colombia, Costa Rica, Cuba, Granada, Guatemala, Guyana, Honduras, Jamaica, México, Panamá, República Dominicana, San Cristóbal y Nieves, Santa Lucía, San Vicente y las Granadinas, Surinam, Trinidad y Tobago. El GEF CReW+ está siendo ejecutado en nombre del BID por la GIZ y la Organización de los Estados Americanos (OEA) y en nombre de UNEP por la Secretaría del Convenio de Cartagena.

Las aguas residuales en el contexto mundial: Desafíos y oportunidades

El agua en el mundo

El consumo de agua a nivel mundial se ha triplicado desde mediados del siglo pasado, incrementándose de 1,3 trillones de m³ al año en 1950 a aproximadamente 4 trillones de m³ en la actualidad (ver ilustración 1)¹.

El incremento del consumo del agua se debe principalmente al crecimiento de la población mundial, que ya se acerca a los 8 billones de habitantes, al crecimiento de las ciudades, las grandes inversiones en mejora de cobertura de servicios de agua y saneamiento y el incremento de superficie agrícola bajo riego. A nivel mundial, el 70 % de todas las extracciones de agua del mundo están destinadas al riego, 19 % a usos industriales y 11 % a uso doméstico (ver ilustración 2).

¹ Hannah Ritchie and Max Roser (2017) - "Water Use and Stress". *Published online at OurWorldInData.org*. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/water-use-stress>' [Online Resource]

Ilustración 1: Consumo de agua en el mundo

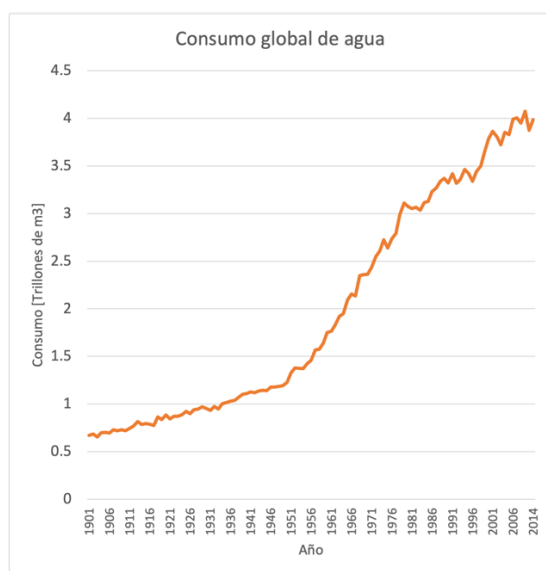
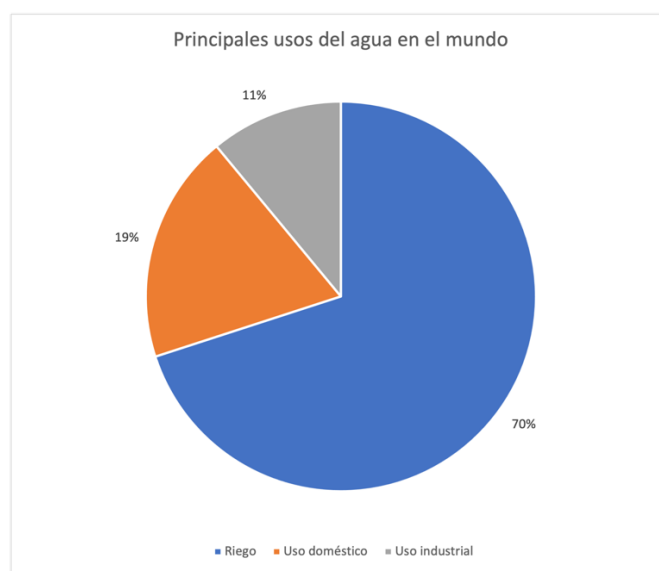


Ilustración 2: Principales usos del agua en el mundo



Toda actividad humana que haga uso del agua genera cierto grado de contaminación. Por ejemplo, el agua utilizada en los sistemas de saneamiento básico se contamina al entrar en contacto con la materia orgánica, patógenos y sólidos. El agua utilizada en procesos industriales es susceptible a contaminarse con químicos y metales pesados y, el agua utilizada para riego entra en contacto con fertilizantes y nutrientes como el nitrógeno, el fósforo y el potasio.

El incremento en concentraciones de fósforo y nitrógeno en los cuerpos de agua provoca un desarrollo desmesurado de algas, la disminución de oxígeno disponible en el agua y la consiguiente pérdida de biodiversidad. Este proceso se conoce como eutrofización. Se estima que alrededor del 40% de los ecosistemas acuáticos de todo el mundo están afectados por este proceso (Hupfer & Hilt, 2008).

La contaminación con agentes patógenos procedentes de los excrementos humanos y animales afecta a casi un tercio de los cursos fluviales de América Latina, África y Asia, y pone en peligro la vida de millones de personas. Este tipo de contaminación contribuye a la propagación de enfermedades tropicales como el cólera, la diarrea y el dengue².

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible y las agendas nacionales de desarrollo

Según ONU-Agua, en las naciones de bajos ingresos sólo se trata un 8 % de las aguas residuales domésticas e industriales, un porcentaje muy pequeño comparado con el de los países desarrollados, donde un 70 % de esas aguas son sometidas a tratamiento.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), también conocidos como Objetivos Mundiales, se adoptaron por todos los Estados Miembros de las Naciones Unidas en 2015 como un llamado universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad para 2030.

Específicamente, el sexto objetivo (ODS 6) está relacionado a temas de agua y saneamiento. Entre las metas acordadas para el 2030 en relación a este objetivo están: lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todas las personas, poner fin a la defecación al aire libre y mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial³. Se espera que hasta el 2030, se realicen importantes inversiones en temas de gestión integral del agua, generando oportunidades y un ambiente propicio para la implementación de proyectos de tratamiento de aguas residuales.

² <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2017/03/las-aguas-residuales-tambien-pueden-ser-herramientas-para-el-desarrollo-sostenible/>

³ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

El Cambio Climático y el agua

El Cambio Climático se evidencia en efectos de evolución lenta tales como la salinización, degradación de suelo y de bosques y desertificación. De esa manera, se generan variaciones en el ciclo del agua, lo que provoca un aumento en la intensidad y frecuencia de fenómenos meteorológicos que pueden ocasionar daños y pérdidas. La variación además reduce la capacidad de previsión de la disponibilidad de recursos hídricos, disminuye la calidad del agua de tal manera que se producen nuevos riesgos para el desarrollo sostenible, la biodiversidad y el disfrute de los derechos humanos al agua potable y al saneamiento en todo el mundo. Algunas medidas de mitigación del cambio climático, como el fomento del uso de biocombustibles, pueden exacerbar aún más la escasez de agua.

Para plantear opciones de un desarrollo sostenible en el futuro, no se puede seguir procediendo conforme a la práctica habitual y la gestión de los recursos hídricos, sino que debe analizarse desde la perspectiva de búsqueda de oportunidades y de construcción de resiliencia ante los efectos de la variabilidad y el cambio climático. La gestión sostenible del agua implica, por lo tanto, optimizar su uso y promoviendo prácticas de reciclaje y recuperación de recursos.

Aguas residuales y la economía circular

Las aguas residuales, una vez depuradas pueden ser utilizadas como agua de riego agrícola, para riego de parques y jardines o para reforestación. Adicionalmente, estas aguas contienen recursos valiosos que se pueden recuperar y convertir en productos útiles como fertilizantes, acondicionadores de suelo, biomasa y energía. Por ejemplo, la persona promedio excreta 4,5 kg de nitrógeno, 0,5 kg de fósforo y 1,2 kg de potasio cada año. Estos elementos y otros micronutrientes que se encuentran en las excretas son imprescindibles para la fertilización y restauración de suelos agrícolas. El valor energético de las heces es en promedio de 4.115 kcal/kg de sólidos secos. Estos sólidos son separados de las aguas residuales durante el proceso de tratamiento y pueden ser utilizados como fuente de energía para ser usada en la misma planta y de esta manera reducir los costos de energía⁴.

Bajo esta perspectiva, cobra fuerza el concepto de la economía circular, que, a diferencia de la visión lineal de aprovechamiento de los recursos, no sólo busca reducir la contaminación de los cuerpos de agua, sino también revalorizar los subproductos o residuos, acorde con los *Principios de Bellagio* en los que el aparente desecho deviene en un nuevo recurso. En esta línea, las 3R -reciclar, reducir y reutilizar- se aplican al tratamiento de las aguas servidas y por extensión al saneamiento in situ, en los que el gas metano y los lodos fecales derivados del tratamiento, pueden aprovecharse en forma sostenible, sea en el primer caso para generación de energía o como mejoradores de suelos para uso agrícola en el segundo⁵.

Buenas prácticas para la planificación e implementación de un proyecto de tratamiento y reúso de aguas residuales

Tradicionalmente, en el sector se han priorizado las inversiones en *proyectos de infraestructura* por encima del *desarrollo de servicios*. Este enfoque centrado en la infraestructura ha resultado en que muchas plantas de tratamiento fueran abandonadas luego de un tiempo o sean operadas de manera ineficiente. Para su funcionamiento, las plantas de tratamiento requieren de sistemas de gestión, personal con competencias técnicas específicas y asegurar una serie de insumos y recursos para su operación y mantenimiento. Lo mismo ocurre con los sistemas de reúso. A continuación, presentamos 3 lineamientos clave para asegurar la correcta concepción de los proyectos y su sostenibilidad en el tiempo.

Lineamiento 1: Planificar “desde el final” y seleccionar tecnologías apropiadas

Las aguas residuales contienen una serie de recursos que pueden ser aprovechables siempre y cuando se diseñe un sistema de tratamiento con enfoque de reúso. El enfoque de reúso implica la identificación y consideración de oportunidades de reúso o de recuperación de recursos desde la fase de concepción del proyecto. Es decir, el proyecto debe planificarse a partir de una o más

⁴ Mcconville, Jennifer and Niwagaba, Charles and Nordin, Annika and Ahlström, Marcus and Namboozo, Vivian and Kiffe, Mark (2020). *Guide to Sanitation Resource-Recovery Products & Technologies: a supplement to the Compendium of Sanitation Systems and Technologies*. (NL, NJ) > Dept. of Energy and Technology, Sveriges lantbruksuniversitet. Report / Department of Energy and Technology, SLU

⁵ <https://www.caf.com/es/conocimiento/visiones/2017/03/el-tratamiento-de-aguas-residuales-bajo-un-enfoque-de-economia-circular/>

oportunidades de reuso o recuperación de recursos y luego trabajar el diseño del sistema hacia atrás, por eso el término *planificar desde el final*.

El tipo de reuso y/o el destino final de las aguas residuales determinan el grado y tipo de tratamiento requerido

Las aguas residuales contienen agua, sólidos grandes y pequeños (basura), sólidos sedimentables (arena), sólidos en suspensión, grasas, materia orgánica, nutrientes y patógenos y podrían contener químicos, metales pesados y residuos de compuestos médicos como hormonas y antibióticos. Los sólidos grandes y pequeños son normalmente separados al inicio del tratamiento y son destinados al sistema de gestión de residuos sólidos. La materia orgánica puede ser recuperada y utilizada para usos industriales, para mejorar suelos o como fuente de energía (combustible). Con el término *nutrientes* nos referimos normalmente a nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Se denominan nutrientes porque son elementos imprescindibles para el crecimiento de plantas y cultivos.

Las aguas residuales contienen energía. Por ejemplo, las aguas residuales tienen, normalmente, una temperatura mayor a la del agua potable, esta diferencia de energía puede ser aprovechado utilizando un intercambiador de calor. Se puede aprovechar también la energía cinética de las aguas residuales para generar electricidad a través de una turbina, aunque aún falta desarrollar más la tecnología. Finalmente, se puede obtener biogás a partir los lodos que se separan como parte del tratamiento de las aguas residuales y que son digeridos a través de un reactor.

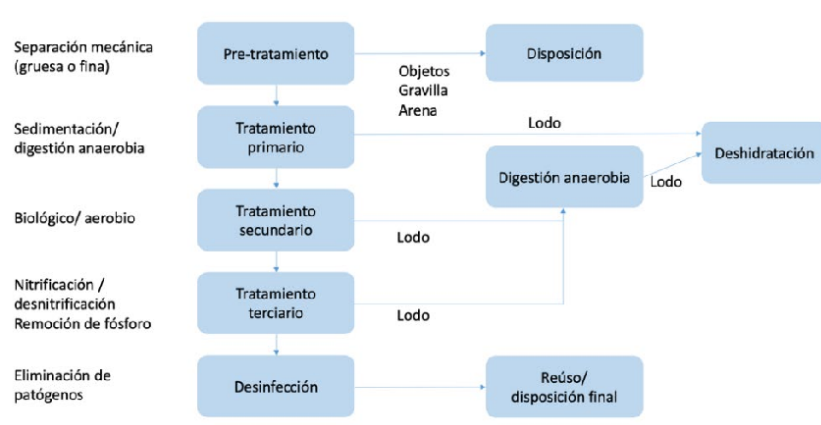
El nivel de tratamiento de las aguas residuales dependerá del destino, tipo de reuso o de la aplicación que se quiera hacer con ellas. Por ejemplo, las aguas residuales tratadas que son vertidas a una laguna requieren un nivel de tratamiento mayor que las aguas residuales para reuso en riego, puesto que para descargar aguas tratadas a un cuerpo de agua sensible a la eutrofización (como es el caso de la laguna) se deben remover los nutrientes presentes en las aguas residuales. Mientras que, para el caso del reuso en riego de cultivos, estos nutrientes son beneficiosos para el suelo y las plantas y por lo tanto el nivel de tratamiento es más sencillo. En este segundo caso, el suelo y las plantas y cultivos terminan el proceso de depuración del agua.

Por otro lado, las aguas residuales contienen virus, bacterias, parásitos y huevos de gusano que pueden causar gastroenteritis, diarreas, giardiasis, infecciones virales e infecciones de la piel y los ojos. Si las aguas tratadas serán aplicadas al riego de vegetales o verduras que se consumen crudas, deberá considerarse un proceso de desinfección para asegurar que los alimentos no sean contaminados por virus o bacterias presentes en las aguas residuales.

Selección de tecnologías apropiadas

El tratamiento de aguas residuales se realiza a través de una serie de procesos unitarios que se combinan para lograr el grado de depuración deseado. Básicamente, lo que hace todo sistema de tratamiento de aguas residuales es separar el agua de los contaminantes. En la siguiente tabla se resumen los principales procesos.

Ilustración 3: Descripción de un tren de tratamiento clásico

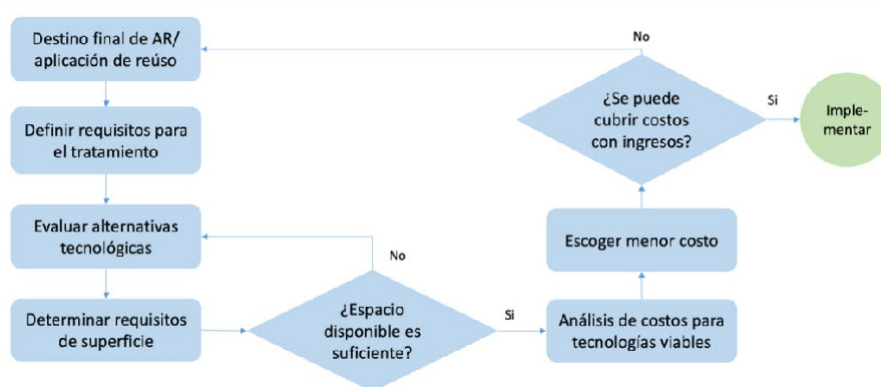


La secuencia de procesos de tratamiento se denomina *tren de tratamiento*. Existen distintas opciones tecnológicas para cada etapa del tratamiento (pre-tratamiento, tratamiento primario, secundario, terciario y desinfección), pero en general casi todos los sistemas de tratamiento siguen esta secuencia lógica. Dependiendo de la calidad de efluente deseada, una o más etapas pueden omitirse.

Las tecnologías utilizadas en cada etapa del tratamiento deben ser apropiadas para el contexto y las condiciones locales, tomando en cuenta tanto los recursos existentes como las limitaciones. A tiempo de elegir tecnologías, se recomienda tomar en cuenta los siguientes aspectos: costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, competencias técnicas necesarias para su operación y mantenimiento, espacio (superficie) requerido, servicio/asistencia técnica local, disponibilidad y acceso para insumos y repuestos, consumo de energía y vida útil.

El siguiente diagrama, propone una secuencia de pasos y decisiones importantes a tiempo de planificar la selección de tecnologías de tratamiento bajo el concepto de *planificar desde el final*:

Ilustración 4: Planificación desde el final



Existen fuentes de información y amplia bibliografía acerca de tecnologías de saneamiento y de tratamiento de aguas residuales. A continuación, se mencionan dos recursos que pueden ser de gran utilidad:

- EAWAG, Compendio de Sistemas y Tecnologías Saneamiento 2da Edición (Versión en español) <https://www.eawag.ch/en/department/sandec/publications/compendium/>
- SEI, Saneamiento, Gestión de Aguas Residuales y Sostenibilidad, 2da Edición (Versión en español) <https://cdn.sei.org/wp-content/uploads/2021/06/saneamiento-gestion-de-aguas-residuales-y-sostenibilidad-2021.pdf>

Lineamiento 2: Tratar adecuadamente las aguas residuales y usar enfoque de *barreras múltiples*

Guías para tratamiento y reúso

Las aguas residuales se deben tratar a un nivel acorde con el destino final de estas, ya sea para su disposición final al medio ambiente o a para las aplicaciones de reúso deseadas. Cada país cuenta con normativa específica para tratamiento de aguas residuales y, en los últimos años, se han venido desarrollando normativas para reúso. Además de las normativas locales, existen varias guías internacionales que pueden ser muy útiles a tiempo de evaluar alternativas de tratamiento. En la tabla 1 citamos las más importantes:

Tabla 1: Guías internacionales para reúso de aguas residuales

Organización internacional que genera la guía	Nombre de la guía	Notas sobre el contenido	Enlace web
Organización Mundial de la Salud (OMS)	Directrices para el uso seguro de aguas residuales, excrementos y aguas grises (2013).	Esta última edición de las directrices se publicó abordando los siguientes temas: (Vol. 1) Aspectos normativos y resumen de las directrices; (Vol. 2) Uso de aguas residuales en la agricultura; (Vol. 3) Uso de aguas residuales y excretas en la acuicultura; (Vol. 4)	https://www.who.int/publications/i/item/9241546824 (Vol. 1) https://www.who.int/publications/i/item/9241546832 (Vol. 2)

Organización internacional que genera la guía	Nombre de la guía	Notas sobre el contenido	Enlace web
		<p>Uso de excretas y aguas grises en la agricultura. En esta edición se han actualizado los lineamientos considerando nueva evidencia sobre patógenos y químicos, y otros factores, tales como: cambios en las características de la población y prácticas de saneamiento; métodos mejorados para evaluar el riesgo; y prácticas socioculturales.</p>	<p>https://www.who.int/publications/i/item/9241546840 (Vol. 3) https://www.who.int/publications/i/item/9241546859 (Vol. 4)</p>
Organización Internacional de Normalización (ISO)	ISO 5667 Calidad del agua	<p>ISO 5667 es un documento de varias partes que, entre otros contenidos, proporciona orientación sobre el muestreo de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, plantas de tratamiento de agua y procesos industriales. Esta norma es aplicable a todo tipo de lodos derivados de del tratamiento y también a lodos de similares características, como por ejemplo fosas sépticas. También brinda orientación sobre el diseño de programas de muestreo y técnicas para la recolección de muestras.</p> <p>Parte 10: Guía para el muestreo de aguas residuales (2020) Parte 13: Guía para el muestreo de lodos (2011) Parte 15: Guía para la preservación y manipulación de muestras de lodos y sedimentos (2009)</p>	<p>https://www.iso.org/standard/42892.html</p>
	ISO 16075 Directrices para el uso de aguas residuales tratadas para proyectos de riego (2020-2021)	<p>Esta norma tiene como objetivo maximizar los beneficios relacionados con el tratamiento y la reutilización de aguas residuales en proyectos de riego agrícola y minimizar los riesgos asociados. Las pautas para el desarrollo del proyecto también incluyen diseño, materiales, construcción y desempeño para las siguientes actividades: riego restringido y sin restricciones de cultivos agrícolas; riego de jardines públicos y privados y zonas paisajísticas (campos deportivos, parques, cementerios, etc); y riego de jardines privados individuales.</p> <p>Parte 1 - Bases para un proyecto de reutilización para el riego Parte 2 - Desarrollo del Proyecto Parte 3 - Componentes de un proyecto de reutilización para riego Parte 4 - Monitoreo Parte 5 - Desinfección de aguas residuales tratadas y tratamientos equivalentes</p>	<p>https://www.iso.org/standard/73482.html (Parte 1) https://www.iso.org/standard/73483.html (Parte 2) https://www.iso.org/standard/73484.html (Parte 3) https://www.iso.org/standard/73485.html (Parte 4) https://www.iso.org/standard/72929.html (Parte 5)</p>
	ISO 20469 Directrices para la clasificación de grado de calidad del agua para la reutilización del agua (2018)	<p>La ISO 20469 publicada en 2018 proporciona pautas para la clasificación del grado de calidad del agua para ayudar a los usuarios a determinar la idoneidad y la calidad del agua recuperada para aplicaciones seguras de reutilización no potable, según el nivel de exposición. El objetivo es permitir la identificación del grado de calidad del agua en el punto de uso.</p>	<p>https://www.iso.org/standard/68138.html</p>
Agencia de Protección Ambiental de los EEUU (EPA)	EPA/600/R-12/618 (2012) Directrices para la reutilización del agua	<p>En 1980, la EPA publicó la primera edición de las "Directrices para la reutilización del agua", que se actualizó en 1992, 2004 y más recientemente en 2012. Esta última edición ofreció nueva información y mayor detalle sobre una amplia gama de aplicaciones de reutilización e introduce nuevos conceptos. y tecnologías de tratamiento que apoyan las operaciones de reutilización del agua.</p>	<p>https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/2012-guidelines-water-reuse.pdf</p>

Las autoridades sanitarias locales son responsables de establecer valores umbral de calidad del agua en función de los usos autorizados y también son responsables de definir prácticas para garantizar la protección de la salud y el medio ambiente teniendo en cuenta las especificidades locales.

Desde el punto de vista agronómico, la principal limitación en el uso de aguas residuales tratadas para riego surge de su calidad. Las aguas residuales tratadas, a diferencia del agua suministrada para uso doméstico e industrial, contienen concentraciones más altas de materiales inorgánicos suspendidos y disueltos (sales solubles totales, sodio, cloruro, boro, metales pesados), que pueden dañar el suelo y los cultivos irrigados. Las sales disueltas no se eliminan mediante tecnologías convencionales de tratamiento de aguas residuales y se pretende que se utilicen prácticas adecuadas de buena gestión, agronómicas y de riego para evitar o minimizar los posibles impactos negativos⁶.

Enfoque multibarrera

Con relación a los riesgos biológicos, pueden implementarse una serie de acciones o actividades (barreras) para prevenir, eliminar, o reducir riesgos a un nivel aceptable. Una barrera es parte de la cadena de transmisión, transporte, tratamiento o manejo que reduce considerablemente el número de patógenos a lo largo de una ruta. Se recomienda un enfoque de múltiples barreras, es decir, el uso de más de una medida de control como una barrera contra los peligros⁷.

Los sistemas de tratamiento y las prácticas agrícolas brindan diversos controles a lo largo de todo el proceso para reducir los riesgos para la salud humana. En sistemas donde se utiliza el producto residual, por ej., en la agricultura o acuicultura, resulta útil comprender las rutas de exposición y transmisión para tener una idea de la efectividad de las medidas de control. Por ejemplo, si una medida de control no resulta práctica, es muy costosa o socialmente inaceptable, ello influirá en su efectividad incluso si fuese técnicamente efectiva.

En la siguiente tabla se presentan algunos ejemplos de barreras:

Tabla 2: Enfoque multibarrera

Tipo de barrera	Ejemplos
Tratamiento de aguas residuales	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentación física (por ej., tanque de sedimentación) • Proceso de tratamiento biológico (por ej., lodo activado) • Adsorción (por ej., in en humedales construidos) • Inactivación biológica (por ej., compostaje) • Inactivación química (por ej., uso de cloro) • Radiación ultravioleta
Prácticas agrícolas y de aplicación del agua tratada	<ul style="list-style-type: none"> • Selección de cultivos • Tipo de riego • Tiempos de retención • Control de huéspedes y vectores intermedios
Otras medidas de protección	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de equipo de protección personal • Acceso restringido a sitios de tratamiento o uso • Desinfección, lavado y cocción de productos

Los controles conductuales a menudo se aplican en combinación con las barreras con tratamiento y sin tratamiento. Las prácticas conductuales dependen de los valores y preferencias individuales (por ej., temores, fobias, hábitos), limitaciones (por ej., costo, tiempo, interés), sentido de responsabilidad, y percepciones y prácticas socioculturales y pueden reforzarse mediante la promoción de la salud y la higiene.

⁶ ISO 16075. Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects (2020-2021).

⁷ Planificación de la seguridad del saneamiento: manual para el uso y la disposición seguros de aguas residuales, aguas grises y excretas, Organización Mundial de la Salud, 2016.

Lineamiento 3: Determinar los costos y beneficios del tratamiento-reúso y asegurar la sostenibilidad financiera del servicio

Análisis costo-beneficio

Todo sistema de tratamiento y reúso genera costos, pero al mismo tiempo puede generar una serie de beneficios. Para asegurar la sostenibilidad financiera de cualquier sistema es de mucha importancia realizar un análisis de costos y beneficios utilizando herramientas de modelación financiera.

Un análisis costo-beneficio normalmente se realiza desde la perspectiva de la economía en su conjunto y no solo compara costos de las diversas soluciones potenciales, sino que también reconoce y asigna valor a los beneficios que genera cada alternativa.

Conceptualmente, un análisis costo-beneficio produciría un solo indicador del valor neto para la economía de cada inversión alternativa y reconoce que los beneficios no son solo aquellos percibidos por las viviendas y empresas que se benefician del tratamiento de aguas residuales o del reúso, sino también aquellos que pueden afectar la actividad productiva en otros sectores, el bienestar de las comunidades vecinas y el entorno económico y natural. Para producir un solo indicador para comparar el valor neto de cada solución, un análisis de costo-beneficio no solo requiere la identificación y medición de los costos y beneficios de saneamiento, productivos, urbanos y ambientales esperados; también requiere que cada uno de ellos sea valorado. Estos requisitos presentan desafíos importantes a tiempo de implementar un análisis costo-beneficio completo y, por lo tanto, este tipo de análisis económico, normalmente se llevará a cabo en proyectos a nivel de ciudad, municipio o región. Sin embargo, para cualquier tamaño de proyectos es importante realizar al menos un análisis financiero que considere todos los flujos de efectivo. Para lograr este propósito se utilizan dos metodologías: El Valor Actual Neto (VAN) y el Costo Anual Equivalente (CAE).

El cálculo del VAN permite comparar a valor presente series de flujos futuros (ingresos y negativos) de uno o más proyectos y alternativas. Cuando el VAN es positivo ($VAN > 0$), se entiende que es un proyecto rentable y que los ingresos (beneficios) superan a los costos. El VAN es ampliamente utilizado en el sector para la evaluación de proyectos y es muy útil desde la perspectiva del inversor; sin embargo, existe otra metodología que resulta más práctica desde la perspectiva del dueño del proyecto o del operador del servicio porque expresa todos los costos y beneficios financieros del sistema en términos de *flujos de dinero anual*. La metodología se denomina Costo Anual Equivalente (CAE)⁸.

El cálculo del CAE incluye todos los costos de construcción (todos los componentes de infraestructura y equipamiento). A estos costos se los denomina CAPEX (del inglés *capital expenditures*). Por otro lado, se consideran todos los costos de operación y de mantenimiento tanto en el corto como en el largo plazo (mano de obra, repuestos, energía, insumos, alquileres, etc.). A estos costos los denominamos OPEX (del inglés *operational expenditures*).

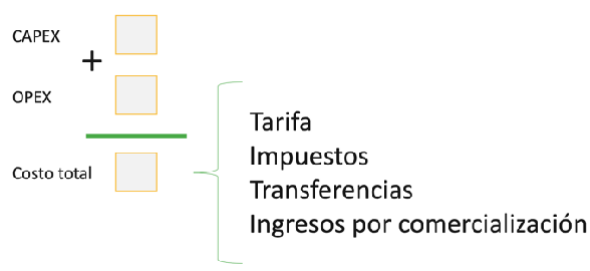
Un análisis CAE toma en cuenta el costo de inversión de cada componente de la infraestructura, su vida útil en años y una tasa de descuento anual igual al costo del capital incluyendo la inflación. De tal manera que se determina un costo anualizado por componente y para todo el sistema. En paralelo se determinan los costos anuales de todas las actividades de operación y mantenimiento.

De manera similar, se pueden analizar los costos de los componentes relacionados con el reúso como son, sistemas de tubería, almacenamiento de agua tratada, sistemas de goteo, etc.

Una vez determinados todos los costos anuales (CAE), deben planificarse mecanismos para asegurar que todos estos costos sean cubiertos. Normalmente, se consideran las siguientes fuentes como fuentes de ingreso para cubrir costos: Tarifas, transferencias/subsidios, impuestos e ingreso por venta de productos y servicios como se puede apreciar en la siguiente ilustración.

⁸ Heredia et. Al. Evaluación del costo anual equivalente de las plantas de tratamiento de aguas residuales de los municipios de Cliza y Tolata, 2020. <https://www.researchgate.net/profile/Gustavo-Heredia-3>

Ilustración 5: Costos anualizados del tratamiento-reúso y posibles fuentes de fondos para cubrirlos



Cuando se presta un servicio de tratamiento para sistemas de servicio básico, normalmente las empresas de agua y saneamiento (tanto públicas como privadas) cobran una tarifa a sus usuarios. Este es un flujo de ingreso de fondos regular que puede cubrir completa o parcialmente los costos. En caso de que los costos no lleguen a cubrirse con esta fuente, están los fondos provenientes de impuestos o transferencias cuando se trata de operaciones públicas o estatales. Los sistemas privados (por ej., hoteles, resorts, condominios) normalmente cubrirán los costos con ingresos propios. Finalmente, cuando se recuperan recursos a partir del tratamiento (por ej., agua para riego, lodos, nutrientes o energía), se pueden generar beneficios e ingresos por la comercialización de estos. Estos ingresos pueden generar ganancias o en otros casos cubrir parcialmente los costos, lo que resulta en un ahorro en costos para el dueño del sistema.

En el Anexo 2, se presenta un ejemplo concreto que ilustra, de manera didáctica, la forma e que se calcula el CAE de un sistema de tratamiento de aguas residuales.

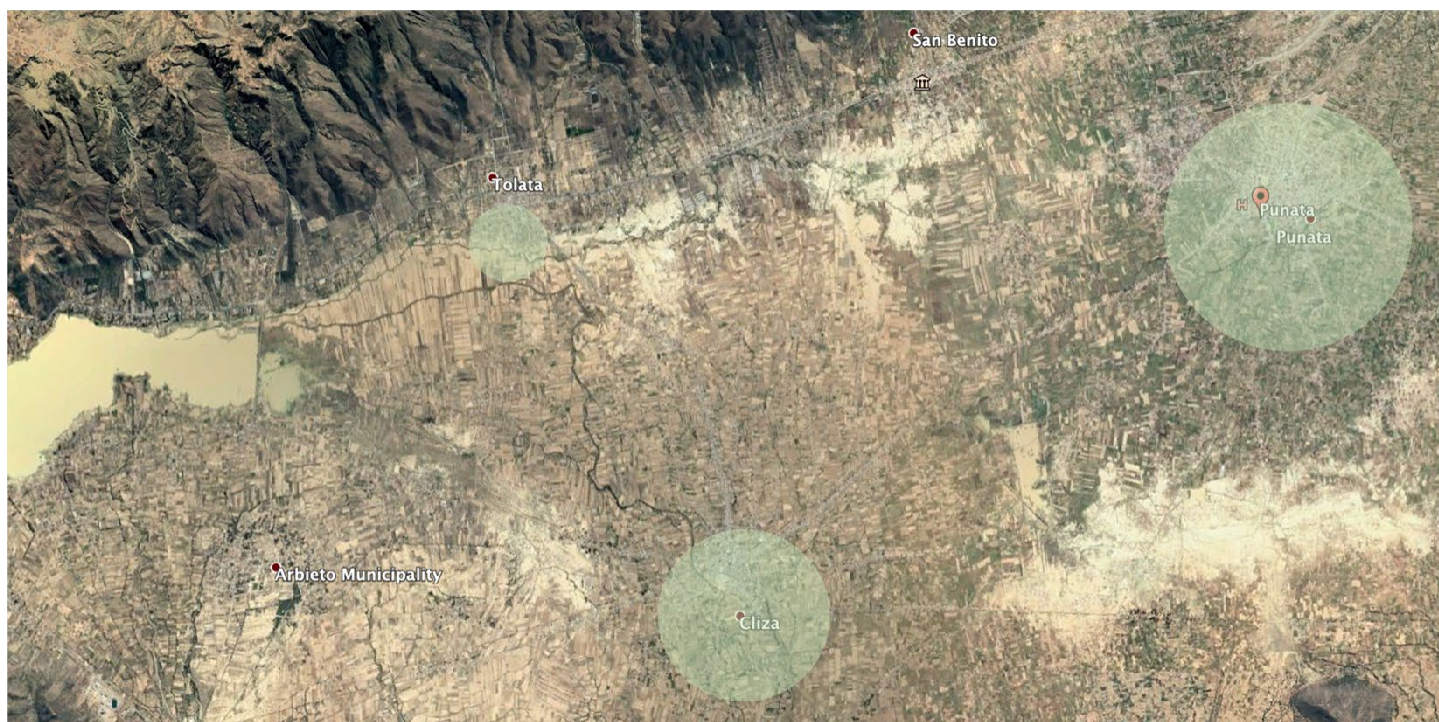
Caso de análisis: Beneficios del tratamiento de aguas residuales con enfoque de reúso (Análisis comparativo de un sistema de riego directo vs. riego con aguas residuales tratadas)

A continuación, se presenta un caso concreto de tratamiento de aguas residuales con enfoque de reúso implementado en Cochabamba – Bolivia entre 2015 y 2021.

Contexto

La región del “Valle Alto” del departamento de Cochabamba en Bolivia es una región con tradición de actividad productiva agrícola, especialmente producción de maíz, forraje y durazno. La zona es relativamente seca, recibiendo una precipitación pluvial anual de solo 490 mm/año. La época de lluvias está concentrada en unos pocos meses del año (noviembre – febrero), y con una precipitación casi nula durante el resto del año. Para no depender solamente de las lluvias, muchos agricultores de la zona han optado por perforar pozos profundos (50-120 metros de profundidad) y extraer el agua para riego utilizando sistemas de bombeo. Estos pozos profundos también son fuente de los principales sistemas de agua potable de la región.

Ilustración 6: Ubicación geográfica de los municipios de Cliza, Tolata y Punata en Cochabamba - Bolivia



El proyecto denominado “*Sistemas Sostenibles de Agua y Saneamiento*” financiado por la Embajada de Suecia en Bolivia y la Fundación Aguatuya, se enfocó inicialmente en tres municipios de esta región: Punata, Cliza y Tolata. Estos tres municipios cuentan con sistemas municipales de agua y saneamiento (distribución de agua potable por tubería y sistema de alcantarillado para recolección de aguas negras). Sin embargo, en ninguno de los tres casos se estaban tratando las aguas residuales de manera apropiada. La siguiente tabla resume la situación inicial del proyecto:

Tabla 3: Datos de dimensionamiento del proyecto

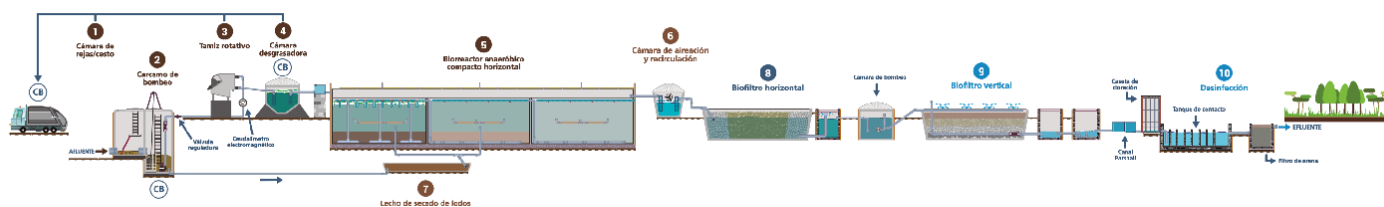
Nombre del municipio	Población para ser atendida en centro urbano [habitantes]	Caudal de aguas residuales generado [m ³ /año]	Superficie planta de tratamiento [m ²]	Inversión en infraestructura de tratamiento [USD]
Cliza	10.000	207.300	8.000	533.963
Punata	26.600	924.700	48.804	1.191.809
Tolata	5.000	118.900	2.930	257.694
Total	35.000	1.250.900	60.930	1.983.466

Sistemas de tratamiento de aguas residuales con enfoque de reúso

En los tres municipios se han implementado plantas de tratamiento de aguas residuales. En el caso de Cliza y Tolata se implementaron plantas nuevas porque no había ninguna planta existente. En el caso de Punata, se ha recuperado, ampliado y mejorado una planta existente (basada en sistema de lagunaje) que no estaba en funcionamiento.

A continuación, se presenta el tren de tratamiento utilizado en la planta de Tolata a manera de ejemplo:

Ilustración 7: Tren de tratamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de Tolata



En todo tren de tratamiento, es importante asegurar un tratamiento preliminar (pretratamiento) efectivo. En este caso se ha utilizado un tamiz rotativo automatizado (ítem 3 del diagrama) para separar todo sólido mayor a 3 mm de diámetro. Esto asegura que a la planta de tratamiento solo ingresen aguas residuales y se evita el ingreso de residuos sólidos o basura que podría llegar a la planta junto con el agua de alcantarilla.

Para reducir el consumo de energía al mínimo, en todas las plantas se han implementado reactores anaerobios que no requieren energía para su funcionamiento porque no necesitan de aireación. Los reactores anaerobios compartimentados (ítem 5 del diagrama) tienen eficiencias de remoción de DBO y DQO de entre 50 % y 70 %. Este tratamiento es complementado en las plantas de Cliza y Tolata por biofiltros de grava, tanto horizontales como verticales (ítems 8 y 9 del diagrama). En el caso de la planta de Punata, el tratamiento primario ha sido seguido por un sistema de lagunaje impermeabilizado con geomembrana de polietileno. Tomando en cuenta tanto el tratamiento primario como el secundario, el desempeño total de las plantas cubre con las expectativas y la normativa local para descarga de efluentes tratados. La eficiencia global de DQO es de 92 %, SS es de 98 %, de $\text{NH}_3\text{-N}$ es de 49 % y de P de 31 %. Como se puede apreciar, con tecnologías apropiadas como estas, se pueden lograr altos niveles de remoción para carga orgánica y sólidos suspendidos y niveles menores de remoción para nitrógeno y fósforos (nutrientes). Dado que el destino del agua tratada es el riego agrícola, la presencia de estos nutrientes en efluente es deseable porque se convierten en fertilizante para los cultivos. Al mismo tiempo, los lodos que se son extraídos periódicamente de los reactores anaerobios son secados al sol, y se convierten en un mejorador de suelos para terrenos agrícolas. Finalmente, en el caso de la planta de Tolata, se ha implementado un sistema de cloración que puede ser utilizado para el reúso en el riego de vegetales que se consumen crudos (riego irrestricto). Las plantas de Cliza y Punata no cuentan con un sistema de desinfección, por lo que el reúso para riego debe estar limitado a cultivos de tallo alto o forraje, como por ejemplo en el maíz y la alfalfa (riego restringido).

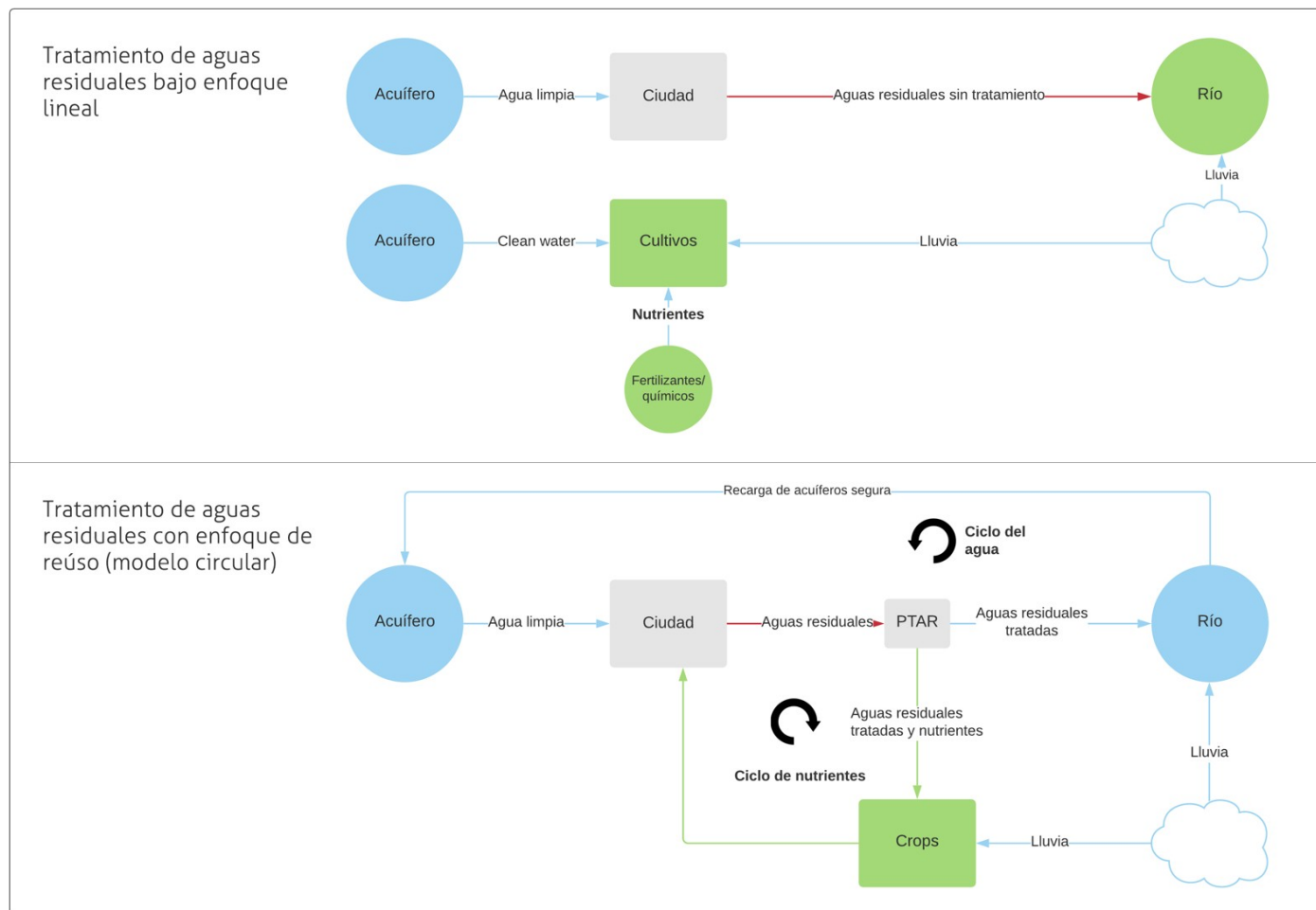
En caso de que la disposición final de las aguas tratadas sea en un cuerpo de agua sensible a la eutrofización, como un lago, el tratamiento debe ser mayor, ya que las concentraciones de N y P del efluente deben ser reducidas antes de la descarga. Esto implica procesos más sofisticados (aireación, nitrificación, desnitrificación) y costosos. Por lo tanto, el beneficio de realizar el tratamiento de las aguas a nivel de reúso (descarga al suelo) presenta un doble beneficio porque, por un lado, permite la recuperación del agua y los nutrientes para el cultivo y, por otro lado, reduce los costos totales de los sistemas de tratamiento. En los hechos, son el suelo y las plantas las que terminan el trabajo de depuración del agua.

Beneficios del enfoque de reúso (modelo circular)

La siguiente ilustración comparan dos lógicas distintas de gestión de las aguas residuales. En la parte superior se puede apreciar el problema de las aguas residuales sin tratar y que terminan contaminando los cuerpos de agua. Este es el escenario inicial para los tres municipios de este caso de estudio. Este escenario, correspondiente con una lógica lineal de “usar y desechar”, conlleva las siguientes consecuencias:

1. Para el riego de sus cultivos, los agricultores dependen de la lluvia (que es escasa y con tiempos variables e impredecibles) o del agua de pozos profundos a un costo elevado por el costo que implica el bombeo.
2. Para fertilizar sus cultivos, los agricultores deben importar fertilizantes sintéticos.
3. El centro urbano toma agua de pozos profundos para su distribución como agua potable, la contamina con el uso doméstico de esta en las viviendas y la descarga (sin tratamiento alguno) en un río.

Ilustración 8: Comparación entre un enfoque lineal (utilizar – desechar) en el que las aguas residuales son un problema y un modelo circular en el que los desechos se convierten en recursos



Cuando se implementan sistemas de **tratamiento de aguas residuales con enfoque de reúso**, se cambia esta lógica lineal por una de economía circular (de recuperación de recursos). Bajo este segundo escenario, la situación actual de los tres municipios estudiados, se pueden apreciar los siguientes impactos positivos:

1. Gracias a la implementación de plantas de tratamiento, se deja de contaminar los ríos.
2. Al contar con agua residual tratada para riego de cultivos, los agricultores encuentran un doble beneficio:
 - a. Cuentan con una fuente estable de agua (caudal constante todo el año). En el caso de los municipios estudiados, los agricultores han pasado de una cosecha al año a dos, prácticamente duplicando su producción.
 - b. Ahorro parcial o total en costos de fertilizante ya que el agua de riego presenta ciertas concentraciones de nutrientes.
3. Se cierran de manera apropiada y sostenible tanto el ciclo del agua, como el ciclo de nutrientes puesto que el agua retorna al medio ambiente ya depurada y los nutrientes vuelven al suelo donde son aprovechados por las plantas.

En la siguiente tabla, se presentan algunos beneficios generados por a tiempo de implementar un sistema de tratamiento de aguas residuales con enfoque de re-uso:

Tabla 4: Beneficios generado por reúso

Parámetro/ indicador	Modelo lineal	Modelo circular	Diferencia	Δ%
Carga orgánica de las aguas residuales que termina en el río [Kg BOD/año]	241.000	6.000	-235.000	-97%
Sólidos suspendidos de las aguas residuales que terminan en el río [Kg SS/año]	167.000	6.000	-161.000	-97%
Nutrientes N que terminan en el río [Kg BOD/año]	37.000	14.000	-23.000	-62%
Nutrientes P que terminan en el río [Kg BOD/año]	5.000	2.000	-3.000	-57%
Explotación de aguas subterráneas para riego [m ³ /año]	296.000	0	-296.000	
Importación de fertilizantes (N y P) [Kg/año]	12.000	0	-12.000	

En este caso, los últimos dos beneficios (reducción de explotación de aguas subterráneas y reducción en la importación de fertilizantes respectivamente) pueden ser fácilmente cuantificados como se muestra en la tabla 5:

Tabla 5: Cuantificación de beneficios

Beneficio	Cantidad evitada	Costo unitario	Ahorro total USD/año
Explotación de aguas subterráneas para riego [m ³ /año]	296.000	0,15	44.400,00
Importación de fertilizantes (N y P) [Kg/año]	12.000	0,62	7.440,00
Total ahorro en agua de riego y fertilizantes			51.840,00

Como se puede apreciar, al valorizar tanto el agua de riego como los fertilizantes a valor de mercado, se puede cuantificar dos de los beneficios directos generados por la implementación de un modelo circular de tratamiento-reúso. En este caso, el beneficio para los agricultores que usan el agua tratada para riego agrícola sería de 51.840,00 USD/año.

Conclusiones

En esta guía de buenas prácticas para el tratamiento y reúso de aguas residuales, se han presentado tres lineamientos básicos:

1. Planificar desde el final y usar tecnologías apropiadas
2. Tratar adecuadamente las aguas residuales y usar enfoque de *barreras múltiples*
3. Implementar modelos de gestión sostenibles, asegurando que todos los costos sean cubiertos

Planificar un sistema de tratamiento de aguas residuales “desde el final” nos permite considerar oportunidades de reúso de agua y de recuperación de distintos recursos presentes en las aguas residuales. Esto implica pasar de una lógica lineal basada en *usar y desechar* a una lógica circular sostenible en la que los desechos se convierten en recursos. Este enfoque circular puede generar beneficios económicos ambientales, como por ejemplo mejorar tanto el ciclo del agua como el ciclo de los nutrientes y también puede generar beneficios económicos de tipo financiero cuando se los productos del tratamiento se los valoriza y se comercializan como productos útiles por ej. agua para riego, fertilizantes, mejoradores de suelo o energía que pueden tener un valor de mercado.

Las tecnologías utilizadas para el tratamiento de aguas residuales deberán ser apropiadas al contexto local para ser efectivas y sostenibles en el tiempo. En el momento de seleccionar una tecnología, deberán tomarse en cuenta aspectos financieros (costos), de disponibilidad de espacio y de compatibilidad con los recursos disponibles y las condiciones del entorno: Acceso a tecnología y servicio técnico, así como las competencias y capacidades necesarias para operar y mantener los sistemas en funcionamiento.

El nivel de tratamiento de las aguas residuales deberá ser acorde a las necesidades de reúso y cumplir con las normativas locales en materia de aguas residuales. El tratamiento de las aguas residuales se realiza para proteger el medio ambiente (fuentes de agua) y para proteger la salud de las personas (reducir el riesgo de exposición de estas a distintos patógenos). Para lograr este objetivo, en el contexto del reúso, se puede tratar las aguas a un nivel avanzado que incluye un proceso de desinfección eliminando de esta manera los patógenos o, alternativamente, se pueden adoptar una serie de medidas y prácticas agrícolas para reducir o eliminar los riesgos sanitarios. Entre estas prácticas se encuentra el uso de equipos de protección personal por parte de los agricultores y los sistemas de riego restringido. Es decir, usar el reúso de agua en aplicaciones que no generan un riesgo significativo para las personas como la reforestación, riego de forraje, plantas de tallo o cultivos que son procesados antes de ser consumidos por el público. Este enfoque se denomina de barreras múltiples. Es posible que las descargas de aguas residuales están normadas, pero no así las actividades de reúso. En este caso, existen guías internacionales sobre el tema (ISO, OMS y EPA) que pueden ser muy útiles a tiempo de diseñar un sistema reúso.

Finalmente, lo más importante es la sostenibilidad financiera y ambiental de los servicios. Por este motivo, es vital la implementación de modelos de gestión que garanticen que exista un propietario de la infraestructura cuyo mandato sea velar por las inversiones en el largo plazo. El propietario de la infraestructura debe asegurarse que exista un equipo humano capaz de operar y mantener todos los componentes y también debe tener acceso a un servicio técnico que solucione problemas, planifique mejoras y ampliaciones en el tiempo y reporte periódicamente sobre el estado y la eficiencia del tratamiento de la planta (función de control y monitoreo). La sostenibilidad financiera se da cuando el propietario de la infraestructura es capaz de cubrir todos los costos (tanto costos de capital – CAPEX – como costos de operación y mantenimiento - OPEX). Estos costos deben ser determinados en la etapa de planificación, junto con el desarrollo de un *plan de negocios* que asegure un flujo de ingresos igual o superior a los costos. Las fuentes de ingreso normalmente se limitan a: i) tarifas, ii) transferencias y subsidios, iii) impuestos y/o iv) ingresos por venta de productos y servicios. Desde la perspectiva financiera, un enfoque de reúso puede generar ingresos o reducción de costos (ahorro) a tiempo de recuperar y valorizar recursos como el agua tratada, nutrientes o energía.

Recursos adicionales

- CReW+ Academy: Curso sobre tratamiento y reúso de aguas residuales (Bloque 2)
<https://www.academy.gefcrew.org/recurso>
- Eutrofización de cuerpos de agua y zonas muertas:
<https://www.gaceta.unam.mx/zonas-muertas-en-los-oceanos-que-son-y-por-que-aumentan/>
- Cambio de paradigma - De la disposición de desechos a a recuperación de nutrientes:
<https://cdn.sei.org/wp-content/uploads/2021/06/saneamiento-gestion-de-aguas-residuales-y-sostenibilidad-2021.pdf>
- Metodología para determinación de costos de un sistema de tratamiento/reúso: Costo Anual Equivalente:
<https://www.cuidatudinero.com/13074191/como-calcular-el-capital-y-los-intereses-de-un-pago-de-prestamo>
- Herramienta en línea para determinación de costos de saneamiento y planificación a nivel de ciudad:
<http://cwiscostingtool.com>
- Compendio EAWAG/SANDEC (español)
<https://www.eawag.ch/en/departament/sandec/publications/compendium/>
- Compendium of Sanitation Technologies in Emergencies
https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/schwerpunkte/sesp/Emergencies/compendium_emergencies.pdf
- Guide to Sanitation Resource-Recovery Products & Technologies: a supplement to the Compendium of Sanitation Systems and Technologies
<https://pub.epsilon.slu.se/21284/>

Anexo 2:

Ejemplo de cálculo de Costo Anual Equivalente (CAE) de un sistema de tratamiento

En el siguiente ejemplo, realizamos el cálculo del CAE para una planta de tratamiento de aguas residuales para 7.500 habitantes, con una capacidad de tratamiento de 250.000 m³/año y considerando una tasa de descuento del 5% anual.

Primeramente, necesitamos los costos de inversión de los principales componentes de la planta y la vida útil esperada de cada uno de ellos. Como se puede apreciar en la tabla 3 abajo, la inversión total de la planta es de USD 488.721,00. Luego, en base al costo de inversión de cada componente, la tasa de descuento y la vida útil de cada componente, calculamos el valor anualizado de cada componente utilizando la siguiente fórmula:

$$A = \frac{Po * i * (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

Donde,

A = Costo de inversión anualizado de cada componente en USD

Po = Costo inicial de cada componente USD

i = Tasa de descuento = 5% = 0.05

N = Vida útil de cada componente en años

Cálculo del CAPEX anualizado

Ítem	Descripción	Costo inicial [USD] (Po)	Vida útil [años] (n)	Costo anualizado [USD/año] (A)
1	Cárcamo de bombeo	25.287,00	20	2.029,09
2	Tamiz autolimpiante, reactor anaerobio y humedal artificial	321.839,00	30	20.936,09
3	Sistema de desinfección	21.552,00	20	1.729,39
4	Tanque de almacenamiento (readecuación)	4.310,00	30	280,37
5	Terraplenado	7.184,00	30	467,33
6	Área de secado de lodos	5.819,00	30	378,53
7	Caseta de control	2.155,00	30	140,19
8	Vías y accesos	2.155,00	30	140,19
9	Cerco perimetral	21.408,00	20	1.718,83
10	Instalaciones eléctricas	8.621,00	20	691,77
11	Medidas de mitigación ambiental	7.184,00	30	467,33
12	Mejoramiento red alcantarillado	25.287,00	20	2.029,09
13	Emisario alcantarillado (500m)	35.920,00	30	2.336,65
	Total	488.721,00		33.343,85

Tabla 3: Cálculo del CAPEX anualizado

Cálculo del OPEX anualizado

Para el cálculo del OPEX anualizado, simplemente debemos de sumar los costos operativos anuales de los principales rubros de gastos recurrentes necesarios para operar y mantener la planta. En caso de contar con datos de costos mensuales, trimestrales o semestrales de algunos rubros, debemos multiplicar estos valores por el número de periodos al año para tener los costos anuales de cada rubro y de esta manera poder totalizarlos. En la tabla 4 abajo, se presenta un ejemplo de cálculo de OPEX anual:

Ítem	Descripción	Costo [USD/periodo]	No. periodos por año	Costo [USD/año]
1	Energía eléctrica	1.277,84	12	15334,08
2	Sereno/seguridad	574,71	12	6896,52
3	Operador	143,68	12	1724,16

4	Técnico especialista	50,29	12	603,48
5	Monitoreo calidad del agua	159,48	2	318,96
6	Mantenimiento equipos eléctricos	359,20	3	1077,60
7	Elaboración de informes	25,14	4	100,56
8	Herramientas menores	215,52	2	431,04
9	Equipo de protección personal y limpieza	143,68	3	431,04
10	Gasolina	71,84	12	862,08
11	Agua del servicio de agua potable	7,18	12	86,16
	Total			27.865,68

Mediante este análisis, se obtienen los siguientes resultados y conclusiones:

R	Resultado	Valor	Unidades	Interpretación/ conclusiones
R1	Inversión inicial	488.721,00	USD	Este es el monto que se requiere inicialmente para construir la planta de tratamiento.
R2	Costo anual equivalente de la infraestructura (CAPEX anualizado)	33.343,85	USD/año	Se requiere contar con este monto cada año para reponer oportunamente todos los componentes al cabo de la vida útil de cada uno de ellos.
R3	Costo anual de operación y mantenimiento (OPEX anual)	27.865,68	USD/año	Se requiere contar con este monto cada año para cubrir todos los costos de operación y mantenimiento.
R4	Costo Anual Equivalente (CAE) de la planta	61.209,53	USD/año	Es la suma del CAPEX anualizado (R2) más el OPEX anual (R3)
R5	Costo unitario por habitante/año	8,16	USD/habitante*año	Esto es lo que nos cuesta en total el tratamiento de agua por persona por año tomando en cuenta todos los costos de la planta. Se calcula dividiendo el CAE de la planta (R4) entre el número de habitantes que la planta atiende.
R6	Costo unitario por m ³ de agua tratada	0,24	USD/m ³	Esto es lo que nos cuesta en total tratar cada m ³ de agua residual en la planta. Se calcula dividiendo el CAE de la planta (R4) entre el número de m ³ de aguas residuales que la planta procesa cada año.

Los resultados (R1 al R6) de la tabla precedente son muy útiles a tiempo de determinar los costos que resultan de tener, operar y mantener una planta de tratamiento. En base a estos costos, se pueden diseñar estrategias financieras para cubrirlos y, de esta manera, asegurar la sostenibilidad financiera del servicio. Los resultados R5 y R6 (costo per cápita y costo por m³ respectivamente), son especialmente útiles a tiempo de diseñar un sistema tarifario para el servicio.