



MANUAL DE BUENAS PRÁCTICAS PARA EL USO SEGURO Y PRODUCTIVO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS



MINISTERIO
DE AGRICULTURA
Y RIEGO





MANUAL DE BUENAS PRÁCTICAS PARA EL USO SEGURO Y PRODUCTIVO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS



MINISTERIO
DE AGRICULTURA
Y RIEGO



Ministerio de Agricultura y Riego
Sr. Juan Manuel Benites Ramos
Ministro

Autoridad Nacional del Agua
Ing. Juan Carlos Sevilla Gildemeister
Jefe

Secretaría General
Abg. Janet Aida Velásquez Arroyo
Secretaria General

Dirección de Estudios de Proyectos Hidráulicos Multisectoriales-DEPHM
Ing. Tomás Alfaro Abanto
Director

Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos-GCRH
Blgo. Juan Carlos Castro Vargas
Director

Dirección de Gestión del Conocimiento y Coordinación Interinstitucional-DGCI
Ing. Magdalena Layne Guimac Huamán
Directora

Autor del Manual
Ing. Julio Moscoso Cavallini (Consultor Externo FAO)

Coordinadores del documento ANA: Ing. Lourdes Chang, Ing. Antonio Tamariz

Coordinadores del documento FAO: Sara Marjani, Benjamin Kiersch, Dennis Escudero, Pilar Román

La publicación de este documento ha sido posible gracias a la colaboración de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en el marco de su proyecto de "Desarrollo de las capacidades institucionales y técnicas de la ANA en el uso seguro y productivo de las aguas residuales en la agricultura".

©Autoridad Nacional del Agua
Calle Diecisiete N° 355, Urb. El Palomar
San Isidro, Lima
Teléfono: 01-226 0647 - Anexo: 2400
www.ana.gob.pe

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca del Perú N° 2016-05124
Primera edición, abril 2016
50 ejemplares

Diseño e impresión:
CREACOLOR SAC
Calle Mochicas 136 Independencia – Lima
creacolorsac@gmail.com
Telf.: 511-324 1540

Derechos reservados. Prohibida la reproducción de esta publicación por cualquier sistema conocido sin la autorización de la Autoridad Nacional del Agua. Este libro no es un manual de consulta; es solo una obra de referencia, por lo que el autor y el editor no serán responsables por los errores que el usuario pueda cometer en el uso e interpretación de la información que se presenta.

PRÓLOGO

El creciente proceso de urbanización viene generando un acelerado surgimiento de pequeñas y medianas ciudades en todo el país. Este fenómeno ha sido acompañado por un extenso programa de inversiones públicas en saneamiento, liderado por el gobierno nacional, regional y local como parte de las políticas de estado para dotar de servicios básicos a las poblaciones de las diferentes regiones del país. La inversión en infraestructura de conducción y tratamiento de efluentes líquidos y sólidos de las ciudades genera una importante cantidad de aguas servidas y residuos sólidos que, adecuadamente tratadas, pueden ser utilizadas en la actividad agrícola y forestal, evitándose de esta manera la contaminación de ríos, lagos y suelos, y mitigando el riesgo de propagación de enfermedades infecto-contagiosas.

Según estimaciones preliminares, si la cobertura de saneamiento en todo el país fuera del 100%, en ciudades con más de 10 mil habitantes (sin incluir Lima y Callao), se podrían irrigar casi 70 mil hectáreas de tierras para la producción agrícola, y hasta 124 mil para la producción forestal. Este gran potencial de vinculación entre los sistemas de saneamiento y la actividad agroforestal requiere ser tomado en consideración, con el propósito de mejorar los mecanismos y herramientas que permitan darle un valor agregado a estos efluentes que, al no ser usados adecuadamente, generan problemas de contaminación y riesgos para la salud pública. El aprovechamiento del agua residual en las urbes cobra relevancia en un contexto de cambio climático, dado que la escasez hídrica se hace cada vez más evidente como resultado de eventos climáticos extremos, como –por ejemplo– las sequías en algunas regiones del país.

En este contexto, el presente “Manual de Buenas Prácticas para el Uso Seguro y Productivo de las Aguas Residuales Domésticas” es resultado del trabajo articulado entre la Autoridad Nacional del Agua y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, y se enmarca dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos del Perú, los objetivos estratégicos y las prioridades regionales y nacionales de la FAO. El documento recoge una serie de experiencias y buenas prácticas desarrolladas a nivel nacional e internacional y tiene como principal propósito brindar información a técnicos y tomadores de decisiones sobre las potencialidades que tiene el reuso de aguas residuales en la actividad productiva. Asimismo, se pretende evidenciar la necesidad de desarrollar mecanismos y herramientas para vincular los proyectos de saneamiento con la actividad agroforestal.

John Preissing
Representante en el Perú
Organización de las Naciones Unidas para
la Alimentación y la Agricultura

Juan Carlos Sevilla Gildemeister
Jefe
Autoridad Nacional del Agua

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación se materializa gracias a los fondos proporcionados por la División de Tierras y Aguas (NRL) de la FAO, y es resultado de la implementación del proyecto FAO TCP/PER/3501. Componente 1 “Desarrollo de las capacidades institucionales y técnicas de la ANA en el uso seguro y productivo de las aguas residuales en la agricultura (Guías OMS-FAO 2006)”.

Un agradecimiento especial a todos los técnicos y funcionarios de la ANA, en especial a los profesionales de la Dirección de Estudios Hidráulicos Multisectoriales, Dirección de Gestión de Conocimiento y Coordinación Interinstitucional y la Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos, y a todos los miembros de la Mesa Temática de Uso de Aguas Residuales Tratadas, que estuvieron involucrados directa o indirectamente en el desarrollo del proyecto mencionado. Asimismo, se agradece el aporte de todos los profesionales de la FAO involucrados en el desarrollo de esta temática.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	10
2.	REUSO EN EL MANEJO INTEGRAL DE LA CUENCA	14
2.1.	La gestión de los recursos hídricos	17
2.2.	Los planes de ordenamiento territorial	19
2.3.	El tratamiento y uso de las aguas residuales	21
2.4.	Los tipos de reuso: directo e indirecto	23
2.5.	Riesgos del uso de aguas superficiales contaminadas con aguas residuales	24
2.6.	La capacidad de autodepuración de los cuerpos de agua	26
2.7.	Estrategias para mejorar la calidad del agua para riego	28
3.	CARACTERÍSTICAS DEL USO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN EL PERÚ	32
3.1.	Breve reseña histórica del uso de las aguas residuales	34
3.2.	La situación actual del tratamiento de las aguas residuales en el Perú	35
3.3.	Las tecnologías de tratamiento utilizadas	37
3.4.	La disposición final de los efluentes	39
3.5.	Los efluentes utilizados para riego en las diferentes regiones	41
3.6.	Las áreas regadas con aguas residuales tratadas	42
3.7.	El potencial de reuso actual y al 2030	44
4.	RIESGOS A LA SALUD Y EL AMBIENTE DEL USO DE LAS AGUAS RESIDUALES	46
4.1.	Principales riesgos a la salud y el ambiente por el uso de aguas residuales	48
4.2.	Criterios para el manejo sanitario y ambiental del uso de aguas residuales	56
4.3.	Las Guías de la OMS para el uso de las aguas residuales	61
4.4.	Planes de seguridad en saneamiento (PSS)	65
4.5.	Programa Nacional de Vigilancia del Tratamiento y Uso de Aguas Residuales	67
5.	SISTEMAS INTEGRADOS DE TRATAMIENTO Y USO DE AGUAS RESIDUALES	70
5.1.	Los sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales	73
5.2.	El plan general del sistema: componentes de tratamiento y uso de aguas residuales	76
5.3.	Ubicación del sistema de tratamiento y uso de las aguas residuales	77
5.4.	El aprovechamiento de los nutrientes de las aguas residuales tratadas	80
5.5.	Los requerimientos de calidad en función al tipo de reuso	84
5.6.	El riego con aguas residuales de áreas agrícolas altamente productivas	88
5.7.	El manejo sustentable de las áreas verdes urbanas regadas con aguas residuales	90

5.8.	Las aguas residuales para la forestación como opción al manejo de suelos y agua	97
5.9.	Los beneficios de integrar el reuso al tratamiento de las aguas residuales	99
6.	CRITERIOS PARA EL DISEÑO DEL COMPONENTE DE REUSO	106
6.1.	Disponibilidad de áreas y agua residual	109
6.2.	Elección de los cultivos para el reuso	113
6.3.	Requerimientos de cantidad y calidad de agua para la producción	114
6.4.	Plan de producción: actividades culturales, costos y precios	117
6.5.	Uso eficiente del agua: almacenamiento y riego tecnificado	123
7.	CRITERIOS PARA EL DISEÑO DEL COMPONENTE DE TRATAMIENTO	128
7.1.	Objetivos del tratamiento para el reuso	130
7.2.	Identificación de las ventajas de las principales tecnologías para el reuso	131
7.3.	Criterios para la elección de tecnología de tratamiento compatible con el reuso	141
7.4.	Criterios para el dimensionamiento de las PTAR para alcanzar la calidad requerida	160
7.5.	Criterios para recuperar y ampliar la capacidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales	168
7.6.	Criterios para la evaluación de proyectos de tratamiento y uso de aguas residuales	175
8.	OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y REUSO	180
8.1.	El Plan de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales	184
8.2.	El manejo de caudales excesivos en una planta de tratamiento de aguas residuales	197
8.3.	El Plan de manejo eficiente del agua residual tratada en el riego	198
8.4.	El Plan de control de calidad en los sistemas de tratamiento y uso de aguas residuales: criterios, parámetros y protocolos	201
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	220



| 01



INTRODUCCIÓN

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI (2015), de los 31,2 millones de habitantes que se estima tiene el Perú actualmente, el 88% de la población vive en áreas urbanas con más de 10,000 habitantes y más de 10.8 millones en Lima y el Callao (35%). Este dramático proceso de urbanización, que se expresa a través del crecimiento demográfico, tiene en su dimensión económica, un alarmante aparejado con el crecimiento de la pobreza urbana.



Foto 1. Asentamiento humano en zonas áridas

Las enfermedades infecciosas en el Perú continúan siendo una de las principales causas de mortalidad y morbilidad en la población, especialmente en los niños menores de cinco años. La insuficiente cobertura de tratamiento de las aguas residuales domésticas y la existencia de miles de hectáreas de cultivos regados con aguas contaminadas con desagües domésticos que se vierten a los ríos sin un tratamiento adecuado, implican un alto riesgo de diseminación de estas enfermedades entéricas (Moscoso et al, 2005). A ello se suma el creciente uso directo de las aguas residuales para el riego agrícola y de áreas verdes, actividad generalmente informal que en muchos casos usan estas aguas sin tratar o tratadas a niveles que no pueden garantizar la calidad requerida para tales usos. Esta situación no es exclusiva del Perú, ya que la mayoría de países en desarrollo presentan condiciones similares de un inadecuado manejo de sus aguas residuales y del reuso que realizan con ellas. Es por ello que desde 2011 la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) trabaja en el Proyecto global e inter-agencial Uso Seguro de las aguas Residuales en Agricultura SUWA¹, ejecutado con la coordinación del Instituto del Agua de la ONU (UN-Water) y la participación de la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Universidad de las Naciones (UNU, la Comisión Internacional de Irrigación y Drenaje (CIID) y el Instituto Internacional de Gestión del Agua IWMI², a fin de proporcionar a los países el conocimiento necesario en materia del uso productivo y seguro de las aguas residuales en agricultura, basado en las Guías de la OMS de 2006.

En diciembre del año 2012 se realizó en Lima el Cuarto Taller Regional de SUWA para América Latina y el Caribe, liderado por la ANA. Este reunió a 14 países de la Región para discutir los problemas, desafíos y necesidades de todos ellos. Se pudo apreciar que casi todos los países tienen problemáticas similares, tales como el bajo monitoreo de los vertidos de aguas residuales,

.....
¹ Safe Use of Wastewater in Agriculture

² International Water Management Institute

el escaso control del uso poco seguro de aguas residuales en agricultura, la dispersión de responsabilidades de las instituciones involucradas y en particular, el desconocimiento de las guías de la OMS para un uso de aguas servidas que no impacte negativamente en la salud y en el medio ambiente. A partir de este taller se definieron una serie de propuestas para elaborar un Programa Regional que involucre a los países con interés en el tema. Entre las propuestas se menciona la creación de una “Red de Comunicación” de las instituciones involucradas y una biblioteca virtual centradas en el uso seguro de aguas residuales, el desarrollo de las versiones en español de los manuales técnicos y otros materiales para concienciar y capacitar a tomadores de decisión, agricultores y sociedad civil. También se propuso propiciar el acercamiento entre agricultores, operadores de plantas de tratamiento, ministerios y gobiernos locales.

Dentro de este contexto, la FAO y la ANA han trabajado juntas en la implementación del proyecto “Desarrollo de las capacidades institucionales y técnicas de la ANA en el uso seguro y productivo de las aguas residuales en la agricultura” (Guías OMS-FAO 2006), con el objetivo de apoyar el desarrollo de capacidades técnicas e institucionales para la formulación de políticas de Gestión Integrada de Recursos Hídricos, promoviendo el uso seguro y sustentable de las aguas residuales domésticas tratadas en áreas agrícolas y áreas verdes recreativas. Bajo la supervisión de la FAO, la Dirección de Estudios de Proyectos Hidráulicos Multisectoriales de la ANA está desarrollando las siguientes actividades:

- a. Recopilar información estadística, normativa y buenas prácticas en materia de re-uso de aguas residuales con técnicos de la ANA y de otras instituciones competentes.
- b. Organizar un primer taller nacional sobre tratamiento y uso seguro de aguas residuales en la agricultura según Guías OMS 2006.
- c. Elaborar un manual que contenga una propuesta de metodología y una propuesta de normativa de uso de aguas residuales en la agricultura peruana, en base a la revisión bibliográfica, conclusiones e ideas relevantes que surjan durante el primer taller nacional.
- d. Organizar un segundo taller nacional de validación de la propuesta de metodología de uso de aguas residuales involucrando a los diversos sectores competentes.
- e. Finalizar las propuestas de metodología y normativa en base a las observaciones recibidas durante el taller de validación.

Es así que el presente documento cumple con la actividad “c” del proyecto que propone elaborar un manual de buenas prácticas para el uso seguro y productivo de las aguas residuales en el riego agrícola y de áreas verdes.



| 02



REUSO EN EL MANEJO INTEGRAL DE LA CUENCA

El Perú se encuentra situado en la parte central y occidental de América del Sur y está conformado por un territorio de 1,285,215 km² de superficie, que representa el 0.87% del planeta. El territorio nacional se divide en tres zonas naturales (regiones naturales): costa, sierra y selva. La primera es una delgada franja costera que solo ocupa el 10.6% del territorio nacional. La zona de la sierra se desarrolla en las cadenas montañosas de los Andes y ocupa el 31.5% del territorio nacional. La selva es la zona más extensa con 57.9% del territorio y está ubicada en la gran región amazónica de América del Sur. La importante precipitación que ocurre en la Sierra y Selva ha determinado que en la evaluación de los Recursos hídricos renovables en América Latina asigne al Perú una situación de abundancia hídrica (Aquastat 2015).

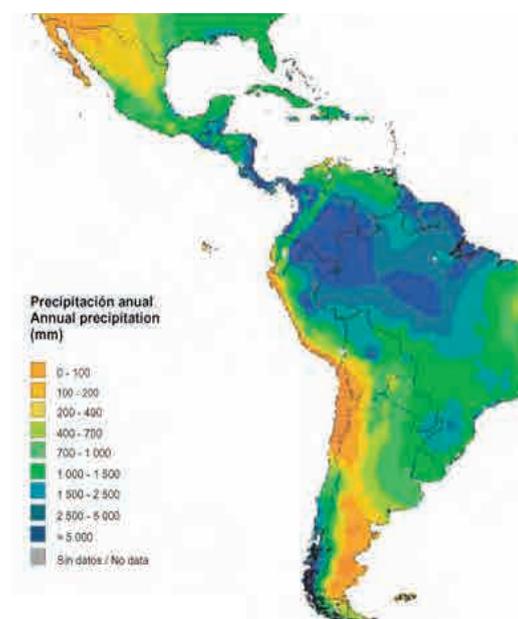


Figura 1. Situación de la precipitación anual en América Latina.



Figura 2. Mapa de Disponibilidad Hídrica de la Costa

La Sierra Peruana ocupa el 32% de la superficie total del territorio y alberga el 36% de la población nacional. Esta zona comparte con la selva el 98.2% de los recursos hídricos nacionales, lo que determina una disponibilidad de agua per cápita de 198,121 m³/año (ANA, 2013). Este valor define una situación de abundancia hídrica. Además se trata de una zona con bajo desarrollo económico, y dentro de esta situación, durante el 2012 la actividad agrícola se desarrollaba en 3,296,000 ha (INEI, 2013). La Selva ocupa el 58% del territorio y solo alberga el 9% de la población nacional. Al compartir con la sierra el 98.2% de los recursos hídricos también tienen una situación de abundancia hídrica. Es la zona con menor desarrollo económico y su actividad agrícola se desarrolla en 2,142,000 ha (INEI, 2013).

La Costa aun cuando abarca solo el 10% de la superficie total del territorio nacional y dispone apenas del 1.8% de los recursos hídricos nacionales, alberga el 55%

de la población del país estimada al 2015 en más de 31 millones de habitantes. Esta situación determina que la disponibilidad de agua per cápita sea de 2,067 m³/año (ANA, 2013), valor muy cercano a una situación de estrés hídrico. A pesar de estas serias limitaciones, la costa es la zona con mayor desarrollo económico, y dentro de esta situación, en 2012 ya sustentaba una actividad agrícola en 1,686,777 ha (INEI, 2013).

Es un hecho que el reuso del agua es más apremiante en la zona costeña por las serias limitaciones de otras fuentes, pero también es importante notar que en sierra y selva la disponibilidad de agua se reduce sensiblemente en la época de estiaje comprendida entre abril y noviembre y que afecta el riego agrícola, por lo que el reuso podría ser una solución para abastecer el agro en esa época del año.

2.1. La gestión de los recursos hídricos

El agua es un recurso natural estratégico para el desarrollo sostenible del país por ello su real valor económico está en función de los costos que implican su disponibilidad, y utilidad. El agua tiene valor social, económico y ambiental, y su aprovechamiento debe basarse en el equilibrio permanente entre éstos componentes. Sin embargo, la gestión de los recursos hídricos tradicionalmente se ha desarrollado en torno al sector agrario, surgiendo la necesidad de alentar un enfoque integral orientado a la coordinación de las intervenciones para el aprovechamiento multisectorial del agua, al ser un bien económico cuyo manejo debe basarse en los criterios de eficiencia, equidad y sostenibilidad.

Es por ello que ya desde el año 2004, los Ministerios de Agricultura; Energía y Minas; Producción; Defensa; Salud; Economía y Finanzas; y Vivienda, Construcción y Saneamiento consideraron relevante la preparación de la Estrategia Nacional para la Gestión de los Recursos Hídricos, donde se sustente el aprovechamiento racional y sostenible del agua de la cuenca hidrográfica, como la unidad de gestión integrada del carácter multisectorial del agua y de la protección y preservación del recurso, entre otros (MVCS, 2006).

Esta iniciativa se concreta en el año 2009 con la promulgación de la Ley de Recursos Hídricos (Ley No. 29338) y que establece claramente que el agua es un recurso natural renovable, indispensable para la vida, vulnerable y estratégico para el desarrollo sostenible, el mantenimiento de los sistemas y ciclos naturales que la sustentan, y la seguridad de la Nación. Por ello constituye un patrimonio de la Nación. No hay propiedad privada sobre el agua. Declara de interés nacional y necesidad pública la gestión integrada de los recursos hídricos con el propósito de lograr eficiencia

y sostenibilidad en el manejo de las cuencas hidrográficas y los acuíferos para la conservación e incremento del agua, así como asegurar su calidad fomentando una nueva cultura del agua, para garantizar la satisfacción de la demanda de las actuales y futuras generaciones.

Esta ley y su Reglamento (D.S. No. 001-2010-AG) regulan el uso y la gestión integrada del agua, la actuación del Estado y los particulares en dicha gestión, así como en los bienes asociados a esta. Incluye las aguas residuales como parte de los recursos hídricos. Igualmente crea el Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos como parte del Sistema Nacional de Gestión Ambiental y que tiene por finalidad el aprovechamiento sostenible, la conservación y el incremento de los recursos hídricos, así como el cumplimiento de la política y estrategia nacional de recursos hídricos y el plan nacional de recursos hídricos en todos los niveles de gobierno y con la participación de los distintos usuarios del recurso. Es así que este Sistema desarrolla sus políticas en coordinación con el Ministerio del Ambiente, el Ministerio de Agricultura, el Ministerio de Energía y Minas, el Ministerio de Salud, el Ministerio de la Producción y el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, así como con los gobiernos regionales y gobiernos locales, dentro del marco de la política y estrategia nacional de recursos hídricos.

Por último la Ley establece que la Autoridad Nacional del Agua (ANA) es el ente rector y la máxima autoridad técnico-normativa del Sistema, otorgándole las siguientes funciones:

- Elaborar la política y estrategia nacional de los recursos hídricos y el plan nacional de gestión de los recursos hídricos, conduciendo, supervisando y evaluando su ejecución;
- Establecer los lineamientos para la formulación y actualización de los planes de gestión de los recursos hídricos de las cuencas, aprobarlos y supervisar su implementación;
- Proponer normas legales en materia de su competencia, así como dictar normas y establecer procedimientos para asegurar la gestión integral y sostenible de los recursos hídricos;
- Elaborar el método y determinar el valor de las retribuciones económicas por el derecho de uso de agua y por el vertimiento de aguas residuales en fuentes naturales de agua, valores que deben ser aprobados por decreto supremo; así como, aprobar las tarifas por uso de la infraestructura hidráulica, propuestas por los operadores hidráulicos;
- Aprobar reservas de agua por un tiempo determinado cuando así lo requiera el interés de la Nación y, como último recurso, el trasvase de agua de cuenca;
- Declarar el agotamiento de las fuentes naturales de agua, zonas de veda y zonas de protección, así como los estados de emergencia por escasez, superávit hídrico, contaminación de las fuentes naturales de agua o cualquier conflicto relacionado con la gestión sostenible de los recursos hídricos, dictando las medidas pertinentes;

- Otorgar, modificar y extinguir derechos de uso de agua, así como aprobar la implementación, modificación y extinción de servidumbres de uso de agua, a través de los órganos desconcentrados de la Autoridad Nacional;
- Conducir, organizar y administrar el Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos, el Registro Administrativo de Derechos de Agua, el Registro Nacional de Organizaciones de Usuarios y los demás que correspondan;
- Emitir opinión técnica previa vinculante para el otorgamiento de autorizaciones de extracción de material de acarreo en los cauces naturales de agua;
- Supervisar y evaluar las actividades, impacto y cumplimiento de los objetivos del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos;
- Emitir opinión técnica vinculante respecto a la disponibilidad de los recursos hídricos para la viabilidad de proyectos de infraestructura hidráulica que involucren su utilización;
- Ejercer jurisdicción administrativa exclusiva en materia de aguas, desarrollando acciones de administración, fiscalización, control y vigilancia, para asegurar la preservación y conservación de las fuentes naturales de agua, de los bienes naturales asociados a estas y de la infraestructura hidráulica, ejerciendo para tal efecto, la facultad sancionadora y coactiva;
- Establecer los parámetros de eficiencia aplicables al aprovechamiento de dichos recursos, en concordancia con la política nacional del ambiente;
- Reforzar las acciones para una gestión integrada del agua en las cuencas menos favorecidas y la preservación del recurso en las cabeceras de cuencas; y
- Aprobar la demarcación territorial de las cuencas hidrográficas.

Por tanto la ANA realiza sus funciones a través de los órganos desconcentrados, denominados Autoridades Administrativas del Agua (AAA) y las Administraciones Locales de Agua (ALA), que dependen de las primeras.

2.2. Los planes de ordenamiento territorial

El Perú presenta diversos escenarios geográficos como bosques, valles, cabeceras de cuencas, entre otros, y en cada uno de estos se desarrollan actividades agrícolas, forestales, mineras y pesqueras, etc, incluyendo la formación de centros poblados y ciudades. Esta ocupación del territorio y el desarrollo de las actividades mencionadas muchas veces se realizan con distintas y desarticuladas visiones de desarrollo. Si bien esta lógica de ocupación ha permitido contribuir con el crecimiento económico, también ha generado el deterioro de los ecosistemas, perdiendo la oportunidad de hacerlas rentables social y económicamente. Esta ocupación desordenada,

ha generado el desarrollo desigual y la falta de competitividad, provocando muchas veces que las actividades sean sólo para subsistencia. Del mismo modo, provoca exclusión y pobreza, producida por el poco acceso a los beneficios que ofrece el territorio, generando la migración de las poblaciones, las mismas que se instalan en zonas urbanas vulnerables.

Estas distintas visiones de desarrollo no permiten la construcción de un modelo de desarrollo compartido, inclusivo y concertado entre autoridades, sectores y actores sociales, lo que muchas veces ha provocado la generación de conflictos, como resultado de procesos de desarrollo desequilibrados y excluyentes, que se desencadenan debido a la percepción e interés contrapuestos. En consecuencia, las potencialidades territoriales del país y su aprovechamiento reflejado en los procesos de ocupación del territorio, no están articulados con el conjunto de políticas nacionales, regionales y locales y sus mecanismos de gestión, por lo que, aplicadas en forma desarticulada no permiten plasmar una visión política y estratégica equilibrada y sostenible.

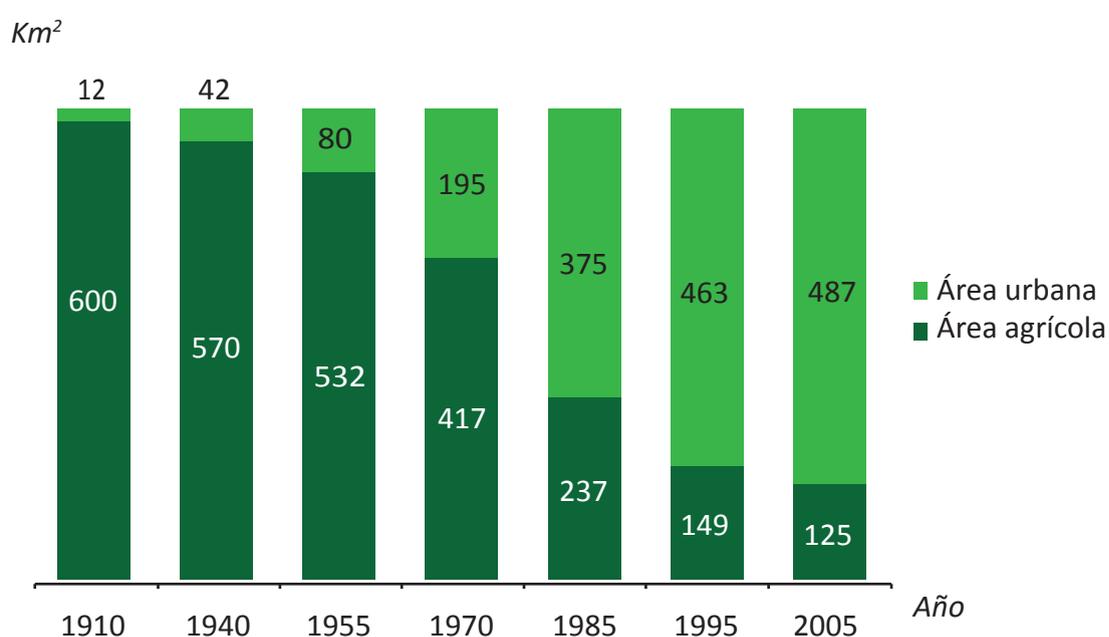


Figura 3. Reducción de la agricultura en Lima (Fuente: Moscoso y Alfaro, 2013).

Un caso representativo de lo que ocurre en muchas ciudades del Perú, es la ocupación territorial de los valles del Chillón, Rímac y Lurín por el casco urbano en la ciudad de Lima Metropolitana. Como se aprecia en la figura 3, el área agrícola se ha reducido en los últimos 100 años de 600 a 125 km², debido al violento crecimiento urbano (Moscoso y Alfaro, 2008). El área agrícola actual es de 12,680 ha, que demanda un caudal de 12 m³/s, y está dedicada principalmente al cultivo de hortalizas.

Es un proceso técnico, administrativo y político de toma de decisiones concertadas con distintos actores sociales para la ocupación ordenada y uso sostenible del territorio. Este toma en consideración las condiciones sociales, ambientales y económicas para la ocupación del mismo, así como el uso y aprovechamiento de los recursos naturales, para de esta manera, garantizar un desarrollo equilibrado y en condiciones de sostenibilidad, gestionando y minimizando los impactos negativos que podrían ocasionar las diversas actividades y procesos de desarrollo que se llevan a cabo en el territorio. Esto asegura el derecho a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado a su desarrollo de vida.

La Dirección General de Ordenamiento Territorial (DGOT) del Ministerio del Ambiente (MINAM) es la responsable de vigilar que las acciones e intervenciones que se desarrollan a lo largo del territorio se realicen en condiciones de sostenibilidad y garantizando el bienestar común. Esta dependencia trabaja para brindar orientación y asistencia a los gobiernos regionales y locales para gestionar los procesos de ordenamiento territorial y la elaboración de los siguientes instrumentos técnicos:

- Zonificación Ecológica y Económica (ZEE).
- Estudios Especializados (EE).
- Diagnóstico Integrado del Territorio (DIT).
- Plan de Ordenamiento Territorial (POT).

El Plan de Ordenamiento Territorial (POT) es un instrumento técnico que orienta la planificación y gestión del territorio, que promueve la ocupación del territorio, garantizando el derecho de toda persona a un ambiente saludable, y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, articulando los planes ambientales, de desarrollo económico, social, cultural y otras políticas de desarrollo vigentes en el país. El POT vincula al proceso de ordenamiento territorial con otros planes e instrumentos de desarrollo concertado regional y local, y de gestión territorial, los cuales son abordados por otros sectores y niveles de gobierno en el marco de sus competencias y funciones. En tal sentido la DGOT debe trabajar en estrecha relación con las Autoridades Administrativas de Agua.

2.3. El tratamiento y uso de las aguas residuales

El proceso acelerado de urbanización ha determinado que las ciudades necesiten cada vez mayor cantidad de agua para satisfacer sus necesidades domésticas, industriales y comerciales (figura 4). La agricultura debe competir por los mismos recursos hídricos, por tanto termina disponiendo de menos agua, que además es afectada por la contaminación generada por el vertimiento de las

aguas residuales sin tratar o inadecuadamente tratadas. Esta situación ocasiona serios conflictos entre la ciudad y el campo.

El manejo del recurso hídrico involucra una serie de procesos que deben buscar la solución de conflictos entre los múltiples usuarios que dependen de un recurso compartido. La oferta de agua proviene generalmente de un sistema común que es la cuenca hidrográfica, y los excedentes de uso para el consumo humano, así como de los efluentes del saneamiento, que vuelven a integrar el sistema. Una administración eficiente implica optimizar los usos del recurso hídrico mediante el uso racional y con una calidad aceptable, debiendo esta gestión maximizar con criterio de equidad los beneficios económicos, sociales y ambientales.

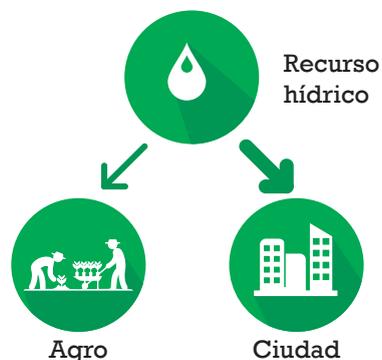


Figura 4. Conflicto entre la ciudad y el agro por el agua

En este contexto, el tratamiento de las aguas residuales no puede desligarse del manejo integral del recurso hídrico. La ampliación de la cobertura de tratamiento debe hacerse mediante planteamientos creativos e integrales y no basados en conceptos estrechos y exclusivamente técnicos. Un enfoque integral de cuenca debe enfatizar que el agua residual es parte de los recursos hídricos disponibles, como se representa en la figura 5. De acuerdo a este enfoque, el agua debe ser aprovechada desde que ingresa hasta que sale de la cuenca, lo que implica tomar



Figura 5. El agua residual en la cuenca

acciones en cada etapa. La capacidad de captación (etapa 1 en la figura 2) puede mejorarse ampliando el volumen de embalses y la cobertura vegetal. La adecuación al tipo de uso (etapa 2), la recolección del agua residual (etapa 3) y el tratamiento según el tipo de contaminante que se ha incorporado al agua (etapa 4), deben ser realizados por los usuarios de acuerdo a las características de sus procesos. El uso productivo (etapa 5) puede darse en la actividad industrial o agrícola luego de un tratamiento acorde con las exigencias de calidad. Finalmente a cada usuario le compete la responsabilidad de disponer en forma adecuada el agua residual (etapa 6), para que este recurso quede disponible para un nuevo usuario. Los sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales facilitan la optimización del uso de los recursos hídricos, ya que al usar aguas residuales para el riego agrícola y de áreas verdes urbanas, permite que volúmenes importantes de agua limpia o potable se destinen al consumo humano, tal como se propone en la figura 6.

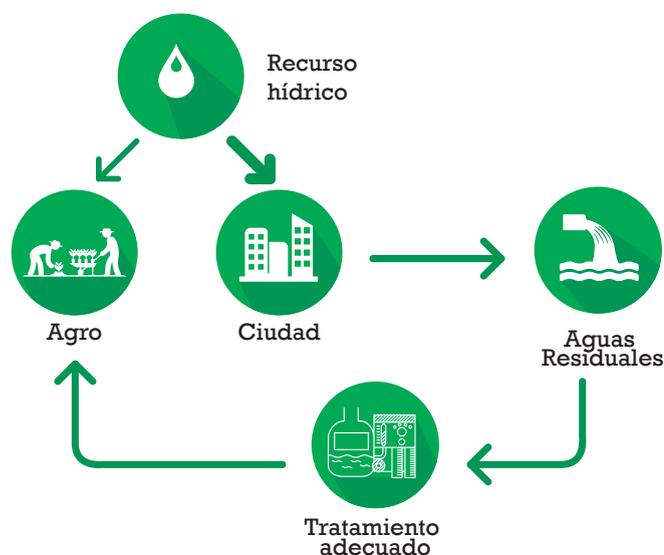


Figura 6. Recuperación del agua para el uso agrícola

2.4. Los tipos de reuso: directo e indirecto

Se entiende por reuso al proceso de volver a utilizar directa o indirectamente, las aguas resultantes de actividades antropogénicas. El reuso suele ser en su mayoría indirecto, en la medida que una gran cantidad de los desagües –tratados y no tratados- son descargados a cuerpos receptores, tales como ríos, mares o lagos, de los cuales se capta el agua para el uso agrícola.



Figura 7. Tipos de uso de aguas residuales

La figura 7 grafica con claridad que el reuso directo es cuando las aguas residuales tratadas o sin tratar son utilizadas directamente en el riego agrícola o de áreas verdes, u otra actividad que las demande. En cambio el uso indirecto es cuando los desagües se descargan a los cuerpos receptores que luego son utilizados para las diferentes actividades. Este segundo tipo no es considerado por la legislación como reuso, y sin embargo es el que más preocupa por sus graves impactos en la salud y el ambiente cuando no existe un tratamiento previo adecuado.

2.5. Riesgos del uso de aguas superficiales contaminadas con aguas residuales

Las descargas de desagües sin tratar, o deficientemente tratados, de origen doméstico, minero e industrial a los ríos, lagos y mares, contaminan estos ambientes y en especial el agua que los recibe. Las evaluaciones y monitoreos efectuados por la DIGESA (2009) y otras instituciones en diferentes cuerpos de agua naturales del país muestran en la figura 8 el fuerte impacto de las aguas residuales descargadas en los ríos, o que genera una alta contaminación fecal. Un caso emblemático es la cuenca del río Rímac que ha sido sistemáticamente monitoreado por DIGESA y SEDAPAL, mostrando que mientras la contaminación minera ha descendido favorablemente, las cargas fecales se elevan debido al aporte de desagües domésticos de las ciudades ubicadas en sus riveras y que como se aprecian en la figura 9 alcanzan niveles tan altos de coliformes termo tolerantes como por ejemplo, 1.0E+6 NMP/100 ml antes de su captación en la Planta Potabilizadora de La Atarjea (DIGESA, 2011).

El imponente Lago Titicaca tampoco se escapa de esta dramática situación, que en la Bahía de Puno ha sufrido un intenso proceso de eutrofización mediante una proliferación abundante de lenteja de agua (*Lemna sp.*), como consecuencia del aporte permanente de una alta carga de nutrientes acarreados por las aguas residuales de esa ciudad, tal como se observa en la foto 2. Otro caso representativo, es el de la Bahía de Lima, donde el litoral se ha visto contaminado, debido a la descarga de volúmenes de aguas residuales realizada años atrás, en las playas de La Taboada, San Miguel y La Chira. Esta situación ha comenzado a ser superada.



**Figura 8. Mapa de contaminación fecal del Perú
Foto 2. Cobertura de Lemna en la Bahía de Puno**

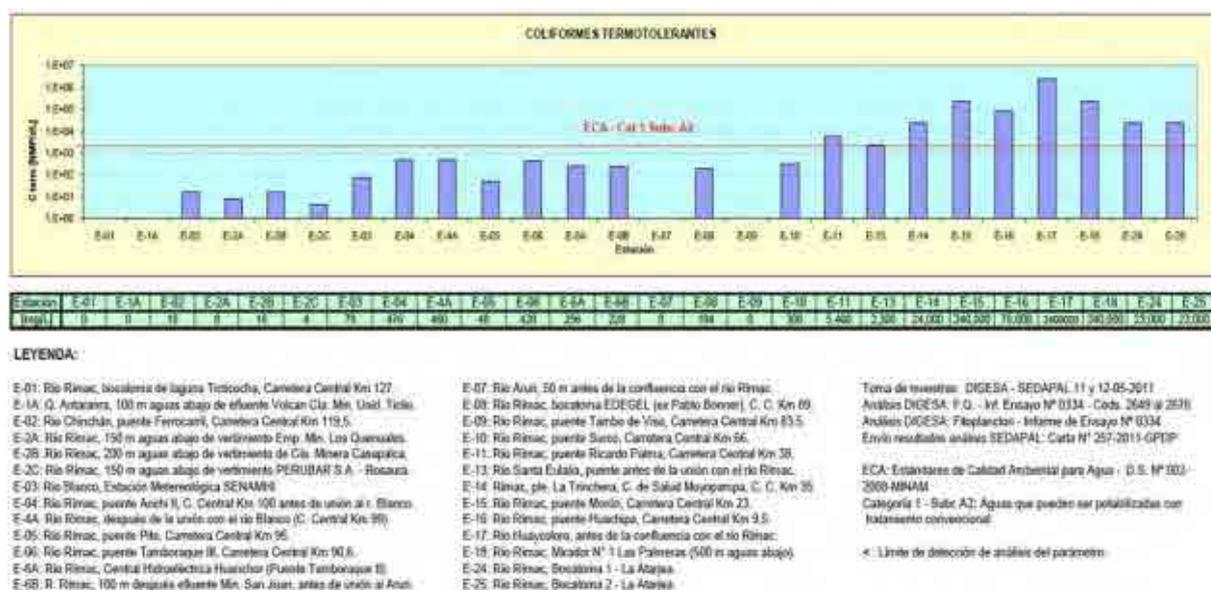
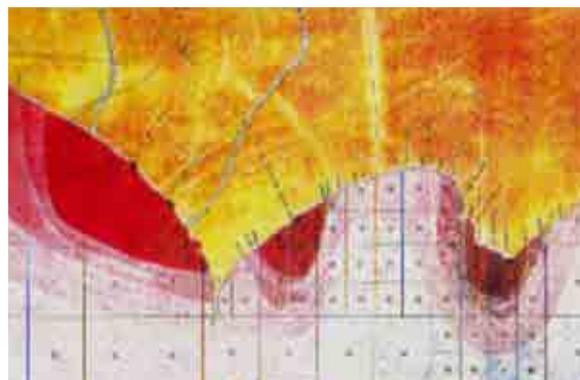


Figura 9. Niveles de contaminación fecal en la cuenca del río Rímac 2010

La concentración de coliformes fecales superaba más de cinco mil veces los límites permitidos para agua de riego en hortalizas, resultando en que más del 30% de estas, no eran aptas para el consumo humano (Moscoso et. al, 2007).



..... **Foto 3. Vista de la descarga de desagües en La Chira**
..... **Foto 4. Vista satelital de la contaminación fecal de la Bahía de Lima**

2.6. La capacidad de autodepuración de los cuerpos de agua

Cuando se trató el tema del reuso indirecto, se explicó que muchas aguas residuales son descargadas a los cuerpos de agua naturales como ríos, lagos y mar, generando una contaminación de dicho cuerpo que puede afectar su uso posterior en diversas actividades. Sin embargo, existe la percepción de que apenas las aguas son vertidas a estos cuerpos naturales, automáticamente son depuradas y por tanto se pueden usar sin mayores problemas. Es necesario entender que la capacidad de autodepuración de los cuerpos de agua es finita, y no se puede esperar que la naturaleza pueda asimilar en forma ilimitada todo tipo y cantidad de contaminantes.

La autodepuración es el proceso complejo de recuperación de un cuerpo de agua después de un episodio de contaminación. En este proceso los compuestos orgánicos son diluidos, sedimentados y transformados progresivamente por la descomposición bioquímica, mientras que los químicos pueden precipitar según el



..... **Foto 5. Río torrencioso muy oxigenado**

caso, recuperando así la estabilidad del cuerpo de agua. En una primera instancia, se tiene que el vertimiento sufre una dilución que permite reducir las concentraciones de los contaminantes. Paralelamente se produce una sedimentación de las partículas y sólidos sedimentables. Luego en el recorrido de los ríos o el esparcimiento en lagos y mares estas aguas residuales pasan por un proceso de degradación biológica de los compuestos orgánicos disueltos, favorecida por la capacidad de oxigenación del cuerpo de agua. También se pueden producir procesos de precipitación de ciertos compuestos químicos y metales pesados, que también contribuye a reducir las cargas contaminantes. Todos estos procesos van a depender de muchos factores, tales como los caudales y volúmenes de dilución, la capacidad de oxigenación según el régimen torrencioso o calmo de las aguas y de la temperatura del agua que determina la actividad biológica, entre otros.

En suma, todo cuerpo de agua tiene una capacidad de autodepuración, pero esta no será igual en un riachuelo que un gran río caudaloso como el Amazonas, ni tampoco será igual en la época de avenida y de estiaje. Por ello resulta difícil y hasta cierto punto riesgoso supeditar la depuración total de las aguas residuales a la capacidad de autodepuración de un cuerpo receptor. Es más seguro establecer estándares de calidad de agua (ECA) según el tipo de uso que tienen estos cuerpos de agua, y que finalmente determinaran el nivel de tratamiento de las aguas que se viertan en ellos. El uso del 100% de las aguas residuales en el riego agrícola libera de algún modo de este requisito establecido para los vertimientos, y en ese caso dependerá de las exigencias de cada tipo de reuso, ya que tampoco es igual regar hortalizas que árboles.

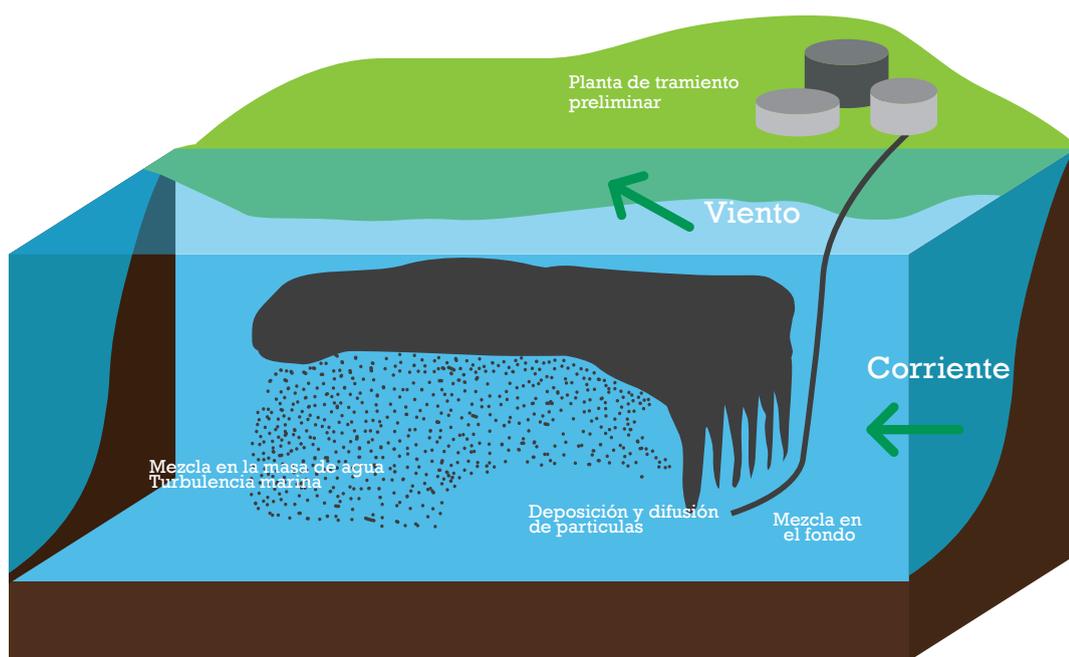


Figura 10. Proceso de dilución y dispersión en un emisario submarino

Una situación muy especial es la que ocurre en la descarga de las aguas residuales pre-tratadas que son descargadas al mar mediante un emisario submarino. La retención previa de los sólidos sedimentables evita la acumulación de lodos en la zona de vertimiento. La liberación del flujo de agua residual no salina en la masa marina salina y a una profundidad de al menos 10 metros genera una dilución forzada porque el agua dulce tiende a flotar por su menor densidad, y en el ascenso alcanzaría una dilución de hasta 100 a uno, por tanto las concentraciones de materia orgánica se reducen a la centésima parte, proceso que sustenta la vigencia de los emisarios submarinos en muchas partes del mundo (figura 10).

2.7. Estrategias para mejorar la calidad del agua para riego

El vertimiento de desagües domésticos sin tratamiento a los ríos ha determinado que en muchas zonas agrícolas se utilicen aguas contaminadas para el riego de cultivos de hortalizas, condición a la que se enfrentan la mayoría de agricultores urbanos y peri-urbanos de las ciudades más grandes. Este círculo vicioso se cierra al ofertar a estas mismas ciudades estos alimentos contaminados producidos, que finalmente generan serios problemas de salud en la población más pobre y vulnerable. El Instituto del Agua de la ONU estima que existen a nivel mundial 20 millones de hectáreas, y a nivel de América Latina 500,000 hectáreas regadas con aguas que contienen aguas residuales (UN-Water 2013).

Se esperaría que este problema se resuelva definitivamente cuando todas las aguas residuales generadas se logren tratar, pero este proceso es aún lento en el país, era necesario buscar alternativas inmediatas que reduzcan la contaminación del agua utilizada en el riego de productos agrícolas, especialmente de hortalizas de consumo crudo. Es por ello que el Programa de Cosecha Urbana del Centro Internacional de la Papa (CIP) y la Comunidad de Madrid-CESAL entre 2005 y 2007 evaluaron la calidad de agua utilizada en las zonas agrícolas del Cono Este de Lima, confirmando que el agua de riego de esta importante zona agrícola estaba fuertemente contaminada con parásitos y coliformes fecales, como se puede apreciar en la figura 11. La concentración de coliformes fecales superaba más de cinco mil veces los límites permitidos para agua de regadío en hortalizas. Resultando en que más del 30% de hortalizas no eran aptas para el consumo humano (Moscoso et. al, 2007).

Es así que la implementación de sistemas de tratamiento del agua de río basados en el uso de reservorios (foto 6) permitió promover una agricultura regada con agua de buena calidad, sustentando una producción de hortalizas sanas que no afecte la salud de los consumidores.

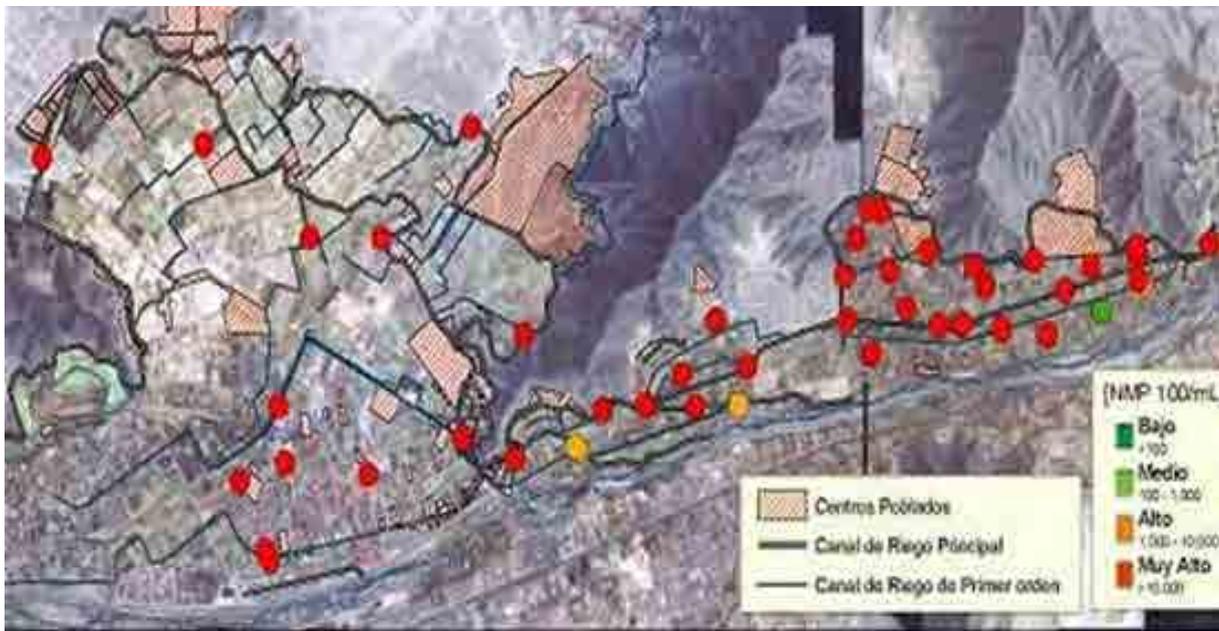


Figura 11. Niveles de coliformes termo tolerantes en diferentes puntos del sistema de riego de la Zona Agrícola del Cono Este de Lima

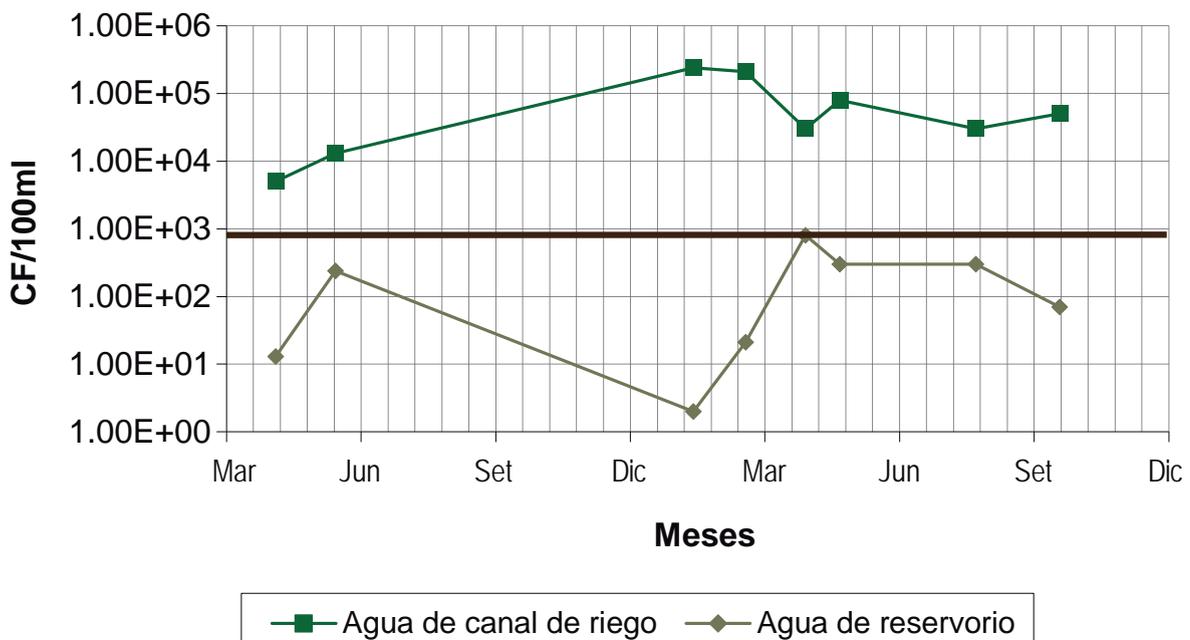


Figura 12. Concentración de coliformes fecales en aguas del canal y reservorio de Carapongo (Fuente: Moscoso et.al. 2007).

El almacenamiento del agua del río por más de 10 días permitió remover totalmente los parásitos y reducir los coliformes fecales hasta los niveles estipulados por los ECA para el riego de cultivos de tallo corto como hortalizas (figura 12).

Además estos reservorios también permitieron mejorar la productividad y rentabilidad en los cultivos de hortalizas, como compensación del terreno asignado y la inversión realizada para instalar dichos reservorios. A ello se sumaron las ganancias adicionales generadas por la producción de peces criados en dichos reservorios (foto 7), que permitieron mejorar los rendimientos obtenidos y justificar mejor la inversión para la implementación de nuevos reservorios.

La difusión y promoción del sistema de reservorios se realizó luego de verificar los resultados de la primera experiencia. Esta acción se efectuó a través de actividades como días de campo y la elaboración materiales.

La venta promocional de tilapia viva y de platos preparados permitió una participación masiva de los agricultores de la zona y funcionarios del sector. Varios reservorios de mayor escala fueron implementados, sin embargo es necesario continuar apoyando a los productores para la comercialización de sus productos en mercados que reconozcan la calidad de sus productos con un pago justo.



Foto 6. Reservorio de Carapongo

Foto 7. Crianza de peces en el reservorio de Carapongo





| 03



CARACTERÍSTICAS DEL USO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN EL PERÚ

3.1. Breve reseña histórica del uso de las aguas residuales

Las primeras experiencias de uso de aguas residuales tratadas en el Perú aparecen en la década del 60 cuando se implementa el sistema de Lagunas de Estabilización de San Juan de Miraflores al sur de Lima (foto 8). Se trataba de agricultores migrantes asentados en zonas cercanas a la planta y que vieron la posibilidad de producir en terrenos desérticos sin ninguna utilidad con un agua disponible permanentemente. Estos eran agricultores precarios, sin títulos de propiedad, sin organización alguna; desarrollando una actividad totalmente informal sin ningún control de riesgos sanitarios, aun cuando muchos de los productos que cultivaban eran hortalizas de tallo corto y de consumo crudo.



Foto 8. Zona agrícola y forestal de San Juan de Miraflores

Luego aparecieron nuevas experiencias en otras ciudades importantes como Tacna, Chiclayo, Trujillo y Piura, con una caracterización muy similar a la descrita en Lima. Sin embargo, conforme fueron ganando experiencia y conocimientos del mercado, estos productores precarios se fueron organizando al igual que el resto de agricultores del país, bajo la forma de juntas de regantes o usuarios de las zonas agrícolas creadas, incluso asumiendo la denominación de “Juntas de Regantes de Aguas Residuales”. Actualmente la organización más importante es la Comunidad Campesina de San Jose en Chiclayo, con 1,600 comuneros que manejan 7,000 ha agrícolas, aun

cuando solo 3,000 ha tienen el agua asegurada, y de estas, 600 ha se riegan con aguas residuales tratadas.



Fotos 9. Riego de áreas verdes del Club de Golf Los Incas (Lima)

Si bien la agricultura es la actividad más importante del uso de las aguas residuales, en los últimos tiempos han aparecido nuevos usuarios que utilizan las aguas residuales tratadas para el riego de áreas verdes urbanas. Se trata de algunas instituciones privadas como clubes, colegios y cementerios así como de municipios que han logrado sustituir el uso del agua potable por agua

residual tratada, reduciendo así los costos de riego al 30% de los que inicialmente tenían (foto 9).

Es importante indicar que, además de un avance significativo en el aspecto organizativo, los agricultores han desarrollado nuevas alternativas de producción que les ofrecen mejores rendimientos con menor cantidad de agua, para generar productos con mejores precios y menores riesgos sanitarios. En la actualidad hay organizaciones de agricultores que usan más eficientemente el agua residual, que han alcanzado en muchos casos un nivel de agricultura comercial que les permite una condición económica bastante aceptable.



Foto 10. Entorno Verde de Tacna

Una de las últimas experiencias exitosas la lidera la Municipalidad Provincial de Tacna, que ha concluido la implementación de las dos primeras etapas del Entorno Verde de Tacna en 110 hectáreas desérticas abastecidas con los efluentes de la planta de lagunas de estabilización de Magollo. Como se observa en la foto 10, esta área verde está constituida por especies forestales, frutales y césped, que sirven como esparcimiento a la población de la ciudad y que aseguran un manejo sostenible con la producción esperada.

3.2. La situación actual del tratamiento de las aguas residuales en el Perú

Para conocer la situación actual del uso de las aguas residuales se han evaluado 541 distritos/ciudades con más de 10,000 habitantes en las 25 regiones del país, seleccionadas por sus poblaciones proyectadas a junio de 2015. La producción actual de aguas residuales se ha estimado teniendo en cuenta la tasa nacional de producción de 162 l/día.habitante y las tasas de cobertura urbana de saneamiento de cada región, reportadas por el MVCS para el 2014. Se puede deducir que el Perú estaría produciendo 42.5 m³/s de aguas residuales domésticas, siendo el aporte de la costa el 66% con 27.9 m³/s. A diferencia de la selva, que es la zona con más baja cobertura, esta sólo representa el 10% del caudal a nivel nacional, aún al representar como población al 13% de total de nuestro país. Las regiones de Lima y Callao que forman la ciudad capital generan el 18.3 m³/s que representan el 43% del total nacional. Le siguen La Libertad, Piura y Lambayeque que generan más de 2 m³/s cada una y juntas alcanzan los 6.9 m³/s. Luego están

Cajamarca, Arequipa, Junín, Cuzco y Puno con 8.8 m³/s. Las regiones con menor producción de aguas residuales son Tumbes, Amazonas, Ucayali, Pasco, Madre de Dios y Moquegua que juntas solo producen 1,7 m³/s.

La cobertura nacional de tratamiento de aguas residuales domésticas sería de 72%, valor que puede ser considerado relativamente alto debido a que en la costa llega al 95%. Sin embargo esta cobertura es bastante baja en la sierra y selva en donde solo alcanzan 25 y 32% del agua residual generada en estas zonas. Existen dos regiones Lima/Callao y Lambayeque que arrojan coberturas mayores a 100% y que sesgan un poco el promedio nacional, especialmente Lima/Callao que tiene una capacidad de 19.1 m³/s cuando solo produce 18.3 m³/s, por tanto, sin incluir Lima y Callao, el resto del país tiene una cobertura de tratamiento de aguas residuales de 48%.

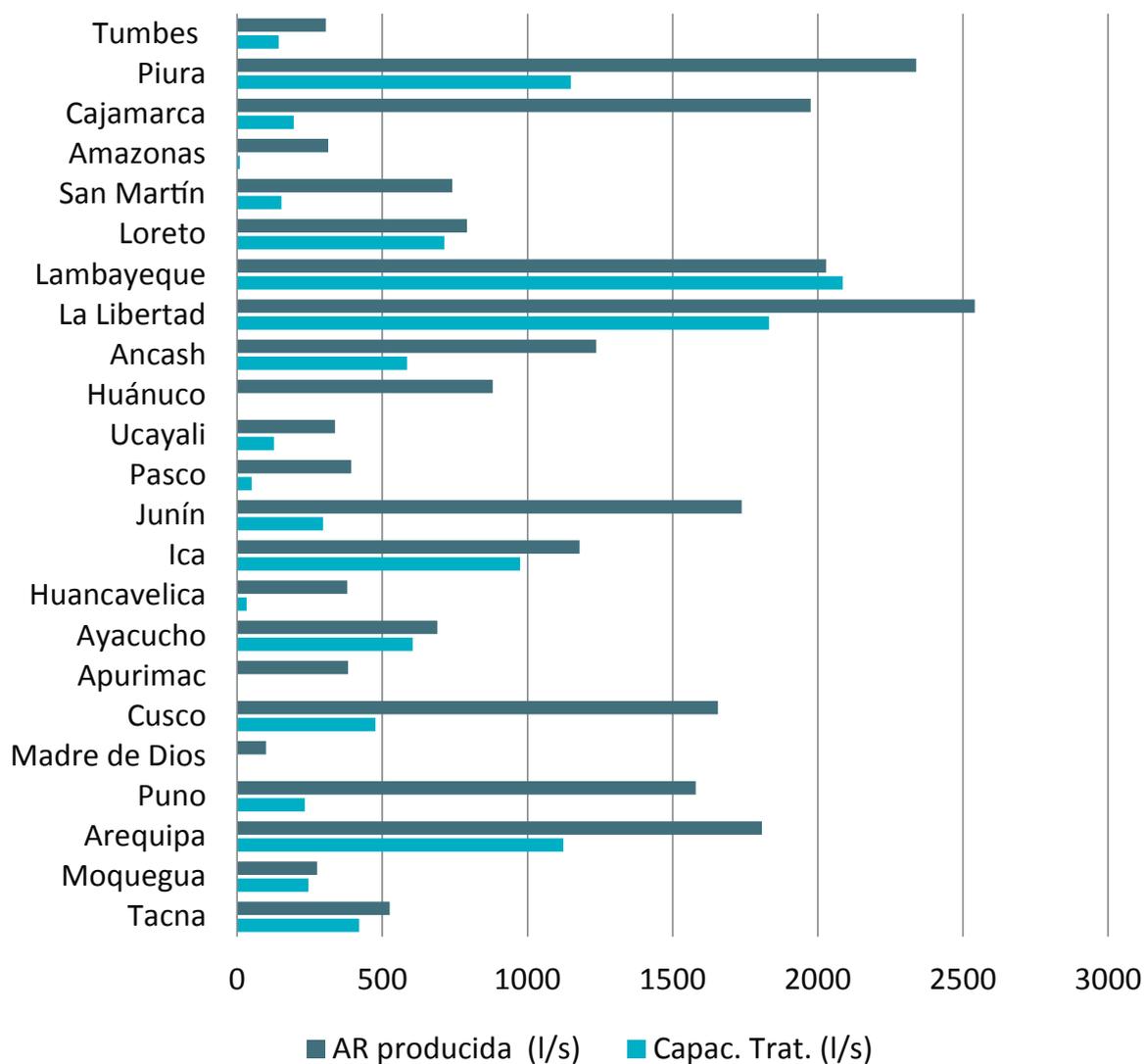


Figura 13. Producción actual de aguas residuales y capacidad de tratamiento en las regiones del Perú (sin Lima y Callao) (Fuentes: SUNASS - 2015, Google Maps - 2015 y elaboración propia).

Los datos procesados también han permitido deducir que en los 541 distritos evaluados existen 336 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), lo que implicaría que el 62% de las ciudades/distritos tienen tratamiento. Existen casos en los que una ciudad o distrito cuenta con más de una PTAR, siendo tal que, las ciudades distritales que no cuentan con estas plantas, asciende a un total de 258, cifra que equivale al 48% de las ciudades.

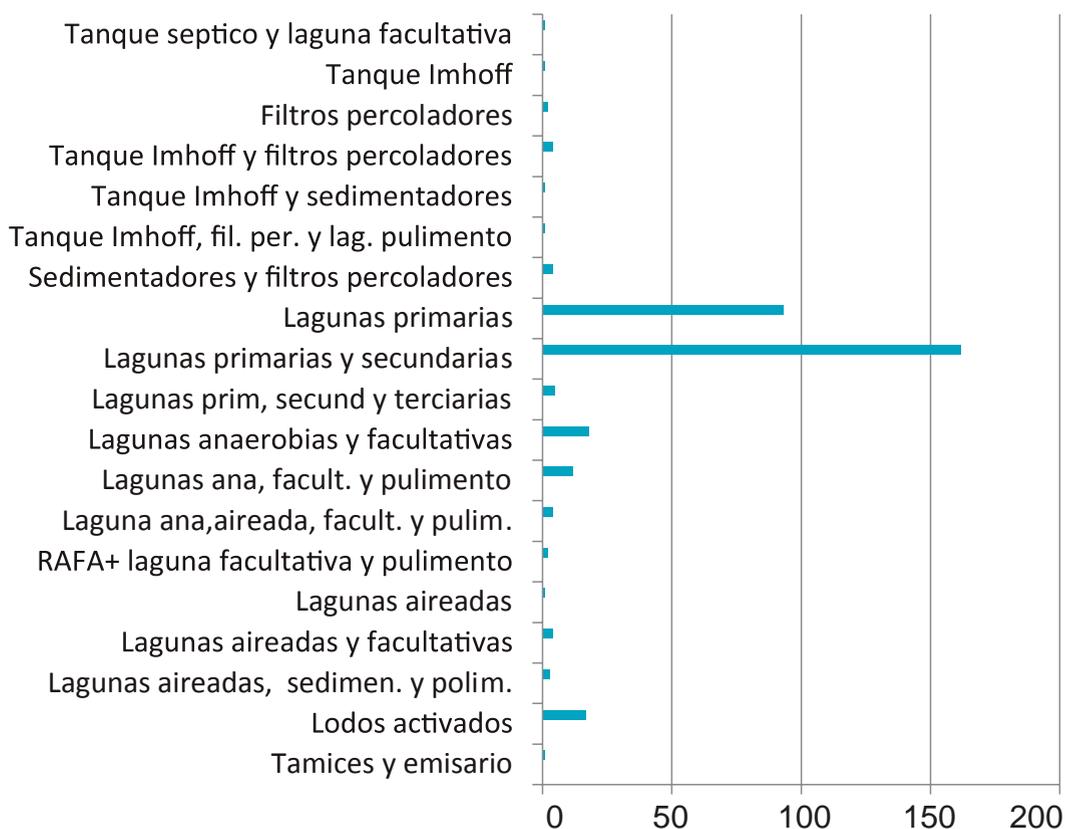
Además de Lima y Callao, las regiones con mayor capacidad de tratamiento serían Lambayeque, La Libertad, Piura, Arequipa e Ica, tal como se aprecia en la figura 13. En contraposición existen regiones en donde no hay tratamiento de aguas residuales, como es el caso de Huánuco, Apurímac y Madre de Dios. Le siguen muy de cerca Amazonas y Huancavelica que solo llegan al 3 y 8% respectivamente. Por último, regiones como Lambayeque, La Libertad y Lima que ostentan altas coberturas en la costa, muestran un servicio casi nulo en la zona serrana de las mismas. En cambio, en Cajamarca, se tiene una cobertura de 35% en la selva, mientras que solo alcanza el 1% en la zona serrana que ocupa la mayor parte de su territorio.

3.3. Las tecnologías de tratamiento utilizadas

La tecnología utilizada en el tratamiento de las aguas residuales define la calidad sanitaria del efluente y por tanto las posibilidades y tipo de reuso. El cuadro 1 y la figura 14 muestran las tecnologías utilizadas en las plantas identificadas en el Perú, que como se puede observar en realidad son combinaciones de diferentes procesos tecnológicos de tratamiento. Se puede apreciar que el 73% de las PTAR incluyen en su proceso de tratamiento algún tipo de laguna, desde solo una laguna facultativa primaria, dos o más facultativas, lagunas anaerobias con facultativas y de pulimento, hasta lagunas aireadas con facultativas y de pulimento. El sistema más importante es la combinación de lagunas facultativas primarias y secundarias utilizado en el 48% de las PTAR que manejan el 25% del caudal tratado, seguido por las lagunas primarias que constituyen otro 28% de las PTAR, aun cuando solo tratan el 5% del caudal nacional. Si bien el proceso de lodos activados solo representa el 5% de las PTAR, ya maneja el 9% del agua tratada y representa una tecnología que se está incorporando aceleradamente sobre todo en las ciudades más grandes.

Tecnología	No PTAR	Caudal (l/s)	% caudal
Tanque septico y laguna facultativa	1	Sin informe	Sin informe
Tanque Imhoff	1	10	0.1
Filtros percoladores	2	12	0.1
Tanque Imhoff y filtros percoladores	4	1,396	8.2

Tanque Imhoff y sedimentadores	1	32	0.2
Tanque Imhoff, fil. per. y lag. pulimento	1	536	3.2
Sedimentadores y filtros percoladores	4	1,116	6.6
Lagunas primarias	93	847	5.0
Lagunas primarias y secundarias	162	4,176	24.6
Lagunas prim, secund y terciarias	5	497	2.9
Lagunas anaerobias y facultativas	18	1,517	8.9
Lagunas ana, facult. y pulimento	12	493	2.9
Laguna ana,aireada, facult. y pulim.	4	1,050	6.2
RAFA+ laguna facultativa y pulimento	2	23	0.1
Lagunas aireadas	1	15	0.1
Lagunas aireadas y facultativas	4	1,145	6.7
Lagunas aireadas, sedimen. y polim.	3	2,679	15.8
Lodos activados	17	1,462	8.6
Total sin tamices y emisario	335	17,006	100.0/54.8
Tamices y emisario	1	14,000	45.2
Total con tamices y emisario	336	31,006	100.0



Cuadro 1 y figura 14. Combinaciones tecnológicas en 336 PTAR existentes en el Perú Fuente: SUNASS (2015), Google Maps (2015) y elaboración propia

La combinación de lagunas aireadas, de sedimentación y pulimento, es usada en las tres plantas limeñas más grandes del país. Estas manejan el 16% de la capacidad instalada. Esta combinación se encuentra en desuso, debido a sus altos costos de inversión, operación y mantenimiento. En contraposición se observa una creciente incorporación de sistemas de lagunas anaerobias con facultativas y de pulimento, que actualmente se utilizan en 34 plantas que manejan casi el 12% del agua tratada. Al parecer, esta combinación muestra una mayor capacidad de sostenibilidad, sin embargo, se debe tener presente que las lagunas anaerobias, generan un elevado volumen de gases de efecto invernadero, es por ello que se está promoviendo el recubrimiento de estas lagunas, para quemar el gas producido, y –en el mejor de los casos- ser utilizado como un combustible alternativo.



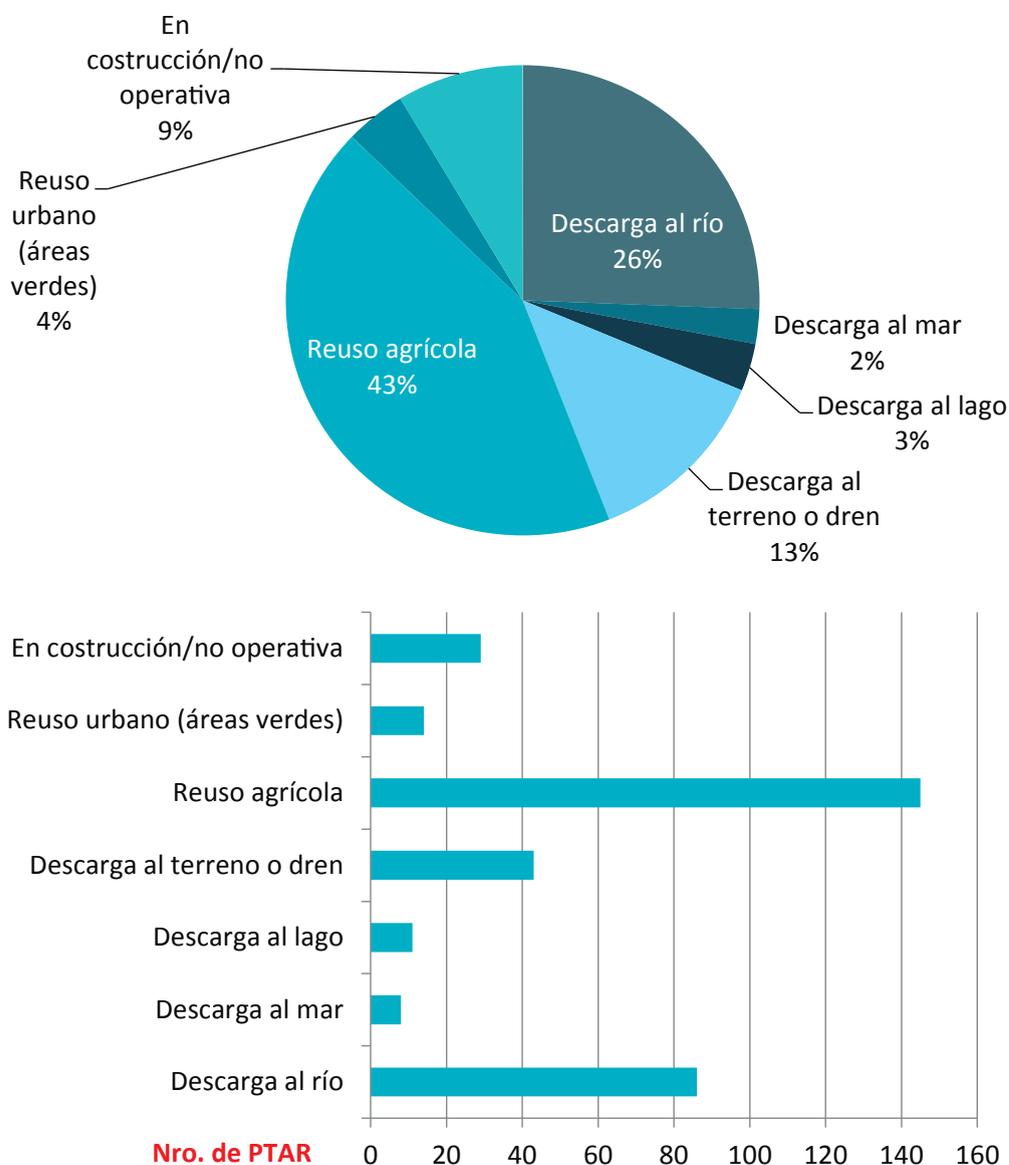
Foto 11. Laguna anaeróbica cubierta

Desde el punto de vista del reuso, vemos que el uso preferente de lagunas de estabilización en sus diferentes combinaciones permite alcanzar por lo menos 10 días de periodo de retención hidráulica, lo que permite eliminar parásitos nemátodos humanos y cumplir con el requerimiento para el riego restringido a cultivos de tallo alto, forrajes, industriales y forestales, que son precisamente las categorías más usadas en la actividad agrícola peruana regada con aguas residuales. Los reportes de coliformes termo tolerantes están en el orden de $1.0E+4$ y $1.0E+5$, valores que también son aceptables para el tipo de cultivos que se están regando.

Es preocupante el uso de tecnologías como lodos activados y otras que mantienen cortos periodos de retención cuando se destinan al riego de áreas verdes urbanas de contacto primario (parques públicos), ya que en esos casos se demanda una calidad sanitaria equivalente a menos de un huevo de nemátodos por litro y menos de 1,000 CTT/100 ml. Es cierto que algunas de estas PTAR incluyen desinfección mediante cloración, pero este proceso no es efectivo para remover parásitos.

3.4. La disposición final de los efluentes

La información suministrada por el estudio de la SUNASS (2015) y la evaluación de las imágenes satelitales de cada zona donde se encuentran ubicadas las PTAR, han permitido identificar el tipo de disposición final que actualmente reciben sus efluentes, y que se muestra en la figura 15.



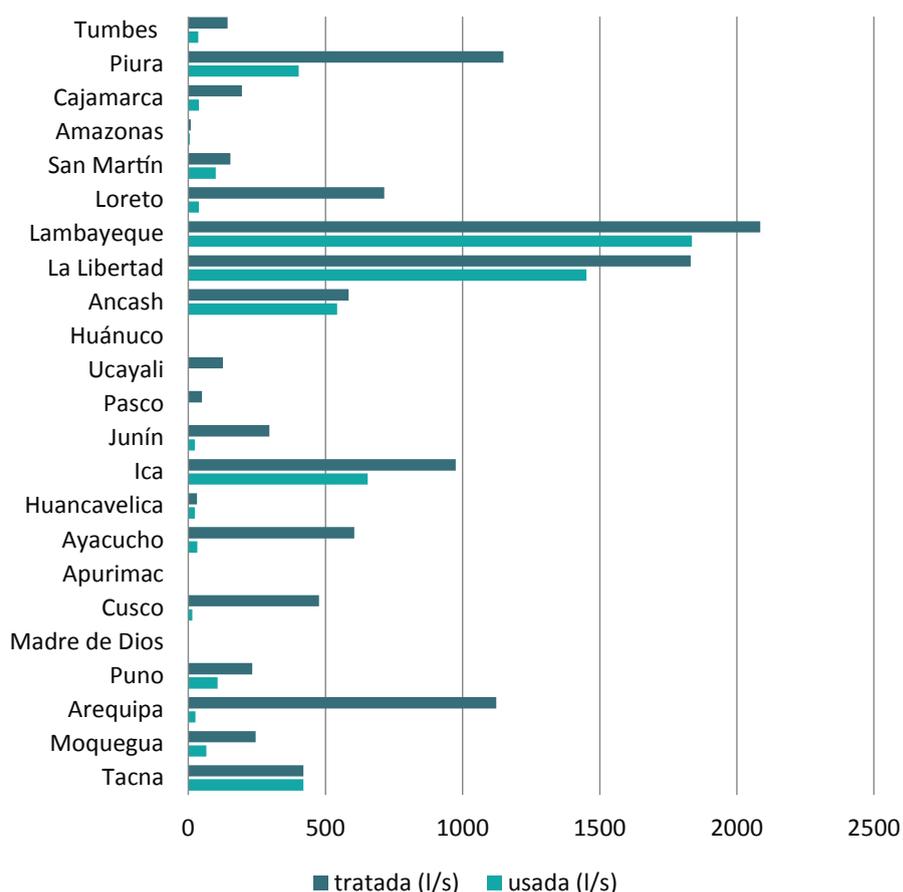
Fuente: SUNASS (2015), Google Maps (2015) y elaboración propia.

Figura 15. Disposición final de las PTAR evaluadas en el Perú

Aun cuando solo 8 PTAR descargan sus efluentes al mar (2% de las PTAR), ellas manejan casi el 48% del agua residual tratada ($14.3 \text{ m}^3/\text{s}$), debido a la mega planta La Taboada que descarga $14 \text{ m}^3/\text{s}$ de los desagües de Lima. Asimismo 86 PTAR descargan a ríos casi $6.4 \text{ m}^3/\text{s}$, 43 plantas a los terrenos adyacentes (arenales) o drenes agrícolas ($1.3 \text{ m}^3/\text{s}$) y otras 11 vierten al Lago Titicaca ($0.09 \text{ m}^3/\text{s}$), lo que demuestra que estas 105 PTAR fueron concebidas exclusivamente para descargar sus efluentes en un cuerpo receptor y no se pensó en el reuso.

3.5. Los efluentes utilizados para riego en las diferentes regiones

Es interesante ver que 7.8 m³/s de los efluentes generados por 145 PTAR identificadas (43%) si son utilizados para el riego agrícola y otras 14 plantas (4%) ofrecen 0.2 m³/s para el riego de áreas verdes urbanas. Como se observa en la figura 13, el 43% de las PTAR existentes entregan sus efluentes para el riego agrícola y otro 4% al riego de áreas verdes urbanas, lo que determina que el 26% de los efluentes de las plantas se utilizan actualmente para el riego. Luego de conocer el caudal de efluentes de las PTAR que son destinados al riego agrícola y de áreas verdes, es preciso saber lo que pasa en cada región, y por ello la figura 16 muestra los caudales destinados al reuso en cada región de costa, sierra y selva. De los 7.8 m³/s tratados que actualmente se reusan en el Perú, el 95% se utiliza en la costa, mientras que en la sierra y selva solo se utilizan 0.4 m³/s aun cuando tienen capacidad para tratar casi 4 m³/s.



Fuente: SUNASS (2015), Google Maps (2015) y elaboración propia.

Figura 16. Comparación de los caudales tratados y de los efluentes utilizados para el riego en las regiones del Perú (sin Lima y Callao)

Lima/Callao, Lambayeque y La Libertad son las regiones que usan el mayor volumen de agua residual tratada con 5.2 m³/s, que representan el 67% de las usadas en todo el país. Le siguen Ica, Ancash (costa), Tacna y Piura con caudales que fluctúan entre 400 y 650 l/s. Regiones como Huánuco, Ucayali, Pasco, Apurímac y Madre de Dios no utilizan sus aguas residuales. Le siguen de cerca Tumbes, Cajamarca, Amazonas, Loreto, Junín, Huancavelica, Cusco y Arequipa que juntas solo llegan al 3% de las aguas reusadas en el Perú.

El caso de Lima y Callao es muy especial porque la PTAR La Taboada no permite reusar los 14 m³/s que trata, ya que solo realiza un tratamiento preliminar avanzado para disponerlos en el mar a través de un emisario submarino. Si bien Lima utiliza el 25% de las aguas tratadas del país, solo representa el 10% del caudal que trata, y a diferencia de las demás regiones, son utilizadas principalmente para riego de áreas verdes.

La figura 14 también permite comparar los caudales tratados y los utilizados en el riego en las diferentes regiones, en ella se observa que Tacna es la única región que utiliza el 100% de sus aguas tratadas y en la costa de Ancash se llega al 93%. Se espera que regiones como Piura, Loreto, Ayacucho, Cusco y Arequipa, que tienen una alta cobertura de tratamiento puedan promover el reuso de sus aguas residuales tratadas. Arequipa debe cambiar pronto esta situación cuando se utilicen sus aguas residuales en Cerro Verde y en la zona agrícola donde se instale la nueva PTAR. Evidentemente regiones como Amazonas, Huánuco, Apurímac y Madre de Dios deberán primero implementar sus sistemas de tratamiento, antes de pensar en reusar sus aguas residuales.

En suma, casi 7.8 m³/s de efluentes generados por 159 de las 336 PTAR instaladas en el país son utilizados para el riego agrícola y de áreas verdes, lo que equivale al 25% del agua tratada. El 95% del reuso se realiza en la costa, mientras que en la sierra y selva solo se utilizan 0.4 m³/s aun cuando tienen capacidad para tratar casi 4 m³/s.

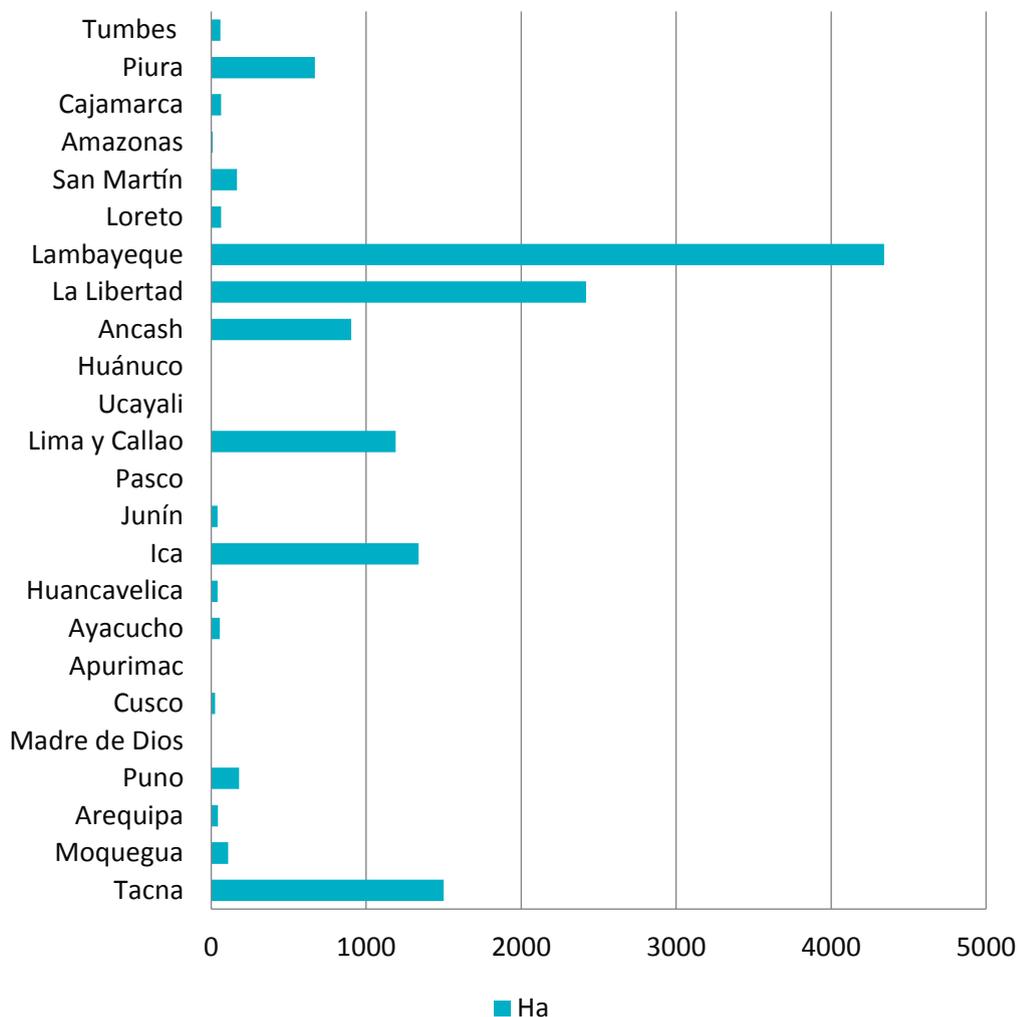
3.6. Las áreas regadas con aguas residuales tratadas

Los datos de las áreas de riego asignadas a los 159 casos provienen de la información obtenida en las visitas de campo de las zonas de reuso más importantes y en otros casos del cálculo efectuado a partir del caudal de la PTAR y la dotación de agua utilizada en algunos casos estudiados, que en promedio se asume es de 0.6 l/s.ha. En algunos casos esta área ha sido tomada directamente de algunas referencias, como son las zonas agrícolas visitadas en los estudios de caso y algunos casos de Lima determinados por SERPAR (2015). Es así que se ha estimado que en el Perú existen alrededor de 13,200 ha agrícolas y de áreas verdes, que son regadas con 7.8 m³/s de

aguas residuales tratadas, de las cuales el 12,567 ha se encuentran ubicadas en la costa (95%), mientras que en sierra y selva apenas se han identificado 311 y 341 ha, respectivamente.

Como se puede apreciar en la figura 17, Lambayeque es la región más importante en reuso porque sustenta 4,343 ha, que representan casi el 33% de las áreas estimadas a nivel nacional. Le siguen La Libertad, Tacna e Ica, que juntas tendrían el 40% de estas áreas. Lima, Ancash y Piura manejan juntas el 21% de estas áreas y el 6% restante lo hacen las demás regiones.

Lima y Callao tienen una situación especial, ya que aun cuando generan el 65% del agua residual de la costa (casi 19 m³/s), solo estarían aprovechando 1,937 l/s para regar cerca de 1,200 ha (el 9.5% de toda la costa), con preferencia de áreas verdes urbanas.



Fuente: SUNASS (2015), Google Maps (2015) y elaboración propia.

Figura 17. Áreas regadas con aguas residuales tratadas en las diferentes regiones del Perú

3.7. El potencial de reuso actual y al 2030

Los caudales tratados actualmente en las PTAR, son generados actualmente por las 541 ciudades con más de 10,000 habitantes, y los esperados de las mismas ciudades al 2030, estimados con las tasas de crecimiento regionales proyectadas por el INEI, permiten calcular el número de hectáreas que podrían ser irrigadas para agricultura o forestación, si se aplica un requerimiento de agua de 0.6 y 0.33 l/s.ha respectivamente. Estos valores corresponden al promedio de dotaciones de agua utilizados en los diferentes cultivos evaluados en costa (Chiclayo, Ica y Tacna), sierra (Huanta) y Selva (Jaén), y que más adelante se especifican por cultivos en el cuadro 8.

Potencial	Costa	Sierra	Selva	Total
Potencial con agua actualmente tratada (2015)				
Caudal (m ³ /s)	14.2	2.7	0.8	17.7
Resuso agrícola (ha)	23,667	4,500	1,333	29,500
Resuso forestal (ha)	42,600	8,100	2,400	53,100
Potencial con agua producida al 2015				
Caudal (m ³ /s)	22.0*	12.5	6.9	41.4
Resuso agrícola (ha)	36,667	20,833	11,500	69,000
Resuso forestal (ha)	66,000	37,500	20,700	124,200
Potencial con agua producida al 2030				
Caudal (m ³ /s)	23.4*	13.6	6.9	43.9
Resuso agrícola (ha)	39,000	22,667	11,500	73,167
Resuso forestal (ha)	70,200	40,800	20,700	131,700

Cuadro 2. Potencial actual y al 2030 del uso de las aguas residuales en el Perú (Fuente: INEI - 2015 y elaboración propia).

El cuadro 2 permite deducir que la reutilización de los 17.7 m³/s de aguas residuales actualmente tratadas en el país (solo incluye 6 m³/s utilizables de Lima y Callao) permitiría regar 29,500 ha agrícolas ó 53,100 ha forestales. En segundo término, si se lograra una cobertura de 100% de tratamiento de toda el agua residual generada por las ciudades con más 10,000 habitantes,

descontando 10 m³/s producidos por Lima y Callao que se descargan al mar, los 31.4 m³/s restantes producidos en el país permitirían el riego de 69,000 ha agrícolas o 124,000 ha forestadas. Por último, una proyección al 2030 muestra que se dispondría de 43.9 m³/s, esta vez deduciendo, 15 m³/s de Lima y Callao que se descargarán en el mar, por lo que la reutilización de efluentes en el Perú llegaría a las 73,200 ha agrícolas ó 131,700 ha forestales. Este incremento es poco significativo debido a que el mayor crecimiento poblacional del país seguirá siendo en Lima y Callao, ciudad en donde precisamente el crecimiento del reuso estará limitado a las 5,000 ha de áreas verdes y la poca agricultura que subsista.

De todas formas se trata de cifras muy importantes que permitirán ampliar la frontera agrícola y promover la forestación, especialmente en las extensas áreas desérticas de la costa. Sin embargo este importante potencial de reuso del país se ve limitado o frenado por una serie de problemas coyunturales, tales como:

- La informalidad del reuso, que se ha desarrollado en forma espontánea y sin mecanismos de control y vigilancia.
- La dificultad normativa y administrativa para formalizarse, lo que determina que la mayoría de los casos no hayan realizado aún este proceso.
- La dependencia de las EPS que realizan la mayor parte del tratamiento de las aguas residuales y que son ajenas al reuso.
- El desconocimiento de la calidad de los efluentes de la mayoría de las PTAR y de los requerimientos de los diferentes tipos de cultivos regados.
- La falta de conocimiento sobre el real valor de este recurso para generar una actividad rentable, sustentada en la disponibilidad del agua y el aporte de nutrientes

Es por ello que, además de fortalecer el conocimiento de esta actividad y el necesario manejo de los riesgos implícitos, también se debe propiciar el desarrollo de instrumentos políticos, normativos y administrativos que permitan formalizar la actividad ya existente y promuevan nuevas experiencias de reuso seguras y productivas.



| 04



RIESGOS A LA SALUD Y EL AMBIENTE DEL USO DE LAS AGUAS RESIDUALES

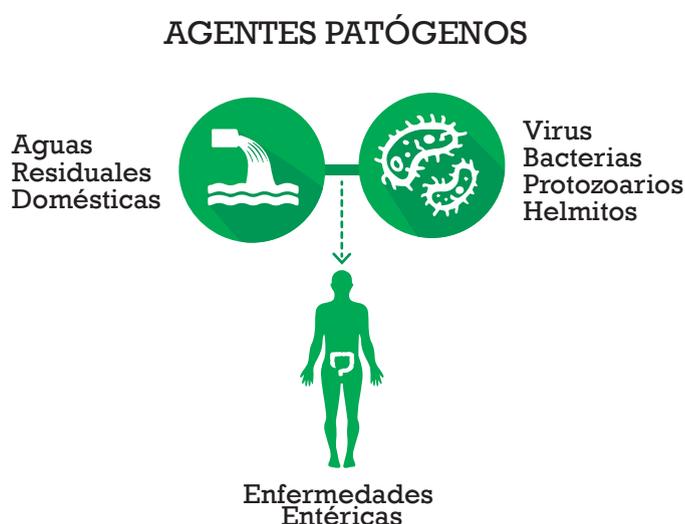
La actividad agrícola ha encontrado en las aguas residuales una valiosa fuente de agua y nutrientes, sin embargo este reuso plantea interrogantes respecto a los riesgos de descargar o usar agua contaminada con patógenos y residuos industriales. ¿En qué medida estos agentes están generando un impacto significativo en la salud y el ambiente? ¿Se está enfocando el manejo de estos riesgos de forma adecuada? ¿Son conscientes de estos riesgos los agricultores, los consumidores de los alimentos regados con esta agua y las autoridades públicas? De no ser así, ¿quiénes son los más perjudicados?

4.1. Principales riesgos a la salud y el ambiente por el uso de las aguas residuales

Es evidente que cuando las aguas residuales domésticas se vierten sin tratamiento previo a los ríos o lagos, estos cuerpos de agua suelen contaminarse con altas concentraciones de bacterias, virus y parásitos, lo cual crea un alto riesgo para salud pública. El mal manejo de las aguas residuales propaga enfermedades entéricas bacterianas, virales y parasitarias, tales como las diarreas, la tifoidea, la paratifoidea, el cólera, la hepatitis infecciosa, la amebiasis, giardiasis, etc. La mayoría

de los efluentes industriales pueden tener altas concentraciones de contaminantes químicos (según el tipo de industria) y/o materia orgánica, expresada en demanda bioquímica de oxígeno (DBO), pero su concentración de gérmenes patógenos es bastante menor que en los efluentes domésticos. Esta diferencia hace que los desechos industriales constituyan principalmente un problema ambiental, mientras que los desechos domésticos representan un problema de salud pública, los que influyen en el deterioro general de la calidad del agua.

El cuadro 3 muestra una relación de los principales agentes patógenos potencialmente presentes en las aguas residuales utilizadas en el riego agrícola y que son causantes de las principales enfermedades entéricas de la población.

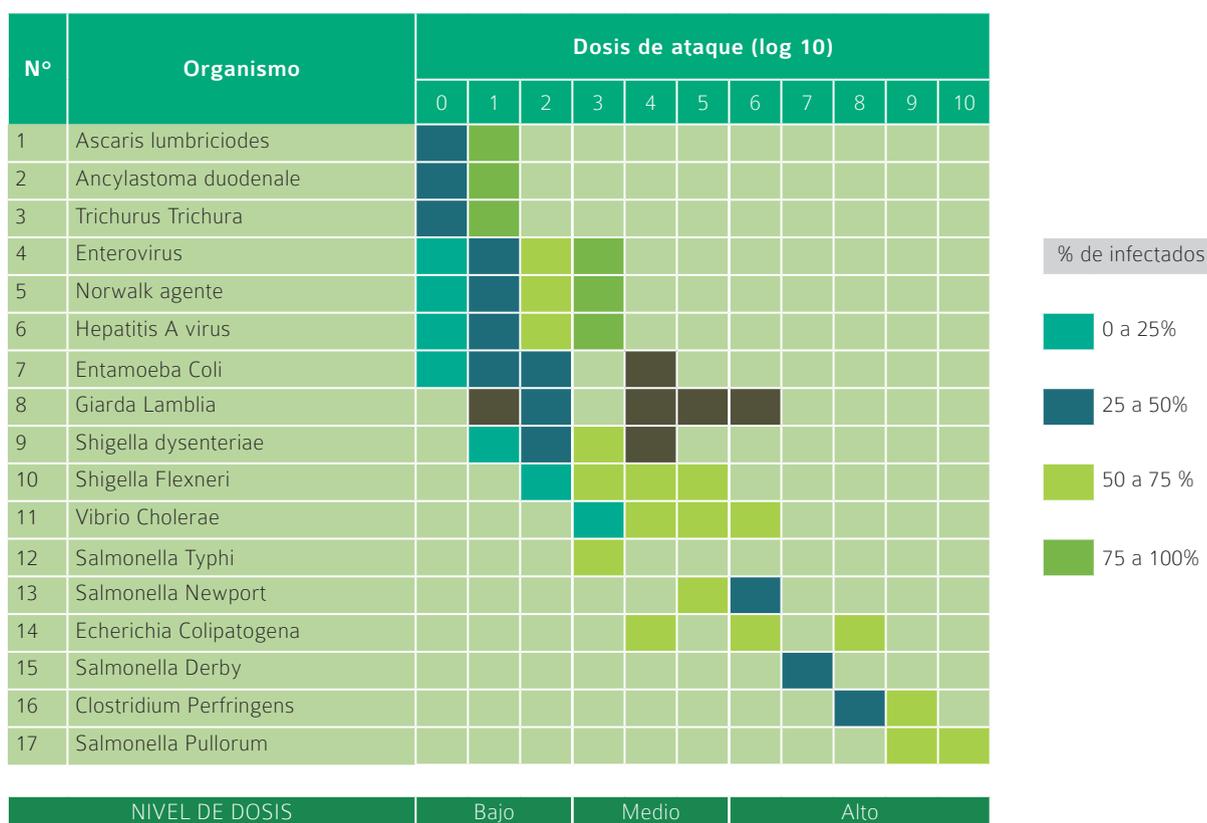


Agente patógeno	Enfermedad
Bacterias	
Shiguelia spp.	Shigelosis (disentería bacilar)
Salmonella typhi	Fiebre tifoidea
Vibro cholerae	Cólera
Escherichia coli (entero patogénico)	Gastroenteritis y septicemia, síndrome urémico hemolítico
Yersinia enterocolitica	Yersiniosis (enterocolitis)
Campylobacter jejune	Gastroenteritis , artritis reactiva
Protozoos	
Entamoeba histolytica	Amebiasis (disentería amebiana)
Giardia lamblia	Giardiasis (gastroenteritis)
Cryptosporidium	Criptosporidiosis, diarrea, fiebre
Microsporidia	Diarrea
Helmintos	
Áscaris lumbricoides	Ascariasis (infección por lombrices)
Ancylostoma (spp.)	Larva migrans cutáneo (infección por anquilostomas)
Strongloides stercoralis	Estrongiloidiasis (infección por nematodos)
Trichuris trichiura	Tricuriasis (infección por T. trichiuria)
Tenia (spp.)	Teniasis (infección por tenia)
Virus	
Enterovirus	Gastroenteritis, anomalías cardíacas, meningitis, otras
Virus de hepatitis A y E	Hepatitis infecciosa
Adenovirus	Enfermedad respiratoria, infecciones oculares, gastroenteritis
Rotavirus	Gastroenteritis
Parvovirus	Gastroenteritis

Cuadro 3. Principales agentes infecciosos presentes en las aguas residuales domésticas usadas en el riego agrícola (OPS, 2014) (Fuente OMS, 2015).

Mientras mayor sea la concentración de organismos patógenos en el agua, el suelo o en los alimentos, mayor será la probabilidad de que la población se enferme. La anterior afirmación se basa en numerosos estudios epidemiológicos que han permitido desarrollar el concepto de dosis infecciosas. El cuadro 4 presenta algunas dosis infectivas de gérmenes entéricos patógenos para los seres humanos.

Se puede deducir que mientras se requiere una dosis infectiva de *Salmonella pullorum* tan alta como de $1.0E+10$ (diez mil millones) para enfermar a más del 50% de personas que se infecten, basta solo un huevo de *Áscaris lumbricoides* para que ocurra lo mismo en la misma población. Esto significa que algunos gérmenes patógenos requieren una baja dosis infectiva, mientras que para otros debe ser más alta. Por tanto, no es necesario exigir ambientes o alimentos estériles, sino limpios. El grado de limpieza para evitar enfermedades dependerá de la virulencia del patógeno y de la susceptibilidad de los individuos atacados. Los individuos sanos y fuertes que han estado sometidos a exposiciones previas recientes y de baja concentración son poco susceptibles a enfermarse. En cambio los individuos débiles que nunca han estado sometidos a exposiciones previas sí son más susceptibles de contraer enfermedades, por este motivo, la incidencia de enfermedades infecciosas en los niños es alta.



Cuadro 4. Dosis infectiva mínima de patógenos entéricos seleccionados (reacción clínica de personas adultas a diversas dosis de ataque) (Fuente: Feachen y otros - 1983).

De lo anterior se puede concluir que una de las mejores medidas de saneamiento es reducir la concentración de patógenos en el medio ambiente, es decir, en el agua, suelo, cultivos y en los alimentos. También es importante tener en cuenta los períodos de supervivencia de los agentes patógenos, que dependen del tipo de cepa y de los factores climáticos y ambientales. El cuadro 5 presenta la persistencia de diferentes gérmenes patógenos en el agua, suelo y productos regados, así como la carga excretada por una persona enferma. Nuevamente se observa que hay

organismos como el *Campylobacter* spp. que tienen una supervivencia muy corta de solo algunos días en el ambiente externo al cuerpo humano. En cambio los huevos de *Áscaris lumbricoides* pueden sobrevivir en el medio ambiente hasta por 12 meses.

N°	Organismo	Carga excret.	Supervivencia (meses)														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	<i>Campylobacter</i> spp.	1. E+08	■														
2	<i>Giardia lamblia</i>	1. E+06	■														
3	<i>Entamoeba histolytica</i>	1. E+06	■														
4	<i>Shigella</i> spp.	1. E+08	■														
5	<i>Vibrio cholerae</i>	1. E+08	■														
6	<i>Samonella typhi</i>	1. E+09	■	■													
7	<i>Salmonella</i> spp.	1. E+09	■	■	■												
8	<i>Echerichia coli</i> patogena	1. E+09	■	■	■												
9	Enteovirusw	1. E+08	■	■	■												
10	Hepatitis A virus	1. E+07	■	■	■												
11	<i>Ancylostoma duodenale</i>	1. E+03	■	■	■												
12	<i>Trichurus trichura</i>	1. E+04	■	■	■	■											
13	<i>Taenia saginata</i>	1. E+05	■	■	■	■	■										
14	<i>Ascaris lumbricoides</i>	1. E+05	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Cuadro 5. Persistencia de patógenos entéricos seleccionados en aguas residuales, suelo y cultivos. Promedio estimado de supervivencia de estados infecciosos a 20-30°C. Carga excretada: número promedio de organismos/g de heces. (Fuente: Feachem y otros - 1983).

El conocimiento de los patrones de virulencia y supervivencia de los agentes patógenos excretados permite evaluar -hasta cierto punto- el riesgo de transmisión de enfermedades por el uso de aguas residuales. Con este criterio basado en aspectos microbiológicos, se pretende eliminar microorganismos patógenos para garantizar la ausencia de riesgos potenciales. Así, por ejemplo, hemos observado que el *Áscaris lumbricoides* puede sobrevivir en el medio ambiente muchos meses y al mismo tiempo basta con ingerir un solo huevo para generar la parasitosis. Es por ello que resulta que el riesgo potencial es elevado. En términos generales se ha establecido que el riesgo potencial de los nemátodos es elevado, por tanto se considera el principal problema de salud pública en el manejo de las aguas residuales. Las bacterias y virus entéricos muestran en general riesgos potenciales menores.

Riesgos Sanitarios



Tipo de patógeno infección

- **Nemátodos intestinales**
- **Bacterias**
- **Virus**
- **Tremátodos y céstodos**



Frecuencia excesiva de infección o enfermedad

- **Elevada**
- **Menor**
- **Mínima**
- **De elevada a nula**

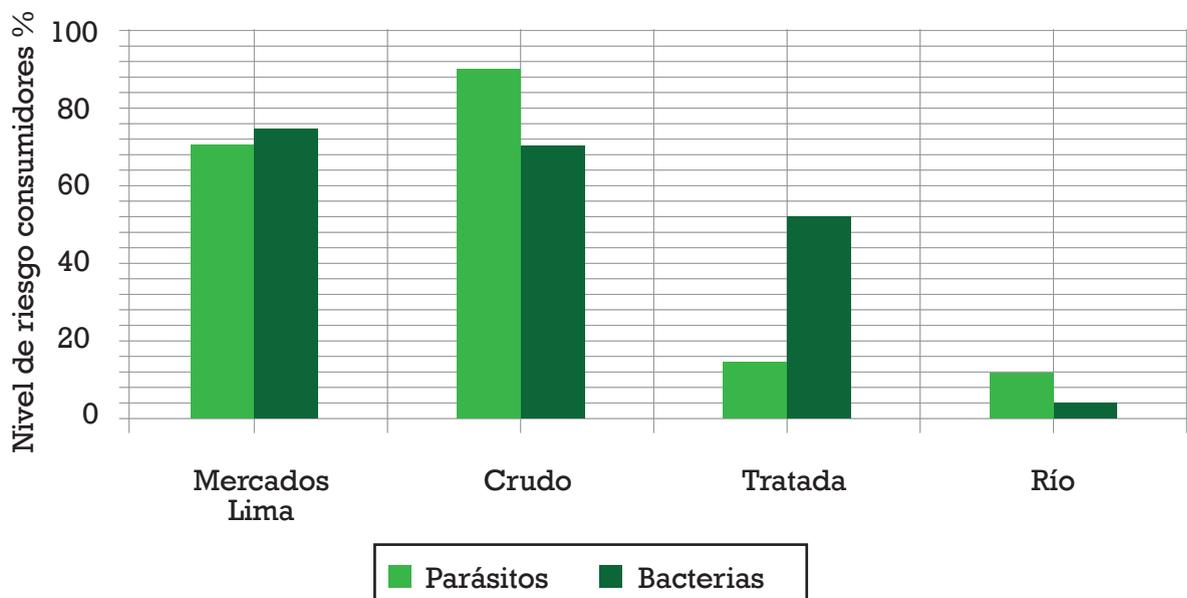


Figura 18. Riesgo potencial por consumo de productos irrigados con diferentes calidades de agua residual en Lima

Bajo este criterio microbiológico de riesgo potencial se realizaron una serie de investigaciones destinadas a evaluar la calidad de los productos agrícolas regados con aguas residuales. En 1990 el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) realizó una amplia evaluación de la calidad de hortalizas cultivadas en el Callao con aguas residuales crudas (sin tratar), con aguas tratadas en las lagunas de San Juan de Miraflores y en una zona agrícola regada con agua del río Lurín no contaminada (testigo). La figura 18 muestra los resultados de esta investigación.

Los resultados indican que el 85% de las hortalizas regadas con aguas crudas estaban contaminadas con parásitos humanos y el 69% con bacterias patógenas. El uso de aguas residuales tratadas en lagunas de estabilización permitía reducir a 16% la contaminación parasitaria y a 52% la de bacterias patógenas. La reducción en bacterias fue solo de 17%, ya que si bien se regaba con aguas tratadas, las lagunas no alcanzaban una alta eficiencia por una sobrecarga de crudo. En los parásitos sí se lograba una remoción importante ya que los periodos de retención hidráulica eran mayores de 10 días. Tampoco se esperaba con el tratamiento eliminar totalmente los patógenos, ya que el agua no es la única fuente de contaminación. Esta aseveración fue confirmada cuando se evaluaron las muestras de hortalizas de los mercados de Lima, en donde llegan productos de diferentes partes del país, y que mostraron altos niveles de contaminación de parásitos, aún cuando se sabe que no son regados con aguas residuales. Es evidente que esos productos son contaminados por la excesiva manipulación que sufren desde la cosecha hasta el consumo. Queda claro también que las aguas residuales no son la única fuente de contaminación.

Estas evaluaciones demuestran que la aplicación de este criterio microbiológico no toma en cuenta el concepto epidemiológico de riesgo real o atribuible, el cual define las posibilidades reales que tiene una persona de sufrir una enfermedad a raíz de cierta exposición. Se dice que existe el riesgo potencial de que se manifieste una enfermedad cuando se detectan microorganismos patógenos en las aguas residuales o en los cultivos, aun cuando no se notifiquen casos de enfermedad causada por los mismos. Este criterio de riesgo potencial es aún más discutible, si se toma en cuenta que la calidad del agua residual utilizada en el riego no es el único factor que influye en la calidad microbiológica de los productos agrícolas, sino que además debe considerarse la falta de saneamiento básico en el lugar, hábitos de higiene y manipulación durante la cosecha (León y Moscoso, 1995).

La evaluación más acertada se basa en el riesgo atribuible o excesivo, que mide el número de enfermedades relacionadas con una vía de transmisión particular en una población, y que en nuestro caso correspondería al número de casos de algunas enfermedades relacionadas con el uso de las aguas residuales. Esto implica comparar una población expuesta al factor de riesgo con otra población "testigo". Algunos casos de la enfermedad objeto del estudio pueden ocurrir en la población testigo no expuesta debido a la transmisión por otras vías, por ejemplo, la diarrea transmitida por el consumo de agua de mala calidad. El término "riesgo relativo" denota la proporción de las estimaciones de riesgo en las poblaciones expuesta y la testigo. El "riesgo relativo" permite evaluar la relevancia del uso de aguas residuales como factor de riesgo de la enfermedad bajo estudio. Las medidas de protección de la salud que se deben tomar dependerán de la posibilidad de reducir los riesgos ocupacionales y de los consumidores. Por lo tanto, resultará más útil evaluar el número real de casos de enfermedades causadas por el uso de las aguas residuales, en cuyo caso el riesgo atribuible es el parámetro más conveniente.

Existen muchos factores para que el riesgo potencial de un agente patógeno pueda convertirse en riesgo atribuible de transmisión de enfermedades. En el caso del uso de aguas residuales en agricultura se presentará un riesgo real si se completa el proceso siguiente:

- a. Si una dosis efectiva del agente patógeno excretado llega a la parcela agrícola o si se multiplica en este lugar para alcanzar la dosis infectiva.
- b. Si la dosis infectiva llega al huésped humano.
- c. Si el huésped se infecta por absorción o ingestión.
- d. Si la infección causa enfermedad o solo fomenta su transmisión.

El uso de aguas residuales en la agricultura será de importancia para la salud pública solo si produce excesiva incidencia o prevalencia de la enfermedad. Ciertas características de un

microorganismo patógeno pueden incrementar el riesgo probable y la importancia que para la salud pública tiene el uso de aguas residuales. Al respecto, Shuval y colaboradores (1986) han señalado las siguientes características:

- Persistencia prolongada de los patógenos en el ambiente.
- Extenso período de latencia o etapa de desarrollo.
- Baja dosis infectiva.
- Poca inmunidad del huésped.
- Mínima transmisión simultánea por otras vías, tales como los alimentos, el agua y los malos hábitos de higiene personal.

Como es mostrado en la figura 19, distintos estudios epidemiológicos realizados en la población de Jerusalén, abastecida con hortalizas regadas con aguas residuales.

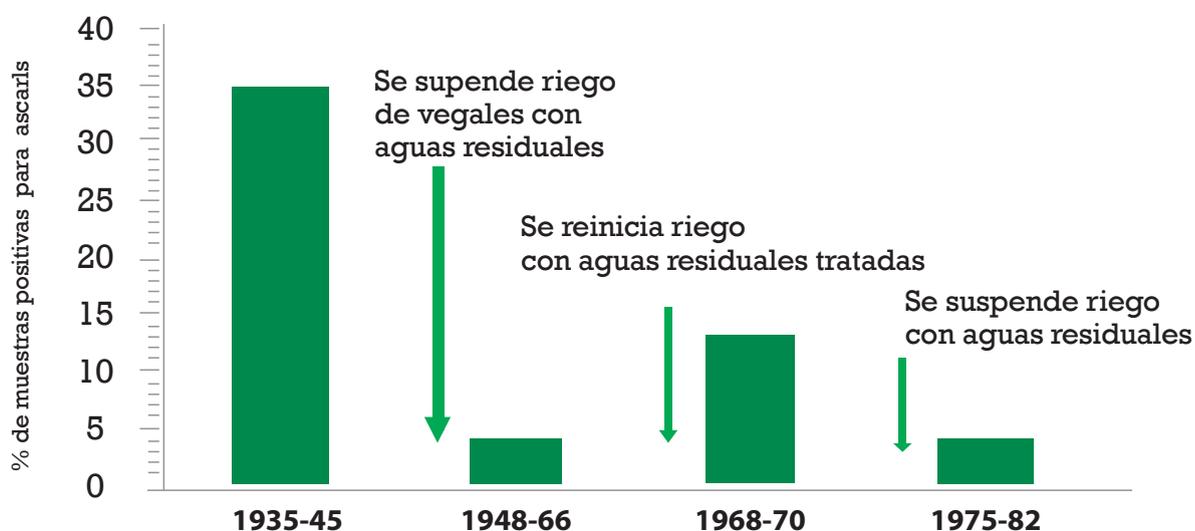


Figura 19. Presencia de Áscaris en muestras de heces en la población de Jerusalén que consume hortalizas regadas con aguas residuales (Fuente: Shuval et. al. 1986).

Entre los años 1935 y 1945 se regaron las hortalizas con aguas residuales crudas y la población consumidora mostró una incidencia de hasta 35% de muestras positivas para áscaris, lo que obligó a prohibir el uso de estas aguas, logrando así bajar la incidencia a 4% entre 1948 y 1966. Luego en el año 1968 se autorizó regar las hortalizas con aguas residuales ya tratadas y la incidencia, si bien no alcanzó los niveles iniciales, llegó al 13% de muestras positivas, lo que implicaba un incremento del 9% en las incidencias atribuidas al uso de estas aguas tratadas y por tanto se decidió prohibir definitivamente el uso del agua residual para regar hortalizas. Los reportes entre 1975 y 1982 muestran que los niveles regresaron al 4% de incidencias atribuidas

a otras fuentes de contaminación. Actualmente el 100% de las aguas residuales son reutilizadas en Israel, pero para el riego de otros cultivos que no sean hortalizas.

Shuval y colaboradores (1986) han analizado otros estudios epidemiológicos disponibles sobre el uso de aguas residuales en agricultura, y han llegado a las siguientes conclusiones:

- El riego de cultivos con aguas residuales sin tratar provoca a los consumidores y agricultores un número alto de infecciones endémicas por nematodos intestinales.
- El riego de cultivos con aguas residuales tratadas no causa un número excesivo de infecciones intestinales por nemátodos a los agricultores o consumidores.
- El cólera y la fiebre tifoidea pueden transmitirse a través del riego de verduras con aguas residuales sin tratar.
- El riego de forrajes con aguas residuales sin tratar puede infectar al ganado con *Cysticercus bovis* (el estado larval de la *Taenia saginata* del ganado bovino), pero apenas existen pruebas de un riesgo real de infección humana.
- Existen pruebas limitadas de que, en las comunidades con buenos hábitos de higiene personal, la salud de quienes habitan cerca de las áreas de riego con aguas residuales sin tratar pueda verse afectada por el contacto directo con el suelo o por el contacto con los agricultores.
- El riego por aspersión con aguas tratadas puede diseminar pequeños números de virus y bacterias, pero no se ha detectado un riesgo real de transmisión de enfermedad por esa vía. Sin embargo, se ha previsto que no se debe regar por aspersión a una distancia menor de 50 a 100 m de las casas o caminos públicos

Por otro lado, los impactos ambientales del uso de las aguas residuales en el riego agrícola estarían enfocados principalmente en los riesgos de contaminación del suelo y eventualmente del acuífero. Existen muy pocos trabajos que sustenten estos riesgos, pero un reciente estudio realizado por la Universidad Autónoma de México en los suelos del Valle de Mezquital (México) muestra resultados muy interesantes al respecto (figura 20).

Durante los años 1990 y 2009 se han estudiado los suelos del Valle de Mezquital regados con aguas residuales en diferentes periodos, desde los más antiguos que llegaban en 2009 a casi 100 años y los más recientes que en 1990 solo tenía cuatro años, además de suelos testigos no regados (Siebe, 2015). La evaluación comprendió el monitoreo de pH, materia orgánica, nutrientes y metales pesados (Pb, Cu, Cd y Zn). Es así que se pudo observar los siguientes resultados:

- El carbono orgánico, que inicialmente era de 1.2% se eleva progresivamente durante los primeros 40 años hasta 2% y se mantiene en esa concentración en los siguientes 60 años.

- El pH inicial de 7.6 se va reduciendo progresivamente durante todo el periodo de riego hasta llegar a 7.2 a los 100 años. En todo el periodo se observa una alta eficiencia de nitrógeno mayor a 75% y que el riego con aguas residuales aporta más nitrógeno que el requerido por los cultivos.

- Se observa una lixiviación de nitratos al acuífero, manifiesto en los manantiales de las partes bajas del valle, sin embargo, hay un efecto parcial de autorregulación por desnitrificación. También se observa un incremento de emisiones de óxido nitroso a la atmósfera.

- Se evidencia una acumulación progresiva de los metales pesados evaluados conforme aumenta el periodo de riego, situación que varía en función el tipo de suelo. Sin embargo aún a los 100 años no se llegan a valores por encima del límite establecido para los suelos.

- Los elementos contaminantes quedan retenidos en la materia orgánica que mantiene el suelo.

Estos estudios en el Mezquital han permitido establecer cálculos de las concentraciones de los metales en el agua de riego para alcanzar el equilibrio y de tiempos de riego que se requerirían para exceder los umbrales en el suelo y los cultivos. Queda la preocupación de que la puesta en marcha de la mega planta de tratamiento de lodos activados de la ciudad de México y el uso de sistemas de riego por goteo cause un desequilibrio del sistema, movilizandolos contaminantes retenidos en la materia orgánica.



Figura 20. Valle de Mezquital, México.

4.2. Criterios para el manejo sanitario y ambiental del uso de las aguas residuales

Luego de identificar los principales agentes contaminantes como gérmenes patógenos y otros potencialmente presentes en las aguas residuales crudas utilizadas para el riego agrícola, es

necesario establecer las rutas de exposición y los grupos humanos expuestos. En muchos casos solo se considera el riesgo de las personas que consumen los productos potencialmente contaminados, pero es necesario tener en cuenta que hay otros grupos expuestos, tanto en el proceso del tratamiento de las aguas residuales como en las actividades propias del reuso, como los agricultores. Solo identificando claramente estos grupos expuestos y las rutas de exposición, finalmente se podrán establecer medidas de prevención y control de los riesgos para estas personas. En suma, el tratamiento y uso de las aguas residuales en el riego agrícola y de áreas verdes puede constituir un riesgo potencial para los siguientes grupos expuestos:

- Los trabajadores que operan las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), en donde llegan las aguas residuales crudas.
- Los trabajadores y agricultores que realizan las actividades de riego de las áreas verdes y agrícolas con las aguas residuales tratadas.
- Los consumidores de los productos agrícolas regados con las aguas residuales, especialmente hortalizas y peces.
- Los usuarios que realizan actividades recreativas en las áreas verdes de parques y jardines regadas con aguas residuales tratadas, especialmente aquellos que tienen un contacto primario con el césped.
- Los pobladores de las áreas urbanas circundantes a las zonas de tratamiento y uso de aguas residuales, que pueden abastecerse del agua contaminada del sistema de riego, consumir los productos cultivados que podrían estar contaminados y que pueden ser impactado por los vientos que llegan desde el área de tratamiento y reuso, arrastrando partículas de agua y olores desagradables.

Las rutas de transmisión de los agentes patógenos pueden ser primarias (a través de exposición por contacto directo) y/o secundarias (exposición a través de una ruta externa). La transmisión primaria incluye el contacto directo con las heces, aguas contaminadas como las residuales o superficies contaminadas con heces y aguas residuales, así como por el contacto de persona a persona, que en este caso se relaciona con la higiene personal. La transmisión secundaria se refiere a la realizada mediante vehículos (alimentos, agua, etc.) y la transmitida por vectores (ratas, mosquitos o zancudos). La primera es a través de la contaminación de fuentes de agua o cultivos contaminados, mientras que la segunda es mediante criaderos de vectores como ratas y mosquitos infectados. También puede ocurrir una transmisión por vía aérea, como es el caso de inhalación de partículas muy finas de agua residual contaminada que se aplica con un riego por aspersión. La probabilidad de enfermedad está relacionada con las rutas de transmisión y directamente con los puntos de exposición, criterios que se deben considerar al momento de diseñar e implementar, o modificar los esquemas de tratamiento y uso de aguas residuales, a fin de buscar el menor riesgo de enfermedad. Las principales rutas de exposición en las actividades de tratamiento y uso de las aguas residuales serían las siguientes:

- Contacto dérmico con aguas contaminadas.
- Ingestión por contacto directo de manos con las aguas residuales contaminadas y que luego se introducen a la boca
- Ingestión por contacto directo de manos con el césped regado con aguas residuales contaminadas y que luego se introducen a la boca.
- Ingestión de alimentos contaminados cultivados con aguas residuales.
- Inhalación de gases y olores desagradables.

Las principales medidas para proteger la salud de los grupos expuestos se agrupan en las siguientes cinco categorías:

- Tratamiento de las aguas residuales y los lodos.
- Control del uso de las aguas residuales, mediante la restricción de cultivos y el uso de métodos de riego más seguros.
- Control de la exposición humana.
- Fomento de la higiene.

Las categorías que han recibido mayor atención para proteger la salud pública son el tratamiento de las aguas residuales y la restricción de los cultivos regados con estas, se espera que en adelante se incorporen otras medidas de acuerdo a las condiciones económicas, sociales, culturales, institucionales y ambientales de cada lugar, y con una visión integral del manejo de las cuencas.

Es evidente que el tratamiento adecuado de las aguas residuales constituye la medida más importante para la protección de la salud y el ambiente, ya sea si se descarga a un cuerpo de agua receptor o se utiliza para el riego agrícola, forestal o de áreas verdes. Sin embargo los métodos tradicionales de diseño de los sistemas de tratamiento se han enfocado casi exclusivamente a la remoción de sólidos y materia orgánica, representada por la Demanda Bioquímica de Oxígeno, lo cual es importante para proteger el ambiente del cuerpo receptor y los usos posteriores. Actualmente se tiene muy clara la necesidad de remover patógenos, tanto para los vertimientos como para el reuso, pero aún no se incluye este criterio en el diseño de la mayoría de las PTAR. Esta deficiencia hace difícil lograr que las plantas ya construidas cumplan con los niveles de remoción de patógenos que la normatividad exige para verter o usar los efluentes en el riego. También está pendiente incluir la remoción de parásitos, que -desafortunadamente- tanto la formulación de los proyectos, como las exigencias normativas no priorizan, aun cuando la OMS desde 1989 indicó que los parásitos constituyen el principal riesgo potencial para la salud pública en el uso de las aguas residuales. Estas exigencias de remover patógenos dependen de la tecnología seleccionada y la capacidad de esta para alcanzar los niveles deseados.

Es muy frecuente ver la implementación de plantas de tratamiento con tecnologías que por un lado no logran los niveles de calidad esperados, y peor aún, no pueden ser operadas y mantenidas adecuadamente por limitaciones económicas y de la falta de operarios con la capacidad necesaria para manejarlas. Un caso reciente es lo sucedido con la PTAR de Yunguyo en Puno, que aun cuando es una nueva y ha adoptado una tecnología muy moderna, el Municipio tiene serias dificultades para asumir los costos de operación y mantenimiento, que incluye la contratación de una amplia planilla de operadores altamente calificados. Por eso es preferible optar por sistemas más simples y sustentables.

Los lodos generados en los procesos de tratamiento son considerados subproductos valiosos para la agricultura como fuentes de nutrientes y acondicionador de suelos, sin embargo también constituyen un riesgo, porque con ellos también sedimentan altas concentraciones de patógenos, especialmente parásitos. Lo ideal es que estos lodos reciban un tratamiento, de lo contrario deben ser confinados en rellenos sanitarios para residuos peligrosos. Otra opción es disponer los lodos en zanjas cubiertas del terreno antes de la siembra o el almacenamiento por un periodo superior a 12 meses. La elaboración anaeróbica de abonos orgánicos y la digestión termofílica permite una activación de los patógenos por las temperaturas superiores a los 50°C que alcanzan estos procesos (León y Moscoso, 1996).

Una medida importante para el uso de las aguas residuales es el control de los vertimientos industriales sin tratamiento previo a los sistemas de alcantarillado, que luego llegan a las plantas de tratamiento municipales. Altas concentraciones de sustancias químicas y metales pesados pueden inhibir los procesos biológicos del tratamiento y propiciar la bioacumulación en la cadena trófica y en los productos regados, afectando finalmente a los consumidores.

La restricción de los cultivos es otra medida muy utilizada en las zonas que riegan con aguas residuales. Es cierto que se puede utilizar estas aguas para todo tipo de cultivos (riego irrestricto), si se logra alcanzar las calidades exigidas para no generar riesgos a la salud, más aun cuando se trata de cultivos de consumo crudo. Los efluentes con calidad más baja también podrían utilizarse en un riego restringido, ya que existen cultivos menos exigentes en calidad porque se consumen cocidos o procesados (o simplemente no se consumen). Es por ello que la OMS (1989) clasifica estos cultivos en las dos categorías siguientes:

Categoría A:

- Cultivos alimenticios que se consumen crudos: lechuga, espinaca.
- Frutas regadas por aspersión, aun con tallo alto.

- Césped de campos deportivos y parques públicos.
- Cultivos acuícolas: peces, crustáceos.

Categoría B:

- Cultivos alimenticios que se consumen cocidos: papa, camote.
- Cultivos de tallos altos: frutales de árbol
- Cereales procesados: trigo, arroz.
- Cultivos industriales no comestibles: algodón
- Cultivos alimenticios envasados: espárragos, alcachofa.
- Forrajes y pastos naturales: pasto elefante, alfalfa, maíz forrajero.
- Cultivos forestales: eucalipto, pinos.

La mayor parte de la agricultura peruana se realiza por secano, pero cada vez es mayor la cantidad de tierras agrícolas manejadas con riego. Los métodos de riego más utilizados en el país son por gravedad: inundación y surcos, que conllevan el riesgo de contaminar los productos por contacto directo del agua y favorecer por exceso la infiltración que podría contaminar el suelo y el acuífero. En los últimos años se ha comenzado a utilizar algunos riegos tecnificados, como aspersión, micro-aspersión y goteo. Los dos últimos constituyen los métodos de riego más seguros, ya que no favorecen el contacto con los productos y la infiltración es casi nula. La aspersión podría trasladar gérmenes patógenos en las pequeñas partículas de agua transportadas por el viento. Sin embargo, cuando el tratamiento es adecuado y permite alcanzar la calidad recomendada, es posible utilizar cualquier método de riego.

Teniendo en cuenta que el uso de las aguas residuales no solo pone en riesgo a los consumidores de los productos regados, sino también a los operadores y agricultores, es necesario aplicar ciertas medidas de control de la exposición humana. Es posible evitar el contacto directo con los patógenos a través de las siguientes medidas preventivas:

- Prohibir el contacto directo con las aguas residuales, especialmente las crudas.
- Usar ropa protectora: botas, guantes y ropa de trabajo.
- Prácticas de higiene: ducha luego de la faena, lavado de manos antes de comer.
- Usar productos desinfectantes, especialmente en manos.
- Vacunación contra determinadas enfermedades locales.

Un control médico frecuente también permitirá identificar un eventual problema de salud en los trabajadores, y dotar de los recursos necesarios las postas médicas para ofrecer el tratamiento oportuno a los casos que se presenten con diarreas o parasitosis.

En suma, es necesario aplicar una combinación de medidas de protección, además del tratamiento, para alcanzar los niveles de protección requeridos para los diferentes grupos expuestos. Por ejemplo, la restricción de cultivos permitirá proteger a los consumidores, pero también se debe utilizar medidas para proteger a los agricultores, como el uso de botas para evitar el contacto directo con el agua. Incluso estas medidas pueden permitir que en ocasiones un tratamiento no muy exigente pueda ser suficiente. La viabilidad y eficacia de una combinación de medidas dependerá de diversos factores a ser evaluados cuidadosamente para alcanzar el control real de los riesgos a la salud y el ambiente. Entre los factores más importantes se pueden mencionar:

- Los hábitos sociales y las prácticas agrícolas, que identifiquen las rutas y grupos de exposición.
- La incidencia local de ciertas enfermedades entéricas relacionadas con las aguas residuales, para identificar los puntos, rutas y grupos de exposición y las medidas que eviten estas circunstancias.
- La disponibilidad de recursos económicos, humanos y de terreno, para elegir la tecnología de tratamiento y demás medidas de control.

4.3. Las Guías de la OMS para el uso de las aguas residuales

El riesgo potencial de transmitir enfermedades entéricas por el uso de las aguas residuales en el riego agrícola siempre ha sido una preocupación de las instituciones y estados en todo el mundo. Por eso ya desde 1968 el Estado de California (USA) estableció que solo se podían utilizar para el riego agrícola aquellas aguas residuales que logren reducir de 23 a 2.3 coliformes totales (CT) por 100 ml, según el cultivo. Esta alta exigencia de calidad demandaba un tratamiento de las aguas residuales casi igual que su potabilización. Además era incongruente frente al límite de 1,000 CT/100 ml, exigido en el uso de las aguas superficiales como ríos. Por otro lado los CT pueden existir en los ambientes naturales, sin que indiquen una contaminación fecal.

Es así que en 1973 la Organización Mundial de la Salud (OMS) propuso utilizar aguas residuales con no más de 100 coliformes fecales (CF) por 100 ml para el riego agrícola sin restricciones (todo tipo de cultivo), valor más accesible y enfocado en un indicador directo de contaminación fecal. Como es difícil detectar y cuantificar a los patógenos causantes de estas enfermedades, los ingenieros sanitarios y las autoridades de salud pública utilizan como organismo indicador de la contaminación a los coliformes fecales y usan la prueba del número más probable de coliformes fecales en 100 ml de agua (NMP/100 ml). Estos organismos actualmente se les conoce como coliformes termo tolerantes (CTT).

La OMS concluye que los límites anteriores demandaban de un tratamiento primario, secundario, y desinfección para alcanzar un nivel de calidad que asegure riesgo cero, que, aunque técnicamente es algo posible, no es así desde el punto de vista práctico y económico. Los expertos en el tema, comenzaban a abordar nuevos enfoques basados en los riesgos reales identificados mediante evaluaciones epidemiológicas de los grupos expuestos. Esta situación menos exigente, permitiría alcanzar las metas de calidad deseadas, aplicando tecnologías apropiadas para el tratamiento de las aguas residuales. Es así que en 1989 la OMS publica las Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura, elaboradas por un grupo de expertos a nivel mundial, donde se reconoce a los parásitos como el principal riesgo para la salud; para lo que propone que se reduzcan a menos de un litro, los huevos de nemátodos, mediante el tratamiento de aguas residuales.

REUSO	NEMATODOS	C. FECALES
RIESGO RESTRINGIDO Forestación Cereales industriales Frutales Forrajes	< 1 Huevo / litro	SIN APLICACIÓN
RIEGO IRRESTRINGIDO Cultivos de consumo crudo Piscicultura Campos deportivos Parques públicos	<1 Huevo / litro	= < 1000 / 100 ml

Cuadro 6. Directrices Sanitarias de la OMS sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura (OMS, 1989).

Como se resume en el cuadro 6, adicionalmente se propuso reducir los coliformes fecales (termo tolerantes) a menos de 1,000 UFC/100 ml para garantizar la calidad en el riego de cualquier tipo de cultivo -riego irrestringido-, incluyendo los más exigentes como hortalizas de consumo crudo, campos deportivos y parques públicos, así como también para abastecer la piscicultura. El riego de cultivos menos exigentes (riego restringido) como forestales, cereales, industriales, frutales de tallo alto y forrajes no requieren la remoción de coliformes fecales, ya que no son consumidos directamente por la población o simplemente no son alimentos.

Durante casi dos décadas estas directrices han sido aplicadas total o parcialmente en los países del mundo. Incluso actualmente son una referencia para que la ANA evalúe y apruebe las autorizaciones de reuso que se están formalizando en el país, mientras el Estado establezca los límites de calidad para el uso de las aguas residuales a nivel nacional.

Desde el año 2006 la OMS ha publicado las Guías para el Uso Seguro de las Aguas Residuales, Excretas y Aguas Grises, que proporcionan un marco general a la gestión de riesgos para la salud asociados al uso de las aguas residuales en la agricultura y la acuicultura. Estas Guías sustituyen a las directrices de 1973 y 1989 y, por primera vez, suprimen los umbrales de calidad de los efluentes. En su lugar, ofrecen flexibilidad para seleccionar un rango de opciones de tratamiento a lo largo de la cadena de saneamiento, para lograr los objetivos de protección de la salud. Este cambio reconoce que los altos niveles de tratamiento no siempre son factibles o efectivos en función de los costos, y que el uso de aguas residuales tratadas o parcialmente tratadas es común en muchos entornos.

Según PROSAP (2013), estas Guías proponen el uso del enfoque de “barreras múltiples” que, como es mostrado en la figura 21, establece una serie de barreras a lo largo de la cadena reúso de las aguas residuales -tratadas o parcialmente tratadas- en lugar de centrarse sólo en la calidad de las aguas residuales disponibles.

Por ejemplo, estas barreras pueden ser colocadas en los siguientes puntos:

- En los puntos de generación de aguas residuales: plantas de tratamiento o de vertimiento
- En las parcelas agrícolas: reservorios de sedimentación, restricción de cultivos o técnicas de riego más seguras
- En los mercados: lavado de los productos cosechados con agua limpia
- Incluso a nivel del consumidor: desinfección, pelado, cocinado.



Facilitar el cambio de comportamiento a través de la educación, incentivos financieros y no financieros e inspecciones regulares.

Figura 21. Barreras múltiples para el uso de las aguas residuales. (Fuente OMS, 2006).

Estas acciones deben ir acompañadas de un control de la exposición humana mediante el uso de guantes y botas para los agricultores. Este enfoque es más aplicable en los países o ciudades donde el tratamiento de aguas residuales y desinfección integral está fallando debido a los altos costos de O&M, permitiendo un sistema de regulación y supervisión en línea con las realidades socio-económicas del país o localidad.

Una combinación de estas medidas o barreras debería ser suficiente para lograr un nivel de riesgo aceptable. Una de las medidas más sencillas y con mejores resultados es la restricción de cultivo (usar agua parcialmente tratada en cultivos no destinados a alimento, como el algodón, o en cultivos de tallo largo, como los frutales). Por ejemplo, en la ciudad de Santiago de Chile en 1993 se registró una reducción del 90% de casos de cólera atribuibles al consumo de cultivos de hortalizas, debido a la interrupción del riego de estos cultivos con agua residual en 1992. Otra barrera posible, es la interrupción del riego una semana antes de la cosecha, favoreciendo la mortandad de bacterias y virus, especialmente en condiciones áridas.

Existen también unos objetivos sanitarios que muestran un nivel de referencia para un riesgo aceptable. El AVAD (Año De Vida Ajustado) es un indicador cuantitativo de “carga de enfermedad” que se refleja en la cantidad total de vida saludable que se pierde o calidad de vida que se reduce, debido a una discapacidad, o mortalidad prematura. Dependiendo de las circunstancias, existen varias barreras posibles para proteger la salud, que incluyen el tratamiento de desechos, restricción de cultivos, adaptación de técnicas de riego y tiempo de aplicación y control de la exposición humana (FAO, 2012). El tratamiento parcial de las aguas puede ser suficiente si se combina con otras medidas de reducción de riesgos para lograr el objetivo de $\leq 10^{-6}$ AVAD por persona y año (ó 1 de cada 100.000).

En lugar de centrarse solamente en la calidad de las aguas residuales en esta etapa de uso, las directrices recomiendan definir metas sanitarias realistas y evaluar y manejar los riesgos de manera continua, desde la generación de las aguas residuales hasta el consumo de productos cultivados con estas aguas residuales, con el fin de lograr estas metas, tal como se sugiere en la Figura 22. Esto permite que exista un sistema reglamentario y de monitoreo acorde a las realidades socioeconómicas del país o localidad.

Estas guías se han diseñado como una ayuda para desarrollar enfoques nacionales e internacionales y ofrecen un marco para la toma de decisiones nacionales y locales referidas a la identificación y gestión de riesgos para la salud asociados al uso de aguas residuales en la agricultura y la acuicultura. Fundamentalmente reconocen que los cambios en la política y la inversión en mejoras, ya sea en obras de infraestructura, medidas operativas o modificaciones de conducta, implican múltiples actores y toman tiempo.

Sin embargo, habiendo trascurrido seis años desde la publicación de estas Guías en el 2012, la ANA organizó en Lima el IV Taller Regional de América Latina y el Caribe del Proyecto Global SUWA, en donde los participantes de 14 países latinos manifestaron que dichas Guías no habían sido incorporadas en su normatividad, debido a que no habían sido evaluadas por estar en idioma inglés y la extensión del documento (4 volúmenes).

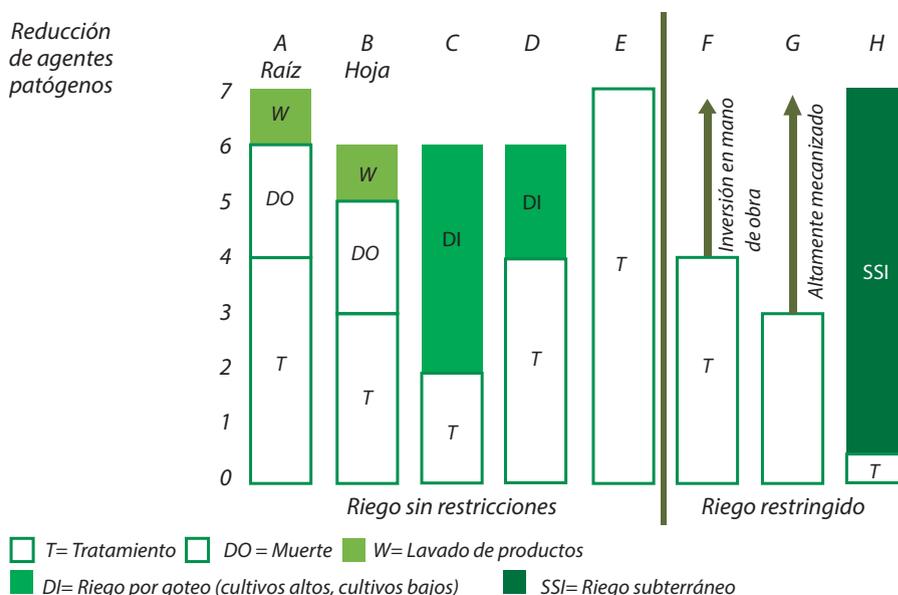


Figura 22. Opciones para la reducción de agentes patógenos mediante combinaciones de barreras para alcanzar el objetivo sanitario de $\leq 10^{-6}$ AVAD por persona anualmente. (Fuente OPS, 2006).

4.4. Planes de Seguridad en Saneamiento (PSS)

Si bien las Guías de la OMS del 2006 constituyen un excelente estudio académico sobre los riesgos sanitarios del uso de las aguas residuales, es bastante difícil “aterrizar” esa propuesta en nuestros países. Por tal razón la OMS elaboró en 2013 un borrador de Manual para elaborar Planes de Seguridad en Saneamiento (PSS), a fin de facilitar la puesta en práctica de las Guías de la OMS mediante la presentación de los enfoques de riesgo recomendados en un proceso paso a paso. Los conceptos de coordinación y mejora progresiva en el tiempo son fundamentales para el enfoque de los PSS.

Esta metodología fue primero probada en diferentes casos desarrollados en cuatro ciudades del mundo, incluyendo Lima. El Equipo Técnico Regional de Agua y Saneamiento (ETRAS) que opera en la Oficina de la OPS en Perú realizó entre 2013 y 2014 la prueba del manual en dos casos de Lima: el Parque Huáscar y la zona agrícola de Este de Lima, representativos del reuso directo e indirecto respectivamente.

En junio de 2014 la OMS realizó en Ginebra una reunión de expertos para revisar el Manual de los PSS antes formulado, sobre la base de los estudios de caso realizados. En el 2015 se ha concluido la versión en inglés del Manual que se quiere difundir a nivel Global (OMS, 2015). Es por ello que ETRAS está ejecutando el Proyecto “Adecuación y difusión en los países de las Américas del Manual de la OMS para la elaboración de Planes de Seguridad en Saneamiento aplicados al uso de las aguas residuales”, y la primera tarea ha sido la traducción del Manual del Inglés al español para facilitar su difusión y comprensión en todos los países de habla hispana.

La planificación de la seguridad del saneamiento es una herramienta de gestión basada en el riesgo para los sistemas de saneamiento. Este manual se centra en el uso seguro de residuos humanos y permite a los usuarios:

- Identificar y gestionar sistemáticamente el riesgo para la salud a lo largo de la cadena de saneamiento;
- Orientar la inversión basada en riesgos reales, a fin de promover los beneficios para la salud y minimizar los impactos adversos en la salud;
- Proporcionar garantías a las autoridades y al público respecto la seguridad de los productos y servicios relacionados con el saneamiento.

Los PSS brindan una estructura que permite reunir a actores de diferentes sectores para identificar riesgos para la salud en el sistema de saneamiento y llegar a un acuerdo sobre las mejoras y el monitoreo regular. El enfoque garantiza que las medidas de control se apliquen a los principales riesgos para la salud y enfatiza las mejoras incrementales que se harán con el tiempo. Es aplicable a entornos de altos y bajos recursos. Se puede usar tanto en la etapa de planificación para nuevos esquemas, como para mejorar el desempeño de sistemas existentes. Es así que el Manual de los PSS considera el desarrollo de las siguientes etapas o módulos:

- Módulo 1 Preparación para la PSS
- Módulo 2 Descripción del sistema de saneamiento
- Módulo 3 Identificación de eventos peligrosos, evaluación de las medidas de control existentes y los riesgos de exposición
- Módulo 4 Desarrollo e implementación de un plan de mejora incremental

- Módulo 5 Monitoreo de las medidas de control y verificación del desempeño
- Módulo 6 Desarrollo de los programas de apoyo y revisión de los planes

4.5. Programa Nacional de Vigilancia del Tratamiento y Uso de Aguas Residuales

Actualmente el país aún no cuenta con un Programa Nacional de Vigilancia del Tratamiento y Uso de Aguas Residuales, ya que se trata de actividades vinculadas a diferentes sectores como Saneamiento, Agricultura, Ambiente y Salud. Si bien durante muchos años fue la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) la que asumió la responsabilidad de vigilar los aspectos de salud vinculados al tratamiento y disposición de las aguas residuales, ahora es la Autoridad Nacional del Agua (ANA) a través de sus dependencias locales que autoriza los vertimientos y reuso de estas aguas, con la opinión técnica de los sectores involucrados, pero su labor de vigilancia por el momento está limitada a monitorear los cuerpos de agua del país, pero no el tratamiento y uso de las aguas residuales generadas.

Los Planes de Seguridad en Saneamiento (PSS) antes descritos constituyen un instrumento de referencia para elaborar un Programa Nacional de Vigilancia y ponen de manifiesto el rol de liderazgo del sector salud en el uso de aguas residuales, ayudando así a darle una perspectiva humana a sectores tradicionales no relacionados con la salud, como la ingeniería sanitaria y el sector agrícola. En ese sentido es muy probable que la DIGESA reasuma las funciones de vigilancia de la gestión de las aguas residuales, sin embargo también se acaba de crear el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) que también podría incluir esta tarea. La ANA también podría asumir esta tarea en la medida que aprueba los vertimientos y reuso de las aguas residuales, toda vez que la disposición de las aguas residuales impacta principalmente en los recursos hídricos y la ANA tiene la capacidad de coordinar acciones multisectoriales. Sería deseable que este Programa sea asumido por varias instituciones como las ya mencionadas, a fin de abordar tanto la vigilancia de los riesgos ambientales como de salud. En todo caso confiamos en que la Mesa Temática de Uso de Aguas Residuales recientemente constituida por iniciativa de la ANA concrete y articule este Programa Nacional de Vigilancia con todos los organismos competentes.

Todo programa de supervisión y evaluación de los aspectos sanitarios y ambientales forma parte de un proceso de toma de decisiones de la política ambiental de un país que fomente el uso seguro de las aguas residuales. Por ello deben estar diseñados teniendo en cuenta las prioridades de evaluación y las normas adecuadas para el control, a fin de lograr la mayor participación local

de los actores sociales involucrados en los sistemas existentes. Para ello también será necesario contar con sistemas adecuados de información y de análisis, por tanto se deberá identificar las entidades competentes que garanticen la eficiencia del programa.

Los planes de acción tienen un carácter tanto preventivo como correctivo. Preventivo para compatibilizar los objetivos de salud con los de desarrollo del país. Correctivo porque buscan reducir los riesgos a la salud y el ambiente asociados al manejo de las aguas residuales. Las estrategias de supervisión deben orientarse al control eficiente que minimice los costos sociales derivados del uso informal de las aguas residuales. Por tanto debe manejar variables ambientales y epidemiológicas para identificar los riesgos actuales y futuros. Por último se trata de un proceso dinámico basado en la revisión y modificación de los programas en función a los cambios de la situación y la identificación de riesgos futuros.

La aplicación de medidas de protección sanitarias y ambientales estará basada en directrices, normas, procedimientos y niveles de responsabilidad para recoger la información que permita dar cumplimiento al seguimiento o vigilancia, que sustente el cumplimiento de estas normas. Las actividades de supervisión y evaluación comprenden:

- El control de la aplicación de las medidas de protección sanitarias y ambientales.
- El control de la calidad química y microbiológica de las aguas residuales.
- El control de la calidad química y microbiológica de los productos regados.
- La vigilancia epidemiológica de los grupos expuestos.

En este punto no pretendemos desarrollar un programa nacional de vigilancia del tratamiento y uso de las aguas residuales, pero si por lo menos proponer algunos criterios básicos que deberán tenerse en cuenta para su formulación:

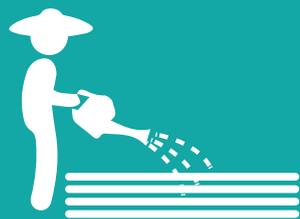
- El programa estaría sustentando en un previo Plan Nacional de Seguridad en Saneamiento (PSS) para el tratamiento y uso de las aguas residuales, que a su vez estaría basado en un Inventario Nacional de Sistemas de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales.
- El Programa tendría el propósito de proteger la salud y el ambiente en los lugares donde se trata y usa el agua residual, lo que implica abordar los siguientes objetivos:
- Identificar y gestionar sistemáticamente el riesgo para la salud a lo largo de la cadena del sistema de saneamiento;
 - Orientar la inversión basada en riesgos reales, a fin de promover los beneficios y minimizar los impactos adversos en la salud y el ambiente;
 - Proporcionar garantías a las autoridades y al público respecto la seguridad de los productos y servicios relacionados con estos sistemas.
- El carácter de ámbito nacional implica asumir la vigilancia de todos los sistemas identificados en las distintas regiones del país, a través de las dependencias regionales y locales que se dispongan en estos lugares.

- Una caracterización de los sistemas de tratamiento y reuso permitirían identificar los eventos peligrosos, los riesgos reales, los grupos y mecanismos de exposición, y las medidas de control requeridas.
- Las medidas de control permitiría establecer los indicadores de calidad sanitaria y ambiental que se deban monitorear en los sistemas de tratamiento y uso de las aguas residuales a nivel nacional.
- Es probable que el Programa no alcance a realizar una vigilancia total de los sistemas existentes, pero podrían seleccionarse los más importantes y representativos para efectuar un monitoreo más exhaustivo.
- Una supervisión de los programas de control de los sistemas podrían constituir un soporte importante del programa de vigilancia, especialmente los que deben ser asumidos por las EPS en las plantas de tratamiento. Tal información podría ser verificada con tomas de muestras aleatorias en los puntos establecidos, a cargo de la institución responsable de la vigilancia y a través de laboratorios acreditados.
- En principio la vigilancia de la calidad de los efluentes tratados sería suficiente para asumir un control de riesgos en los cultivos regados, por tanto solo eventualmente se realizaría un monitoreo de verificación de los productos generados. Esto disminuye la presión sobre los productores y facilitaría la formalización del reuso.
- Del mismo modo, se deben seleccionar los parámetros de monitoreo más relevantes (indicadores), a fin de no tornar complejos y costosos los programas de control y vigilancia. Eventualmente el programa de vigilancia debería asumir el monitoreo de un listado completo de parámetros, especialmente de contaminantes químicos y acorde con los LMP y ECA estipulados en la normatividad vigente.
- Si es importante acompañar este plan de monitoreo con una evaluación epidemiológica de los grupos expuestos, a fin de conocer la evolución de la situación de salud desde una línea de base.

Es cierto que la vigilancia epidemiológica plantea mayores dificultades por la complejidad de la situación de salud de los grupos expuestos, por tanto es preferible concentrarse en determinados agentes patógenos relacionados con las enfermedades diarreicas y parasitarias más frecuentes en la zona. La forma más sencilla es el muestreo sistemático de sangre y heces de los trabajadores y agricultores.



| 05



SISTEMAS INTEGRADOS DE TRATAMIENTO Y USO DE AGUAS RESIDUALES

Desde 1975 el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Centro Regional de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) inició el Programa de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales con el propósito de contribuir a elevar la cobertura del tratamiento de aguas residuales domésticas en las Américas, por medio de tecnologías apropiadas que permitieran la remoción de organismos patógenos, y no solo de materia orgánica. Durante el período transcurrido el CEPIS y diversas instituciones peruanas realizaron una serie de investigaciones en el Complejo Bioecológico de San Juan de Miraflores al Sur de Lima.

En ese contexto, el CEPIS en el año 2000 suscribió un convenio con el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC) del Canadá para ejecutar el Proyecto de Investigación Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales en América Latina: Realidad y Potencial, con el propósito de documentar y analizar las experiencias de América Latina en el tratamiento de aguas residuales domésticas y su uso sanitario en agricultura urbana para recomendar estrategias de diseño e implementación de estos sistemas integrados e identificar nuevas oportunidades (Moscoso y Egocheaga, 2002-1).

La primera actividad del Proyecto fue elaborar un Inventario Regional para conocer la situación del tratamiento, disposición y aprovechamiento de las aguas residuales domésticas en los países de América Latina, con el propósito de establecer una tipología de los sistemas de tratamiento y uso de las aguas residuales existentes en la Región. La segunda actividad del Proyecto se ejecutó en tres etapas de recopilación y análisis de la información. En la primera de los Estudios Generales, se abordaron los aspectos técnicos y económicos generales de 18 casos identificados en 14 países. Luego se seleccionaron 11 de los 18 casos para ejecutar la segunda etapa de Estudios Complementarios, que incluyó la evaluación de los aspectos ambientales, sociales, culturales, institucionales y legales. Durante la tercera etapa de Estudios de Viabilidad se eligieron siete de esos 11 casos y se promovió la socialización y desarrollo de la propuesta con los principales actores locales. Estos estudios de caso mostraron las siguientes características:

- El uso de las aguas residuales estaba orientado principalmente al riego de forrajes y cultivos industriales.
- En la mayoría de los casos el agua residual era la única fuente de abastecimiento, ya que se ubicaban preferentemente en zonas áridas o semiáridas. Sin embargo, este limitado recurso se aplicaba a los campos mayormente mediante riego por inundación.
- Los agricultores minimizaban o desconocían los riesgos a la salud asociados al riego con aguas residuales y pocos reconocían el aporte que representan los nutrientes que contienen estas aguas.
- En todos los casos, esta actividad agrícola se desarrollaba al margen de las exigencias del tratamiento y no existían mecanismos de coordinación entre las empresas de agua y otras instituciones involucradas.

- Estas características podrían entenderse en los casos de una agricultura de subsistencia (agricultores marginales), sin embargo varios casos mostraban niveles de alta eficiencia técnica y económica.
- El uso de las aguas residuales no estaba legislado en la mayoría de los países de la Región.

Las últimas actividades del Proyecto fueron la elaboración y difusión de documentos directrices y guías para la formulación de proyectos para la Región, así como la realización de una serie de seminarios nacionales y mesas de donantes para procurar la implementación de los proyectos apoyados (Moscoso y Egocheaga, 2002-2).

5.1. Los sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales

Según Oakley (2015), el principio fundamental del manejo integrado de las aguas residuales reside en comprender que los desechos de la ciudad pueden ser puestos en valor a través del tratamiento, que tiene como principal objetivo remover los elementos perjudiciales –patógenos y contaminantes- para luego disponer del recurso hídrico, energía y nutrientes. Como se muestra en la figura 23, el enfoque principal del manejo integral de las aguas residuales está conformado por los siguientes elementos:

- Incorporar en el diseño procesos naturales para cerrar los ciclos de agua, carbono, nitrógeno, potasio, etc.
- Utilizar procesos naturales de tratamiento para remover los gérmenes patógenos, evitando en lo posible procesos artificiales como la cloración.
- Valorar los nutrientes contenidos en las aguas residuales, que mejoran la fertilidad de los suelos (materia orgánica) y aporta los nutrientes requeridos por los cultivos, sustituyendo los fertilizantes químicos.
- Valorizar la capacidad energética de la materia orgánica (incluyendo lodos) para generar y utilizar biocombustibles como el metano.

Las experiencias del uso de aguas residuales desarrolladas por el CEPIS y otras instituciones de la Región, sistematizadas a través de este Proyecto OPS/IDRC (2002), han permitido proponer un modelo para integrar el tratamiento al uso de las aguas residuales domésticas. Estos sistemas integrados son una alternativa viable y sostenible para mejorar la calidad de vida en las ciudades de la Región, al permitir un adecuado manejo de los aspectos técnicos, ambientales, sociales y económicos del tratamiento y el uso de las aguas residuales domésticas.

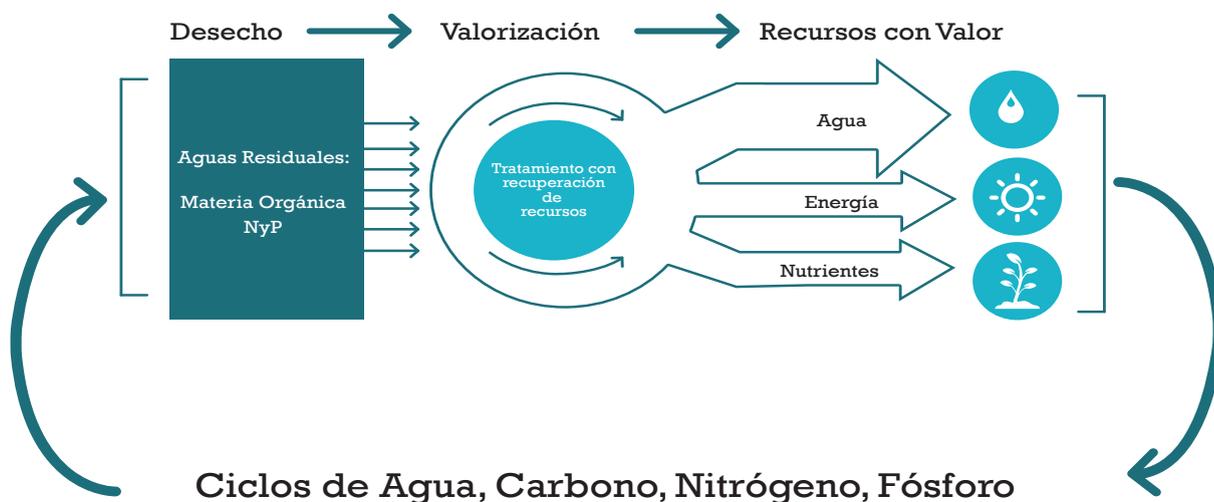


Figura 23. Esquema de un sistema integrado de tratamiento y uso de aguas residuales. (Fuente: Oakley, 2015).

El potencial de la integración del tratamiento al uso agrícola de las aguas residuales constituye un mecanismo estratégico para reducir las inversiones y costos operativos en ambas actividades, que aún no se ha comprendido en su verdadera dimensión. Por tanto, los sistemas integrados permitirían controlar un incremento significativo de las tarifas cuando en éstas se incorpore el costo del tratamiento, garantizando así una mayor sostenibilidad del servicio. Por último, la aceptación de este modelo implica que la comunidad asuma la responsabilidad de tratar sus aguas residuales con tecnología apropiada, y valore beneficios como la protección de la salud y el ambiente, y la generación de empleo y alimentos de calidad.

Israel es un caso emblemático en el manejo integrado de las aguas residuales que merece tenerlo como referente. Un país con una población de casi 8 millones y 20,700 km² tiene una demanda actual de agua equivalente a 75 m³/s. Sus recursos hídricos naturales apenas aportan 40 m³/s, que representan el 53% de la demanda. El reuso del agua



Foto 12. Reservorios y uso de aguas residuales

representa actualmente el 20% de la oferta (15 m³/s) y el saldo de 20 m³/s tiene que ser obtenido con la desalinización del agua de mar (27%). Una proyección para el 2050 muestra que los recursos naturales atenderán solo el 34% de la demanda de agua, por tanto el reuso aportará el 26% de esta demanda y la desalinización el 40% restante, lo que implica un incremento elevado del costo del agua, pero que en todo caso es aminorado significativamente con el reuso. (Libhaber, 2015-2). Actualmente el 82% de los desagües generados y el 87% de los tratados son usados en más de 300 proyectos para el riego de 123,000 ha agrícolas. La estrategia de reuso es almacenar todas las aguas residuales parcialmente tratadas en grandes reservorios de estabilización para su utilización en la estación de estiaje (foto 12), lo que implica que estas aguas no son vertidas en ningún cuerpo hídrico natural.

En América Latina se destaca como experiencia modelo el sistema de manejo integrado de las aguas residuales de Campo Espejo, en Mendoza, Argentina. Este sistema está conformado por la Unidad de tratamiento de Aguas Cloacales (UTE) y la zona agrícola denominada Área de Cultivos Restringidos Especiales (ACRE) de Campo Espejo. La planta trata 1.6 m³/s en 12 baterías de tres lagunas en serie que juntas conforman 278 ha de espejo de agua y sus efluentes son utilizados para el riego de 3,000 ha agrícolas y forestales, que producen ajos, alcachofas, uvas para vinificación, forrajes, olivos, frutales de tallo alto y álamos para madera prensada. La empresa privada cobra a la ciudad US\$ 0.8/m³ tratado y US\$ 0.3/m³ entregado a los agricultores, ingresos que ha permitido sustentar esta actividad lucrativa por 20 años. Otro proyecto similar se ha desarrollado en Paramillo con 3,000 ha agrícolas y actualmente se está replicando en otros lugares de Mendoza para irrigar nuevas 10,000 ha (Foresi, 2015).

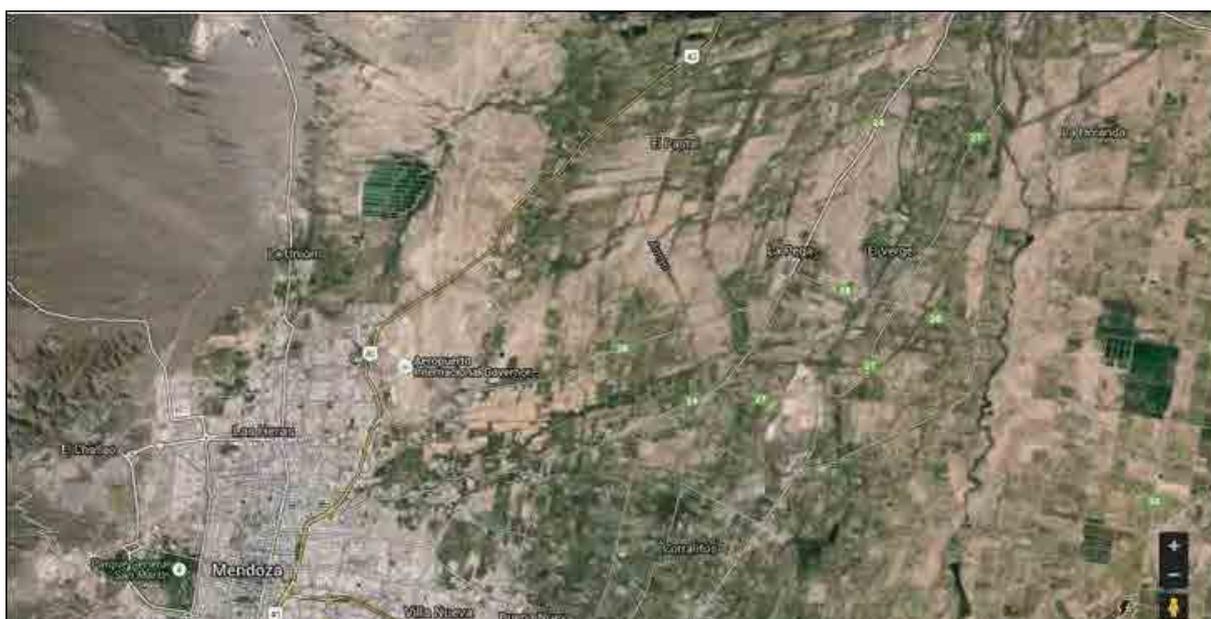


Foto 13. Imagen satelital del Sistema Campo Espejo en Mendoza, Argentina. (Fuente: Google Earth, 2015).

Si bien en Santa Cruz de Bolivia no se utilizan los efluentes de las plantas para el riego agrícola, si constituye un modelo del aprovechamiento de la energía generada por el tratamiento anaeróbico en lagunas cubiertas y el quemado de metano (fotos 14 y 15).



Foto 14. Lagunas anaeróbicas
Foto 15. Quemador de metano en la Planta de SAGUAPAC en Santa Cruz, Bolivia

En la costa peruana existen casos de tratamiento y uso de aguas residuales, que desafortunadamente no han sido diseñados integrados, pero que podrían convertirse en estos sistemas más eficientes si se lograra una asociación de los entes de gestión.

5.2. El plan general del sistema: componentes de tratamiento y uso de aguas residuales

El sistema integrado de tratamiento y uso de aguas residuales está conformado por dos componentes principales: el tratamiento de las aguas residuales y el uso productivo y seguro especialmente en la agricultura.

En el componente de tratamiento se propone que este proceso se adecúe al uso de las aguas residuales, lo que implica priorizar la remoción de patógenos para proteger la salud pública, en lugar de remover la materia orgánica y los nutrientes que sí son aprovechados por la agricultura. Las lagunas de estabilización constituyen la tecnología más apropiada para

Componentes del sistema integrado	
Tratamiento	Uso agrícola
<ul style="list-style-type: none"> • Remoción de patógenos • Uso de lagunas de estabilización • Tender a descarga cero • Áreas algo alejadas y baratas • Gestión más responsable y eficiente en la cuenca 	<ul style="list-style-type: none"> • Calidad sanitaria de acuerdo a cultivos • Aprovechamiento de materia orgánica y nutrientes • Entorno ecológico urbano • Empleo y alimentos seguros

lograr este objetivo, además de requerir solo el 20% de la inversión y el 10% de los costos de operación que demandan otras tecnologías. El uso de estas aguas en cultivos industriales y forrajes, que son menos exigentes en calidad sanitaria, permitiría reducir aún más los costos del tratamiento. Además, el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas para riego significa reducir y hasta eliminar las

descargas (descarga cero) que siempre generan impactos negativos al ambiente. La aplicación de una norma que establezca un pago por la carga contaminante vertida a los cuerpos de agua y no el uso productivo en el riego permitirá lograr ese objetivo de la descarga “cero”. Por último y como ya se ha explicado en el punto 2.3, se propone incorporar este sistema integrado de las aguas residuales a la gestión eficiente del agua en la cuenca, de modo que constituya un componente de los recursos hídricos disponibles.

Objetivo	Tratamiento para la remoción de:	
	<ul style="list-style-type: none"> Materia orgánica Nutrientes 	<ul style="list-style-type: none"> Parásitos Bacterias y virus Patógenos
	Tecnología apropiada para países industrializados	Laguna de estabilización
COSTO: INVERSIÓN + OPERACIÓN + MANTENIMIENTO		

5.3. Ubicación del sistema de tratamiento y uso de las aguas residuales

Tradicionalmente los diseñadores de las plantas de tratamiento han buscado su localización lo más cerca posible a la ciudad, y mejor aún si se puede dentro de ella, sin embargo esa decisión conlleva un alto riesgo de afectar a la población con ciertas molestias, como la presencia de olores desagradables y vectores. Es natural que las personas no deseen tener una PTAR junto o cerca a su hogar y por ello la norma S.090 vigente establece que los sistemas de tratamiento deben estar lo más alejados posible de los centros poblados, estimando una distancia mínima de:

- 500 m para tratamientos anaerobios
- 200 m para lagunas facultativas
- 100 m para lagunas aireadas, lodos activados y filtros percoladores.

También la norma indica que se debe considerar un área de protección alrededor del sistema. Distancias menores a las señaladas deberán ser justificadas con la inclusión de proceso de control de olores y otras contingencias perjudiciales (MVC, 1997).

La razón de los proyectistas en elegir un terreno cercano a la ciudad solo se sustenta en tratar de disminuir los costos de transporte del crudo, por tanto buscan reducir la distancia entre la ciudad y la planta. En ese sentido se debe analizar que el costo de un terreno urbano normalmente es 100 veces más que el rural, por lo que siempre será más económico llevar el crudo hasta terrenos más alejados y baratos, aun cuando estos se ubiquen a varios kilómetros de la ciudad. Podemos poner como ejemplo la ciudad de Juliaca, en donde los terrenos urbanos a 2015 oscilan entre US\$ 50 y 120/m², dependiendo de la zona de la ciudad, mientras que las tierras agrícolas de Enchupalla y Quilcapunco ubicadas a varios kilómetros de Juliaca tienen un valor entre US\$ 5,000 y 6,000/ha, que equivale a US\$ 0.5-0.6/m². Más aún la Municipalidad está gestionando la adquisición de un terreno baldío para el relleno sanitario a un costo de US\$ 760/ha (US\$ 0.08/m²), situación muy similar que también tendrían muchos terrenos áridos cercanos a las ciudades en la costa peruana.

Pero la razón principal para elegir una ubicación más alejada de la ciudad debe ser la posibilidad de desarrollar un proyecto integrado de tratamiento y uso agrícola o forestal de las aguas residuales, ya sea en una zona agrícola actual que sería beneficiada por el riego o de una zona baldía o árida que se habilitaría con el abastecimiento de agua para constituir una nueva zona agrícola y/o forestal. Es el caso del Proyecto de San Bartolo al Sur de Lima, en el que se trasladó el agua cruda 17 km para instalar una PTAR que permitiera el desarrollo de 8,000 ha agrícolas, pecuarias y forestales (foto 16). Un caso similar es la PTAR de Magollo en Tacna donde se instaló un colector de 11 km entre la ciudad y la PTAR, y luego los agricultores construyeron otros 9 km adicionales de canal para llevar el agua tratada desde la planta hasta la zona agrícola de Copare-La Yarada (foto 17). Claro que lo ideal es que la PTAR se construya en el mismo lugar donde serán utilizados sus efluentes.



Foto 16. PTAR San Bartolo, Lima
Foto 17. PTAR Magollo, Tacna

Una de las principales limitaciones argumentadas para elegir las lagunas de estabilización es que demandan de gran cantidad de terreno, por tanto los proyectistas con frecuencia optan por tecnologías más compactas. Es cierto que en algunos lugares como Japón sería casi imposible proponer esta tecnología para tratar grandes volúmenes de desagües en lugares donde no existe espacio y por tanto los terrenos son inmensamente costosos. Un ejemplo más cercano es Lima, donde se requerirían como 3,500 ha de lagunas para tratar sus desagües, extensión que solo se dispondría en lugares ya muy alejados de la ciudad. Sin embargo en la mayoría de ciudades del Perú la situación es diferente porque demanda áreas más pequeñas que normalmente están disponibles a unos kilómetros y en donde además se puede aprovechar los efluentes para mejorar o crear nuevas áreas agrícolas y forestales. De hecho esos terrenos son significativamente más baratos que los cercanos a la ciudad.

Una situación frecuente, es verse en la necesidad de trasladar una PTAR instalada dentro o próxima a la ciudad, a una nueva ubicación apartada de esta. Para ello es necesario, en primer lugar, conseguir un terreno -de mayor tamaño que el anterior- para la nueva planta. Esta situación ocurrió con la PTAR de Concord, en California, que durante el año 1955 se instaló en un terreno valorizado en US\$ 50,000/ha. Pasados 20 años desde su establecimiento, se hizo necesario trasladar la dicha planta, motivo por el que el terreno original fue vendido por 7.4 veces más del precio inicial (Arthur, 1983). Es evidente que los terrenos rurales inicialmente baratos incrementan notablemente su valor conforme crece la ciudad y van quedando más cercanos a ella, algo que las empresas inmobiliarias siempre han aprovechado para lograr grandes ganancias. Además, el terreno usado para construir una planta de lagunas de estabilización puede rehabilitarse muy

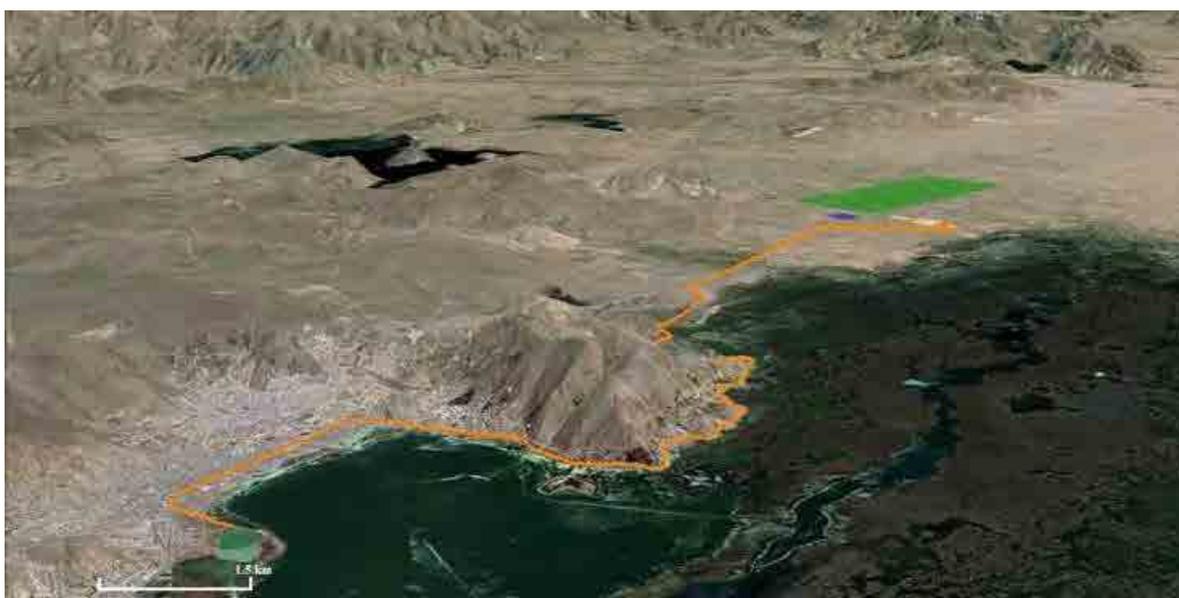


Foto 18. Imagen del proyecto de traslado de la PTAR de Puno. (Fuente: Google Earth, 2015).

fácilmente cuando se quiere recuperar para fines urbanos, ya que solo es necesario realizar un movimiento de tierras para su nivelación. Una situación similar tiene el caso de la PTAR de Puno, que si se traslada a la zona agrícola de Paucarcolla (foto 18), liberaría 21 hectáreas en la zona urbana más central de la ciudad y que alcanzaría un alto valor económico porque permitiría el desarrollo de una moderna zona comercial, turística y de esparcimiento en la ribera del lago Titicaca, en lugar de seguir teniendo lagunas que generan mal olor.

5.4. El aprovechamiento de los nutrientes de las aguas residuales tratadas

La “descarga cero” propuesta antes como la mejor opción para evitar los vertimientos de cargas contaminantes de nitrógeno y fósforo que eutrofizan los cuerpos de agua naturales, implica reusar totalmente el agua utilizada por la ciudad. Es cierto que en la época de lluvias no pueden ser utilizadas las aguas residuales tratadas porque los suelos alcanzan una saturación de humedad, pero en muchos lugares como en Israel, estas aguas son almacenadas para ser usadas en las épocas de estiaje, por tanto si es posible proponer un uso total o descarga cero.

Esos “contaminantes” que eutrofizan los cuerpos de agua naturales, se pueden convertir en nutrientes utilizados por las actividades agrícolas, pecuarias (forrajes y pastos naturales), acuícolas y forestales desarrolladas a partir del reuso.

Cultivo	Regado con aguas residuales tratadas	Regado con agua de pozo y con fertilización
Alfalfa	12	10
Maíz	5	2
Trigo	3	2
Cebada	4	2
Avena forrajera	22	12
Tomate	35	18
Ají	12	7
Papa	30	12

Cuadro 7. Incremento de la producción agrícola por el uso de aguas residuales en Tacna (TM/ha). (Fuente: León y Moscoso, 1996).

El uso de las aguas residuales no se ha desarrollado exclusivamente en lugares donde hay limitación de agua, sino también en aquellos donde se dispone de otras fuentes, debido a que los agricultores descubrieron que estas aguas tienen altas cantidades de “fertilizantes naturales”, que

permiten el crecimiento de sus cultivos sin aplicar fertilizantes químicos. Muchas experiencias han demostrado como las aguas residuales sustituyen los fertilizantes y logran una productividad agrícola más alta. El cuadro 7 muestra las experiencias agrícolas realizadas en Tacna en donde los agricultores que regaban con aguas residuales tratadas en lagunas de estabilización lograban cosechas de 50 a 250% más altas que aquellos que usaban agua de pozo y fertilizantes químicos. Esto implica para los primeros una reducción importante de sus costos de producción y por tanto una ventaja en los precios de los productos que ofertan en el mercado.

Es más fácil entender que las aguas residuales tratadas aportan los nutrientes requeridos por los cultivos, por tanto estos pueden remplazar total o parcialmente los fertilizantes químicos que normalmente demandan estos cultivos. Lo que resulta más difícil es entender que además de ahorrar en los fertilizantes, se logran mayores producciones en los cultivos. Por ejemplo que en Tacna se logró 30 TM/ha de papa en las áreas regadas con aguas residuales, mientras que en las regadas con agua subterránea se obtuvieron 12 TM/ha, aun cuando también recibieron nutrientes de los fertilizantes químicos aplicados. La explicación es que, por un lado las aguas residuales tratadas liberan compuestos orgánicos o químicos más simples que los fertilizantes comerciales y por tanto pueden ser absorbidos más fácilmente por las raíces de las plantas. Por otro lado ofrecen estos nutrientes cada vez que se realiza el riego del cultivo, situación más frecuente (cada semana o quincena) que cuando se aplican los fertilizantes al suelo y que no pasan de ser tres veces en la campaña de 4 a 6 meses. Esa mayor frecuencia determina que los nutrientes sean aprovechados en mayor proporción por los cultivos y finalmente generen mayor crecimiento y productividad.

Si tomamos como referencia la información de las lagunas de estabilización de San Juan (Moscoso y Flórez, 1991), que representan la tecnología más utilizada en el país, la concentración de nitrógeno, fósforo y potasio total que tienen sus efluentes y la equivalencia de estos nutrientes respecto a los fertilizantes comerciales que se aplican en

- Nitrógeno total: 17.70 mg/l, equivalente a 88 mg/l de sulfato de amonio.
- Fósforo total: 4.76 mg/l, equivalente a 63 mg/l de superfosfato.
- Potasio total: 2.34 mg/l, equivalente a 45 mg/l de cloruro de potasio.

Aplicando las equivalencias de estos nutrientes y conociendo la dotación de agua de los cultivos agrícolas regados con aguas residuales en Chiclayo, Ica, Tacna, Huanta y Jaén recientemente evaluados, podemos deducir el aporte de nutrientes de las aguas residuales utilizadas y que figuran en el cuadro 8, cantidades nada despreciables para estos cultivos.

Por otro lado también en el cuadro 9 se puede apreciar el aporte de nutrientes que ofrecen las

Caso	Cultivo	Dotación agua		Aporte de nutrientes (kg/ha.año)		
		l/s.ha	m ³ /ha.año	N	P	K
Chiclayo	forrajes	0.35	10,900	965	685	491
Ica	algodón	0.90	28,000	2,478	1,759	1,262
Tacna	tuna	0.34	10,500	929	660	473
Huanta	tuna	0.14	4,400	389	276	198
Jaén	arroz	0.60	18,600	1,646	1,169	838
Promedio nacional	diferentes	0.47	14,480.00	1,281	910	653

Cuadro 8. Aportes de nutrientes de las aguas residuales tratadas en las zonas agrícolas estudiadas en el Perú. (Fuente: elaboración propia).

aguas residuales cuando se riegan los cultivos de arroz, algodón y maíz chala en las zonas del país antes citadas. Vemos en la segunda columna los requerimientos de estos nutrientes en términos de los fertilizantes comerciales utilizados para cada cultivo y en la tercera columna los aportes que ofrece el agua residual cuando se aplica por gravedad. También vemos en la cuarta columna que estos aportes superan largamente los requerimientos, que en algunos cultivos como arroz y algodón pueden causar problemas en la floración y formación de espigas y capsulas, básicamente por exceso de nitrógeno que solo favorece el desarrollo vegetativo (la parte verde) pero no la floración. Es por eso que se propone en la quinta columna reducir la dotación de riego (indicadas en las celdas celestes) para que mediante una dilución con otras fuentes de agua o el uso de un método de riego localizado (micro-aspersión o goteo), logremos bajar el nivel de aporte de nitrógeno hasta los establecidos como requerimientos del cultivo en la etapa de floración.

Es por eso que los agricultores de arroz en Jaén manifiestan que el uso exclusivo de los efluentes de la PTAR es muy conveniente en la primera etapa de desarrollo vegetativo del cultivo, pero que luego afecta la producción de espigas por un exceso de “empaje” (materia verde) y la proliferación del Pyricularia (gusanos) que secan el grano. Los arroceros cercanos de Bellavista también ratifican lo mencionado, pero ellos indican que antes de la floración mezclan las aguas residuales tratadas con las del río para diluirlas, lo que implicaría una reducción del aporte de nitrógeno que afecta dicha floración. En el caso del maíz chala y otros forrajes, ese exceso de nitrógeno no es realmente perjudicial, pero de todas formas se estaría desperdiciando, por lo que también se debería distribuir con mayor eficiencia.

En cuanto a las actividades acuícolas, se sabe que en Asia se ha cultivado de forma tradicional tanto peces como otros organismos acuáticos utilizando los residuos orgánicos para fertilizar el agua contenida en los estanques de cultivo, promoviendo el desarrollo de una cadena alimenticia

Cultivo	Requerim.	Riego por gravedad		Riego localizado o diluido	
	kg/ha.año	kg/ha.año	%	kg/ha.año	%
Arroz:		0.60 l/s.ha		0.20 l/s.ha	
Sulfato de amonio	500	1,600	320%	500	100%
Superfosfato	200	1,200	600%	400	200%
Cloruro de potasio	200	800	400%	250	125%
Algodón:		0.90 l/s.ha		0.30 l/s.ha	
Sulfato de amonio	800	2,478	310%	800	100%
Superfosfato	500	1,759	352%	600	120%
Cloruro de potasio	500	1,262	252%	400	80%
Maíz chala:		0.35 l/s.ha		0.23 l/s.ha	
Sulfato de amonio	550	924	168%	600	109%
Superfosfato	360	687	191%	687	191%
Cloruro de potasio	300	491	164%	491	164%

Cuadro 9. Requerimientos de nutrientes y aporte de las aguas residuales en los cultivos de arroz, algodón y maíz chala. (Fuente: elaboración propia).

natural, que aporta alimento a los organismos cultivados. En las últimas décadas a nivel mundial estos cultivos se han intensificado con la adición de alimentos artificiales, permitiendo así incrementar la producción por metro cuadrado. Aún cuando casi no hay experiencia de acuicultura con aguas residuales en el Perú y América, la Unidad de Acuicultura de San Juan implementada en 1988 permitió evaluar la capacidad de las aguas residuales tratadas para producir peces aptos para consumo humano. Al igual que en la agricultura, este estudio demostró que la acuicultura también se beneficia con el uso de las aguas residuales, toda vez que permite una gran producción de microalgas y otros organismos acuáticos que sirven de alimento a los peces. Se pudo demostrar que es posible obtener hasta 4,400 kg/ha de tilapia del Nilo con solo el alimento natural producido en los estanques, ahorrando casi el 70% de los costos de producción que otras piscigranjas gastan en alimentos artificiales (Moscoso y Flórez, 1991).

Del mismo modo la forestación regada con aguas residuales también muestra importantes ventajas en su crecimiento y productividad. Las mayores experiencias de riego forestal se han realizado desde la década de los 60 en Pennsylvania y Michigan, Estados Unidos, donde se han regado bosques artificiales con efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales (Sopper y Kardos 1963; Sutherland et al. 1974). Estos autores manifiestan que los pinos y eucaliptos regados con aguas residuales tratadas incrementaron su grosor en 186 y 60% respectivamente, más que los regados con aguas de río. Las Pisceas y los bosques mixtos tuvieron una altura mayor en 100 y 340% más cuando recibieron aguas residuales. Por último indicaron que estas especies aumentaron el número de fibras, que es un indicador de mejora de la calidad de la madera.

La experiencia más reciente en el Perú ha sido la implementación de las dos primeras etapas del Entorno Verde de Tacna con 110 hectáreas abastecidas con los efluentes de la planta de lagunas de estabilización de Magollo. Está área verde creada por la Municipalidad Provincial de Tacna está constituida por árboles forestales y frutales que han demostrado un desarrollo impresionante en solo 10 años, como se aprecia en la foto 17 y que aseguran un manejo sostenible con la producción esperada.



Foto 19. Bosque de eucaliptos de 10 años en Tacna

5.5. Los requerimientos de calidad en función al tipo de reuso

Por otro lado muchos profesionales creen que el reuso siempre demanda mayor calidad del efluente que si se dispone directamente en los cuerpos de agua receptores y por tanto requieren de mayor inversión en el tratamiento, sin embargo se debe tener presente que, cuando estas aguas son tratadas para el vertimiento en cuerpos de agua naturales, las exigencias de calidad pueden ser aún mayores que para el reuso, ya que por un lado estos recursos hídricos pueden ser usados luego para el consumo humano, y por otro lado, debe evitarse el vertimiento de nutrientes y contaminantes que generen eutrofización o afecten su flora y fauna natural.

Cuando se discutió en el punto 4.2 los criterios para el manejo sanitario del uso de las aguas residuales, se mencionó que si los efluentes no alcanzan la máxima calidad sanitaria se puede optar por la restricción de los cultivos, ya que existen cultivos menos exigentes en calidad de agua porque se consumen cocidos o procesados o simplemente no se consumen. Es por ello que la OMS desde 1989 ya clasificaba estos cultivos en las dos categorías con las diferentes exigencias de calidad siguientes:

- **Categoría A:** cultivos con mayores riesgos por ser de tallo bajo (hortalizas) y se consumen crudos (lechuga, zanahoria) o soportan contacto primario de las personas (césped). Para estos casos las exigencias de calidad del agua residual tratada debe ser de menos de 1 huevo de nemátodes por litro y de 1,000 coliformes fecales o termo tolerantes por 100 mililitros.

Categoría B: cultivos con menores riesgos por ser de tallo alto (árboles de frutales), no se consumen crudos (papa, camote), son procesados (arroz, trigo), son alimentos para el ganado (forrajes), no son alimentos (algodón), o son árboles forestales (pino, eucalipto). En estos casos la exigencia de calidad del agua residual tratada se limita solo a menos de 1 huevo de nemátode por litro para proteger a los usuarios, pero ya no se exige ningún nivel de coliformes termo tolerantes.

Estamos de acuerdo con los criterios de la OMS antes descritos, sin embargo, en la práctica suelen encontrarse distintos matices de la misma según qué grupos de cultivos se encuentren, y el nivel de riesgos potenciales de los mismos, que pueden potencialmente afectar la salud de los usuarios y/o consumidores.

Es así que el Programa CEPIS 2.1, desarrollado para formular perfiles de proyectos de sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en agricultura, acuicultura y forestación, propone cuatro grupos de cultivos listados en el cuadro 10 que demandarían diferentes niveles de coliformes termo tolerantes comprendidos entre $1.0E+3$ y $1.0E+6/100$ ml. (Moscoso y Egocheaga, 2002-1).

El Programa REUSO 2.1 al incluir la formulación del tratamiento para el riego de cultivos previamente elegidos, propone también el desarrollo del sistema de tratamiento por etapas, a fin de lograr alcanzar los diferentes niveles de calidad requeridos en cada grupo de esos cultivos. Además establece como requisito que la primera etapa tenga un periodo de retención mínimo de 10 días para garantizar la remoción de nemátodos, de lo contrario no se pueden elegir los cultivos deseados aun cuando sean los menos exigentes en calidad.

Una apreciación de la calidad sanitaria de los efluentes utilizados en el riego agrícola del país se puede obtener evaluando las condiciones de algunos casos estudiados que se muestran en el cuadro 11.

Así se puede observar que los efluentes de todas las PTAR, excepto la de Cachiche, alcanzan periodos de retención mayores a 10 días, por tanto deben lograr efluentes con menos de 1 huevo de nemátode por litros, único requerimiento para el riego restringido a cultivos como tuna, tara, olivo, forrajes (gramalote, pasto elefante, alfalfa, maíz chala), algodón y arroz, que son los actualmente regados. Solo en el caso de la planta de Cachiche se podrían tener niveles de parásitos nemátodos más altos que los requeridos, ya que su periodo de retención apenas llega a siete días debido a una sobrecarga, pero este problema puede ser subsanado con un manejo adecuado de los caudales de ingreso y una limpieza de los lodos acumulados en las lagunas. Por otro lado se observa que la calidad de los efluentes de las PTAR Copare y Huáscar con periodos de retención de 40 y 25 días respectivamente llegaría a menos de 1,000 coliformes termo tolerantes por 100 mililitros, calidad exigida para regar las áreas verdes urbanas que permiten el contacto directo con los usuarios.

Nivel de coliformes termotolerantes	Cultivos			
	Temporales	Perennes	Forestales	Acuicultura
Efluente con 1.0E+3	Alcachofa			
	Ajo			
	Apio			
	Brocoli			
	Cebolla			
	Melón			
	Pimiento			
	Poro			
	Tomate			
	Zanahoria			
Efluente con 1.0E+4	Esparrago	Limón		Tilapia
	Frijol			
	Papa			
	Pepinillo			
	Trigo			
	Zapallo			
Efluente con 1.0E+5	Alfalfa	Lucumo		
	Arroz	Manzano		
	Cebada			
	King grass			
	Maíz			
	Yuca			
Efluente con 1.0E+6	Algodón	Cacao	Bosque	
	Caña	Café	Eucalipto	
		Olivo		
		Mandarina		
	Naranja			

Cuadro 10. Cultivos con diferentes exigencias de calidad sanitaria en el agua de riego - Programa REUSO 2.1 (Fuente: Moscoso y Egocheaga, 2002-1).

No es el mismo caso de la PTAR San Juan de Miraflores en Lima porque sus efluentes superan los 1,000 CTT/100 ml requeridos para el riego del Parque Huayna Capac, situación que podría ser corregida con un proceso más efectivo de desinfección.

Una situación que merece una atención muy especial es la existencia de algunas zonas agrícolas, que por las limitaciones de agua en las fuentes tradicionales, recurren al uso de agua residual doméstica sin tratar. Se trata de pocos casos en el país, en que los colectores que llevan las

aguas residuales crudas a las PTAR, cruzan estas áreas agrícolas y son manipulados o rotos para derivar una parte del agua cruda hacia esos predios vecinos. Es el caso de un sector de la Junta de Usuarios Chancay-Lambayeque de Chiclayo, que tienen predios agrícolas en el trayecto de los colectores a las plantas de San José y Pampa de Perros, de donde derivan hasta 330 l/s de crudo para regar diversos cultivos, incluyendo hortalizas. Casos como estos constituyen un alto riesgo a la salud pública, toda vez que usan el agua residual sin tratar con cargas muy elevadas de gérmenes patógenos que pueden enfermar a los consumidores de esas hortalizas.

Por tanto en estos casos será necesario aplicar sanciones ejemplares a estos infractores, que además de producir alimentos muy contaminados, también dañan la infraestructura del sistema de alcantarillado y tratamiento de las aguas residuales de estas ciudades.

Lugar	PTAR				Cultivos	Requerimiento de calidad		
	Nombre	Retención	Parásitos	CTT		Parásito	CTT	Cumple
		(días)	(No. H/L)	(NMP/100 ml)		(No. H/L)	(NMP/100 ml)	Sí/No
Tacna	Magollo	15	0	1.00E+05	tuna, tara	< 1	No aplica	Sí
					maíz , olivo			
	Copare	40	0	1.00E+03	parques	< 1	< 1,000	Sí
Ica	Cachiche	7	puede ser >1	4.70E+06	algodón	< 1	No aplica	Puede ser que no
					maíz			
Chiclayo	San José	15	0	1.00E+05	gramalote	< 1	No aplica	Sí
	Pampa de Perros	25	0	1.00E+05	pasto elefante maíz chala			
Lima	Huascar	25	0	4.00E+02	parques	< 1	< 1,000	Sí
	San Juan	21	0	4.90E+03	forrajes	< 1	No aplica	Sí
					parques	< 1	< 1,000	No
Huanta	Ichpico	20	0	1.00E+05	tuna, maíz	< 1	No aplica	Sí
Jaén	Jaén	15	0	3.00E+04	arroz	< 1	No aplica	Sí

Cuadro 11. Calidad de algunos efluentes tratados de aguas residuales y requerimientos para diversos usos en el Perú. (Fuentes: OPS - 2014, SUNASS - 2015 y elaboración propia).

5.6. El riego con aguas residuales de áreas agrícola altamente productivas

Las primeras experiencias de riego agrícola con aguas residuales en el Perú se orientaron al cultivo de forrajes y hortalizas, actividad que se desarrolló paralela a la forestación de algunas zonas experimentales con eucaliptus y casuarinas. Estos cultivos agrícolas han ido variando con el tiempo de acuerdo a las expectativas de mercado y la necesidad de seleccionar aquellos con menor demanda de agua, que por tanto permitan regar más tierras con el mismo volumen de agua disponible. Es así que en Tacna en 1982 se reportaban producciones de maíz chala (forrajero), alfalfa, avena forrajera, trigo, cebada, tomate, ají (paprika) y papa, en cambio entre el 2005 y



Foto 20. Cultivo de Tara en Tacna

2015 los cultivos habían variado y ahora el principal es la tuna para producción de cochinilla, mientras que las áreas de maíz forrajero han descendido de 421 a 250 ha y solo se cultiva en la época de menor demanda de agua o en los bordes de los canales de riego. El olivo también ha tenido una reducción de área de 71 a 10 ha, en este caso debido a problemas con plagas en toda la zona productora del sur. En contraposición, la tara es el cultivo emergente más significativo por su buen precio actual (foto 20). La producción forrajera (maíz, sorgo y alfalfa) se mantienen porque está siempre ligada al engorde de vacunos de carne durante la época fría.

El cuadro 12 enumera los principales cultivos de los casos estudiados y que juntos abarcan casi 10,000 ha de las 13,200 ha regadas con aguas residuales a nivel nacional, por tanto se puede decir que son representativos de la situación del país. Es evidente que el 53% de los cultivos son forrajes, ocupando el primer lugar el gramalote con 3,000 ha, el pasto elefante con 1,000 ha, el maíz chala con 861 ha y la alfalfa con 422 ha. Es importante indicar que la el maíz chala y la alfalfa son cultivos trabajados tanto en costa como en sierra.

El arroz alcanza un nivel de 27% porque es el cultivo casi exclusivo de la selva alta norte, pero no necesariamente es el más apreciado para regarse con aguas residuales. Es más, muchos agricultores no aceptan el uso de aguas residuales porque, como antes ya se dijo, afecta la productividad del cultivo del arroz. Por ello otros agricultores arroceros proponen usar las aguas residuales pero mezcladas con agua de río.

Cultivo	Costa (ha)	Sierra (ha)	Selva (ha)	Total (ha)	%
Gramalote	3,000			3,000	30
Alfalfa	400	22		422	4
Pasto elefante	1,000			1,000	10
Maíz chala	770	91		861	9
Algodón	380			380	4
Tuna/cochinilla	950	26		976	10
Tuna fruta		472		472	5
Tara	120	26		146	1
Olivo	10			10	0
Arroz			2,700	2,700	27
Total	6,630	637	2,700	9,967	100

Cuadro 12. Principales cultivos regados con aguas residuales tratadas en el Perú. (Fuente: Juntas de regantes de Chiclayo, Ica, Tacna, Huanza y Jaén - 2014 y elaboración propia - 2015).

Un cultivo emergente es la tuna trabajada también en costa y sierra, orientado a la producción de cochinilla en el caso de los primeros, mientras que en la sierra es a la producción de fruta, aunque inicialmente lo dedicaron también a la cochinilla. La gran ventaja de este cultivo es su poco requerimiento de agua que permite tolerar prolongadas épocas de sequía. Otro cultivo próspero es la tara que se está cultivando en muchas partes de la costa y sierra, ya que tiene un mercado en desarrollo con buenos precios y es también un cultivo con bajo requerimiento de agua.

No están mencionados en el cuadro 11 otros cultivos como la caña de azúcar que se trabaja en la costa norte y algunos frutales de tallo alto como cítricos, granada y paca. Igualmente se debe incluir las especies forestales, como eucalipto, casuarina y pino, además del césped (gras americano) y otras plantas ornamentales menores cultivadas en las áreas verdes urbanas regadas con aguas residuales tratadas.

Se puede apreciar que, además de un avance importante en el aspecto organizativo, los agricultores han desarrollado nuevas alternativas de producción, que les ofrecen mejores rendimientos con menor cantidad de agua para generar productos con mejores precios y menores riesgos sanitarios. Por tanto podemos decir que actualmente hay organizaciones de agricultores que usan más eficientemente el agua residual doméstica y han alcanzado en muchos casos un nivel de agricultura comercial que les permite una condición económica bastante aceptable con los ingresos como los estimados en los siguientes casos según el tamaño de sus parcelas:

- Tacna (costa): entre S/. 4,000 y 6,000 mensuales por agricultor (US\$ 1,300 -2,000/mes).

- Huanta (sierra): entre S/. 4,000 y 5,000 mensuales por agricultor (US\$ 1,300 - 1,600/ mes).
- Jaén (selva): entre S/. 3,000 y 13,000 mensuales por agricultor (US\$ 1,100 - 4,300/mes).

Los agricultores aún no han tecnificado los cultivos debido a que no manejan grandes extensiones de terreno (5 a 10 ha) y no pagan por el agua tratada, pero algunos sí están intentando mejorar la tecnología agrícola para elevar su productividad, como es el caso del cultivo de tara en Tacna. Un paso siguiente será intentar obtener un valor agregado de sus productos, como procesar la cochinilla obtenida en los tunales de Tacana para la producción de tintes naturales, o la elaboración de productos lácteos con la leche que producen actualmente en Chiclayo.

5.7. El manejo sustentable de las áreas verdes urbanas regadas con aguas residuales

La habilitación de áreas verdes es una necesidad imperante en las ciudades, ya que permiten reducir la contaminación del aire y otorgar espacios de esparcimiento a la población. Estos son aún más importantes en los centros poblados ubicados en zonas áridas, ya que también regulan la temperatura y protegen la salud de las personas.

El Perú ha sido uno de los primeros países latinoamericanos en lograr experiencias exitosas en el uso de las aguas residuales domésticas para el desarrollo de áreas verdes recreativas en su desierto costero. En el 2008 el Proyecto Global SWITCH - Manejo Sostenible del Agua para mejorar la Salud de las Ciudades del Mañana, implementado por IPES - Promoción del Desarrollo Sostenible, permitió identificar en Lima Metropolitana 37 experiencias de utilización de aguas residuales en el riego de áreas verdes y agrícolas, abastecidas por 30 plantas de tratamiento privadas, municipales y de la Empresa de Agua SEDAPAL (IPES, 2008). Estas experiencias se desarrollaban bajo las siguientes modalidades:

- Experiencias privadas: que han permitido reemplazar el agua potable por el agua residual tratada para el riego de campos deportivos y jardines. Son los casos de los clubes de Golf de Los Incas de San Isidro y de La Planicie en La Molina, que han implementado sistemas de tratamiento para regar sus campos, ahorrando el 80% de los costos de agua potable que antes utilizaban. Un sistema similar ha implementado el Colegio Particular de la Inmaculada (foto 21), que instaló lagunas de estabilización en la parte alta del cerro aledaño, permitiendo con ello desarrollar una ladera verde con árboles frutales y luego regar sus campos deportivos y jardines.

Experiencias municipales: de menor escala que también han demostrado las ventajas de utilizar las aguas residuales en el desarrollo de áreas verdes urbanas. Es el caso de la Alameda de La Juventud en Villa El Salvador (foto 22), que mediante la instalación de una pequeña planta de lodos activados ha permitido transformar una berma central de una importante avenida en un área verde recreativa. Sin embargo, proyectos como estos desafortunadamente tienen un manejo limitado y están proliferando en muchos lugares de la ciudad sin control, lo que podría determinar una gran cantidad de pequeñas plantas mal operadas y sin una supervisión de la calidad sanitaria.

Experiencias asociadas: el riego de grandes parques con aguas residuales tratadas en una PTAR pública, como es el caso del Parque Zonal Huáscar de 45 hectáreas administrado por el Servicio de Parques de Lima (SERPAR), que realizó un convenio con la Empresa de Agua SEDAPAL para instalar la PTAR en el mismo terreno del parque (foto23). Se trata de la opción más segura y manejable para la ciudad.



Foto 21. Colegio La Inmaculada



Foto 22. Alameda de la Juventud



Foto 23. Parque Zonal Huáscar en VES

Por eso con una visión integrada de la toda la ciudad de Lima, SERPAR en el 2014 ha elaborado el inventario de las áreas verdes y agrícolas e infraestructura ecológica de Lima y Callao, identificando mediante imágenes satélites 3,207 ha de áreas verdes públicas, pero que parte de ellas están ocupadas por construcciones y losas de concreto, por lo que el área verde útil se reduce a 2,715 ha. Además esta área útil no está completamente implementada por falta de recursos y principalmente de agua, por tanto las áreas verdes públicas realmente implementadas solo llegan a las 2,284 ha, lo que equivale al 71% de las áreas asignadas. Por otro lado se estimó que las áreas verdes privadas de uso colectivo actualmente cubren una superficie de 1,230 ha, y aun cuando solo equivale al 38% del área verde de uso público, representa un aporte significativo para los beneficios sociales y ambientales que el verde urbano otorga a la ciudad. Por último se debe sumar el verde privado de uso individual que podría superar las 4,000 ha. Una proyección al 2035 indica que las áreas verdes públicas nuevas alcanzarían las 2,700 ha, que sumadas a las 2,715 ya existentes, ofrecerían a la ciudad 5,415 ha de espacios públicos verdes.

Sin embargo, por otro lado Lima es la segunda ciudad desértica más grande del mundo, ya que su principal fuente de agua son los ríos Rímac, Chillón y Lurín, que juntos tienen un caudal promedio mensual de 26 m³/s en época de estiaje. Es por ello que SEDAPAL debe extraer adicionalmente

hasta 8.3 m³/s de agua subterránea para atender la creciente demanda de consumo humano e industrial de la ciudad. Por otro lado se puede apreciar en el cuadro 13 que las áreas verdes públicas y privadas son actualmente regadas con 3.8 m³/s provenientes principalmente de las fuentes de agua superficiales (ríos), subterránea (pozos) y potable, utilizando solo 0.44 m³/s provenientes de las aguas residuales tratadas. Las áreas verdes proyectadas al 2035 llegarían a demandar por lo menos 5.9 m³/s, si implementa un riego tecnificado más eficiente, de lo contrario será casi el doble (SERPAR, 2014).

Fuente	Oferta actual			Oferta potencial
	Agricultura	Áreas verdes	Total	
Área actual (ha)	11,100	3,800	14,900	
Aguas superficiales (ríos)	8.66	1.10	9.76	-
Aguas subterráneas (pozos)	1.50	1.13	2.63	1.50
Agua potable		1.13	1.13	-
Agua residual con tratamiento secundario	0.94	0.44	1.38	3.60
Agua residual con tratamiento primario				10.50
Agua residual sin tratar				4.90
Total	11.10	3.80	14.90	20.50

Cuadro 13. Oferta actual y potencial de agua para el riego de las áreas verdes y agrícolas de Lima y Callao (m³/s). (Fuente: SERPAR, 2014).

Es importante entender que las limitadas fuentes de agua actualmente usadas para el riego de las áreas verdes en Lima son las mismas (menos la residual) usadas para el abastecimiento del consumo humano, en una ciudad donde más de un millón de personas no tienen acceso directo a la red de agua potable, por tanto es imperativo sustituir estas fuentes, especialmente la potable, con el uso de las aguas residuales generadas por la ciudad. Incluso se propone reemplazar el agua de río actualmente usada por la actividad agrícola, salvo la requerida en pequeñas áreas de cultivo de hortalizas, que podría usar agua de pozo. Pero el problema no solo se limita a la disponibilidad de las fuentes de agua, sino también al costo de riego de estas áreas verdes. Como se aprecia en el cuadro 14 actualmente Lima y Callao gastan casi 215 millones de soles para regar sus áreas verdes, de los cuales el agua potable representa el 66%, aun cuando solo contribuye con solo el 30% del volumen utilizado. Si se sustituyen todas las fuentes actuales por agua residual tratada, este costo se podría reducir a 52.7 millones de soles (25% del actual).

Frente a la difícil situación descrita para Lima y Callao, y que bien puede ser similar en las demás ciudades grandes del país, la estrategia para desarrollar las áreas verdes requeridas por la ciudad y garantizar la sostenibilidad de su riego a costos aceptables sería la siguiente:

Fuente	Caudal (m³/s)	Volumen anual (Mm³)	Tarifa (S/. / m³)	Costo actual (MS/.)	Costo con AR (MS/.)
Agua de río pre-tratada	1.10	34.69	0.45	15.61	15.26
Agua subterránea (pozo)	1.13	35.64	1.45	51.67	15.68
Agua potable	1.13	35.64	3.96	141.12	15.68
Agua residual tratada	0.44	13.88	0.44	6.11	6.11
Total	3.80	119.84		214.50	52.73

Cuadro 14. Costo actual del riego de áreas verdes de Lima y Callao.
(Fuente: SERPAR, 2014).

- Evitar la proliferación indiscriminada de las pequeñas experiencias municipales que no cuentan con un buen manejo y control sanitario.
- Elaborar un plan de desarrollo de áreas verdes municipales y privadas con SEDAPAL, para identificar las demandas de agua y los requerimientos de tratamiento en cada zona de la ciudad.
- Instalar, no pocas plantas grandes ni muchas pequeñas, sino plantas medianas ubicadas en lugares estratégicos según la demanda local de agua. Se prevé ubicar las plantas en las partes altas y periféricas de la ciudad para regar en lo posible por gravedad.
- Desarrollar un sistema de distribución del agua tratadas por gravedad o presurizado en todos los parques municipales y privados, estableciendo tarifas de consumo sostenibles.
- Encargar la operación de las plantas básicamente por SEDAPAL, y solo eventualmente a un Municipio que cuente con la supervisión de esta Empresa.

Con estas consideraciones es que SERPAR en el 2014 ha elaborado el Plan de Riego Sostenible en su componente de Riego con Aguas Residuales Tratadas, como parte del Plan Maestro de Áreas Verdes y Espacios Públicos de Lima Metropolitana. La propuesta ha evaluado si la oferta de estas plantas existentes en Lima podía abastecer las áreas verdes actuales y proyectadas al 2035, bajo los siguientes escenarios:

- **ESCENARIO 1:** áreas verdes públicas existentes pero habilitadas al 100% y con los mismos sistemas de riego actuales por gravedad, mangueras, cisternas y tecnificados (aspersión, micro-aspersión y goteo).
- **ESCENARIO 2:** áreas verdes públicas proyectadas con solo sistemas de riego tecnificados.

ESCENARIO 3: áreas verdes públicas, agrícolas y parques ribereños solo con sistemas de riego tecnificados.

Como se puede ver en el cuadro 15, esta evaluación global de la demanda máxima de agua a nivel metropolitano (sin incluir el Callao) se realizó con una misma oferta de 3,129 l/s de agua residual generada por las PTAR existentes operadas por SEDAPAL y SERPAR.

Parámetros	Escenarios		
	1	2	3
Oferta	3,129.00	3,129.00	3,129.00
Demanda (l/s)	2,361.10	3,244.57	8,434.46
Demanda (%)	100.00	137.42	357.23
Balance (l/s)	767.90	-115.57	-5,305.46
Balance (%)	75.46	-3.69	-169.56

Cuadro 15. Balance hídrico global de las aguas residuales para el riego de las áreas verdes proyectadas en Lima al 2035. (Fuente: SERPAR, 2014).

Para regar las 2,721 ha de áreas verdes existentes que se implementen al 100% de su capacidad (escenario 1) el balance hídrico sería positivo con 768 l/s sobrantes. Sin embargo al aplicar la oferta existente sobre las áreas verdes públicas proyectadas al 2035 (escenario 2) ya encontramos un balance hídrico ligeramente negativo con un 4% de déficit. La situación se torna difícil en el escenario 3 que incluye, además de las áreas verdes públicas proyectadas, los parques agrícolas y ribereños también proyectados, que de ser abastecidos con aguas residuales demandarían 8,434 l/s, por tanto se tiene un balance hídrico negativo con un déficit de 170% mayor que la oferta actual.

Es cierto que las áreas agrícolas y ribereñas son abastecidas actualmente con agua de río, pero bien podrían ser atendidas con aguas residuales tratadas para liberar ese recurso hacia otros usos prioritarios como el consumo humano. En este caso se tendría que alcanzar la calidad sanitaria del agua residual requerida para el tipo de cultivos, que preferentemente no deberían ser de consumo crudo.

Por otro lado estas cifras del balance deben ser aterrizadas a los distritos para evaluar si esa disponibilidad relativa en los dos primeros escenarios también se mantiene a nivel de los distritos. Para ello se conformaron 23 grupos en las cuatro zonas geográficas de Lima (Norte, Centro, Este y Sur), constituidos por 11 grupos de distritos y 12 distritos independientes, según su accesibilidad, topografía y distancia de las PTAR a las zonas de riego, ya que no siempre se

podrá disponer del agua residual en el lugar deseado porque su traslado a un lugar muy alejado o poco accesible podría resultar demasiado costoso.

El cuadro 16 permite observar que en Lima Norte, aun cuando tiene varias PTAR, deberá implementar nuevas plantas con capacidad para tratar 1,380 l/s si se quiere abastecer las áreas verdes públicas proyectadas, y con 3,875 l/s si se quiere abastecer además las zonas agrícolas y ribereñas. Por otro lado Lima Centro requiere PTAR que traten entre 245 y 560 l/s si se quiere atender solo las áreas verdes públicas o también se quiere reemplazar el uso actual del río Surco. Las PTAR existentes en Lima Este son suficientes para atender la demanda de las áreas verdes proyectadas, por tanto solo se requerirá nuevas PTAR si se quiere abastecer las zonas agrícolas y ribereñas con 215 l/s adicionales. Por último, Lima Sur también tiene suficiente agua residuales para abastecer sus áreas verdes públicas proyectadas, salvo en algunos distritos balnearios distantes en donde se requieren pequeñas plantas. Solo en Pachacamac y Lurín se necesitarían nuevas plantas si se quiere abastecer los 950 l/s requeridos por las zonas agrícolas y ribereñas.

El Estudio también indicó que no todas las plantas de SEDAPAL alcanzan la calidad sanitaria necesaria para efectuar un riego seguro de las áreas verdes que tienen contacto directo con el público. Solo seis de las 20 plantas alcanzan niveles requeridos de coliformes termo tolerantes menores a 1,000 NMP/100 ml, por lo que las otras 14 plantas deberán implementar un proceso de desinfección adicional. Por otro lado 10 de las 14 plantas reportan efluentes con menos de un huevo de helmintos por litro, valor suficiente para el riego de áreas verdes de contacto primario. Las otras plantas que tienen valores por encima de un huevo por litro, debido a sus cortos periodos de retención, deberán implementar procesos de filtración para mejorar la remoción de estos patógenos. Es importante comentar que los parásitos no son removidos con la desinfección.

Igualmente se observó que varias plantas de SEDAPAL son operadas por debajo de su capacidades de diseño por múltiples razones, por tanto podrían ser rehabilitadas o ampliadas para mejorar el abastecimiento de agua a las áreas verdes cercanas. La implementación prevista para 15 plantas permitirían incrementar 2.7 veces el caudal de tratamiento de 2,230 a 6,020 l/s. Por último este estudio identificó 57 lugares en los distritos donde se podrían ubicar las nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales que se requieran para atender la demanda local.

Distrito	Área verde (ha)			Demanda max. agua (l/s)			Oferta de agua (l/s)		Balance del agua (l/s)			Caudal nuevas PTAR (l/s)		
	Actual 100% habilitada	Proyectada sin agricultura y riberas	Proyectada con agricultura y riberas	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3	Planta	Caudal (l/s)	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3
Lima Norte:	661.93	2,613.89	6,762.83	566.20	1,594.48	4,125.33		761.00	194.80	-833.48	-3,364.33	375.00	1,380.00	3,875.00
Ancón	36.42	1,795.66	1,795.66	30.70	1,095.35	1,095.35	Ancón (S)	41.00	43.60	-1,026.93	-1,026.93	1,030.00	1,030.00	
						Parque Piedras Gordas	18.00							
						Piedras Gordas (S)	15.00							
						Parque Santa Rosa	2.00							
Santa Rosa	6.67	18.97	18.97	5.70	11.57	11.57	Club Unión (S)	4.00						
Puente Piedra	37.96	83.04	221.95	32.50	50.66	135.39			-112.60	-172.94	-2,653.70	115.00	175.00	2,655.00
Carabayllo	91.31	200.47	4,128.38	80.10	122.29	2,518.31								
Independencia	23.29	23.29	23.29	19.90	14.21	14.21								
Comas	175.36	178.86	193.86	153.90	109.10	118.25	Parque Sinchi Roca	6.00						
Los Olivos	159.95	159.95	171.95	134.70	97.57	104.89	Av. Universitaria	40.00	-260.50	-172.88	-189.35	260.00	175.00	190.00
							Parque Lloque Yupanqui	2.00						
San Martín de Porres	130.97	153.66	208.78	108.70	93.73	127.35	Puente Piedra (S)	633.00	524.30	539.27	505.65			
Lima Centro:	935.07	965.44	984.44	816.10	588.92	600.51		55.00	-761.10	-533.92	-545.51	340.00	245.00	560.00
Rimac	29.58	54.58	60.58	25.30	33.30	36.96			-25.30	-33.30	-36.96	25.00	35.00	40.00
Cercado de Lima	91.80	93.78	106.78	77.40	57.21	65.14	Parque Rimac	55.00						
La Victoria	47.80	51.20	51.20	43.40	31.23	31.23			-90.00	-49.57	-57.50	90.00	50.00	60.00
San Luis	26.44	26.44	26.44	24.20	16.13	16.13								
Breña	3.76	3.76	3.76	3.30	2.29	2.29								
Jesús María	53.02	53.02	53.02	46.50	32.34	32.34			-60.90	-42.30	-42.30	65.00	45.00	45.00
Lince	12.56	12.56	12.56	11.10	7.66	7.66								
Pueblo Libre	24.09	24.09	24.09	20.70	14.70	14.70								
Magdalena del Mar	23.82	23.82	23.82	20.50	14.53	14.53			-156.30	-112.53	-112.53	160.00	115.00	115.00
San Miguel	136.56	136.56	136.56	115.10	83.30	83.30								
San Borja	110.85	110.85	110.85	104.10	67.62	67.62								
Santiago de Surco	141.92	141.92	141.92	130.10	86.57	86.57			-234.20	-154.19	-154.19	Abastecidos por el río Surco		155.00
Surquillo	24.04	24.04	24.04	22.00	14.66	14.66								
San Isidro	86.84	86.84	86.84	76.90	52.97	52.97			-194.40	-142.04	-142.04	Abastecidos por el río Surco		145.00
Miraflores	96.95	96.95	96.95	74.40	59.14	59.14								
Barranco	25.02	25.02	25.02	21.10	15.27	15.27								
Lima Este:	646.62	1,026.87	2,373.35	575.80	626.39	1,447.75		710.00	134.20	83.61	-737.75	280.00	215.00	905.00
San Juan de Lurigancho	172.38	177.19	182.19	145.30	108.08	111.13	Parque Huiracocha	4.00	-141.30	-104.08	-107.13	145.00	105.00	110.00
Lurigancho-Chosica	21.35	184.43	507.13	18.70	112.50	309.35	San Antonio	96.00	77.30	-16.50	-213.35	20.00	215.00	
Chaclacayo	17.36	76.01	121.01	15.30	46.37	73.82	Carapongo (S)	360.00						
Ate-Vitarte	152.52	269.37	335.37	142.30	164.31	204.57	Santa Clara (S)	163.00	260.70	239.31	155.74			
Santa Anita	61.33	61.33	61.33	49.20	37.41	37.41								
El Agustino	64.92	64.92	90.92	59.50	39.60	55.46	Parque Cahuide	4.00						
Cieneguilla	12.50	49.37	931.15	11.40	30.12	568.00	Cieneguilla (S)	83.00	71.60	52.88	-485.00			490.00
La Molina	144.26	144.26	144.26	134.10	88.00	88.00			-134.10	-88.00	-88.00	135.00	90.00	90.00
Lima Sur:	470.91	712.75	3,706.35	403.00	434.78	2,260.87		1,603.00	1,200.00	1,168.22	-657.87	15.00	65.00	1,015.00
Villa María del Triunfo	43.64	55.64	55.64	37.30	33.94	33.94	José Gálvez (S)	106.00	70.70	74.06	74.06			
							Parque Flor de Amacaes	2.00						
Villa El Salvador	212.02	232.02	232.02	181.30	141.53	141.53	Huáscar (S)	89.00						
							Parque Huáscar	8.00						
San Juan de Miraflores	83.96	83.96	83.96	70.80	51.22	51.22	San Juan (S)	393.00	191.60	265.05	265.05			
Chorrillos	52.79	52.79	52.79	46.30	32.20	32.20								
Pachacámac	6.98	26.13	1,710.18	6.00	15.94	1,043.21	Manchay (S)	32.00						
							San Bartolo (S)	898.00						
Lurin	31.92	140.53	1,450.08	27.30	85.72	884.55	San Pedro de Lurin (S)	25.00	942.70	874.34	-951.76			950.00
							Nuevo Lurin (S)	-						
							Julio C. Tello (S)	21.00						
Punta Hermosa	17.51	17.51	17.51	15.00	10.68	10.68	Punta Hermosa (S)	18.00	3.00	7.32	7.32			
San Bartolo	4.97	4.97	4.97	4.30	3.03	3.03	San Bartolo Norte (S)	1.00	5.70	6.97	6.97			
							San Bartolo Sur (S)	9.00						
Punta Negra	12.16	12.16	12.16	10.40	7.42	7.42	Punta Negra (S)		-10.40	-7.42	-7.42	10.00	10.00	10.00
Santa María del Mar	2.96	85.04	85.04	2.60	51.87	51.87			-2.60	-51.87	-51.87	5.00	55.00	55.00
Pucusana	2.02	2.02	2.02	1.70	1.23	1.23	Pucusana	1.00	-0.70	-0.23	-0.23			
Total	2,714.53	5,318.96	13,826.98	2,361.10	3,244.57	8,434.46		3,129.00	767.90	-115.57	-5,305.46	1,010.00	1,905.00	6,355.00

Cuadro 16. Balances hídricos de las aguas residuales tratadas en los tres escenarios propuestos para el riego de las áreas verdes existentes y proyectadas en Lima al 2035. (Fuente: SERPAR, 2014) (S: de SEDAPAL).

ESC. 1: áreas verdes públicas actuales con los mismos sistemas de riego actuales.

ESC. 2: áreas verdes públicas proyectadas al 2035 todas con sistemas de riego tecnificados.

ESC. 3: áreas verdes públicas y parques agrícolas y ribereños proyectados al 2035 todas con sistemas de riego tecnificados.

5.8. Las aguas residuales para la forestación como opción al manejo de suelos y agua

La creación de entornos ecológicos es una necesidad imperante en las ciudades, ya que permiten atenuar la creciente contaminación del aire. Se estima que cada hectárea de bosque tiene capacidad de generar diariamente 1,000 kg de oxígeno y de absorber 1,500 kg de dióxido de carbono, además de retener anualmente 30 TM de partículas en suspensión. Como antes se ha dicho, en los centros poblados ubicados en zonas áridas estos bosques pueden constituir una cortina de viento para proteger la salud de la población de las bajas temperaturas y del exceso de partículas de polvo en el aire.

El uso de las aguas residuales para la producción forestal tiene la ventaja de un menor requerimiento de cantidad y calidad de agua. En términos prácticos significa que el costo del tratamiento puede ser menor cuando se apliquen los efluentes a estas áreas forestales y el riego abarcaría una mayor área de desarrollo forestal. Además es importante destacar que la forestación puede estar orientada a la actividad comercial, como es la producción de madera y otros productos que tienen demanda en el mercado urbano, y no solo al desarrollo de bosques para fines ecológicos o recreativos. Por eso, las principales alternativas de producción forestal son las siguientes:

- Franjas perimetrales de las plantas de tratamiento, como barreras de viento para aislar el sistema del área urbana, mejorar el ornato del lugar y evitar una eventual difusión de malos olores.
- Viveros forestales de diversas especies ornamentales, que pueden ser ofertadas en la ciudad con un beneficio económico bastante elevado.
- Bosques de producción de madera y otros productos como leña y carbón.
- Entornos ecológicos urbanos para fines recreativos y proteger a la ciudad de los vientos y polvo.
- Franjas para protección de laderas que permitan contrarrestar los efectos de la erosión pluvial y eólica, y mejorar las condiciones ambientales y paisajísticas de las zonas urbanas.

En el Perú existe una rica y variada experiencia del desarrollo de entornos ecológicos, especialmente en la costa desértica. El Complejo Bioecológico de San Juan de Miraflores (foto 24), ubicado al Sur de Lima es la experiencia más antigua y que ha logrado desarrollar 600 ha verdes conformada por una zona agrícola y otra forestal, además de un parque zonal de

recreación para la población del sur de Lima. El bosque está conformado por 15 ha de eucaliptos asociados con casuarinas, molles y otras especies.

Otro importante desarrollo forestal es el Entorno Verde de Magollo (foto 25), que recientemente se está implementando en la ciudad de Tacna y que pretende ocupar 580 ha de desierto, utilizando los efluentes de la planta de aguas residuales aledaña. En la actualidad tiene 60 ha de un bosque consolidado de eucaliptos, casuarinas. Una segunda etapa está en proceso para otras 40 ha con eucalipto y cítricos que le otorgarán un esquema productivo, además de ambiental y recreativo. El principal problema de los entornos ecológicos es su mantenimiento y conservación. Normalmente son administrados por los municipios y otras entidades públicas que, por lo general, tienen serias limitaciones institucionales y económicas. Por eso la alternativa es proponer la gestión comercial de algunas parcelas forestales. Al inicio, el gobierno local participaría en la implementación del proyecto y luego las parcelas se entregarían a los agricultores para su conservación y explotación racional. Ello significa que estos bosques deberán ser regados y protegidos, y luego de la tala deberán ser nuevamente reforestados con las mismas especies y densidades que inicialmente tuvieron. Otra opción es promover la iniciativa privada para que se implemente bosques con propósitos exclusivamente comerciales, que permitan con ello financiar el tratamiento de las aguas residuales generadas por las ciudades.

La importante experiencia del Perú en el desarrollo de entornos ecológicos, especialmente en la



Foto 24. Complejo Bioecológico de San Juan



Foto 25. Entorno Verde de Magollo en Tacna



Foto 26. Ubicación de las ciudades seleccionadas para la forestación

costa desértica, ha permitido sustentar un Programa Nacional de Forestación de Zonas Áridas en la Costa Peruana, que propone como primera etapa implementar casi 2,400 hectáreas de bosques en zonas áridas aledañas a nueve ciudades costeñas (foto 26), utilizando 1.8 m³/s de aguas residuales que serían tratadas en 230 hectáreas de lagunas de estabilización primarias. Hasta el 2035 se esperaría duplicar dicha infraestructura para regar 7,300 ha de bosques alrededor de las mismas ciudades. El Proyecto demandaría una inversión de 46 millones de dólares hasta el 2035 (31 millones para las plantas de tratamiento y 15 millones para la forestación), brindando a los concesionarios recibir desde el primer año de operaciones casi US\$ 3 millones anuales proveniente de la tarifa de tratamiento y a partir del octavo año otros US\$ 8 millones de la producción forestal. Se prevé que este proyecto podría pagar la deuda en los primeros 10 años y obtener utilidades mayores al doble de la inversión en 20 años, rentabilidad sumamente atractiva para promover la inversión privada.

Esta estrategia de reuso también permitiría reducir la inversión del tratamiento al 19% del valor calculado para plantas convencionales de lodos activados, en virtud de un menor requerimiento de la calidad de agua para el riego forestal y del uso de tecnología barata como las lagunas de estabilización solo primarias (foto 27). Del mismo modo beneficiará indirectamente a toda la población de las ciudades involucradas, al proteger

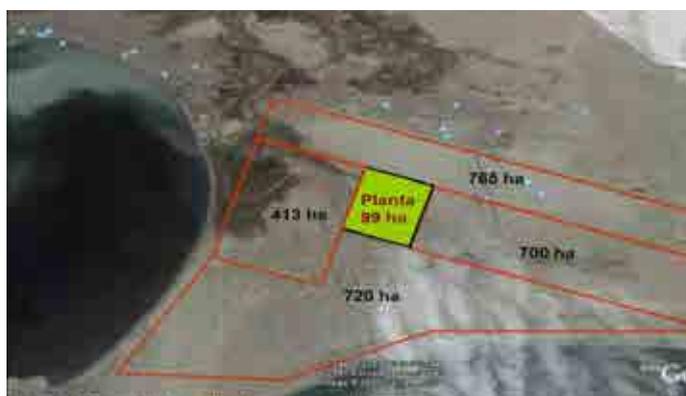


Foto 27. Zona forestal potencial en Chimbo

su salud de los vientos del desierto y proporcionarles áreas verdes de esparcimiento. Por último, la creación de estos oasis en el desierto costeño contribuiría decididamente con las iniciativas de lucha contra el calentamiento global y la desertificación. Al respecto se ha estimado que este proyecto liberaría 120 millones anuales de metros cúbicos de agua que deben ser captados y transportados desde zonas alejadas de la sierra, y además captaría 2.6 millones de toneladas de dióxido de carbono y produciría 1.6 millones de toneladas de oxígeno.

5.9. Los beneficios de integrar el reuso al tratamiento de las aguas residuales

Haciendo un repaso de todos los aspectos que se han discutido en este capítulo, es posible hacer la siguiente lista de los beneficios de integrar el reuso al tratamiento de las aguas residuales:

Para la protección de la salud y mejorar la calidad de vida de la ciudad:

- Mejora el manejo de riesgos a la salud y el ambiente
- Reduce el gasto social de la atención de enfermedades entéricas y la pérdida de días de trabajo en la población enferma.
- Permite el incremento de la producción segura de alimentos, especialmente a las ciudades que ofertan sus aguas residuales a esta actividad.
- Permite proponer una reducción de la tarifa de agua a la ciudad, en la medida que puede compartir los costos del tratamiento de las aguas residuales con los usuarios de los efluentes.
- Contribuye a la generación de empleo agrícola dentro en la ciudad, tanto en las áreas agrícolas periurbanas como en las áreas verdes urbanas.
- Protege la salud de las poblaciones de ciudades ubicadas en zonas áridas de las bajas temperaturas y del exceso de partículas de polvo en el aire.
- Contribuye a la producción de energía a través del biocombustible generados en los procesos de tratamiento anaerobio de aguas y lodos.

Para el fortalecimiento de la empresa que trata las aguas residuales:

- Otorga a la EPS una mayor capacidad económica para asegurar la operación y el mantenimiento de la planta de tratamiento.
- Mejora la viabilidad y sostenibilidad de los sistemas de tratamiento de aguas residuales que implementen las ciudades.

Para la mejora de la actividad agrícola y forestal:

- Aporta los nutrientes básicos para la actividad agrícola, sustituyendo total o parcialmente los fertilizantes químicos.
- Contribuye a la ampliación de la frontera agrícola y forestal, al permitir la incorporación de nuevas tierras que no disponían de fuentes de agua como el desierto de la costa.
- Permite el almacenamiento estacional de agua para ser usado en la actividad agrícola en la época de estiaje.

- Permite asegurar la producción agrícola durante todo el año, en áreas que son obligadas a descansar en época de estiaje por falta de agua, mejorando la productividad y rentabilidad de la actividad agrícola.

Para el buen manejo de la cuenca y el medio ambiente:

- Contribuye a proteger las fuentes de agua destinadas al consumo humano.
- Constituye una fuente adicional de recursos hídricos, incrementando la oferta de agua para el riego agrícola y forestal.
- Contribuye al uso eficiente de los recursos hídricos, sustituyendo con agua residual tratada el uso de otros recursos como aguas superficiales, subterráneas y potable que pueden ser mejor utilizadas de primer uso en las actividades prioritarias como el consumo humano.
- Contribuye a la recuperación de la calidad sanitaria y ambiental de los cuerpos de agua que antes del reuso eran contaminados con el vertimiento de las aguas residuales.
- Contribuye en la captación de CO₂ emanado por las actividades urbanas y a la producción de oxígeno, mejorando la calidad del aire de la ciudad.
- Contribuye a la lucha contra el calentamiento global por el uso de los gases como combustible.
- Contribuye a la lucha contra la desertificación mediante la incorporación de áreas verdes agrícolas y forestales en las zonas desérticas.

Abordando solo algunos de los beneficios mencionados más importantes, se puede complementar que en una aplicación directa del principio “quien contamina paga”, las ciudades debieran asumir el costo total del tratamiento de las aguas residuales que generan. Sin embargo, muchas autoridades tienen dificultades para agregar estos costos de tratamiento al costo de vida en la población y terminan asumiendo solo los costos del abastecimiento de agua potable y el alcantarillado. En ese sentido la integración del tratamiento al uso agrícola de las aguas residuales puede ser un mecanismo clave para reducir las inversiones y costos operativos en ambas actividades. La alternativa de utilizar estas aguas tratadas en actividades productivas como la agricultura genera un espacio de concertación entre la ciudad, que dispondría de sistemas adecuados de tratamiento de bajo costo, y los usuarios potenciales del agua, quienes podrían asumir parte del costo del tratamiento por el derecho a disponer de agua con fertilizantes. Por tanto, los sistemas integrados controlarían en algo el incremento de las tarifas cuando se incorpore el costo del tratamiento, lo que finalmente garantizará la sostenibilidad del servicio.

El valor de los nutrientes

Un beneficio que siempre debe ser evaluado es el valor de los nutrientes contenidos en las aguas residuales. Es posible estimar la cantidad que “fertilizantes naturales” que generan o generarían las aguas residuales domésticas si todas fueran tratadas y utilizadas en la actividad agrícola. Este cálculo se ha realizado sobre la base de los precios promedios para el país de los fertilizantes comerciales más utilizados para aportar nitrógeno, fósforo y potasio y que son los siguientes:

- Sulfato de amonio: S/. 1,710/TM (US\$ 553/TM)
- Superfosfato de calcio: S/2,220/TM (US\$ 716/TM)
- Cloruro de potasio: S/. 1,810/TM (US\$ 584/TM)

Es así que el cuadro 17 muestra los aportes y el valor de estos tres tipos de nutrientes que generan las aguas residuales actualmente tratadas para diferentes escenarios. Las aguas tratadas actualmente en un año contienen casi 110,000 TM de nutrientes valorizados en S/. 208 millones (US\$ 67 millones). Estas cifras se elevarían a 136,000 TM anuales si todas las aguas generadas

Parámetro	Unidad	AR tratada actual	AR producida 2015	AR a producirse en 2030
Producción AR	l/s	17,700	22,000	28,900
	miles m ³ /año	558,187	693,792	911,390
Aporte de nitrógeno	TM/año	49,400	61,401	80,658
Aporte de fósforo		35,072	43,592	57,264
Aporte de potasio		25,163	31,276	41,085
Total nutrientes		109,635	136,269	179,008
Valor del nitrógeno	miles S/.	84,473	104,995	137,925
Valor del fósforo		77,860	96,775	127,127
Valor del potasio		45,545	56,610	74,365
Total nutrientes	miles S/.	207,878	258,380	339,417
Total nutrientes	miles US\$	67,058	83,348	109,489

Cuadro 17. Aportes y valor de los nutrientes contenidos en las aguas residuales que actualmente se tratan y producen, y las que se producirán en el 2030 en el Perú. (Fuente: elaboración propia - 2015).

actualmente fueran tratadas y reusadas, con un valor que alcanzaría a los S/. 258 millones (US\$ 83 millones). Por último si las aguas que se generen en el 2030 fuesen tratadas y reusadas totalmente estaríamos suministrando a la agricultura casi 180,000 TM anuales de nutrientes por un valor de S/. 340 millones anuales (US\$ 109 millones).

La generación de puestos de trabajo agrícola en la ciudad

Por otro lado también se puede estimar la generación de puestos de trabajo del uso actual y potencial de las aguas residuales para los mismos escenarios antes propuestos. el cuadro 18 nos permite estimar que se podrían lograr 35,400 puestos de trabajo directos y 177,000 indirectos si todas las aguas tratadas actualmente fueran utilizadas para desarrollar la actividad agrícola, cifras que se elevarían a 82,800 y 414,000 empleos respectivamente si todas las aguas producidas se reusaran. Por último en el 2030 se llegaría a generar 87,000 puesto directos y 434,000 indirectos.

La ampliación de la frontera agrícola

Uno de los objetivos más importantes para el desarrollo del Perú ha sido y sigue siendo la ampliación de la frontera agrícola, especialmente en zonas como la costa en donde hay amplias áreas desérticas que se pueden volver productivas si dispone del agua necesaria. Es por ello que

Parámetro	Unidad	AR tratada actual	AR producida 2015	AR a producirse en 2030
Área agrícola	ha	29,500	69,000	72,300
Agricultores	parcelas	5,900	13,800	14,460
Familiares	personas	29,500	69,000	72,300
Empleo directo	personas	35,400	82,800	86,760
Empleo indirecto	personas	177,000	414,000	433,800

Cuadro 18. Aporte potencial de puestos de trabajo en las áreas agrícolas regadas con aguas residuales en el Perú. (Fuente: elaboración propia - 2015).

desde la década del 70 se iniciaron grandes proyectos de irrigación que han permitido incorporar y habilitar a la actividad agrícola más de 715,000 ha. El cuadro 19 presenta las inversiones y tierras incorporadas o habilitadas por los grandes proyectos de irrigación implementados en el país. Se puede observar que los costos totales varían desde US\$ 3,166 hasta 39,641 por hectárea, dependiendo de la complejidad del sistema de irrigación y en algunos casos de la incorporación de centrales para la generación de energía hidroeléctrica. Por eso el estudio luego discrimina los costos de generación de energía y rescata los costos netos de incorporar (captación y traslado del recurso) y habilitar las tierras (sistema de distribución y riego) que figuran en las últimas tres

columnas. Es importante aclarar que en algunos casos estos costos netos superan al total, por lo que asumimos provengan de otras fuentes o el total no contemple incrementos presupuestales para la implementación o la ampliación en siguientes etapas. Aun así encontramos que los costos netos (sumados la incorporación y el sistema de riego) varían entre US\$ 4,040 y 27,110/ha según el caso. Si se toma como referencia los casos de reuso recientemente estudiados en Tacna, Huanta (Ayacucho) y Jaén (Cajamarca), se puede observar en el cuadro 20 que la incorporación de tierras en esos lugares ha tenido un costo entre US\$ 1,559 y 12,267, valores más bajos que los invertidos para incorporar tierras a través de los grandes proyectos de irrigación ejecutados en el país, aun cuando los de reuso incluyen los costos del sistema de tratamiento de las aguas residuales. En una situación normal, en donde la ciudad asume la inversión del tratamiento de sus aguas residuales, el aprovechamiento de este recurso en la actividad agrícola demandaría una inversión restringida al sistema de traslado y riego, por tanto los costos serían aún más bajos. De hecho el caso de Jaén no sería el más deseado porque tiene componentes que elevan los

Proyecto	Inversión	Ha incorporadas	Costo total/ha	Costo en US\$/ha		
	millones US\$		US\$	Incorporar	Riego	Ambos
Puyango-Tumbes	636.76	48,000	13,266	2,800	4,490	7,290
Chira-Piura	828.03	119,244	6,944	3,300	5,280	8,580
Jequetepeque-Saña	564.37	49,600	11,378	2,470	3,960	6,430
Olmos	1,180.00	112,000	10,536	2,870	4,590	7,460
Tinajones	522.00	86,000	6,070			
Chavimochic	2,134.00	145,973	14,619	6,610	10,590	17,200
Chinecas	140.00	44,220	3,166	1,550	2,490	4,040
Majes	2,474.00	62,410	39,641	3,000	4,810	7,810
Pasto Grande	280.20	9,304	30,116	5,910	9,460	15,370
Tacna	579.38	21,253	27,261	10,420	16,690	27,110
Río Cachi	204.16	17,435	11,710	5,320	8,520	13,840
Total	9,542.90	715,439.00	13,339			

Cuadro 19. Costos de incorporación de tierras para la agricultura en los grandes Proyectos de Irrigación del Perú. (Fuente: INADE, Perú Económico, Vol. XVII, No.7 - 1994).

costos, tales como un alto precio de las tierras y la implementación de reservorios. En cambio Tacna es el caso ejemplar para la costa, ya que habilita tierras desérticas sin valor y trabaja con cultivos muy rentables y de poca demanda de agua, lo que les ha permitido incorporar una extensión mayor de tierras a la agricultura.

Caso	Inversión	Área regada	Costo de habilitación	
	(miles soles)	(ha)	(S./ha)	(US\$/ha)
Tacna	5,317	1,100	4,834	1,559
Huanta	6,747	660	10,223	3,298
Jaén	26,620	700	38,029	12,267
Promedio	38,684	2,460	15,725	5,073

Cuadro 20. Costos de incorporación de tierras por los proyectos de reuso estudiados en el Perú. (Fuente: elaboración propia - 2015).

Solo queda recordar que el potencial actual de reutilización de aguas residuales en el Perú es de 29,500 ha agrícolas o 53,100 ha forestales y una proyección al 2030 establece que se podría llegar a las 73,200 ha agrícolas ó 131,700 ha forestales, extensiones muy importantes que podrían incorporarse a costos más bajos que los proyectos de irrigación convencionales. Pero para ello se deberá lograr algunas estrategias de gestión como las siguientes:

- Integrar la gestión de los sistemas de tratamiento y reuso.
- Comprometer a todas las EPS de Agua y Saneamiento en este proceso integrador, ya que constituyen las principales fuentes de agua residual tratada.
- Asegurar una eficiente operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento, ya que de eso depende el garantizar la calidad de los efluentes utilizados en las actividades agrícolas y forestales que se desarrollen.
- Valorar este recurso hídrico que conforman las aguas residuales tratadas, en tanto que ellas aseguran una disponibilidad permanente de agua y nutrientes, a fin de establecer tarifas reales del uso de los efluentes de las plantas.
- Mejorar la productividad de la actividad agrícola y forestal, implementando sistemas de almacenamiento del agua y de riego tecnificado, que permitan ampliar el área beneficiada, especialmente en época de estiaje.
- Fortalecer experiencias “modelos” de tratamiento y uso de aguas residuales en diferentes regiones del país, que permitan demostrar las ventajas del reuso y capacitar a los operadores y agricultores.

Se espera que el Plan de Inversiones de Saneamiento 2016-2020 que está elaborando el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento incorpore esta estrategia de fortalecer por lo menos tres experiencias modelo en costa, sierra y selva para promover el uso eficiente y seguro de las aguas residuales en el resto del país.



| 06



CRITERIOS PARA EL DISEÑO DEL COMPONENTE DE REUSO

Tradicionalmente los proyectos de reuso se han desarrollado en forma espontánea y en función a la disponibilidad de agua residual, incluso sin tratar, que aprovechaban los agricultores aledaños a las ciudades, generalmente en zonas donde los colectores llevaban estas aguas a un cuerpo receptor, o alrededor de las plantas de tratamiento de estas aguas y que en algunos casos en áreas desérticas sin ningún uso. Esta situación determinaba que los agricultores utilizaran las aguas residuales sin ninguna previsión y por tanto pusieran en riesgo la salud de ellos mismos y de los consumidores. A pesar de que esta actividad era informal, los agricultores fueron incorporando aquellos cultivos con buena productividad, en la medida que las aguas residuales les proporcionaban nutrientes y les permitían buenos rendimientos, con el único criterio de elegir los cultivos más rentables. Queda claro que no existía ninguna estrategia para buscar una integración con los responsables del tratamiento, que hiciera del reuso una opción que beneficiara a ambos componentes.

Por lo antes indicado es que ahora proponemos tener una visión integrada desde el momento de la concepción del Proyecto, lo que implica definir antes del tratamiento, la forma, el lugar y los tipos de cultivos que se pueden desarrollar con este recurso. La Guía para la Formulación de Proyectos de Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de las Aguas Residuales elaborada por CEPIS/OPS (Moscoso y Egocheaga, 2002-2) propone la siguiente secuencia para abordar estos proyectos:

- Conceptualización del modelo de sistema integrado.
- Ubicación del estudio en el contexto de la cuenca.
- Identificación del contexto social en el área de estudio.
- Identificación del contexto legal de las aguas residuales.
- Evaluación del tratamiento y el reúso existentes.
- Diagnóstico ambiental del área de estudio.
- Identificación de los actores involucrados en el proyecto.
- Evaluación de los recursos agua y suelo en la cuenca.
- Definición de la propuesta de un sistema integrado.
- Socialización de la propuesta con los actores identificados.
- Elaboración del plan agrícola.
- Diseño del sistema de tratamiento.
- Definición del plan de implementación del proyecto.
- Formulación de la propuesta de gestión del proyecto.

- Definición de la estrategia para el financiamiento del proyecto.
- Evaluación económica y financiera del proyecto.

Esta secuencia no necesariamente coincide con la estructura del documento que se elabora para presentar el estudio de pre-inversión, ya que dicha estructura depende más del orden en que se debe presentar oficialmente el documento, de acuerdo con la norma establecida para la formulación de los estudios de pre-inversión (ejemplo el SNIF). Por tanto esta secuencia intenta proponer en términos prácticos los pasos que se deben seguir para desarrollar el estudio en forma lógica.

La conceptualización debe enfocar del Proyecto como el sistema integrado de tratamiento y uso de aguas residuales domésticas que ya se ha explicado en el capítulo anterior, y que necesariamente debe incorporar los aspectos sanitarios, ambientales, agrícolas, sociales, institucionales, legales y económicos que deberán ser abordados. Por tanto, la institución o consultora responsable deberá conformar un equipo multidisciplinario para elaborar estos temas, lo que implica en una primera instancia adecuar el tratamiento de las aguas residuales domésticas al uso productivo, a fin de priorizar la remoción de patógenos para proteger la salud pública, en lugar de remover la materia orgánica y los nutrientes que sí son aprovechados en la agricultura. También propondrá la implementación una tecnología apropiada de tratamiento, como las lagunas de estabilización, para lograr este objetivo sanitario requerido por las actividades agrícolas, acuícolas y forestales a los costos más bajo y sostenible.

A continuación se abordarán solo algunos de los aspectos más relevantes relacionados al dimensionamiento de los proyectos. La información completa se puede revisar en la Guía para la Formulación de Proyectos de Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de las Aguas Residuales elaborada por CEPIS/OPS (Moscoso y Egocheaga, 2002-2).

6.1. Disponibilidad de áreas y agua residual

A diferencia del esquema tradicional, antes de proponer el sistema de tratamiento se debe concebir el sistema de reuso, proceso que comienza por identificar el lugar donde se podría desarrollar una actividad productiva o recreativa con las aguas residuales. Evidentemente, como ya se dijo, este lugar no estará demasiado cerca de la ciudad y debe tener una visión clara del ciclo del agua de la cuenca, por tanto debe evaluar cómo están desarrollados todos los componentes: fuentes y demanda de agua, manejo de los desagües de la ciudad y su tratamiento actual si ya existe, el uso actual o potencial para el riego agrícola y su disposición final. Siempre

se procurará el máximo aprovechamiento de estas aguas en el riego, a fin de reducir y hasta eliminar las descargas a los ambientes acuáticos naturales, ya que por más tratamiento que exista, de alguna forma siempre generarán impactos negativos al ambiente.

El conocimiento básico de los recursos hídricos, la fisiografía y capacidad de uso de los suelos permitirán definir el potencial agrícola de la zona previamente elegida, a fin de ubicar el proyecto en el lugar más apropiado. La evaluación de las fuentes de agua (lluvia, aguas superficiales, subterráneas y residuales), así como de su calidad sanitaria y agronómica, será importante para el estudio. La información confiable de la demanda de agua para uso agropecuario y municipal permitirá conocer la disponibilidad efectiva del agua para riego agrícola. Al final se deberá establecer un balance hídrico y la variación estacional de las fuentes estudiadas.

Para formular la propuesta, será necesario conocer la extensión actual y potencial de las tierras irrigables, área que a la vez debe incluir el sistema de tratamiento. Debido a la cantidad de terreno que demandan el área agrícola que será regada y las lagunas de estabilización, es conveniente localizar el proyecto en áreas disponibles amplias y baratas, algo alejadas de la ciudad. Este sistema integrado generará un entorno ecológico de mínimo impacto negativo para la población y la ruta del sistema de conducción también promoverá un desarrollo urbano planificado.

Un aspecto relevante es evaluar la capacidad de uso de los terrenos elegidos, ya que pueden ciertas limitaciones para las actividades que se quieren desarrollar, incluyendo la instalación de la planta de tratamiento (por ejemplo que tenga una napa freática muy superficial). Los suelos se clasifican entre otros criterios, según su potencial para sostener la producción de cultivos y las limitaciones que pueden ofrecer a la misma, lo que se denomina capacidad de uso de la tierra o capacidad agrícola (foto 28). Los aspectos más importantes que intervienen en la determinación de la capacidad de uso son los siguientes:



Foto 28. Evaluar la capacidad de uso de la tierra

- **Fertilidad del suelo:** se debe tomar en cuenta la textura del suelo, la profundidad efectiva, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de carbonatos, la salinidad o conductividad eléctrica, y la concentración de los principales elementos mayores (nitrógeno, fósforo y potasio). Esta fertilidad se puede evaluar a través de análisis de caracterización de suelos o de medidas indirectas como los bioensayos.

- **Limitaciones naturales para la agricultura:** pueden haber suelos con toxicidad por presencia de aluminio o sodio, o con mal drenaje y problemas de salinidad. Otros factores como el riesgo de erosión en pendientes muy pronunciadas o el riesgo de inundaciones en zonas ribereñas también deben ser analizados para determinar el costo de las intervenciones que se requieran y su impacto en la rentabilidad.

- **Comportamiento de los suelos frente al agua de riego:** se requiere analizar la textura y el contenido de materia orgánica, la tasa de infiltración, la retención y el nivel de la napa freática, entre otros. Esto puede ser determinante para decidir el sistema de riego o los cultivos a incluir en el plan agrícola, dependiendo de las necesidades de agua y de la eficiencia productiva. Este comportamiento puede evaluarse por medio de análisis del suelo, pruebas de conductividad hidráulica y bioensayos.

Ya se explicó que el agua residual es muy apreciada por su aporte de materia orgánica y nutrientes. La materia orgánica es un recurso indispensable para mejorar la calidad del suelo en términos físicos, químicos y biológicos. Por lo general, los suelos agrícolas presentan bajas concentraciones de materia orgánica, especialmente aquello que no se han trabajado por limitaciones de agua como las extensas áreas desérticas de la costa peruana. El insumo más utilizado para agregar materia orgánica al suelo es el estiércol, que en muchos lugares es cada vez más escaso, caro o de calidad inadecuada. Por estas razones, el aporte de materia orgánica a través de las aguas residuales puede ser un factor decisivo para lograr la aceptación de los sistemas integrados por parte de los agricultores. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que el estudio de la dinámica en el suelo de la materia orgánica aportada por aguas residuales es aún incipiente y requiere mayor evaluación en cada caso. El aporte de nutrientes al cultivo puede significar un ahorro importante en el uso de fertilizantes químicos, que son el principal insumo para la fertilización.

Es muy probable que finalmente no se utilice todo el terreno disponible ubicado debido a las limitaciones de agua y de la capacidad de uso del suelo, pero es mejor tener más terreno a no tener la cantidad suficiente para usar toda el agua disponible. En ese sentido hay que tener presente que la cantidad de agua residual se irá incrementando conforme crece la ciudad, por tanto es conveniente disponer de terrenos adicionales para contemplar la ampliación del tratamiento y el reuso. Por ello, luego de conocer la disponibilidad y características de las tierras ubicadas, es necesario conocer la oferta de agua residual y la demanda de agua de los cultivos que se desean implementar. Para describir mejor el proceso de elaboración de la propuesta utilizaremos como ejemplo hipotético la ciudad de Sullana ubicada en la zona norte de la costa peruana. En la figura 24 se puede observar que el colector de las aguas residuales se tendría que prolongar por 11 km hasta una zona desértica de más de 500 ha muy aparente para desarrollar el Proyecto. También se puede apreciar el sistema de tratamiento está incluido en la zona elegida para el reuso, y además de estar dividido en etapas de acuerdo a los requerimientos de ubicación, cantidad y calidad de agua de los distintos componentes del reuso.

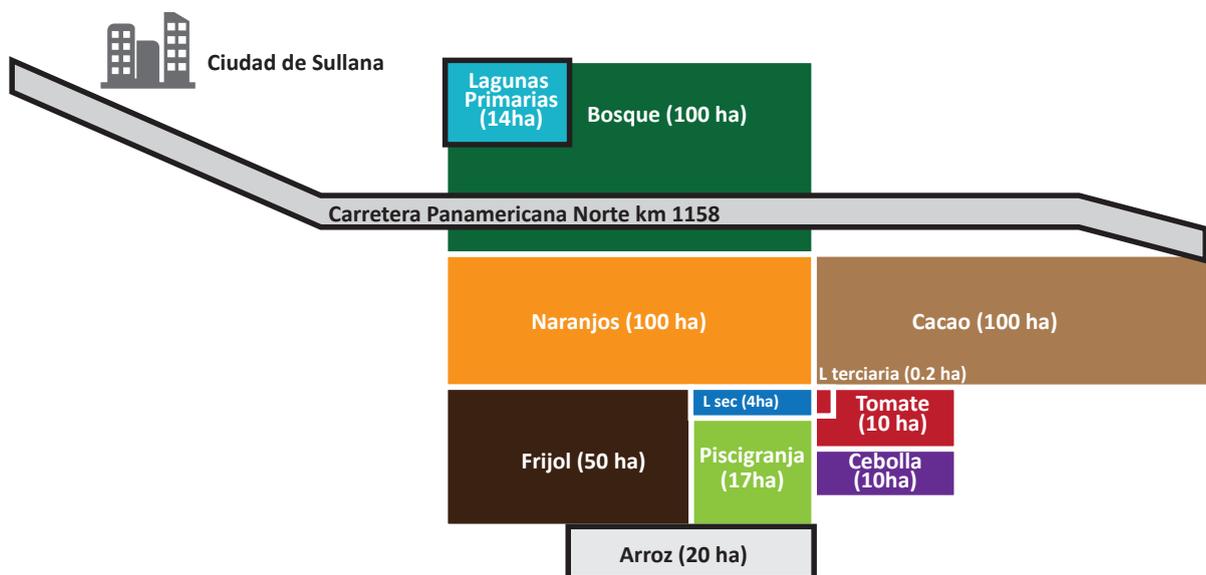


Figura 24. Ejemplo de ubicación de un sistema integrado de aguas residuales. (Fuente: elaboración propia).

La zona elegida para el ejemplo de Sullana tiene más de 500 ha disponibles, por tanto la siguiente necesidad es conocer la cantidad del agua residual que podría ser utilizada para desarrollar las actividades de reuso deseadas. La elección de los cultivos, sus requerimientos de agua según el clima y el método de riego finalmente establecerá la extensión de los cultivos elegidos y por tanto la cantidad neta de terreno que será adquirido a un precio previamente establecido. El cuadro 21 indica que el Proyecto dispondría de un caudal de crudo de 200 l/s con un DBO₅ de 250 mg/l y una colimetría fecal de 1.00E+8. También indica que la temperatura promedio del agua del mes más frío del año es de 25°C y las pérdidas por evaporación e infiltración serían de

Parámetros	
Caudal de crudo (l/s)	200.00
DBO ₅ en el crudo (mg/l)	250
Coliformes fecales en el crudo (NMP/100ml)	1.00E+08
Temperatura mensual mínima del agua (°c)	25.00
Evapo-filtración (cm/día)	1.50
Área total disponible para el sistema (ha)	430.00
Costo del terreno (EUA\$/ha)	1,500.00
Área complementaria del proyecto (%)	15.00

Cuadro 21. Información general para el ejemplo de Sullana. (Fuente: elaboración propia).

1.5 cm/día. Por último refiere que el costo del terreno sería de US\$ 1,500/ha. Aun cuando en este caso se tiene una disponibilidad de más de 500 ha, solo se considera comprar solo las 430 ha netas requeridos, salvo que se quiere reservar 70 ha adicional para la ampliación futura, costo que afectará la rentabilidad inicial de la producción de la primera etapa.

6.2. Elección de los cultivos para el reuso

La selección de cultivos consiste en determinar el cultivo o las combinaciones de cultivos más apropiados a las condiciones de la zona elegida para el Proyecto, a fin de garantizar la sostenibilidad del sistema integrado en términos de rentabilidad. Esta selección está determinada por factores como la capacidad de uso de la tierra, el clima, el tamaño de las propiedades y el nivel de inversión, las vinculaciones con actividades como la agroindustria o ganadería y el mercado. Normalmente se escogen los cultivos comerciales más importantes en las zonas agrícolas cercanas, con lo que se asegura su adaptación a las condiciones climáticas y de los suelos. Desde el punto de vista del sistema integrado, la calidad sanitaria del agua de riego está determinada por el tipo de cultivo seleccionado. Si bien es frecuente encontrar plantaciones forestales o huertos de frutales regados con aguas residuales, conforme mejora la calidad del agua es más frecuente observar la siembra de cultivos de tallo corto y hortalizas.

Efluente / calidad	Tipo	Cultivo	Área (ha)	Caudal (l/s)
1. Primario 1E+06 CF/100 ml	Perennes	Eucalipto	100.00	30.86
		Cacao	100.00	30.86
		Naranja	100.00	25.72
			300.00	87.44
1. Secundario 1E+04 CF/100ml	Temporales Granja	Frijol	50.00	11.57
		Arroz	20.00	17.15
		Tilapia	17.40	39.51
			87.40	68.23
1. Terciario 1E+03 CF/100ml	Temporales	Tomate	10.00	4.63
		Cebolla	10.00	6.43
			20.00	11.06

Cuadro 22. Cultivos elegidos para el proyecto de Sullana. (Fuente: elaboración propia).

La elección de los cultivos está supeditada a las expectativas de negocio que se quiere realizar en la actividad agrícola, acuícola y forestal, por tanto dependerá de las condiciones del mercado, como capacidad de venta y precios. Podría tratarse de un monocultivo muy comercial, como caña de azúcar, algodón o producción forestal, pero también puede orientarse a una producción diversificada para tener mejor protección con los cambios del mercado. Pero además de la rentabilidad de los cultivos elegidos también en estos proyectos integrados de aguas residuales se tiene en cuenta otros aspectos como menor requerimiento de agua en cantidad y calidad, ya que cultivos menos exigentes permiten ampliar el área productiva y requerir un menor costo de tratamiento, como es el caso de la producción forestal.

El cuadro 22 muestra los cultivos elegidos para el ejemplo de Sullana, en donde también se establece la calidad requerida del efluente y el requerimiento de agua de cada cultivo expresado en caudal (l/s). Es evidente que cultivos como el arroz demandan más agua que los forestales como eucalipto y perennes como naranja y cacao. La acuicultura de tilapia es el cultivo más exigente en cantidad de agua. Por otro lado, si se suman las áreas asignadas a los ocho cultivos seleccionados se alcanzan las 407.40 ha, a la que debe sumar 17.6 ha utilizadas por la planta de tratamiento, lo que hace un total de 425 ha netas. Otras 5 ha se incluyen como área complementaria para caminos, edificaciones y otros espacios no productivos. En suma el proyecto se formula en 430 ha de terreno.

De hecho un proyecto con diferentes tipos de cultivo como el ejemplo de Sullana requiere de un análisis técnico, económico y financiero más complejo, ya que combinan cultivos de diferentes escalas y tiempos de maduración. Herramientas como el Programa CEPIS REUSO 2.1 facilitan esta formulación a nivel de perfil (Moscoso et.al. 1998). Este programa permite desarrollar el tratamiento por etapas en función a los tipos, áreas y requerimientos de agua de todos los cultivos que se han elegido, incluyendo plantaciones temporales, perennes, forestales y crianza de peces.

6.3. Requerimientos de cantidad y calidad de agua para la producción

El componente agrícola del sistema integrado define la demanda o necesidad de agua residual. La demanda insatisfecha de agua para riego agrícola puede deberse a la falta o escasez del recurso o a la estacionalidad o distribución de la oferta de agua a lo largo del año. En algunos casos las aguas residuales pueden constituir la única fuente, como es el caso de proyectos en las zonas áridas de la costa. En otros casos el agua residual se puede agregar a la oferta de agua para riego conformada también por otras fuentes. En zonas con agricultura de secano

(por lluvias), las aguas residuales pueden permitir que se cultive todo el año si las lluvias se concentran en épocas determinadas y el volumen de aguas residuales se almacena para la época de estiaje. La cuantificación de las necesidades de agua se realiza a través del balance hídrico del área de estudio basado en el plan agrícola existente o proyectado. El balance hídrico señala las diferencias entre la oferta y demanda de agua en un plazo definido, normalmente un año agrícola. La oferta de agua está constituida por las fuentes naturales (lluvia, agua superficial, agua subterránea, entre otras) y las aguas residuales en el contexto de los sistemas integrados. La demanda de agua la define la necesidad de agua de los cultivos, que incluye la demanda biológica, la evaporación y la filtración. Para calcular el balance hídrico mensual se determina la diferencia entre la oferta y demanda mensual de agua, que arroja un déficit o superávit de agua que permite evaluar opciones de manejo, como las mejoras en los sistemas de riego y la instalación de reservorios.

Los sistemas integrados tienden a incorporar mejoras paulatinas en el manejo del agua residual tratada, en especial, lo referente a la reducción de pérdidas y la mayor eficiencia de uso. Esto incluye mejoras en las vías de conducción (canales, acequias, zanjas, etc.), en la infraestructura de almacenamiento (reservorios, represas, etc.) y en los sistemas de riego. Los sistemas de riego pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- **Riego por gravedad:** aprovecha esta fuerza para conducir el agua hasta los campos, en los que se distribuye a través de surcos o por inundación (melgas o pozas). La eficiencia de utilización del agua en el riego por gravedad es bastante baja, ya que las pérdidas por infiltración o evaporación son altas.

- **Riego tecnificado:** procuran llevar el agua a través de tubos o mangueras hasta muy cerca de la planta, lo que disminuye las pérdidas y permite mayor productividad. Se requiere equipos de presión para llevar el agua y mayores inversiones en equipos y materiales. Entre los principales sistemas de riego tecnificado o presurizado se tiene, en orden creciente de eficiencia de utilización de agua: aspersión, micro-aspersión y el goteo.



Foto 29. Riego por gravedad (surcos)
Foto 30. Riego tecnificado (goteo)

Es necesario tener en cuenta que las partículas contenidas en el agua residual tratada pueden afectar el funcionamiento de algunos sistemas tecnificados, por lo que hay que realizar una adecuada selección de la tecnología. También es importante considerar que la aspersión o microaspersión puede depositar sobre las hojas de los cultivos ciertas partículas u organismos que afecten la calidad del producto final, si el agua de riego no tiene la calidad sanitaria adecuada, lo que no necesariamente ocurriría con el riego por surcos o por goteo.

La implementación de sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales domésticas deberá considerar la calidad del agua en sus tres dimensiones: sanitaria, agronómica y ambiental. La calidad sanitaria deberá estar determinada por las concentraciones de parásitos, representados por los huevos de helmintos y los coliformes fecales o termo tolerantes como indicador de los niveles de bacterias y virus causantes de enfermedades entéricas en el ser humano. La calidad agronómica estará relacionada con las concentraciones de nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio y oligoelementos), así como de aquellos elementos limitantes o tóxicos para la agricultura, como la salinidad y niveles excesivos de boro, metales pesados y otros. Finalmente, la calidad ambiental, aun cuando en principio debería involucrar los parámetros antes mencionados, en la práctica estará más relacionada con las concentraciones de sólidos, materia orgánica, nutrientes y elementos tóxicos que pueden generar impactos negativos en los cuerpos de agua receptores de las descargas.

En el sistema integrado, la calidad de los efluentes de la planta estará de acuerdo con los requerimientos sanitarios y agronómicos de los cultivos agrícolas, acuícolas y forestales seleccionados, en el entendido de que la calidad sanitaria del agua para el riego de un bosque no será tan exigente como cuando se irriga un campo de lechugas. En ese sentido, el sistema de tratamiento formulado para un sistema integrado tendrá efluentes con diversas calidades sanitarias de acuerdo con cada tipo de cultivo. Para el caso de parásitos se propone un tratamiento que los remueva totalmente del agua, con el propósito de proteger la salud de los trabajadores de la planta de tratamiento y de los agricultores regantes.

Por ello es necesario efectuar una caracterización de las aguas residuales que se quiere aprovechar, a fin de conocer su calidad sanitaria y agronómica a través de los siguientes parámetros:

- Caudal promedio (de las 24 horas en tres días de la semana).
- Temperatura promedio (de las 24 horas en tres días de la semana).
- pH promedio (de las 24 horas en tres días de la semana).
- Sólidos suspendidos totales y volátiles.
- Demanda bioquímica de oxígeno (total de 5 días).

- Coliformes fecales o termo tolerantes.
- Huevos de nematodos (helmintos) y protozoarios parásitos humanos.
- Nitrógeno total y amoniacal.
- Fósforo total.
- Salinidad (o conductividad).
- Elementos tóxicos (si hubiese evidencia de su vertimiento al sistema).

La confiabilidad de los datos antes citados estará estrechamente relacionada con la extensión del periodo de muestreo y la experiencia del laboratorio responsable que en principio debe ser acreditado.

El cuadro 21 también muestra los niveles de calidad requeridos por los cultivos elegidos para el ejemplo de Sullana. Los cultivos están agrupados en tres niveles según la calidad requerida, lo que implica que el tratamiento se realizará en tres etapas para alcanzar las calidades y caudales requeridos por tales grupos. De hecho los cultivos forestales y perennes son los menos exigentes en calidad del agua, por tanto en una primera etapa el sistema de tratamiento debe lograr la remoción total de parásitos con un periodo de retención mayor a días y reducir los coliformes fecales o termo tolerantes a menos de $1.0E+6$ NMP/100 ml, permitiendo que 87.44 l/s de efluentes se deriven al riego de las 300 ha de eucaliptos, naranjos y cacao. El segundo grupo de frijol, arroz y la acuicultura de tilapia está demandando 68.23 l/s de aguas que previamente han pasado por una segunda etapa de tratamiento hasta alcanzar menos de $1.0E+4$ CTT/100 ml. Por último las hortalizas como tomate y cebolla los más exigentes en calidad y por tanto exigen una tercera etapa de tratamiento hasta lograr que 11.06 l/s logren menos de $1.0E+3$ CTT/100 ml.

6.4. Plan de producción: actividades culturales, costos y precios

Con todas las condiciones y estrategias descritas en los puntos anteriores, finalmente el Proyecto puede establecer un plan de producción o plan agrícola, que contempla la selección y rotación de cultivos y los planes de siembra (áreas, calendario agrícola, producción). En esta parte también se debe definir el método de riego que será implementado, a fin de establecer los requerimientos hídricos en cantidad y calidad.

El manejo agronómico (actividades culturales) de los cultivos seleccionados determinará los requerimientos técnicos, administrativos y de asistencia técnica del plan agrícola y sus costos de producción. También se deberá establecer la modalidad de comercialización de los productos

que se piensan generar, identificar los precios, estacionalidad, modalidad y política de ventas. Finalmente se deberá efectuar el cálculo de la inversión y los ingresos esperados.

El manejo agronómico de los cultivos regados con aguas residuales no es diferente del resto del país, salvo de aquellos dedicados a la exportación y que han incorporado tecnología y mecanización. La mayor agricultura se realiza con irrigación por gravedad mediante surcos o melgas (inundación confinada) en campos arados en forma mecanizada con tractores. El riego y las demás labores culturales normalmente son manuales. La cosecha también se realiza en forma manual por cortes o recolección del producto. En los casos estudiados de reuso se han podido apreciar que las técnicas agrícolas utilizadas son las siguientes:

- Nivelación y remoción del terreno con tractor.
- Incorporación manual de materia orgánica y compost para mejorar la productividad del suelo.
- Conformación de surcos para cultivos intensivos con tractor o de melgas para cultivos perennes.
- Siembra de semilla en cultivos intensivos o de plántones en cultivos perennes.
- Control manual de hierbas y plagas con agroquímicos, usando mochilas.
- Podas de mantenimiento de árboles, especialmente la tara.
- Cosecha según el cultivo, por corte en forrajes, raspado de cochinilla en tunales, recolección en aceitunas en olivos y recojo en el suelo de vainas de tara.

En este punto utilizaremos como ejemplo el caso actual de la zona agrícola de Copare- La Yarada de Tacna. Como se puede apreciar en el cuadro 23, esta zona agrícola recibe un promedio anual de 300 l/s tratados en la PTAR de Magollo para regar todo el año 909 ha de cultivos perennes (tuna, tara, olivo y otros) y parte de los temporales (sorgo y maíz forrajeros), y aun cuando este caudal disminuye hasta 255 l/s en invierno (agosto), ya desde mayo añaden temporalmente nuevas 188 ha de maíz chala que es cosechado en octubre antes de que la demanda de agua se incremente demasiado. Eso implica que en lugar de almacenar el agua sobrante en esa época, la utilizan en una mayor área agrícola. Se ha estimado una demanda anual de agua para el riego de 9,460,800 m³ que equivale en promedio a 8,600 m³/ha.año y que fluctúa entre 11,970 y 7,330 m³/ha según la época calurosa o fría.

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Efluente de PTAR (l/s)	330	345	330	315	300	285	270	255	270	285	300	315
Riego con efluente (l/s)	330	345	330	315	300	285	270	255	270	285	300	315
Balance efluente/riego	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Área regada (ha)	909	909	909	909	1097	1097	1097	1097	1097	1097	909	909
Tuna (ha)	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700
Tara (ha)	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Olivo (ha)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Otros perennes (ha)	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Sorgo forrajero (ha)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Maiz forrajero (ha)	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
					188	188	188	188	188	188		

Cuadro 23. Área regada con aguas residuales en la zona agrícola de Copare-La Yarada, Tacna. (Fuente: elaboración propia).

Respecto al manejo agronómico del cultivo de la tara se pueden mencionar algunas características observadas en Tacna como son las siguientes:

- Los lotes tienen de 15 a 20 años en producción.
- Se riegan cada 18 días porque la tara tiene un bajo requerimiento de agua.
- Se incorpora cada cierto tiempo al suelo una cantidad de materia orgánica y compost elaborado con la misma hojarasca de los árboles.
- Se pasa el tractor cada dos meses para romper la capa dura superficial del suelo formada por las aguas residuales (se cree que son los detergentes).
- Se aplica diversos microorganismos probióticos para mejorar la productividad del suelo (laptobasilus, sacharomicetas, micorizas, etc).
- Se inicia la producción de vainas de tara a partir del año y medio y se alcanza la plena capacidad de producción a los 3 años.
- La cosecha se realiza de 2 a 3 veces por año, recolectando las vainas que caen al suelo cuando se observa una alfombra.

El cultivo emergente de tuna para producir cochinilla tiene las siguientes características en Tacna:

- Se planta el cultivo y al año y medio se infecta con cochinilla.
- Se pone un sobre con cochinilla en cada planta para que se infecte.

- Se cosecha a los 4 meses de haberse infectado y cuando las cochinillas están oscuras.
- La cosecha se hace por raspado de las hojas (pencas).
- Con 3.5 kg de cochinilla fresca se logra un kilo de cochinilla seca.
- Una hectárea de tuna produce 80 a 100 kg de cochinilla seca.
- El precio actual de la cochinilla seca es de US\$ 17.50/kg.



Foto 31. Parcela de cultivo de tuna en Tacna
Foto 32. Cultivo de tuna / cochinilla en Tacna

Item	Miles S/.	Miles US\$
Sistema de distribución de efluente	1,183	381
Adquisición de terreno	164	53
Acondicionamiento del terreno	600	193
Sistema de riego	273	88
Vivero	2	1
Tractor y vehiculos	27	9
Obras menores	22	7
Herramientas	11	4
Equipos y muebles	22	7
Imprevistos	115	37
Gastos generales y utilidades	604	195
Total	3,021	974

Cuadro 24. Costos de inversión de la zona agrícola Copare-La Yarada, Tacna
(Fuente: elaboración propia).

El cuadro 24 lista los principales gastos de inversión que los agricultores han realizado en la zona agrícola y que incluye los gastos de adquisición y acondicionamiento del terreno, el sistema de riego, vehículos y otros equipos, un 5% de imprevistos y 25% de gastos generales y utilidades para los contratistas, sumando un total de S/. 3,021,000 (US\$ 974,000). Este monto incluye la construcción de un canal de concreto de 6 km que lleva el agua desde la PTAR Magollo hasta la zona agrícola de Copare-La Yarada, Los cálculos realizados con el Programa REUSO 2.1 asigna a esta inversión un costo de S/. 1,183,000 (US\$ 381,000). Si bien el terreno no tuvo un valor comercial porque fue una concesión del Estado de una zona árida, se ha consignado un costo por los tramites de formalización de las propiedades de S/. 150/ha, valor inferior a los S/. 200/ha invertidos para la nivelación y acondicionamiento de las 1,097 ha de terreno habilitadas para la agricultura. El sistema de riego se inicia desde el canal de concreto que lleva el afluente a la zona agrícola y se trata de una red de canales de concreto principales y canales de tierra secundarios (acequias) para un manejo del agua por gravedad. Aún no se ha considerado la alternativa de implementar un riego tecnificado que permitiría ampliar el área de cultivo.

Algunos informes del Ministerio de Agricultura y Riego para los cultivos más importantes de la zona estudiada han permitido que el cuadro 25 muestre los principales rubros de los costos de producción para los cultivos de tara, olivo, tuna para la producción de cochinilla, maíz chala y sorgo forrajero (MINAGRI, 2012). Es importante indicar que los cultivos perennes como tara,

Costos	Tara y olivo		Tuna/Cochinilla		Maíz y sorgo forrajeros	
	Año 1	Año 2, 3	Año 1	Año 2...10	Campaña	Anual
Habilitación terreno			365		20	60
Maquinaria					140	420
Equipos y herramientas	3,600	3,600	240	42		
Plantación			580			
Mantenimiento			520	1100		
Mano de obra	12,000	8,000			180	540
Semillas o plantones	3,000		1700		120	360
Guano			535	535	100	300
Plaguicidas	2,050	1,400			70	210
Transporte			450	150		
Otros gastos					152	456
Total	20,650	13,000	4,390	1,827	782	2,346

Cuadro 25. Costos de producción de tara, olivo, tuna/cochinilla, maíz chala y sorgo forrajero cultivados en Copare-La Yarada (S/./ha.año). (Fuente: MINAGRI - 2013 y elaboración propia).

olivo y tuna tienen costos diferenciados entre el primer año de implementación y los siguientes de crecimiento y producción, por tanto estos costos diferenciados deben de incluir en el análisis financiero que se realice. Es evidente que los cultivos perennes arbóreos como la tara y olivo tienen el costo de producción más alto, especialmente el primer año en que se realiza la plantación.

Cultivo	Cosecha	Prod. anual	Precio	Ingresos	Área (ha)	Ingresos	
	(kg/ha)	(kg/ha/año)	(S/./kg)	(S/./ha.año)		(S/.)	(US\$)
Cochinilla	100	300	60.00	18,000	700	12,600,000	4,064,516
Tara	3,000	9,000	2.35	21,150	120	2,538,000	818,710
Olivo	7,500	7,500	2.50	18,750	10	187,500	60,484
Maiz chala	40,000	120,000	0.08	9,600	62	595,200	192,000
	40,000	40,000	0.08	3,200	188	601,600	194,065
Sorgo	40,000	200,000	0.08	16,000	10	160,000	51,613
Total					1,090	16,682,300	5,381,387

Cuadro 26. Rendimientos, precios e ingresos de la producción agrícola en Copare-La Yarada, Tacna. (Fuente: elaboración propia - 2015).

El cuadro 26 presenta los rendimientos (kg/ha), precios unitarios (S/./kg) e ingresos por ventas calculados para los principales cultivos trabajados en las 1,097 ha agrícolas de Copare-La Yarada: cochinilla obtenida en los tunales, tara, olivo, maíz chala y sorgo forrajero. La producción de esta zona agrícola estaría logrando ingresos anuales por la venta de sus productos por 16.7 millones de soles (US\$ 5.4 millones). Esta magnitud de ingresos ha justificado la inversión del canal de 6 km para trasladar los efluentes de la PTAR. Si bien los agricultores no pagan actualmente por el agua tratada, es posible que asuman parcialmente este costo y la tecnificación del sistema de riego para una mejor eficiencia del uso del agua y el incremento del área de cultivo.

El principal aporte (76%) es la cochinilla cultivada en las 700 ha de tunales existentes, seguido por la tara que aunque solo es cultivada en 120 ha muestra un potencial importante por su rendimiento económico. De hecho se trata de un cultivo nuevo en Tacna pero está creciendo en forma acelerada. Sin embargo, la ventaja de los tunales para cochinilla es que demandan un costo de producción más bajo que los otros cultivos y generan ingresos altos y cercanos a estos, por tanto es el cultivo más rentable en el caso de Tacna.

6.5. Uso eficiente del agua: almacenamiento y riego tecnificado

Es muy frecuente en muchas zonas agrícolas peruanas que el balance hídrico entre la demanda de agua para riego y oferta de agua de lluvia o río se torne negativo en la época de estiaje, ocasionando que un 30% de las tierras habilitadas no puedan ser cultivadas en esa época. Es por ello que consideramos que los efluentes de las PTAR podrían ser almacenados en reservorios estacionales para atender esa demanda insatisfecha en la época de estiaje. Por otro lado, los métodos de riego por gravedad, mediante inundación y surcos, son los utilizados en la mayor parte de la agricultura bajo riego del Perú, práctica favorecida por las bajísimas tarifas de agua que se aplican. Del mismo modo ocurre con las aguas residuales que no son pagadas por los actuales usuarios. En la medida que se establezca una tarifa más real para el uso del agua, incluyendo el agua residual tratada, se creará la necesidad de usar menor cantidad para regar una parcela, y por tanto se optará por aplicar métodos de riego más eficientes como los sistemas presurizados de aspersión y goteo. Esta alternativa abrirá el círculo virtuoso de ampliar las áreas irrigadas al bajar los requerimientos de agua. El almacenamiento y riego tecnificado son los instrumentos para lograr un uso eficiente del agua.

El caso del cultivo de arroz en la selva alta es el más emblemático porque se caracteriza por aplicar un riego por gravedad para la inundación de pozas que se mantienen permanentemente con una profundidad de 10 a 20 cm y por tanto no tienen condiciones técnicas para optar por otros métodos de riego más eficientes. Existen algunas propuestas de reemplazar este sistema tradicional por un cultivo sin inundación, pero ello demandará trabajar con nuevas variedades de arroz y luego evaluar las ventajas económicas frente a la actual situación. Además, una condición que favorece el sistema actual es la abundancia de

agua en época de avenida, lo que ha determinado una valorización muy baja del agua, que sumada a costos de sus sistemas de riego muy simples, les permite mantener tarifas actuales muy bajas. Tal vez un análisis de las mejoras de rendimientos en el cultivo del arroz por la implementación de sistemas de cultivo en tierra seca con riego tecnificado permitiría que los agricultores opten por esa alternativa, especialmente en la época de estiaje en que el recurso

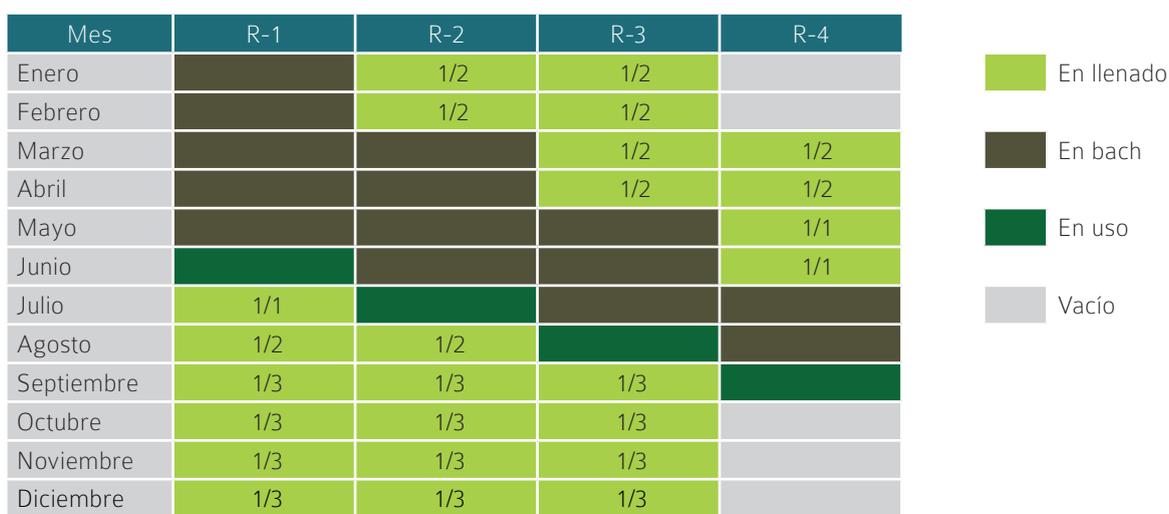


Foto 33. Cultivos de arroz en Jaén

se torna escaso. Sin embargo, es más probable que se opte por el almacenamiento del agua en reservorios, alternativa que al final también sería favorecida con el uso de métodos de riego más eficientes, ya que los volúmenes a ser almacenados serían menores. Un aspecto muy positivo es que en la selva se está desarrollando una actividad agrícola de escala mediana y grande, por lo que estos agricultores-empresarios estarían más preparados para abordar esta innovación tecnológica que mejore sus utilidades.

En el uso de las aguas residuales para el riego de las áreas verdes urbanas si se vislumbra una adopción más rápida de métodos de riego más tecnificados como aspersión y goteo. El Plan de Riego Sostenible de las Áreas Verdes de Lima Metropolitana propone el uso de especies xerofíticas y de riego tecnificado para regar los parques de la ciudad, de modo que los municipios puedan reducir sus costos del riego de sus áreas verdes actuales y proyectadas (SERPAR, 2014).

La adopción de métodos de riego más eficientes son alternativas ya aceptadas por los agricultores que utilizan aguas residuales tratadas, pero actualmente no están muy dispuestos a asumirlos por las bajas tarifas que pagan por el agua superficial. Como se ha evaluado en algunos casos estudiados, normalmente los métodos de riego tradicionales por gravedad demandan una inversión de S/. 264 a 2,160/ha (US\$ 85-696/ha), mientras que los métodos tecnificados pueden superar los S/. 5,000/ha (US\$1,600/ha). Por ello será necesario brindar un soporte técnico y económico para lograr que los agricultores adopten finalmente estas alternativas más eficientes, especialmente en la costa donde el recurso es más escaso.



1/3 Proporción de caudal derivado a cada reservorio
 Periodo mínimo en bach: 2 meses en verano / 5 meses en invierno

Figura 25. Manejo de los reservorios de Israel para el riego en la época de estiaje - 4 meses. (Fuente: Libhaber - 2015, 2).

Como ya se mencionó, la estrategia de reuso en Israel es almacenar en grandes reservorios todas las aguas residuales parcialmente tratadas, fin de completar su tratamiento para su utilización total en la estación de estiaje, lo que implica que estas aguas no son vertidas en ningún cuerpo hídrico natural. Como se indica en la figura 25, luego de un tratamiento anaeróbico estas aguas residuales son transferidas a los reservorios, donde pueden estar almacenadas entre 2 y 5 meses hasta la época de estiaje en que se utiliza para el riego agrícola (junio a setiembre). Dichas aguas incrementan su calidad sanitaria durante este largo tiempo de almacenamiento (en bach), logrando así alcanzar los estándares establecidos para cada tipo de cultivo que riegan.

La propuesta para trasladar las aguas residuales de Puno a la zona agrícola de Paucarcolla (foto 34) podría tener un manejo muy similar a las experiencias israelitas mencionadas. La posibilidad de almacenar las aguas residuales tratadas en reservorios abriría la oportunidad de disponer de agua en toda la época de estiaje, complementando así el uso de las aguas de lluvia

que ahora es la forma de riego más importante en esa región (secano). Esta disponibilidad de agua durante todo el año permitiría una producción continua de forrajes, en especial de alfalfa, que haría posible lograr de 3 a 5 cortes al año. Una proyección de la producción de aguas residuales de la ciudad de Puno al año 2035 permite estimar un caudal promedio de crudo de 260 l/s, que al ser tratado en una PTAR de lagunas de estabilización y deducir las pérdidas por evaporación e infiltración, generaría un efluente promedio de 247 l/s, tal como se puede apreciar en el cuadro 27. Del mismo modo se asume una variación de este caudal de $\pm 2\%$ entre los meses de mayor y menor calor ligado a ciertas variaciones en los hábitos del uso de agua en la población servida, por tanto el caudal variaría entre 252 y 242.



Foto 34. Zona agrícola de Paucarcolla, Puno

Las cifras extrapoladas para los 12 meses permiten calcular los volúmenes mensuales de efluentes que se podrían almacenar a partir de noviembre en que se inician las lluvias. Por ello se observa en la última línea del cuadro, que el volumen acumulado se incrementa a partir de ese mes hasta abril, en donde se comienza a utilizar las aguas almacenadas porque las lluvias ya se reducen significativamente. Asumiendo una dotación de agua para el riego por gravedad de un litro por segundo y por hectárea, se puede deducir por tanteo la cantidad de hectáreas de alfalfa que pueden ser regadas con las aguas almacenadas durante el periodo seco. Finalmente en la última línea se puede identificar el volumen máximo de almacenamiento.

Es así que los efluentes de la PTAR de Puno podrían atender los requerimientos de agua para

regar 430 ha de alfalfa durante los meses sin lluvias, siempre que se almacenen las aguas residuales tratadas en un reservorio con capacidad para 2.76 millones de metros cúbicos. Esto implica que en toda la zona del altiplano sería necesario almacenar 6,400 m³ por cada hectárea de alfalfa que se quiera regar en la época de estiaje.

Parámetro	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Crudo tratado por la PTAR (± 2%) l/s	263	265	263	262	260	258	257	255	257	258	260	262
Efluentes PTAR (5% por pérdidas)	250	252	250	249	247	245	244	242	244	245	247	249
Demanda de agua para riego ± 5%	444	452	444	437	430	423	416	409	416	423	430	437
Riego con efluentes (%)	-	-	-	50	100	100	100	100	100	100	50	-
Riego con efluentes (l/s)	-	-	-	219	430	423	416	409	416	423	215	-
Riego con agua de lluvia (%)	100	100	100	50	0	0	0	0	0	0	50	100
Riego con agua de lluvia (l/s)	444	452	444	219	0	0	0	0	0	0	215	437
Ha regadas de alfalfa	430	430	430	430	430	430	430	430	430	430	430	430
Capacidad del reservorio:												
Volumen de efluente mensual (miles de m ³)	649	653	649	644	640	636	632	627	632	636	640	644
Volumen de efluente a usar (miles de m ³)	-	-	-	567	1,115	1,096	1,077	1,059	1,077	1,096	557	-
Volumen a almacenar (miles de m ³)	1,376	2,029	2,678	2,756	2,282	1,822	1,376	944	499	39	83	727

Requerimiento de almacenamiento:

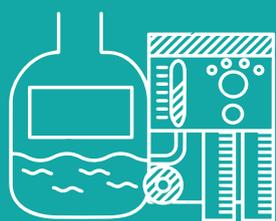
6,409 m³/ha

Cuadro 27. Cálculo de la capacidad del reservorio para almacenar los efluentes de la PTAR de Puno proyectadas al 2035 (Fuente: elaboración propia).





| 07



CRITERIOS PARA EL DISEÑO DEL COMPONENTE DE TRATAMIENTO

Tradicionalmente se han tratado las aguas residuales generadas por las ciudades para que su disposición final en un cuerpo receptor no cause impactos a la salud y el ambiente, ya que estas aguas naturales pueden luego ser utilizadas en diversas actividades como el consumo humano, el riego agrícola o en el esparcimiento de las personas. Las primeras evaluaciones de impacto ambiental en estos cuerpos receptores mostraron que el oxígeno disuelto era afectado notablemente con las descargas, debido a la degradación de la materia orgánica que acarreaban las aguas residuales, por tanto se definió que el tratamiento debía estar orientado a remover la materia orgánica, expresada por la Demanda Bioquímica de Oxígeno de los primeros cinco días (DBO5). Es así como las plantas de tratamiento siempre han sido diseñadas mediante una ecuación que permita reducir la concentración de DBO5 hasta niveles que tengan poco impacto en los cuerpos receptores, modelo que hasta el momento se sigue aplicando para dimensionar la mayor parte de las plantas.

7.1. Objetivos del tratamiento para el reuso

Cuando hablamos de tratar las aguas residuales para utilizarse en el riego de áreas agrícolas o verdes recreativas debemos redefinir el objetivo de ese tratamiento, ya que debemos dejar lo que beneficia a este reuso, como la materia orgánica y los nutrientes, y remover lo que puede afectar esta actividad, como los gérmenes patógenos y contaminantes químicos.

Stewart Oakley (2015) reflexiona sobre la prioridad que se continúa dando a la remoción de materia orgánica en los diseños actuales de las plantas de tratamiento; cuando en realidad es indispensable remover los gérmenes patógenos del agua si esta quiere ser reutilizada, así como remover los nutrientes que ocasionan eutrofización de estos ambientes acuáticos si esta se quiere descargar en ambientes naturales.

Es evidente que las tecnologías de tratamiento se han desarrollado en función de los objetivos que tenían y por ello han evolucionado de tal forma que puedan lograr una alta eficiencia en la remoción de sólidos y materia orgánica, pero no tanto en los patógenos y los nutrientes. En los países desarrollados el tema de salud pública ya no está ligado a las enfermedades transmisibles porque estas han sido superadas hace varias décadas y sus desagües ya no tienen cargas importantes de patógenos. En todo caso la preocupación actual de ellos es más la presencia de sustancias medicinales y hormonas excretadas por su población, y que podrían tener un impacto a largo plazo.

Sin embargo en los países en vías de desarrollo como el Perú (figura 26), las enfermedades infecciosas y parasitosis son aún la causa del 40% de la mortalidad infantil, cifra que en los países

Causas de muerte infantil

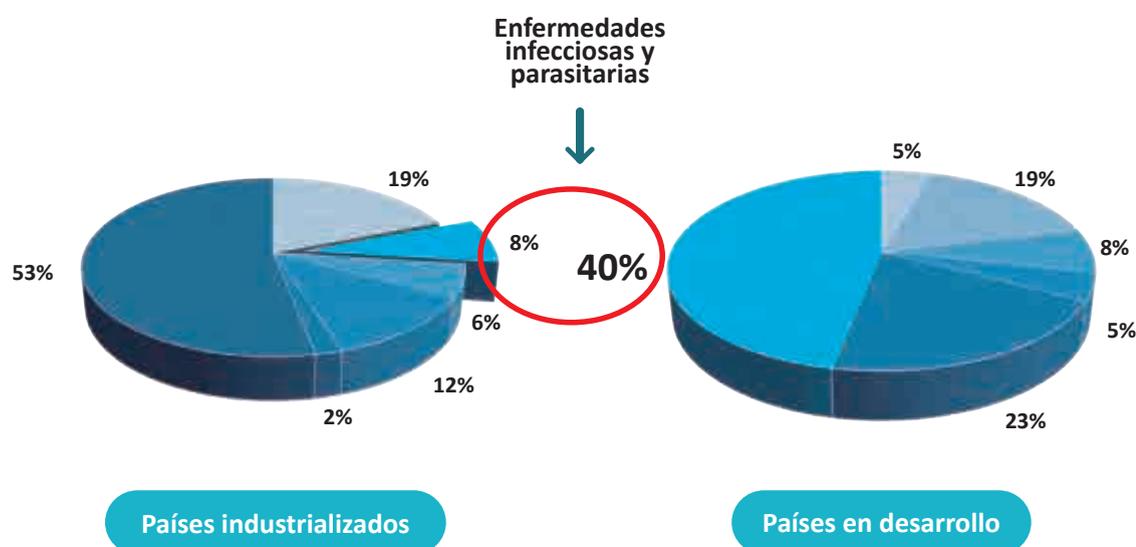


Figura 26. Mortalidad infantil por enfermedades infecciones y parasitarias.
(Fuente: CEPIS / OPS - 2005).

desarrollados es de solo la quinta parte. Como consecuencia, es fácil entender que las aguas residuales domésticas de nuestros países tienen una alta concentración de gérmenes patógenos. Por ello el análisis de los riesgos a la salud del uso de las aguas residuales debe comenzar por conocer la situación actual de la salud pública del Perú y de todos los países en desarrollo, en comparación con la situación en los países industrializados, de donde proceden la mayor parte de las tecnologías de tratamiento hoy aplicadas.

En suma, el tratamiento para el reuso debe tener como objetivo principal la remoción de los organismos patógenos y no la materia orgánica y los nutrientes que si se pueden aprovechar en las actividades agrícolas, acuícolas y forestales, incluso cuando también se riegan las áreas verdes urbanas recreativas.

7.2. Identificación de ventajas de las principales tecnologías para el reuso

La gestión de las aguas residuales históricamente ha esta basada en el enfoque tradicional de tratar las aguas para disponerlas en un cuerpo receptor, cumpliendo con los límites establecidos en las normas, lo que ha generado el desarrollo de una ingeniería en línea. La figura 27 muestra la clasificación histórica del tratamiento aplicado a las aguas residuales domésticas.



Figura 27. Clasificación histórica del tratamiento de las aguas residuales. (Fuente: Oakley, 2015).

Este enfoque de ingeniería lineal establece que el afluente o crudo recolectado por el sistema de alcantarillado debe ser trasladado a la planta de tratamiento (PTAR) para pasar por varias de las etapas siguientes:

- **Pre-tratamiento:** que permite la retención de sólidos gruesos y arenas mediante cribas o rejillas y desarenadores respectivamente.
- **Tratamiento primario:** que básicamente es un proceso para sedimentar sólidos finos mediante un sedimentador primario (tanques sépticos e Inhoff).
- **Tratamiento secundario:** que busca remover los sólidos disueltos, generalmente bajo la forma de materia orgánica soluble (DBO soluble). Normalmente el efluente de esta tercera etapa alcanzaba los niveles de calidad en sólidos y DBO, normados para disponerlos en los ambientes naturales.
- **Tratamiento terciario:** para efluentes que no son aptos para su disposición por tener elevadas concentraciones de patógenos y nutrientes, que pueden impactar a la salud y el ambiente. Se trata de procesos para la remoción de los nutrientes y ahora incluyen la desinfección.
- **Tratamiento de lodos:** los lodos generados en el tratamiento primario y secundario de las aguas residuales son estabilizados y deshidratados para su disposición final, mediante espesadores, digestores y lechos de secado.

En principio todas las plantas deben tener los procesos considerados en el pre-tratamiento (cámaras de rejillas y desarenadores), que al retener los sólidos gruesos y arenas favorecen las siguientes etapas del tratamiento. Algunos proyectistas consideran que las lagunas pueden retener directamente estos sólidos, por tanto proponen eliminar el pre-tratamiento, alternativa que no debe ser aceptada porque genera formación de conos de estos sólidos en los puntos de

ingreso a las lagunas. Por otro lado en algunos casos también se añaden trampas de grasas. El tratamiento primario está orientado principalmente a retirar la materia sólida fina de las aguas residuales, orgánica o no, mediante un dispositivo de sedimentación donde se depositen los materiales para su posterior eliminación. Existen varios sistemas que realizan la sedimentación, tales como los tanques sépticos, tanques Inhoff, sedimentadores primarios, tanques de flotación y tamices rotatorios. Esta sedimentación puede reducir de 20 a 40 % de materia orgánica y 40 a 60 % los sólidos.



Foto 35. Cámara de rejas y desarenador
Foto 36. Sedimentador primario

El tratamiento secundario está orientado a la remoción de la materia orgánica disuelta mediante procesos biológicos realizados por biomasa de bacterias en suspensión o adheridas a sustratos, bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas. En ese sentido hay que destacar los dos grandes grupos de procesos aeróbicos y anaeróbicos. Los procesos aeróbicos son realizados por bacterias que demandan de oxígeno para degradar la materia orgánica. Pueden utilizar el oxígeno natural atmosférico o disuelto en agua (lagunas de pulimento, biofiltros) o el generado artificialmente por aireación u oxigenación (lagunas aireadas, lodos activados, zanjas de oxidación). El proceso más representativo son los lodos activados, que reciben aireación inyectada por soplores o mezcladores. Las principales ventajas de estos sistemas aeróbicos son:



Foto 37. Planta de lodos activados de Yunguyo

- El control efectivo de olores desagradables, ya que el proceso de degradación de la materia orgánica utilizando oxígeno no genera compuestos finales que tengan mal olor.
- Requieren de un área reducida cuando se aplica aireación artificial en procesos como los lodos activados, por tanto permiten implementar plantas compactas en un terreno relativamente pequeño.
- Permiten obtener efluentes muy clarificados por su alta eficiencia en remoción de sólidos y materia orgánica, lo que podría ser más adecuados para los métodos de riego presurizados que deben filtrar el agua antes de inyectarse en el sistema para evitar las obstrucciones de los dispositivos de entrega.

Sin embargo los procesos con aireación artificial también tienen algunas desventajas, tales como:

- Altos costos de inversión, operación y mantenimiento por el equipamiento y la energía requeridos, que muchas veces limitan la sostenibilidad operativa, sobre todo en comunidades que no pueden asumir esas exigencias económicas.
- Poca eficiencia en la remoción de patógenos, debido a los cortos periodos de retención (a veces solo horas), lo que obliga a tener que añadir por lo menos un proceso de desinfección.
- Deben manejar constantemente los lodos generados por el proceso, que al contener concentraciones elevadas de patógenos requieren ser dispuestos en rellenos de seguridad a un costo también elevado.
- La materia orgánica y los nutrientes removidos ya no pueden ser utilizados en la agricultura, porque se concentraron en los lodos que antes indicamos son considerados residuos peligrosos.

El otro grupo en el tratamiento son los procesos anaeróbicos, que son realizados por bacterias que no requieren de oxígeno para degradar la materia orgánica. Estos procesos se han desarrollado en muchos sistemas, siendo los más importantes los reactores anaeróbicos de flujo ascendente (RAFA) y las lagunas anaeróbicas. La figura 28 muestra que este proceso anaeróbico se realiza a través de dos etapas:

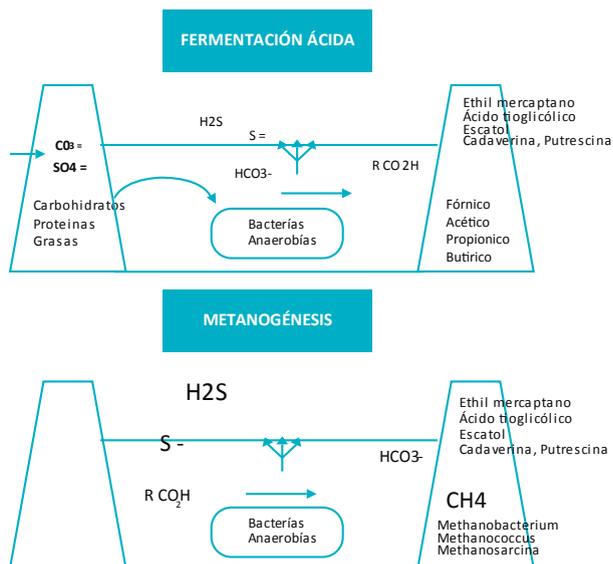


Figura 28. Fases del proceso anaeróbico

- **Fase de fermentación ácida o acidogénesis:** realizada por bacterias anaeróbicas acidogénicas para convertir compuestos orgánicos de alto peso molecular (lípidos, polisacáridos, proteínas) en otros compuestos utilizados por los microorganismos como fuentes de energía y como transformación a carbono celular (ácido acético y otros ácidos, alcoholes, cadaverina, putresina y otros gases como dióxido de carbono, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno). El pH frecuentemente desciende hasta menos de 5 por la presencia de los ácidos orgánicos y el dióxido de carbono. Varios de los compuestos producidos emanan olores desagradables como el sulfuro de hidrógeno.

- **Fase de metanogénesis:** realizada por microorganismos estrictamente anaerobios denominados metanogénicos (Methanobacterium, Methanococcus, Methanosarcina), que comienzan a desarrollarse al final de la fase ácida y que convierten el ácido acético y el gas de hidrógeno, generados en la fase anterior, en metano y dióxido de carbono. Esta conversión ocasiona un incremento del pH hasta rangos alcalinos de 7 a 8. De alguna manera esta fase favorece la captura los compuestos nitrogenados generados en la fase anterior y que son los causantes de los olores desagradables.

Las principales ventajas de los procesos anaeróbicos son:

- Bajos costos de inversión, operación y mantenimiento porque no requieren del equipamiento y la energía, por tanto es más factible su sostenibilidad en comunidades de bajos recursos económicos.

- Pueden reducir los requerimientos de área si se implementan sistemas compactos como los RAFA. También pueden contribuir a la reducción esta área, si estos procesos se combinan con las lagunas facultativas.

- Su alta eficiencia en remover materia orgánica permite tratar aguas residuales con altas concentraciones de sustancias orgánicas y biodegradables, descargas de ciertas actividades industriales como camales, procesadoras de lácteos, pesqueras y agroindustriales.

- La producción de gases principalmente metano puede ser utilizado como combustible, por lo menos en las actividades de la planta que requieran de energía.

Los procesos anaeróbicos tienen ciertas desventajas, tales como:

- Muy sensibles a los factores ambientales, especialmente a las fluctuaciones y bajas de temperatura. Las bacterias metanogénicas son muy sensibles a las bajas temperaturas, no así las acidogénicas, por tanto el proceso ácido se puede acumular mientras el metanogénico se restringe, generando olores desagradables. La aplicación de cal puede atenuar este desbalance.

- Poca eficiencia en la remoción de patógenos, debido a los cortos periodos de retención (pocos días), lo que obliga a añadir un proceso posterior de pulimento o desinfección.

- Pueden propiciar condiciones estéticamente desagradables y atraer vectores como moscas, especialmente en sistemas abiertos tales como las lagunas anaeróbicas, donde se acumula en la superficie nata de materia orgánica resuspendida por los gases emanados.

- Generan gases de efecto invernadero que escapan a la atmósfera, por tanto son muy cuestionadas por los ambientalistas. La cobertura permite confinar estos gases y recolectarlos para ser quemados o utilizados como combustible.



Foto 38. Tanques RAFA en Uberaba, Brasil
Foto 39. Lagunas anaeróbicas cubiertas, Santa Cruz, Bolivia

Tradicionalmente los investigadores han recomendado no utilizar procesos anaeróbicos en lugares fríos con temperaturas menores a 10°C como es el caso de la sierra, sin embargo en los últimos años se ha promovido la implementación de lagunas anaerobias alrededor del lago Titicaca (ejemplo en El Alto, Bolivia) y al parecer están funcionando bien. Es probable que el manejo de grandes volúmenes de agua y el uso de lagunas excavadas y profundas permitan mantener temperaturas en el agua por encima de los 10°C. Recientemente varios sistemas de lagunas anaerobias han sido cubiertos con geomembranas para evitar la fuga del metano, que luego es simplemente quemado, o mejor aún, utilizado para combustible. Esta cobertura también puede conservar la temperatura.

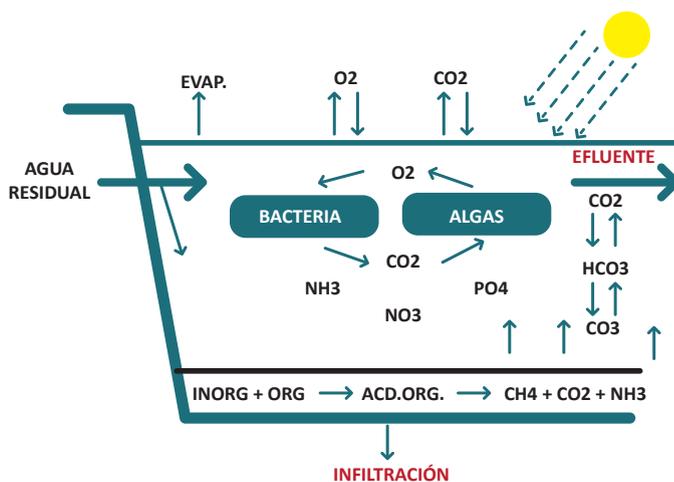


Figura 29. Proceso de estabilización en una laguna facultativa

Existe una situación intermedia entre los procesos aeróbicos y anaeróbicos, que se ha convenido llamar facultativo, y que está referido principalmente a las lagunas facultativas. En realidad no es el término más correcto porque el concepto ha sido tomado de las bacterias facultativas que pueden actuar con o sin oxígeno. En el caso de las lagunas facultativas en realidad se produce una actividad aeróbica en la columna superior de la masa de agua y anaeróbica en la inferior y principalmente en el fondo. Como se

aprecia en la figura 29, lo relevante de las lagunas facultativas es la actividad de las bacterias aeróbicas que degradan la materia orgánica aprovechando el oxígeno generado por las algas

en la fotosíntesis. A su vez, los productos de descomposición, especialmente el dióxido de carbono es la principal fuente para realizar esa actividad fotosintética por las algas. Se trata de un proceso alimentado de oxígeno en forma natural, sin requerir aireadores y energía eléctrica. Esta condición es especialmente importante en zonas elevadas como la sierra, en donde la disponibilidad de oxígeno atmosférico es restringido, por tanto la producción de oxígeno por la algas resulta siendo estratégica. Por último la materia orgánica sedimentable que se acumula en el fondo de las lagunas como lodo sufre una descomposición anaeróbica, de forma similar a la descrita anteriormente, permitiendo una completa estabilización y reducción significativa del volumen de estos lodos.

Una cualidad que diferencia a las lagunas de estabilización de otros procesos de tratamiento es su gran eficiencia en la remoción de gérmenes patógenos, ya que esta basada en periodo de retención prolongados (días a semanas). El valor de la constante de decaimiento de bacterias (K_b) representa la velocidad real a la que desaparecen las bacterias patógenas en una laguna de estabilización en función a los siguientes factores:

- **Temperatura del agua:** el incremento de la temperatura aumenta el decaimiento bacterial, presuntamente por un incremento de la actividad metabólica que genera una mayor susceptibilidad a las sustancias tóxicas y la multiplicación de los predadores. La mayor temperatura también promueve un aumento en la concentración de algas, que mejora la eficiencia de remoción de bacterias patógenas que son anaerobias y les afecta un ambiente oxigenado.

- **Radiación solar:** permite la formación de sustancias tóxicas de oxígeno (radicales de oxígeno libre, peróxido de hidrógeno y probablemente superóxido y radicales hidroxilo) que dañan y destruyen a la membrana interna de las bacterias patógenas, a través del proceso de foto-oxidación favorecido por un pH elevado. La radiación ultravioleta es una bactericida muy efectivo. Por último la radiación solar también favorece la proliferación de las algas, que como antes se ha dicho, contribuyen a la remoción de las bacterias patógenas.

- **Valor de pH:** la intensa fluctuación del pH en las lagunas durante las 24 horas afectan significativamente las condiciones de las bacterias patógenas. La fotosíntesis en el día favorece el incremento del pH hasta niveles mayores de 8, valor que decae durante la noche por la respiración algal que exhala dióxido de carbono. Un valor de mayor de 9 es letal para los coliformes fecales.

- **Oxígeno disuelto:** las altas concentraciones de oxígeno disuelto generadas por la intensa actividad fotosintética tienen un efecto positivo sobre la formación de compuestos tóxicos de oxígeno. Las bacterias patógenas entéricas son anaerobias, por tanto son afectadas por la presencia abundante de oxígeno disuelto.

- **DBO y nutrientes:** las bacterias entéricas patógenas se alimentan del sustrato orgánico de las heces, que luego de ser diluidas en las aguas residuales generan una situación de escasez. Se estima que las últimas lagunas en una serie con poco DBO favorece la remoción de estas bacterias patógenas.

- **Competencia y predación:** en la laguna se presenta una fuerte competencia por los nutrientes disponibles entre los organismos de la cadena trófica y los patógenos, por tanto cuando hay una escasez relativa de nutrientes, las bacterias fecales ofrecen una competencia menos fuerte que los otros organismos. Además las bacterias patógenas también pueden ser consumidas por protozoarios u otras formas más evolucionadas de vida animal. Algunos bacteriófagos específicos también destruyen organismos fecales.

- **Sedimentación:** una parte importante de las excretas transportadas por las aguas residuales sedimentan en las lagunas, por tanto arrastran gran cantidad de gérmenes patógenos, incluyendo helmintos parásitos.



Foto 40. Lagunas de estabilización de Juli, Puno

La remoción de los parásitos en lagunas de estabilización se obtiene por la sedimentación de los quistes de protozoos y huevos de helmintos. La velocidad de sedimentación depende de la densidad de los organismos, que son muy cercanos a la densidad del agua, por tanto requieren de varios días para descender hasta el fondo de la lagunas y incorporarse a los lodos. Es por ello que la OMS (1989) recomienda un periodo de retención de 10 días para remover el 100% de los huevos de helmintos y los quistes de protozoarios parásitos humanos.

Un proceso de tratamiento que ha tomado vigencia en los últimos años es el humedal artificial, que simulando a los pantanos naturales utiliza la vegetación para facilitar la remoción de materia orgánica y nutrientes, así como retener algunos contaminantes. Las primeras experiencias propusieron un sistema de flujo superficial, en donde el agua residual fluye sobre un sustrato sembrado con plantas palustres, como se aprecia en la figura 30, pero esta opción luego fue descartada por el alto riesgo de favorecer la proliferación de zancudos. Para evitar esa agua superficial expuesta, se desarrollaron otras dos alternativas de flujo sub-superficial vertical y horizontal. En el vertical el agua residual es rociada sobre la superficie y por filtración desciende a las capas inferiores, donde luego de remover su materia orgánica y nutrientes es recolectada para extraerse y disponer el efluente en un cuerpo de agua. El humedal de flujo sub-superficial horizontal se diferencia del anterior en que el agua ingresa por un lado del humedal y se desplaza hasta el otro lado pasando por el sustrato con vegetación, que también remueve los elementos

antes mencionados. Esta última alternativa tiene la ventaja de ampliar el periodo de exposición, por lo que la calidad del efluente puede ser mejor, pero eso implica también que se trabaje con menores caudales que el anterior (foto 41).

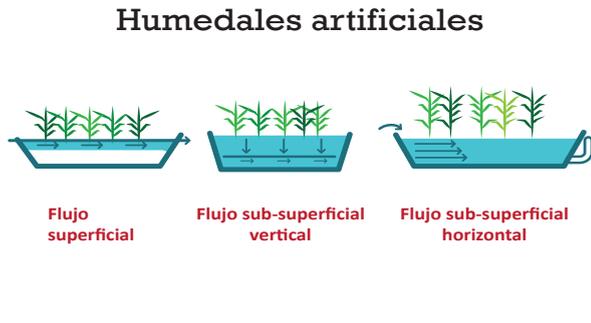


Figura 30. Tipos de humedales artificiales
Foto 41. Humedales de Cementos Lima

En todos los casos el humedal es construido sobre una laguna previamente excavada e impermeabilizada con geomembrana, donde luego son instaladas capas de material filtrantes de diferentes espesores (grava, cofitillo y arena) y finalmente se siembran plantas propias de pantanos, como juncos y totoras. El humedal artificial ha mostrado una buena eficiencia para remover materia orgánica, nutrientes y algunos contaminantes, como metales pesados de aguas residuales provenientes de pequeñas comunidades, pero su aplicación a ciudades más grandes resulta poco práctico. Además, el reducido periodo de retención tampoco permite una buena remoción de patógenos.

Por último no se puede dejar de mencionar un proceso desarrollado exclusivamente para el reuso en Israel, que son los reservorios de estabilización (Libhaber, 2015-2). Como ya se mencionó en el punto 6.5, las aguas residuales después de un tratamiento anaeróbico son transferidas a grandes reservorios donde pueden estar almacenadas entre 2 y 5 meses hasta la época de estiaje en que se utiliza para el riego agrícola (junio a setiembre). Las aguas residuales incrementan su calidad sanitaria durante este largo tiempo de almacenamiento, logrando alcanzar los



Foto 42. Reservorios de estabilización en Israel

estándares establecidos para los tipos de cultivo que se riegan. Esta alternativa también ha permitido reducir el tratamiento convencional, que antes se debía aplicarse para alcanzar la calidad requerida para su disposición final (foto 42).

Durante los últimos años se han desarrollado muchas tecnologías, que luego se han combinado para alcanzar la mayor capacidad de remover los diferentes elementos contenidos en las aguas residuales, por ello actualmente se prefiere hablar de combinación de procesos unitarios antes que tecnologías de tratamiento. En el cuadro 1 ya se mencionaron las combinaciones de procesos de tratamiento de aguas residuales más utilizadas en el Perú y si se añaden algunas también comunes en otros países tenemos el siguiente listado:

- Tamices rotatorios + emisario submarino.
- Tanque séptico.
- Tanque séptico + laguna facultativa.
- Tanque Imhoff.
- Filtro percolador.
- Tanque Imhoff + filtro percolador.
- Tanque Imhoff + filtro percolador + clorinador.
- Tanque Imhoff + filtro percolador + laguna de pulimento.
- Tanque Imhoff + sedimentador.
- Sedimentador + filtro percolador.
- Laguna facultativa primaria.
- Laguna facultativa primaria + laguna facultativa secundaria.
- Laguna facultativa primaria + laguna facultativa secundaria + laguna facultativa terciaria.
- Laguna anaerobia + laguna facultativa.
- Laguna anaerobia + laguna facultativa + laguna de pulimento.
- Laguna anaerobia + laguna aireada + laguna facultativa + laguna de pulimento.

- Laguna anaerobia + reservorios de estabilización
- RAFA + laguna facultativa + laguna de pulimento.
- RAFA + escurrimiento superficial.
- Laguna aireada.
- Laguna aireada + laguna facultativa.
- Laguna aireada + laguna de sedimentación + laguna de pulimento.
- Lodos activados + clorinador.
- Humedales artificiales.

Muchas de las combinaciones existentes también cuentan con una etapa de pre-tratamiento, conformada por cámaras de rejas manuales o mecanizadas y desarenadores. El hecho de que existan todas estas combinaciones no asegura de que todas sean eficientes y validadas. El sistema más importante en el Perú es la combinación de lagunas facultativas primarias y secundarias, que es utilizado en el 48% de las PTAR y que manejan el 25% del caudal tratado.

7.3. Criterios para la elección de tecnología de tratamiento compatible con el reuso

La existencia de un número grande de tecnologías y de procesos unitarios combinados hace difícil que el proyectista elija la fórmula más apropiada para la situación específica que tiene en cada caso, por tanto es necesario en primer lugar definir con mucha claridad el objetivo del tratamiento, según sea la disposición en un determinado cuerpo receptor o del tipo de reuso. Cada situación establece los elementos que deben ser removidos y los niveles que se deben alcanzar, acordes con la normatividad vigente. Es por eso que se debe realizar un análisis de estas alternativas en función a ciertos criterios como los siguientes:

- Capacidad de remoción de patógenos.
- Requerimiento de equipos y energía.
- Tratamiento y disposición de lodos.

- Grado de dificultad en la operación y el mantenimiento.
- Requerimiento de personal.
- Requerimiento de terreno.
- Costos de inversión, operación y mantenimiento.
- Valorización de los efluentes y biosólidos.

A continuación se explican los argumentos para evaluar estos criterios para definir los procesos tecnológicos que deben ser aplicados.

Capacidad de remoción de patógenos

Es evidente que no todos los procesos de tratamiento son igual de eficientes para remover bacterias y virus entéricos, y parásitos humanos nemátodos y protozoarios contenidos en las heces fecales. El cuadro 28 muestra la eficiencia de ocho diferentes procesos de tratamiento para remover bacterias, virus, helmintos y quistes de protozoarios patógenos, expresados en unidades logarítmicas y no en porcentaje que en este caso no permite apreciar bien la magnitud. Vemos que la mayoría de los procesos evaluados tiene capacidad de remover hasta dos unidades logarítmicas de todos los patógenos identificados. Mayor capacidad que esa para remover bacterias patógenas solo la tienen las lagunas de estabilización y la desinfección. Una remoción más eficiente de helmintos se podría lograr con los procesos de cuagulación previa, lagunas aireadas o lagunas de estabilización. Para la remoción de virus también las lagunas y

Proceso de tratamiento	Reducción de órdenes de magnitud o unidades logarítmicas			
	Bacterias	Helmintos	Virus	Quistes
Sedimentación primaria simple	0 a 1	0 a 2	0 a 1	0 a 1
Con coagulación previa	1 a 2	1 a 3	0 a 1	0 a 1
Lodos activados	0 a 2	0 a 2	0 a 1	0 a 1
Biofiltros	0 a 2	0 a 2	0 a 1	0 a 1
Zanja de oxidación	1 a 2	0 a 2	1 a 2	0 a 1
Desinfección	2 a 6	0 a 1	0 a 4	0 a 3
Laguna aireada	1 a 2	1 a 3	1 a 2	0 a 1
Lagunas de estabilización	1 a 6	1 a 3	1 a 4	1 a 4

Cuadro 28. Capacidad de remoción de patógenos de diferentes procesos de tratamiento de aguas residuales. (Fuente: Feachem et al. 1983)

la desinfección son más eficientes. Por último solo es posible remover con mayor eficiencia los quistes también a través de las lagunas. Esta evaluación nos lleva a concluir que el proceso más eficiente para remover los cuatro grupos de patógenos son las lagunas de estabilización. Esto significa que si tratáramos las aguas residuales con otros procesos como los lodos activados, se tendría que adicionar un proceso de desinfección y algún otro que remueva los helmintos, ya que la desinfección no consigue remover este grupo de patógenos.

En el cuadro 29 se muestran las eficiencias y calidad final de los efluentes de algunas plantas que fueron evaluadas con el proyecto SWITCH en Lima (IPES, 2008). Se puede observar que la máxima remoción de coliformes termo tolerantes (fecales) se logró en la planta de lodos activados porque dispone de un proceso de desinfección, pero en forma natural se logró mayor eficiencia en las lagunas de estabilización y lagunas aireadas por sus mayores periodos de retención. Las lagunas de estabilización de Pucusana tienen una baja remoción de coliformes fecales porque su tiempo de retención es muy reducido, ya que estaba sobrecargada porque solo operaba el 50% del sistema. En todos los casos se obtuvo una completa remoción de helmintos, pero es más segura en los sistemas con más de 8 días de retención.

Planta evaluada	Tiempo retención (días)	Eficiencia de remoción			Calidad del efluente		
		DBO (%)	Coliformes fecales (unid.log.)	Parásitos (unid. log.)	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	Huevos de helmintos (unid./l)	Protozoarios parásitos (unid./l)
Lodos activados de la Avenida Universitaria	0.8	99	6	2	1.60E+01	0	5
Lagunas de estabilización de Pucusana	8.2	50	3	3	3.11E+06	0	2
Humedales artificiales de Oasis de Villa	1.9	91	2	2	1.30E+05	0	0
Filtro percolador de Miraflores-Costa Verde	0.2	46	2	1	3.50E+06	0	75
Lagunas de estabilización de La Inmaculada	17.0	96	4	3	1.70E+03	0	0
Lagunas aireadas de Huascar y Parque 26	25.0	86	5	3	1.70E+04	0	0

Cuadro 29. Eficiencia y calidad de los efluentes de seis plantas evaluadas en Lima. (Fuente: IPES, 2008)

Una preocupación reciente es la presencia de protozoarios parásitos humanos que muestran una remoción algo limitada, como se observa en tres de los sistemas evaluados. Es fácil entender que el filtro percolador tenga baja eficiencia para remover protozoos porque apenas alcanza un tratamiento primario, pero en sistemas de lodos activados y lagunas esto indica que los procesos no son muy suficientes, por tanto se recomienda instalar una pantalla que evite la salida del efluente por rebose y retenga los flotantes, donde normalmente se encuentran estos patógenos.

Requerimiento de equipos y energía

El desarrollo tecnológico constante ha permitido disponer cada vez de más equipos para mecanizar los procesos, situación que es más apreciada en la medida que las plantas de tratamiento son de mayor capacidad, evitando así que los requerimientos de mano de obra sean muy elevados y el

manejo de los riesgos de la operación se controlen mejor. Es así que las PTAR pueden tener las siguientes situaciones:

- Procesos mecanizados que requieren energía.
- Procesos naturales que no requieren energía y pueden producirla.
- Procesos con la combinación de las dos posibilidades.

Muchos procesos han operado al inicio solo en forma manual, pero actualmente muchos son o pueden ser mecanizados utilizando equipos como los siguientes:

- Medidores de caudal o caudalímetros electrónicos de tubo venturi, de rueda o de ultrasonido, que permiten registrar el caudal en forma permanente.
- Bombas hidráulicas centrífugas o helicoidales para elevar el nivel del flujo.
- Cámara de rejas o cribas con limpieza mecanizada, que retiran los sólidos de la criba y los trasladan hasta un contenedor. También pueden incluir un prensado.
- Compresores para difusores que inyectan aire a los reactores aireados.
- Aireadores flotantes para inyectar aire en la porción de la masa de agua donde están ubicados.
- Mezcladores flotantes para mantener en movimiento la masa de agua y propiciar la incorporación del oxígeno atmosférico.
- Barre lodos para remover el lodo del fondo de los sedimentadores y facilitar su traslado al sistema de manejo de lodos.
- Bombas de lodos para recircular o trasladar los lodos de los reactores a los digestores o lechos de secado.
- Espesadores de lodos para reducir el contenido líquido antes de su traslado.
- Digestores de lodos para estabilizar y remover patógenos.
- Equipos de gas para cloración o de radiación UV.
- Sistema de sensores de oxígeno, pH y otros parámetros instalados en diferentes puntos de los procesos de la planta.
- Sistemas electrónicos para automatización de la operación de todos los equipos utilizados en la planta.



Foto 43. Sistema electrónico de automatización

La casi totalidad de estos equipos trabajan con energía eléctrica, gasto que debe ser incorporado a los costos de operación. Oakley (2015) indica que las plantas mecanizadas demandan un mínimo de 0.6 kWh por m³ de agua tratada. La PTAR de lodos activados de Yunguyo actualmente utiliza 0.43 kWh/m³ (foto 44). En general estas innovaciones tecnológicas han generado procesos mejor contralados pero con altos costos de inversión, operación y mantenimiento por los equipos



Foto 44. Planta de lodos activados de Yunguyo, Puno

incorporados, haciendo que en muchos casos no puedan ser asumidos por las comunidades de bajos recursos económicos, especialmente las pequeñas y rurales. Por eso es frecuente encontrar plantas que ya no operan porque sus equipos se dañaron y no fueron renovados. Los sistemas naturales de tratamiento incluyen los siguientes procesos naturales físicos y bioquímicos:

- Sedimentación, adsorción, flujo por gravedad.
- Fotosíntesis con descomposición aeróbica.
- Descomposición anaeróbica con producción de metano.

Se prefieren sistemas con procesos naturales que trabajan por gravedad y en lo posible no requieran equipos, debido a que tienen las siguientes ventajas:

- No requieren energía externa y pueden producir energía.
- Son estables y poco vulnerables.
- La huella de carbono es pequeña.

- Los efluentes y lodos son apropiados para su uso en agricultura.
- Son más rentables y sostenibles.

Estas ventajas constituyen la principal razón de que las lagunas de estabilización sean el sistema de tratamiento preferido, ya que trabajan con procesos naturales que no requieren necesariamente equipos y solo usan la energía solar como única fuente, por tanto son más sostenibles en los casos de las comunidades con baja capacidad económica. Sin embargo, tampoco debe ser un imperativo no utilizar ningún sistema mecanizado, ya que muchas veces por lo menos se requieren sistemas de bombeo para elevar el agua hasta lugares más aparentes para su tratamiento y uso. En plantas más grandes es conveniente tener cámaras de rejillas mecanizadas y cuando se utilizan procesos anaeróbicos se debe tener por lo menos quemadores de metano.

Tratamiento y disposición de lodos

Una deficiencia muy frecuente en los proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales es que no incluyen el manejo de los lodos generados. Esto es especialmente importante en los procesos que generan permanentemente lodos y que deben ser tratados para su disposición final. Como se observa en la figura 31, para instalar los equipos y ambientes usados para procesar los lodos en una planta de lodos activados se requiere un terreno

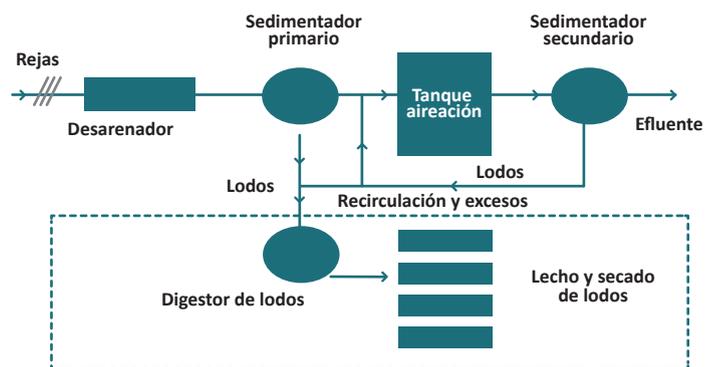


Figura 31. Manejo de lodos en una PTAR de Lodos Activados

similar al utilizado para el tratamiento del agua, por tanto la planta debe disponer del doble de terreno. El tratamiento de lodos demanda barre lodos, bombas de lodos, digestores, secadores y lechos de secado de lodos, equipos y ambientes que demandan casi la mitad de la energía requerida por la planta.

En los sistemas con producción permanente de lodos, la disposición de estos residuos es un aspecto que debe ser definido desde la formulación del proyecto. En la mayoría de los casos, los lodos solo son trasladados en un lecho de secado, de donde luego se transportan a un relleno sanitario de seguridad, ya que son considerados residuos peligrosos por la presencia de patógenos, especialmente de parásitos humanos. El costo de esta disposición puede llegar a ser 10 veces lo que costaría en rellenos sanitarios convencionales. Es por eso que se está proponiendo que

las plantas implementen digestores, que al estabilizar los lodos con calor logran eliminar los patógenos, de forma que luego puedan ser dispuestos en rellenos sanitarios convencionales, y en el mejor de los casos ser utilizados en la agricultura como mejoradores de suelos o fertilizantes, si se añaden y estandarizan los contenidos de nutrientes.

El caso de las lagunas de estabilización es totalmente diferente a los sistemas de producción continua de lodos, ya que el manejo de los lodos acumulados en el fondo de estas lagunas se difiere al momento en que tengan que ser removidos, que en las lagunas anaeróbicas debe ser cada 2 o 3 años, en las facultativas de 5 a 8 años y en las de pulimento cada 10 a más años. El tiempo para remover los lodos en cada tipo de lagunas dependerá de la velocidad de acumulación y por eso deben ser evaluado con una batimetría previa, ya que se recomienda su remoción antes de que los lodos ocupen el 20% del volumen de las lagunas. También se recomienda al proyectista diseñar las lagunas primarias con una franja en la entrada del crudo más profunda que el resto de la laguna, a fin de permitir la acumulación de lodos en esa zona y dilatar más la frecuencia de limpieza, ya que estas lagunas acumulan más lodos que las siguientes de la batería. Una gran ventaja de los lodos acumulados en las lagunas es que solo representan del 35% del volumen de lodos frescos generados en otros sistemas como los lodos activados.

La forma convencional de remover los lodos de las lagunas de estabilización es realizando un secado por varios meses en la época de mayor calor y de estiaje, para buscar la máxima eliminación de la humedad y que luego facilite la extracción mecánica de volúmenes menores con la maquinaria excavadora. Una limpieza más frecuente acelera el secado de los lodos porque las capas acumuladas son más delgadas. El gran problema que tiene una planta



Foto 45. Dispositivo de vaciado total del agua

con solo una laguna o batería es que el secado de lodos implica tener que paralizar la operación completa por un tiempo muy prolongado, por tanto en ese caso la única opción es usar equipos de dragado o absorción de lodos líquidos, que hacen la operación muy costosa por el gran volumen que se debe manejar. Otro problema observado en muchas plantas es que las lagunas no fueron diseñadas para permitir el drenado total cuando se quiere secar y remover los lodos, lo que obliga a realizar la ruptura de un dique para lograrlo. Por eso toda laguna debe ser diseñada y construida con un dispositivo que permita el vaciado total del volumen de agua, tal como se aprecia en la foto 45.

Grado de dificultad en la operación y el mantenimiento

Muchos procesos compactos como los lodos activados se caracterizan por tener procesos mecanizados con equipos que demandan una supervisión con operarios muy calificados y las 24 horas del día. Si bien estos procesos se han ido automatizando para requerir menos mano de obra, estos supervisores deben ser aún más calificados. A ello se suma que este tipo de procesos deben ser operados con una limitada variación de caudales y cargas orgánicas, por tanto este requerimiento también exige de una supervisión permanente. A esto se suma la vulnerabilidad de los sistemas automatizados por riesgos de daños y robos. Por ejemplo, el sistema automatizado de la PTAR de Yunguyo ha quedado dañado por la caída de un rayo sobre la planta, situación que demandará disponer de US\$ 33,000 para su reparación.

Sistemas naturales como las lagunas de estabilización no operan con equipos, por lo que son menos vulnerables y no requieren de una supervisión durante las 24 horas. Todas sus actividades de operación y mantenimiento son simples y no permanentes, por tanto necesitan mano de obra sin mucha calificación y solo durante la jornada normal de trabajo, lo que implica costos de personal más bajos.

Requerimiento de personal

Este criterio de alguna forma ya se ha abordado en el anterior, ya que el grado de dificultad de la operación y el mantenimiento de una planta determina la cantidad y calificación del personal requerido. Es por tanto lógico establecer que los sistemas mecanizados demanda de más cantidad y calificación del personal.

La figura 32 permite comparar los requerimientos de personal para plantas de lodos activados y lagunas de estabilización dimensionadas para dos niveles de caudales. Para un caudal de 50 l/s una planta de lodos activados requerirá entre 12 y 28 operarios, según sea su nivel de automatización, mientras que las lagunas solo demandarán 6 operarios. Del mismo modo una PTAR que trate 250 l/s necesitará de 20 a 74 operarios cuando se implemente con lodos activados, cantidad que se reduce a 12 operarios si se utilizan lagunas. Estas cifras demuestran que las plantas de lodos activados

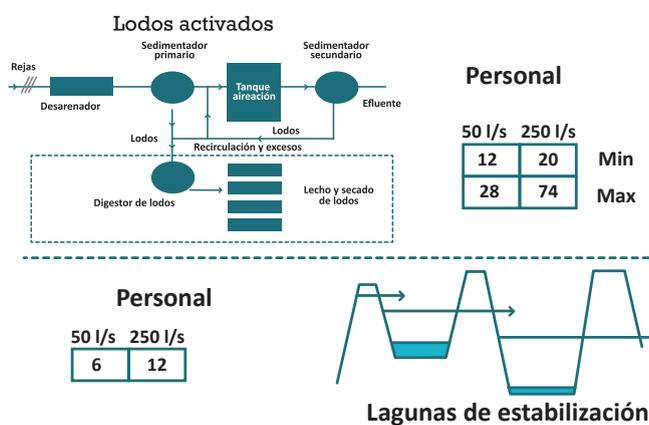


Figura 32. Requerimiento de personal en dos tipos de plantas

de lodos activados demandan una gran cantidad de personal calificado y permanente, mientras que las lagunas de estabilización requieren un personal poco calificado y solo durante la jornada normal de trabajo.

requieren de 2 a 7 veces más de personal que las lagunas, que además deben ser más calificado y por tanto con haberes más elevados. Por ejemplo la PTAR de lodos activados de Yunguyo tiene 13 operarios para tratar actualmente 23 l/s.

Las lagunas de estabilización demanda poca mano de obra porque el sistema natural trabaja casi solo, por tanto se requiere personal para las labores de control de caudales, limpieza de cribas, desarenadores, canales y de natas en las lagunas, limpieza de vegetación que prolifera en bordes y la masa de agua de las lagunas y supervisión en general para el control de posibles eventos especiales. La única actividad más compleja pero eventual es la remoción de lodos de las lagunas, pero normalmente esta se realiza con personal y maquinaria contratados específicamente para tal fin.

Desafortunadamente muchos sistemas de lagunas en el país no cuentan ni siquiera con un operario permanente, y la limpieza es eventual, cuando se hace. Eso determina que con los años estas plantas terminen operando mal. Por eso se debe exigir que todas las plantas (con sistemas naturales o mecanizados) tengan por lo menos un operador asignado y personal de vigilancia durante las 24 horas del día.

Requerimiento de terreno

Los procesos compactos como los lodos activados demanda poco terreno, en comparación con las lagunas que requieren de áreas mayores para alcanzar largos periodos de retención, que permitan la remoción natural de la materia orgánica y sobre todo de los gérmenes patógenos. La figura 33 compara los requerimientos de área para los dos tipos de procesos antes mencionados.

Los proyectos desarrollados en diferentes partes muestran que las plantas de lodos activados demandan de 0.16 a 0.40 m²/habitante servido, dependiendo del clima del lugar, ya que los procesos biológicos son más activos en zonas cálidas y por tanto el requerimiento de terreno será menor. El requerimiento de terreno para las plantas de lagunas de estabilización fluctúa entre 0.8 y 4.0 m²/habitante servido, también dependiendo de la temperatura del lugar. El dato de 4 m²/hab. está referido a lagunas construidas en Alaska, en donde la superficie llega a congelarse varios meses al año. En cambio en zonas tropicales este requerimiento se reduce a la quinta parte. De hecho el requerimiento de terreno de las lagunas es 5 veces lo que demandan las plantas de lodos activados, por tanto

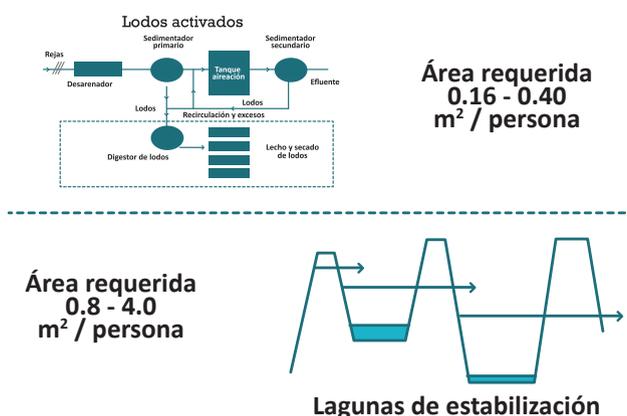


Figura 33. Requerimiento de terreno en dos tipos de plantas

como ya se ha discutido en el punto 5.3, los proyectistas normalmente eligen las tecnologías más compactas para evitar la adquisición de terrenos muy grandes o no disponibles. Algunos lugares como Lima efectivamente cuentan con pocos espacios para proponer lagunas, pero la mayoría de ciudades del Perú requieren áreas relativamente pequeñas, que normalmente están disponibles a unos kilómetros y en donde además se puede usar los efluentes para habilitar nuevas áreas agrícolas y forestales. De hecho esos terrenos son más disponibles y baratos que los cercanos a la ciudad, con la ventaja adicional que después de 20 años tendrán un valor de 5 a 10 veces mayor que el inicial.

Costos de inversión, operación y mantenimiento

Este criterio termina siendo el más importante para seleccionar los procesos que conformarán el sistema de tratamiento, ya que de alguna forma engloba todos los anteriormente discutidos. Además es el criterio decisivo para elegir una de las alternativas evaluadas en todo estudio de pre-inversión.

Por otro lado es importante diferenciar los costos de inversión para implementar una planta, de los costos de operación y mantenimiento que se deben mantener en todo su periodo de vida útil, que en principio es de 20 años, pero que en la práctica puede incluso extenderse hasta 50 años.

Costos de inversión

La información sobre los costos de inversión de las plantas de tratamiento de aguas residuales es la menos disponible, debido a la privacidad de los contratos y las variaciones del valor monetario durante los tiempos transcurridos desde la construcción, lo que hace difícil la tarea de comparar los costos de las diferentes tecnologías. Es por ello que en 2008 el Proyecto SWITCH Lima efectuó una evaluación de los costos de inversión mediante un proceso de tasación simultánea de 6 plantas existentes en Lima, con el propósito de poder comparar estos costos (IPES, 2008). Como se puede observar en el cuadro 30, los costos directos fueron diferenciados en los siguientes 7 componentes:

- Obras preliminares.
- Movimiento de tierras.
- Estructuras de concreto.
- Sistemas de conducción y distribución.

- Equipos de aireación.
- Otros equipos.
- Obras complementarias.

Además se añadieron los costos indirectos equivalentes al 15% de los costos directos. Por último también se incluyó el costo del terreno, estimado a partir del valor comercial de la propiedad en la zona, aun cuando en la práctica se puede no haber comprado.

Item	Descripción	Universitaria	Pucusana	Oasis de Villa	Miraflores	Inmaculada	Huascar Parque 26
1.00	Obras preliminares	1,184	2,985	900	1,118	1,266	11,201
2.00	Movimiento de tierras	5,144	136,341	4,677	1,696	85,577	3,176,095
3.00	Estructuras de concreto	126,682	6,272	16,560	31,715	485,489	11,516,578
4.00	Sistema de conducción (tuberías)	6,609	13,531	401	1,678	28,147	1,412,285
5.00	Equipo de aireación	1,551					39,744
6.00	Otros equipos	474	4,564	435	752		
7.00	Obras complementarias	3,124	1,982		2,097	1,763	9,824
Costo directo		144,768	165,675	22,973	39,056	602,242	16,165,727
Costo indirecto (15%)		21,715	24,851	3,446	5,858	90,336	2,424,859
Costo total de la obra		166,483	190,526	26,419	44,914	692,578	18,590,586
Costo del terreno		96,460	36,270	14,340	276,960	868,400	4,878,000
Costo total de la Planta		262,943	226,796	40,759	321,874	1,560,978	23,468,586

Cuadro 30. Costos de Inversión de seis plantas de tratamiento implementadas en Lima a 2008 (US\$). (Fuente: IPES, 2008)

Esta información de base luego permitió establecer en el cuadro 31 el costo por persona atendida (per cápita) para cada tipo de tecnología utilizada, haciendo distinción cuando se incluye el valor comercial del terreno.

Aun cuando las diferencias de tamaño de la planta (caudal o población atendida) dificulta la comparación entre tecnologías de tratamiento, en el cuadro 31 y la figura 34 se puede observar que las tecnologías con menores costos de inversión son las lagunas de estabilización y los humedales artificiales. Las lagunas del colegio La Inmaculada son una excepción, toda vez que se construyeron en concreto armado por haberse ubicado en la parte alta de un cerro. Por otro lado resulta sorprendente que la PTAR Huáscar/Parque 26 tenga un costo de inversión tan elevado

como US\$ 465/habitante atendido, incluso más que la planta de lodos activados, debido también a que todas las lagunas fueron construidas con concreto armado.

Planta	Tecnología	Caudal (l/s)	Población atendida	Costo de la planta (US\$)	Costo (US\$/persona)	
					Sin terreno	Con terreno
Av. Universitaria	Lodos activados	3.00	1,529	166,483	109	172
Pucusana	Lagunas de estabilización	4.00	2,700	190,526	71	84
Pucusana	Lagunas (plena capacidad)	10.00	6,750	190,526	28	34
Oasis de Villa	Humedales artificiales	0.20	500	26,419	53	82
Mitaflores-Costa Verde	Filtros percoladores	0.90	488	44,914	92	660
Inmaculada	Lagunas de estabilización	4.60	3,500	692,578	198	446
Huascar-Parque 26	Lagunas aireadas	70.00	40,000	18,590,586	465	587

Cuadro 31. Costos de inversión de seis plantas de Lima según la tecnología de tratamiento (US\$). (Fuente: IPES, 2008)

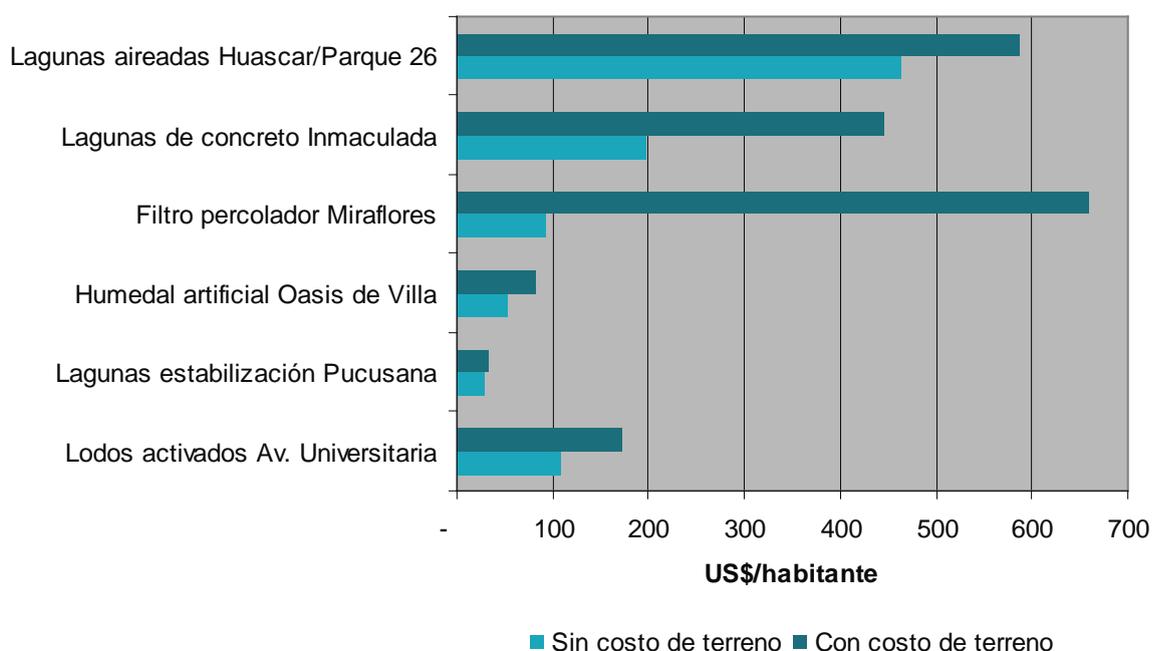


Figura 34. Comparación de los costos de inversión de seis plantas de Lima según la tecnología de tratamiento. (Fuente: IPES, 2008)

Es interesante observar que cuando se incluye el costo del valor comercial del terreno en la zona donde se ha ubicado la planta, el costo de inversión de la PTAR de filtro percolador en Miraflores se eleva de US\$ 92 a 660/habitante atendido, lo que demuestra que es prohibitivo implementar

una planta en lugares con terrenos de alto valor comercial, aun cuando se trate de una planta compacta o el terreno es parte de un parque como fue el caso. Nuevamente en la planta de Huáscar/Parque 26 se aprecia que el terreno generó un incremento del costo de inversión de US\$ 465 a 587/habitante, en la medida que se trata de lagunas con extensiones considerables.

La información proporcionada en el Plan Nacional de Saneamiento 2006-2015 y el Plan de Inversiones del Sector Saneamiento de Alcance Nacional 2014-2021 elaborados por el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento ha permitido a Libhaber (2015-1) realizar un análisis de los costos de inversión de 30 plantas de tratamiento de aguas residuales construidas en el Perú y que figuran en el cuadro 32, lo que permite una comparación entre las diferentes tecnologías utilizadas. Si bien esta información incluye las plantas más importantes del país porque logran una cobertura para casi 12 millones de habitantes, solo dos de ellas tienen el 79% de la capacidad instalada en todas las plantas evaluadas y utilizan un tratamiento preliminar de remoción de sólidos finos y luego una descarga al mar de la mayor parte de los desagües de Lima mediante emisarios submarinos, a un costo de inversión promedio de US\$ 29.40/habitante atendido. Luego le siguen en ascenso tecnológico 6 pequeñas plantas de tanques Inhoff que muestran costos de inversión tan diferentes como US\$ 21.78 y 124.12/habitante, valor último excesivamente alto respecto al promedio internacional.

Nombre de la PTAR	Proceso de Tratamiento	Caudal (l/s)	Población Servida (habitantes)	Costo de Inversión	
				Millones de (US\$)	(US\$/habitante)
Taboada, Lima	Tratamiento preliminar y emisario submarino	14,000	5,000,000	146.20	29.24
La Chira, Lima	Tratamiento preliminar y emisario submarino	6,200	2,660,000	79.00	29.70
2 Mega PTAR	Tratamiento preliminar y emisario submarino	20,200	7,660,000	225.20	29.40
Velille, Cusco	Tanques Imhoff	3	2,900	0.06	21.78
5 PTAR	Tanques Imhoff	8	7,240	0.90	124.12
6 PTAR	Tanques Imhoff	12	10,140.00	0.96	94.85
PTAR Piura	RAFA y filtro percolador	120	211,000	37.80	179.15
Totora, Ayacucho	Tanque Inhoff y filtro percolador	300	252,242	5.54	21.96
Contumaza, Cajamarca	Tanque Inhoff y filtro percolador	3	5,000	0.69	137.91
San Jerónimo, Cusco	Filtros Percoladores	446	375,000	32.10	85.60
4 PTAR	Tanque Inhoff y filtro percolador	869	843,242	76.13	90.28
14 PTAR	Lagunas de Estabilización	238	205,630	14.90	72.46
Aucallama, Huaral	Lagunas de Estabilización	6	5,560	0.37	66.67
15 PTAR	Lagunas de Estabilización	244	211,190	15.27	72.31
Boca del Río, Pisco	Lagunas anaerobia, facultativa y pulimento	190	70,000	3.98	56.85
Covicorti, Trujillo	Lagunas aireadas y facultativas	880	475,200	15.46	32.53
Cortijo, Trujillo	Lagunas aireadas y facultativas	200	108,000	3.51	32.53
2 PTAR	Lagunas aireadas y facultativas	1,080	583,200	18.97	32.53
San Juan, Lima	Lagunas aireadas, sedimentación y pulimento	400	216,000	29.53	136.71
Huascar, Lima	Lagunas aireadas, sedimentación y pulimento	90	48,600	6.64	136.63
San Bartolo, Lima	Lagunas aireadas, sedimentación y pulimento	1,000	540,000	73.83	136.72
3 PTAR	Lagunas aireadas, sedimentación y pulimento	1,490	804,600	110.00	136.71
Puente Piedra	Lodos Activados	300	162,000	4.38	27.04
Cieneguilla, Lima	Lodos Activados	118	63,720	3.10	48.65
Manchay, Lima	Lodos Activados y filtración	60	32,400	5.90	182.10
Santa Clara, Lima	Lodos Activados y filtración	437	235,980	14.50	61.45
Escalerilla, Arequipa	Lodos Activados	120	220,000	25.00	113.64
Enlozada, Arequipa	Lodos Activados	545	1,000,000	142.50	142.50
5 PTAR	Lodos activados	1,580	1,714,100	195.38	113.98
30 PTAR		25,665	11,896,472	645.89	54.29

Cuadro 32. Costos de inversión de 30 PTAR construidas en el Perú según la tecnología de tratamiento utilizada. (Fuente: Libhabe - 2015 y elaboración propia).

El tercer grupo lo forman 4 plantas que utilizan Tanques Inhoff o RAFA con filtros percoladores, también con una gran diferencia de costos de inversión entre US\$ 21.79 a 179.15/habitante, valores que igualmente los más altos escapan a los promedios internacionales. El costo de inversión del cuarto grupo de lagunas de estabilización tiene un promedio de US\$ 72.31/habitante, que aun cuando es un poco elevado está cercano al promedio internacional. Un sistema parecido y que incluye lagunas anaeróbicas presenta un costo de US\$ 56.85/habitante, que más bajo y si está dentro del promedio internacional. El quinto grupo de lagunas aireadas y facultativas muestran un costo de US\$ 32.53, que por el contrario, algunos serían muy bajos respecto al promedio internacional, ya que incluyen equipamiento para aireación. El sexto grupo de lagunas aireadas, sedimentación y pulimento constituyen las PTAR más costosas construidas porque gastaron US\$ 136.71/habitante, mayor que el siguiente grupo de lodos activados con un promedio de 113.98/habitante. En el caso de las lagunas aireadas se dijo antes que ese alto costo podría deberse a la construcción de pisos y paredes de concreto armado. Si bien el costo de inversión de las PTAR de lodos activados está dentro del promedio internacional, podría estar sesgado porque hay casos de costos tan bajos como US\$ 27.04/habitante que es poco confiable.

Podríamos decir que en general la inversión realizada en las 30 plantas es bastante aceptable porque en promedio es de US\$ 54.29/habitante, pero como dijimos antes, está sesgada con las plantas de tratamiento preliminar que tienen casi el 80% de la capacidad instalada. Si separamos estas PTAR, las otras 28 tendrían un costo de US\$ 99.30/habitante, valor que es casi el doble y que puede ser considerado algo elevado, producto de la elección de tecnologías menos naturales y más costosas.

Por otro lado, también Libhaber indica que, mientras el costo promedio de inversión de las lagunas de estabilización en la costa es de US\$ 35.30/habitante, en sierra y selva alcanzan US\$ 104.30 y 115.30/habitante respectivamente, valores últimos considerados muy elevados y por encima del promedio internacional. Es probable que los proyectos elaborados incluyan revestimiento de concreto que eleven los costos significativamente o que los costos estimados no tengan una supervisión idónea.

Para facilitar la apreciación más fácil sobre las diferencias de costo entre los diferentes procesos tecnológicos, se presenta la figura 35 que muestra un análisis de costos relativos de inversión a nivel mundial, donde es posible identificar los procesos más utilizados en el tratamiento de las aguas residuales. Queda claro que los costos se incrementan en la medida que se alcanza un nivel de tratamiento superior y que dentro de los procesos secundarios, las lagunas facultativas tienen el costo más bajo.

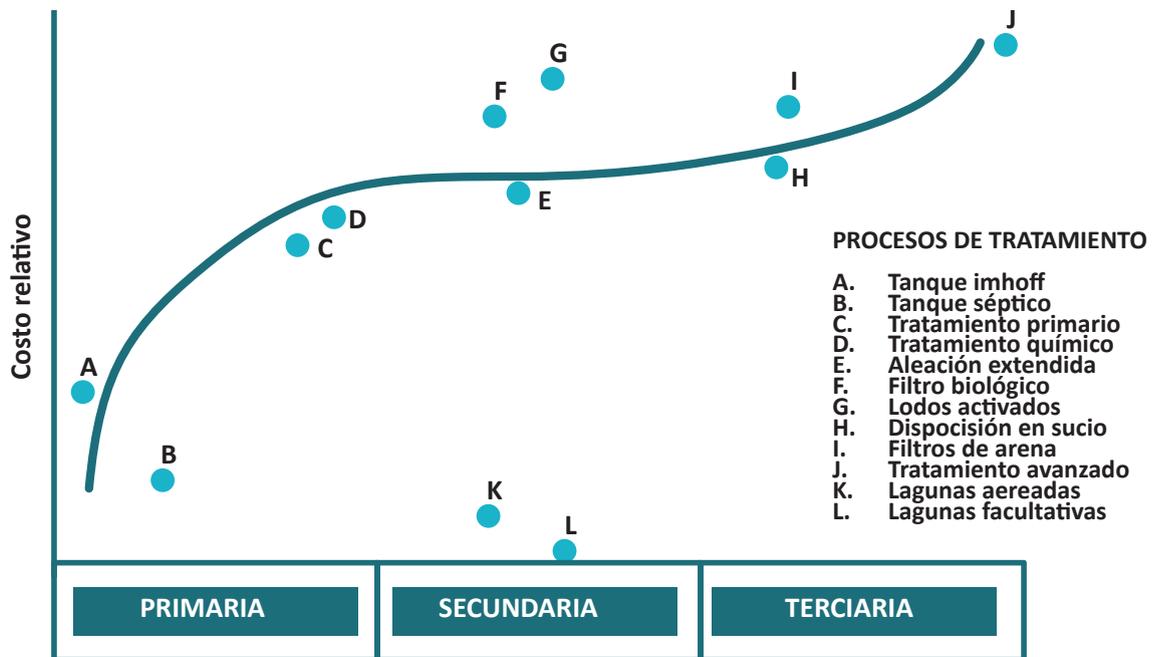


Figura 35. Diferencia de costos relativos para diferentes procesos de tratamiento de las aguas residuales a nivel mundial. (Fuente: IAMA - 2007).

Costos de operación y mantenimiento (O&M)

Normalmente se busca que la inversión en la construcción de la planta sea la más baja posible, pero es más importante aún, que los costos de operación y mantenimiento pueden ser solventados por la comunidad, a través del pago del servicio de agua y saneamiento (tarifas reales). Sin embargo este aspecto generalmente queda relegado cuando se logra el financiamiento de la una "inversión direccionada" y se puede "entregar" la obra, más aún si el costo de inversión es donada o asumida totalmente por el gobierno central. Es por eso que necesitamos sustituir esa cultura de hacer obras por la de brindar servicios eficientes y que además sean sostenibles con los recursos propios de cada comunidad.

También el Proyecto SWITCH Lima efectuó la evaluación de los costos de operación y mantenimiento (O&M) de las mismas 6 plantas de Lima en donde se analizaron los costos de inversión, y que también permite comparar estos costos para diferentes tecnologías (IPES, 2008). Como se puede observar en el cuadro 33, este análisis se realizó teniendo en cuenta los gastos directos de personal, materiales e insumos, energía para equipos, agua y electricidad, servicios de mantenimiento de equipos y de áreas verdes. Igualmente se calculó el costo de depreciación de la infraestructura durante la vida útil, costo indirecto que sumado a los costos de O&M finalmente establece el costo de tratamiento.

Descripción de partidas	Berma central Av. Universitaria	Zona agrícola de Pucusana	Oasis de Villa	Miraflores- Costa Verde	Colegio Inmaculada	Parque Huascar	Parque 26
Personal	23,590	5,200	250	3,200	5,760	35,600	13,610
De operación	16,550	3,200	250	3,200	5,760	22,000	6,810
De seguridad	7,040	2,000				13,600	6,800
Materiales e insumos	240	100	325	1,200	7,200	1,692	300
Energía para aireación y bombeo	6,282	670			25,128	102,914	1,520
Electricidad y agua potable	440			800		960	360
Servicios por mantenimiento de equipos	850	4,670			1,440	9,400	4,670
Servicios por mantenimiento de áreas verdes						17,201	4,515
Costo total anual (US\$/año)	31,402	10,640	575	5,200	39,528	167,767	24,975
Producción de agua (m ³ /año)	55,200	82,800	3,532	22,075	142,500		1,036,800
Costo de agua por operación y mantenimiento (US\$/m ³)	0.57	0.13	0.16	0.24	0.28		0.12
Inversión en la Planta (US\$)	166,483	190,526	26,419	44,914	692,578		18,590,586
Vida útil de la planta (años)	25	25	25	25	25		25
Depreciación de la planta (US\$/año)	6,659	7,621	1,057	1,797	27,703		495,749
Costo de agua por depreciación de la inversión (US\$/m ³)	0.12	0.09	0.30	0.08	0.19		0.48
Costo total del agua (US\$/m³)	0.69	0.22	0.46	0.32	0.47		0.60
Población atendida	1,529	2,700	500	488	3,500		40,000
Tarifa anual (US\$/persona)	24.89	6.76	3.26	14.34	19.21		17.21

Cuadro 33. Costos de operación y mantenimiento de seis plantas de tratamiento implementadas en Lima a 2008 (US\$) (Fuente: IPES - 2008).

Tanto el cuadro 33 como la figura 36 nos permiten ver que las lagunas de estabilización tienen los costos de O&M más bajos (US\$ 0.13/m³), aun cuando el filtro percolador solo realiza un tratamiento primario. Evidentemente la PTAR de lodos activados muestra el costo de O&M de US\$ 0.57/m³, que es el más elevado de todas las plantas porque demanda de energía eléctrica para operar los equipos de aireación. Llama la atención que la planta de Huáscar/Parque 26 tenga un costo de O&M de solo US\$ 0.12/m³ a pesar de utilizar energía para el funcionamiento de los aireadores de las primera fase, pero tal vez por ser la PTAR más grande logre una mayor eficiencia por economía de escala.

Otra forma de comparar los costos de O&M es deduciendo el costo que deberá pagar cada persona atendida durante un año (US\$/persona/año), como se aprecia en el cuadro 34. A diferencia del análisis anterior, el menor costo anual por persona servida de US\$ 1.15 y corresponde a los humedales artificiales de Oasis de Villa, valor que se eleva a US\$ 1.58/persona/año en las lagunas de estabilización de Pucusana. El costo más elevado de US\$ 20.50/persona/año lo tiene la planta de lodos activados de la Avenida Universitaria y le sigue con US\$ 11.30/persona/año

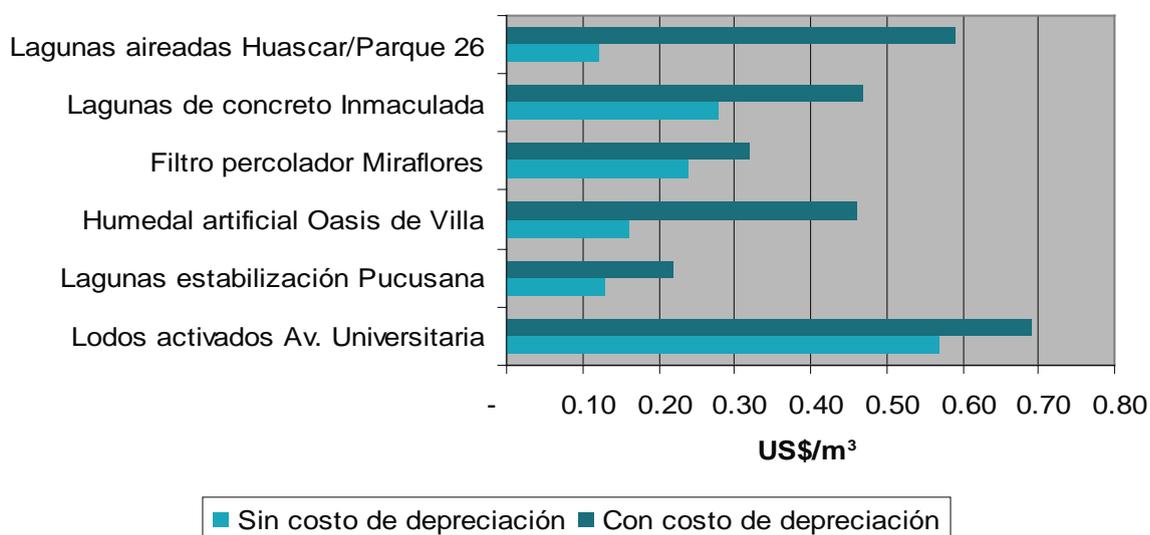


Figura 36. Comparación de los costos de operación y mantenimiento de seis plantas de Lima según tecnología de tratamiento. (Fuente: IPES, 2008).

Nombre de la Planta	Tecnología	Caudal (l/s)	Población atendida	Costo de O&M	
				(US\$/año)	(US\$/persona/año)
Av. Universitaria	Lodos activados	3.00	1,529	31,402	20.54
Pucusana	Lagunas de estabi	10.00	6,750	10,640	1.58
Oasis de Villa	Humedales artificiales	0.20	500	575	1.15
Mitaflores-Costa Verde	Filtros percoladores	0.90	488	5,200	10.7
Inmaculada	Lagunas de estabilización	4.60	3,500	39,528	11.30
Huascar-Parque 26	Lagunas aireadas	70.00	40,000	192,742	4.82

Cuadro 34. Costos de operación y mantenimiento de seis plantas de tratamiento implementadas en Lima a 2008 (US\$/persona/año). (Fuente: IPES - 2008).

las lagunas de estabilización del Colegio La Inmaculada. Estos altos costos demuestran que estos dos últimos sistemas no son las mejores alternativas para brindar servicio de saneamiento a la población atendida, sino que más bien se trata de casos desarrollados con el propósito de usar las aguas residuales para el riego de sus áreas verdes. Si volvemos al cuadro 33, veremos que el costo de ambos casos es de US\$ 0.57 y 0.28/m³, costos más bajos que US\$ 1.44/m³ pagados antes por el uso de agua potable para regar sus áreas verdes.

Tecnología de Tratamiento	Costo de Inversión (US\$/habitante)	Costo de O&M (US\$/habitante/Año)
Pre-tratamiento		0.2
Preliminar y emisario submarino	30	0.90-1.30
Lagunas de estabilización (costa)	19-67	0.60-1.60
Humedales artificiales	34-53	1.15
Lagunas aireadas	33	3.80-4.20
Filtros percoladores	86-92	3.80-10.70
Lodos activados	70-140	4.00-20.00

Cuadro 35. Costos de inversión y O&M por persona para PTAR de diferentes tecnologías de tratamiento utilizadas en Perú. (Fuente: Libhaber - 2015, 1).

Los estudios de Libhaber (2015-1) sobre las inversiones y costos de operación y mantenimiento en plantas de tratamiento de aguas residuales en Perú le han permitido elaborar un resumen de estos costos para las diferentes tecnologías utilizadas y que se presenta en el cuadro 35. La última columna muestra en orden ascendente los costos anuales por habitante desde US\$ 0.20/habitante para operar el pre-tratamiento (retención de sólidos gruesos y arenas) hasta los lodos activados que fluctúan entre US\$ 4.00 y 20.00/habitante.

Costo del tratamiento

Con mucha frecuencia se asume que el costo del tratamiento equivale a los costos de operación y mantenimiento referentes a los gastos directos de personal, materiales e insumos, energía para equipos, agua y electricidad, servicios de mantenimiento de equipos y de áreas verdes. Sin embargo el costo de tratamiento también debe incluir los gastos indirectos por pago de la deuda e interés del crédito que ampara a inversión y el capital de trabajo. Ya que por lo general el financiamiento es asumido por los gobiernos nacionales, regionales y locales, los operarios del sistema no incluyen estos costos indirectos, pero se pueden abordar como costo de depreciación de la infraestructura durante la vida útil del sistema, en el entendido que al vencer esa vida útil se debe invertir en implementar una nueva planta.

Si retomamos el cuadro 32 y la figura 31, podemos observar por ejemplo que el costo de tratamiento de la PTAR de lodos activados se eleva de US\$ 0.57 a 0.69/m³ cuando se incluye el costo de depreciación (de la franja celeste a la franja morada), por tanto realmente el costo de tratamiento es US\$ 0.69/m³.

Un caso interesante de analizar es la PTAR de lagunas aireadas de Huáscar/Parque 26, que aun cuando sus costos de O&M son de apenas US\$ 0.12/m³, el costo de depreciación representa 4 veces el operativo, elevando finalmente el costo de tratamiento a US\$ 0.59/m³. Esta situación permite decir que los proyectos con una inversión muy elevada, generan finalmente un costo de tratamiento alto. Por el contrario vemos el caso de las lagunas de Pucusana, donde el costo de depreciación es de US\$ 0.09/m³ y por tanto eleva el costo de tratamiento solo a US\$ 0.22/m³, ya que la inversión fue relativamente baja en comparación con las otras tecnologías.

7.4. Criterios para el dimensionamiento de las PTAR para alcanzar la calidad requerida

Tradicionalmente el diseño de las plantas de tratamiento ha respondido a la necesidad de sanear todas las aguas residuales que genera una ciudad, con una proyección del incremento del caudal que tendrá en los próximos 20 años en función al crecimiento poblacional esperado. Este enfoque sigue siendo válido, pero debe ser adaptado a la posibilidad de reusar estas aguas, lo que implica conocer previamente las exigencias de esta actividad. En ese sentido, debemos pasar de un enfoque lineal, de recolectar, tratar y disponer, al enfoque de cerrar el ciclo del manejo integrado de los recursos hídricos en la cuenca.

Es así que necesitamos saber la cantidad y calidad actual y proyectada del agua residual que debe ser tratada (crudo) y la calidad que debe alcanzar con el tratamiento, en función a la disposición final o el uso que se propone. Esta diferencia entre las condiciones iniciales y finales (luego del tratamiento) determinarán las características y el dimensionamiento del sistema de tratamiento elegido. Cuando se proyecta la disposición final en un cuerpo receptor, el tratamiento debe permitir que toda el agua alcance la calidad establecida por la normatividad para dicha disposición, mientras que cuando se busca reusar, es posible que el tratamiento se divida en etapas que van logrando diferentes niveles de calidad, en función a las exigencias de cada tipo de uso posterior.

Dimensionamiento para remoción de carga orgánica

Otro concepto tradicional es dimensionar el sistema en función al caudal actual y proyectado de las aguas residuales, sin embargo el concepto fundamental es la carga orgánica y patógena que tenga el crudo. Trabajar solo con el caudal puede llevar a errores muy graves, como ocurrió con las tres plantas del Proyecto Mesías al Sur de Lima, que fueron dimensionadas para tratar 2.67 m³/s y actualmente solo ha podido llegar a 1.47 m³/s, que representa solo el 55% de lo esperado. El problema fue que se dimensionaron para manejar los 2.67 m³/s de un crudo con se asumía tenía una concentración de DBO de 250 mg/l, pero cuando las plantas iniciaron su

operación, el crudo tenía más de 500 mg/l, lo que obligó a reducir a casi la mitad los caudales que se esperaba tratar. Esta lección nos enseña que lo más importante es calcular la carga orgánica contenida realmente en el caudal que se debe tratar, lo que implica una medición frecuente y en un periodo de tiempo confiable.

Algunos técnicos podrían pensar que cuando se va a utilizar los efluentes en la agricultura, ya no es necesario conocer las cargas orgánicas, pues finalmente el objetivo no es removerla, sino utilizarla para fertilizar. Aun cuando es cierto que no buscamos remover la materia orgánica, el sistema de tratamiento tiene una capacidad para recibir esta materia orgánica, que si se supera el límite provoca serios problemas de eficiencia y funcionamiento. Si usamos el mismo ejemplo anterior de Sullana, veremos en el cuadro 20 que ese Proyecto dispondría de un caudal de crudo de 200 l/s que contiene un DBO5 de 250 mg/l, por tanto se puede calcular la carga orgánica que se deberá tratar:

$$\text{Carga orgánica} = 200 \text{ l/s} \times 250 \text{ mg/l} = 50,000 \text{ mg/s} = 4,320 \text{ kg DBO/día}$$

Es la carga orgánica que deberá ser tratada diariamente en el sistema elegido, por lo que a continuación será necesario conocer la capacidad de este sistema, que a su vez dependerá de la temperatura con que trabaje durante todo el año. Se entiende que el sistema debe funcionar bien en todo momento, por tanto necesitamos estimar la capacidad de carga para el momento más desfavorable, y por eso se ha convenido en utilizar la temperatura promedio mensual del agua del mes más frío del año, que en el ejemplo de Sullana sería de 15°C. Cada proceso tiene una capacidad diferente, e incluso los procesos como las lagunas anaeróbicas pueden tener problemas cuando la carga orgánica es menor al mínimo requerido para su buen funcionamiento.

En el caso de lagunas facultativas primarias, se debe calcular la capacidad de carga superficial (CS), expresada en kg DBO/ha.día. Esta capacidad ha sido estimada por diferentes investigadores y en especial por los trabajos realizados por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) en las Lagunas de Estabilización de San Juan de Miraflores en Lima. Trabajando con diferentes cargas orgánicas entre 0 y 1,200 kg DBO/ha, se evaluó el contenido de amonio (NH4) en el afluente (ingreso) y en el efluente (salida) de las lagunas experimentales, en el entendido que el proceso aeróbico de descomposición

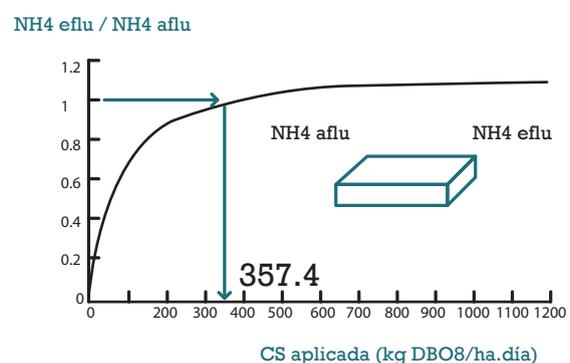


Figura 37. Carga superficial en lagunas facultativas (Fuente: Yáñez - 1980).

de la materia orgánica provoca una reducción del amonio contenido en el agua residual cruda, por tanto si la relación del amonio entre el efluente y el afluente es menor a 1 significa que el proceso es positivo. Cuando esta relación se torna mayor a 1, ya el proceso aeróbico está siendo afectado y termina por convertirse en anaeróbico. Como se aprecia en la figura 37, se pudo definir que a 20°C, esta relación llegaba a 1 cuando la carga superficial era de 357.4 kg DBO/ha.día. Significa que con cargas menores trabaja bien el proceso aeróbico, mientras que con cargas superiores tiende a volverse anaeróbico. Por supuesto que esto sucede con 20°C, por tanto si la temperatura del agua es menor, la capacidad disminuye y si llegan los meses más calurosos, las lagunas facultativas alcanzan una mayor capacidad.

Es por eso que CEPIS estableció la siguiente ecuación para calcular la máxima capacidad de carga de las lagunas facultativas:

$$CS_{\max} = 357,4 \times 1,085^{(T-20)}$$

Vemos que la ecuación establecida por Yáñez (1980) considera el valor límite establecido, que multiplicado por un coeficiente que varía con la temperatura, permite establecer la máxima capacidad de carga de una laguna. Sin embargo utilizar esta máxima capacidad para dimensionar las lagunas nos lleva a la posibilidad de superarla con una ligera variación de temperatura, por lo que es mejor utilizar una carga menor que brinde una holgura para no sobrecargar el sistema con una eventualidad. Es así que Sáenz en 1987 propone la siguiente ecuación:

$$CS_{\max} = 250 \times 1,0443^{(T-20)}$$

De hecho esta ecuación de Sáenz contempla los mismos parámetros que la de Yáñez, pero reduce la carga a 250 kg DBO/ha.día para evitar que alguna sobrecarga llegue al límite y luego afecte la eficiencia de la operación de la laguna. Hay técnicos que cuestionan a Sáenz por haber reducido la carga de 357 a 250 kg/ha.día, ya que se pierde un 30% de la capacidad, por tanto podría utilizarse un valor más cercano al límite.

En el caso de los procesos anaeróbicos, se debe utilizar la capacidad de carga volumétrica. Según la Norma de Saneamiento 090, las lagunas anaerobias deben trabajar con cargas volumétricas entre 100 y 300 g DBO5/m³.día, dependiendo de la temperatura (MVC, 1997). Aun cuando no se aplica para estas lagunas la carga superficial, también la Norma menciona que esta carga superficial debe estar siempre por encima de 1,000 kg DBO/ha.día. Cuando hablábamos de la capacidad de carga superficial de las lagunas facultativas, quedo claro que no podían pasar del límite de los 357 kg DBO/ha.día porque entrarían a una situación de sobrecarga que limitaría la eficiencia de las bacterias aeróbicas. De otro lado ahora también nos dicen que las lagunas anaeróbicas no deben tener una carga superficial menor a

1,000 kg DBO/ha.día, porque de lo contrario el proceso anaeróbico se hace poco eficiente. En la figura 38 se puede ver que existe un rango entre 357 y 1,000 DBO kg/ha.día, que no es apropiado para ninguno de los dos procesos y que se le conoce como proceso anóxico, que debe ser evitado porque no es favorable para las bacterias aeróbicas y anaeróbicas responsables de descomponer la materia orgánica. Eso significa que las lagunas facultativas deben evitar las sobre cargas y que las anaerobias no deben ser sobredimensionadas o trabajar con poca carga, especialmente al inicio de la operación en que se dispone de menos caudal de crudo.

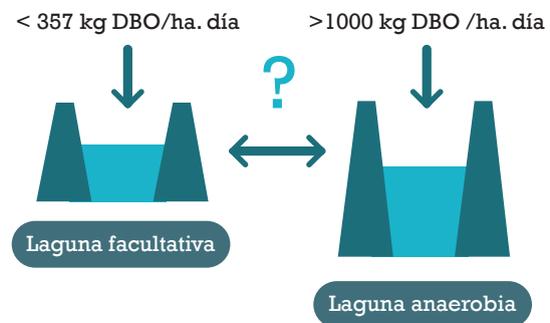


Figura 38. Rango de cargas del proceso anóxico

El cuadro 36 enumera las capacidades de carga orgánica para diversos procesos de tratamiento establecidas en la Norma de Saneamiento 090 (MVC, 1997). Como se puede apreciar en los filtros percoladores, Reactores Anaeróbicos de Flujo Ascendente (RAFA) y lodos activados se aplica la carga orgánica volumétrica, expresada en $\text{kg DBO/m}^3\text{.día}$. Solo en los casos de aplicación de aguas residuales sobre el terreno se utiliza la carga orgánica superficial en kg DBO/ha.día . El tiempo de retención en los diferentes tipos de lodos activados determina la capacidad de carga orgánica volumétrica que se puede aplicar.

Tipo de proceso	Periodo retención (h)	Carga volumétrica (kg DBO/m ³ .día)
Filtro percolador		
Baja carga		0.08-0.40
Alta carga		0.40-4.80
Reactor Anaerobio Flujo Ascendente		
Aguas residuales domésticas		0.75-1.00
Desechos orgánicos concentrados		7.50-10.00
Lodos activados		
Convencional	4-8	0.30-0.60
Aireación escalonada	3-6	0.60-0.90
Alta carga	2-4	1.10-3.00
Aireación prolongada	16-48	0.20-0.30
Mezcla completa	3-5	0.80-2.00
Zanja de oxidación	20-36	0.20-0.30
Aplicación sobre el terreno		kg DBO/ha.día
Riego a tasa lenta		11.00-28.00
Infiltración rápida		10.00-60.00
Flujo superficial		Hasta 76

Cuadro 36. Capacidades de carga orgánica de diferentes procesos de tratamiento. (Fuente: MVC - 1997).

Dimensionamiento para remoción de patógenos

Como antes se ha mencionado, los diseños de las plantas de tratamiento tradicionalmente se han orientado exclusivamente a remover los sólidos y la materia orgánica existentes en el crudo. Son pocas las plantas existentes que han aplicado criterios y modelos para remover los gérmenes patógenos, que ya discutimos es la prioridad para proteger la salud pública, más aún si se quiere reusar los efluentes. Por tanto es elemental que el diseño de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas incorporen modelos que permitan predecir la calidad sanitaria de los efluentes. Para ello se deben manejar los siguientes factores:

- La concentración de coliformes termo tolerantes (fecales) en el crudo, en representación de los gérmenes patógenos.

- La calidad sanitaria esperada en el efluente, en función a los requerimientos para la disposición final o del tipo de reuso. La diferencia de calidad entre el afluente (crudo) y el efluente deseado, establecerá los niveles de remoción que se debe lograr en el tratamiento.
- La temperatura del agua en el mes más frío del año, que va a definir la velocidad de remoción de los organismos patógenos en la situación más desfavorable.
- La aplicación del modelo hidráulico de flujo disperso, que establece la eficiencia del reactor en el manejo del flujo de las aguas tratadas.
- El periodo de retención real, que difiere del teórico en función a la relación longitud/ancho, profundidad y ubicación de los dispositivos de ingreso y salida .
- Tasa de decaimiento de bacterias patógenas – K_b , en función a la temperatura, el periodo de retención real y otras condiciones del reactor.
- La sedimentación de parásitos, en función al tiempo de retención.

En las lagunas de estabilización facultativas y anaerobias se presenta un decaimiento de la concentración de bacterias patógenas (K_b) que se mide a través del decaimiento de los coliformes fecales. Esta razón de decaimiento es muy baja y por ello se necesitan períodos de retención muy grandes (de 5 a 30 o más días) para lograr efluentes de buena calidad microbiológica. Estos periodos dependerán de las características del agua residual, de la temperatura, de la radiación solar, y del uso que se dará a los efluentes.

Como se observa en la figura 39, existen tres modelos hidráulicos que explican en comportamiento del agua dentro de un reactor. Marais (1974) propuso un modelo para la remoción de bacterias patógenas en las lagunas de estabilización, basado en condiciones cinéticas de primer orden y suponiendo un comportamiento de mezcla completa, lo que implicaría que el agua que ingresa se dispersa instantánea y uniformemente por todo el reactor, situación que solo sería posible si el sistema trabajan

en forma intermitente o posee mezcladores artificiales. Pero una PTAR normalmente tiene un ingreso permanente de agua al reactor como una laguna, lo que determina que la masa de agua no se desplace uniformemente para llegar hasta el punto de salida, sino que parte de ella quede estancada por periodos largos y forme zonas muertas, mientras que otra parte genera cortocircuitos que reducen mucho el tiempo de estadía de esa porción de agua. Esta situación llamada flujo disperso varía en función de la forma de la laguna (relación longitud/ancho – L/A) y

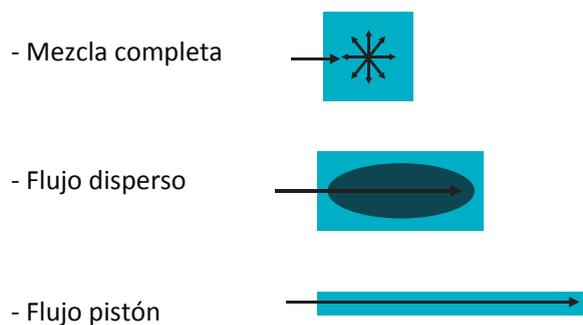


Figura 39. Tipos de modelos hidráulicos aplicados a las lagunas

la disposición y número de puntos de ingreso y salida del agua. La situación más eficiente sería si el reactor es tan alargado como un canal para que tienda a un flujo pistón, en donde el flujo de agua se mueva casi uniforme entre la entrada y la salida, pero esta condición no es factible alcanzar en la práctica por las difíciles exigencias constructivas y costos muy elevados.

Con ello queda claro que la inclusión de las características de dispersión (flujo disperso) en las ecuaciones para el diseño de lagunas de estabilización aseguran mejores resultados en la predicción de la calidad de los efluentes, ya que explican los fenómenos hidráulicos que ocurren en una laguna, como cortocircuitos y velocidad del flujo, en función a la forma de la laguna y de la ubicación y número de los dispositivos de entrada y salida del agua. Bajas relaciones de L/A en las lagunas, aumentan las zonas muertas y reducen el tiempo real de retención del agua.

El periodo de retención teórico es el tiempo (horas o días) que permanece el agua en el reactor y se calcula en base al caudal y el volumen neto. El problema es que este periodo no es real porque se acorta debido a las características de dispersión antes explicadas. Sin embargo, las lagunas alargadas y el uso de varios dispositivos de entrada y salida permiten que el flujo del agua sea más uniforme y por tanto el periodo de retención real se acerque más al teórico.

El modelo de flujo disperso ha sido utilizado para estimar los periodos de retención reales en la reducción de los niveles de coliformes termo tolerantes en las lagunas de estabilización de San Juan estudiadas por el CEPIS durante más de una década (Yáñez, 1986). Tomando en cuenta la temperatura promedio del agua, se establecieron las relaciones para las tasas de mortalidad neta de coliformes termo tolerantes (tasa de decaimiento) K_b para las diferentes lagunas facultativas en serie y que son las siguientes:

- Lagunas primarias: $k_b = 0.477 \times 1.18^{(T-20)}$
- Lagunas secundarias: $k_b = 0.904 \times 1.04^{(T-20)}$
- Lagunas terciarias: $k_b = 0.811 \times 1.09^{(T-20)}$

Estas ecuaciones demuestran que los mecanismos de remoción de bacterias patógenas son diferentes para cada nivel de tratamiento, debido a la variación de las condiciones ambientales, como las fluctuaciones de radiación solar, concentración de algas, pH, oxígeno disuelto, nutrientes disponibles y otros. Esto significa que las lagunas terciarias son más eficientes para remover coliformes termo tolerantes que las secundarias, y estas a su vez más que las primarias. Por ello muchas veces a las lagunas finales se les llama lagunas de acabado o pulimento. Los valores de caudal de ingreso, coliformes termo tolerantes y temperatura del agua han permitido estimar los valores esperados en el efluente de cada laguna. Estos datos se han comparado

con los observados en el programa de vigilancia de las lagunas, encontrándose un alto nivel de correlación entre ambos datos, lo que implica que este modelo es una eficiente herramienta para el diseño.

Si recordamos que el ejemplo de Sullana tiene un crudo con una concentración de coliformes termo tolerantes de $1.00E+8$ y la temperatura promedio del agua del mes más frío del año es de $25^{\circ}C$, el modelo CEPIS REUSO 2.1, que incorpora todas las variables y ecuaciones antes discutidas, ha permitido calcular las características de las lagunas requeridas para ofrecer diferentes calidades para el uso de grupos de cultivos escogidos y que se resumen en el cuadro 37.

Etapas	Primaria	Secundaria	Terciaria
Número de lagunas (u)	4	4	2
Profundidad media (m)	2.60	2.50	2.50
Relación L/A de las lagunas	2.0	3.0	3.0
Carga orgánica (Kg DBO/ha/día)	319.00		
Área de tratamiento (ha)	13.54	3.85	0.20
Ancho (m)	130	56	18
Longitud (m)	260	170	55
Efluente (l/s)	176.53	82.40	13.99
Periodo de Retención real (días)	10.3	6.4	2.3
Tasa de mortalidad de bacterias (1/día)	0.7658	0.8934	1.0950
Factor de dispersión	0.1738	0.0536	0.0196
Factor adimensional	2.5533	1.4976	1.0941
Colimetría fecal del efluente (NMP/100 ml)	$9.27E+05$	$8.58E+03$	$7.73E+02$

Cuadro 37. Características de las lagunas de estabilización diseñadas para el Proyecto Integrado de Sullana. (Fuente: elaboración propia).

Las cuatro lagunas primarias ocupan 13.54 ha para no exceder la carga orgánica superficial de 319 kg DBO/ha.día. Una relación L/A de 2 les permite alcanzar un periodo de retención real de 10.3 días, suficiente para remover los parásitos y para alcanzar una calidad de menos de $1.00E+6$ CTT/100 ml en los 87.44 l/s requerido para regar las 300 ha de Eucalipto, cacao y naranja. Solo los 82.40 l/s restantes continúan el tratamiento en cuatro lagunas secundarias que ocupan otras 3.85 ha para alcanzar menos de $1.0E+4$ CTT/100 ml, suficientes para los 68.23 l/s que serán utilizados para abastecer las 87.4 ha de arroz, frijol y tilapia. Por último, una tercera etapa de

tratamiento se realizará en 2 lagunas terciarias hasta alcanzar menos de 1.0E+3 CTT/100 ml, requeridos por los 11.06 l/s para regar las 20 ha de tomate y cebolla. Como se puede ver, el tratamiento se propone en tres etapas, a fin de alcanzar los diferentes niveles de calidad solo de los volúmenes de agua requeridos por cada grupo de los cultivos elegidos. Ello implica también establecer un costo de tratamiento diferenciado por niveles de calidad, permitiendo así reducir el costo total del tratamiento y de la producción.

7.5. Criterios para recuperar y ampliar la capacidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales

El inventario realizado por SUNASS (2015) indica que más de la mitad de las plantas de tratamiento tienen más de 20 años y tienen muchos problemas de diseño, operación y mantenimiento. A ello se suma que también algunas plantas nuevas muestran problemas. En general muchas plantas en el Perú están trabajando en forma deficiente por los siguientes problemas:

Problemas de diseño:

- Han sobrepasado la vida útil y han quedado subdimensionadas para los caudales que ahora reciben.
- Han sido ubicadas solo para verter los efluentes y no para reusar.
- Sólo tienen tratamiento primario, generando un efluente no apropiado para el vertimiento o reuso.
- El tratamiento secundario ha sido diseñado sólo para la remoción de sólidos y materia orgánica, pero no para remover patógenos.
- Sólo tienen una laguna o una batería, por tanto no pueden parar para realizar la remoción de los lodos acumulados.
- No cuentan con buenos sistemas de pre-tratamiento, medición y distribución de caudales.
- Tienen problemas conceptuales de diseño, como puntos de entradas no bien ubicados que provocan cortocircuitos o no tienen sistemas de drenaje total.
- Las lagunas fueron diseñadas con muy poca profundidad para facilitar la penetración de la luz solar que demandan las algas para la fotosíntesis, pero han limitado la capacidad y por tanto han exigido mayor área.
- Los canales y dispositivos no tienen capacidad para manejar los caudales máximos y menos excesos de agua por lluvias.



Foto 46. Entrada de agua al centro de la laguna

- No disponen de un entorno ecológico de protección y amortiguamiento. Muy pocas plantas en el Perú tienen áreas verdes circundantes, lo que favorece las invasiones de la franja de distanciamiento urbano estipulada por la legislación.

Problemas de operación:

- No realizan la medición de caudal a la entrada y salida de la planta.
- No se controla la distribución de caudales en las baterías.
- El pre-tratamiento es deficiente por acumulación de sólidos y sedimentos
- Trabajan sobrecargadas con un caudal por encima de la capacidad de diseño o porque han perdido capacidad por acumulación de lodos.
- Reciben cargas contaminantes que afectan el proceso biológico.
- No se realiza monitoreo de los parámetros que permitan un control del proceso y estimar las eficiencias.
- No tienen operadores que supervisen la operación de rutina.
- No tienen vigilancia que evite el robo o vandalismo.



Foto 47. Acumulación de sólidos en las rejillas

Problemas de mantenimiento:

- Están colmatadas de lodos, cubiertas de vegetación y/o las estructuras básicas están deterioradas.
- En algunos casos no están en operación y han sido abandonadas.
- No cuentan con presupuesto para mantenimiento.
- Se propone la clausura bajo la asunción de que la tecnología es deficiente y obsoleta.
- Se propone sustituir la planta existente por una nueva planta con tecnología "de punta" que funcione eficientemente.



Foto 48. Dispositivos deteriorados totalmente

Las plantas deben tener una **inspección periódica** para detectar necesidades de mantenimiento, recuperación, rehabilitación o ampliación. Esta inspección deberá evaluar los siguientes aspectos:

Información solicitada al operador:

- Datos de capacidades de diseño, especialmente de caudales y cargas.
- Información seriada de medición de caudales, por lo menos a la entrada y la salida de la planta.
- Información seriada de monitoreo de la calidad del agua, mínimo de la concentración de sólidos, DBO, coliformes termo tolerantes y parásitos humanos (helminchos y protozoarios), por lo menos a la entrada y la salida de la planta.
- Reportes anuales de eficiencia en remoción de los parámetros anteriores.
- Evaluación batimétrica de acumulación de lodos en las lagunas.
- Entrevista con los usuarios de los efluentes (si se reusa), para recibir opiniones sobre condiciones del abastecimiento, tipos de cultivos regados y supuestos problemas de calidad.

Inspección ocular:

- Estado de las estructuras de pre-tratamiento: sistema de rebose de excesos, cámara de rejillas, desarenadores, sistemas de recolección de sólidos y medidores de caudal.
- Estado de las estructuras de distribución de caudales, canales, dispositivos de entrada, interconexión y salida de agua de los reactores o lagunas.
- Acumulación de sedimentos en la entrada de los reactores o lagunas
- Acumulación de lodos en las lagunas
- Estado de cercos perimetrales e instalaciones de servicios: oficina, baño, depósito, laboratorio de campo, guardianía.
- Estado de los equipos en operación: cámaras de bombeo, transportadores de sólidos, aireadores, bombas de lodos, barre-lodos, digestores y quemadores de gas (si los tiene).
- Estado de los lechos de secado de lodos y almacenamiento de lodos secos (si los tiene)
- Estado de los bordes de los diques de las lagunas.
- Presencia de vegetación acuática y palustre, natas y emanación de gases en las lagunas.
- Coloración de las lagunas y del efluente.
- Aspecto del ambiente en puntos de vertimiento de los efluentes.
- Estado de los dispositivos de entrega de efluentes, canales de riego y tipo de cultivos regados.



Foto 49. Acumulación de sedimentos en la laguna

Esta inspección permitirá identificar los aspectos que se debe incluir en una propuesta para recuperar y ampliar la capacidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales, en base a las acciones siguientes:

Para la recuperación de la capacidad y eficiencia del sistema existente: que se puede conseguir solo corrigiendo algunas deficiencias de operación y mantenimiento, mediante las siguientes acciones:

- Actualizar el programa de operación y mantenimiento de la planta, para asegurar la ejecución de tareas deficientes en la inspección. Este programa debe incluir el cálculo de las capacidades y eficiencias que se pueden lograr. También debe establecer el requerimiento de operadores y la programación de las tareas para cada uno de ellos.
- Habilitar o instalar dispositivos que permitan una medición de caudal por lo menos a la entrada y salida de la planta, así como controlar la distribución de caudales en las baterías, todos de acuerdo a la capacidad de diseño.
- Rehabilitar las cámaras de rejillas y desarenadores, para evitar el ingreso de sólidos gruesos y sedimentos a los reactores o lagunas. La limpieza oportuna de estos sistemas debe ser asegurada con la programación de un operario.
- Mantener el caudal de diseño para evitar las sobrecargas de caudal, sólidos y materia orgánica. La habilitación de la caja de rebose (by pass) es importante para eliminar los excedentes, especialmente en momentos de lluvias.
- Realizar una inspección frecuente de los vertimientos de desagües industriales en la ciudad, a fin de detectar y evitar las descargas de sustancias químicas que afectan el proceso biológico del tratamiento y reducen la capacidad de la planta.
- Realizar un monitoreo de los parámetros para verificar que las eficiencias correspondan a las esperadas. Si estas son menores, identificar y corregir las causas al más breve plazo.
- Asegurar la labor de los operadores necesarios para realizar todas las tareas de operación y mantenimiento. Toda planta debe asegurar un operador permanente.
- Rehabilitar el cerco perimetral de la planta y asegurar un sistema de vigilancia, a fin de no permitir el ingreso de personas no autorizadas durante las 24 horas del día, con el propósito de evitar los robos o el vandalismo. Esto incluye la prohibición del manipuleo de los dispositivos de entrega de efluentes por los agricultores, a fin de evitar la acumulación de agua dentro de la planta, que pueda afectar la eficiencia del tratamiento.



Foto 50. Monitoreo de la calidad del agua

Para la rehabilitación y mejoramiento de la planta: tarea orientada principalmente a corregir problemas de diseño y reparar los deterioros generados por la antigüedad de la planta. Entre las acciones de rehabilitación y mejoramiento de pueden citar las siguientes:

- Elaborar un plan de limpieza de los lodos acumulados en los reactores o lagunas, que permita recuperar la capacidad de diseño en un tiempo razonablemente corto (1 a 3 años). En plantas que solo tienen una laguna o batería, se extraerá los lodos con dragas o equipos succionadores.
- Profundizar las lagunas que se diseñaron con muy poca profundidad para asegurar la penetración de la radiación solar. La experiencia ha mostrado que las lagunas o reservorios más profundos logran mejorar la calidad de los efluentes. Se puede aprovechar la programación de limpieza de lodos para efectuar luego la profundización de las lagunas.
- Instalar dispositivos de vaciado total de las lagunas, a fin de asegurar el secado y remoción de lodos secos. Muchas plantas antiguas no tienen estas estructuras, por lo que se debe aprovechar la ruptura del dique que se haga la primera vez que se drene la laguna para extraer los lodos acumulados.
- Cuando el sistema ha sido diseñado solo para la remoción de sólidos y materia orgánica y no para remover patógenos, se puede incorporar algunos procesos que mejoren la calidad sanitaria de los efluentes. Lo ideal sería añadir lagunas de pulimento o reservorios de estabilización, que permitan almacenar el agua para el riego.
- Cuando solo se tiene una laguna o una batería, se debería implementar otra unidad, para realizar luego la remoción de los lodos acumulados en la antigua, y posteriormente de ambas en forma alternada y cuando se requiera.
- Rehabilitar y modernizar las cámaras de rejillas y desarenadores que se encuentren deteriorados o con poca capacidad. Si fuese necesario, también se puede mecanizar la recolección y almacenamiento de los residuos gruesos.
- Rehabilitar o instalar un nuevo dispositivo de medición de caudal, ya que la mayoría de plantas han sido mal construidos. Actualmente existen equipos de medición rápida y permanente, con la ventaja que el registro constante permite observar las variaciones horarias de caudal y detectar los picos.
- Rehabilitar los sistemas de distribución del agua dentro de la planta, ampliando la capacidad de los canales que muestran derrames o limitaciones para entregar el caudal necesario a cada reactor o laguna. Instalar un dispositivo para una repartición eficiente de caudales a cada batería para evitar sobrecargas.
- Rehabilitar e instalar nuevos dispositivos de entrada y salida del agua en los reactores o lagunas, ubicados en puntos más distantes para propiciar un mayor tiempo de retención. Sustituir el único dispositivo en la mayoría de las lagunas por dos o tres paralelos para que el agua ingrese y salga por diferentes puntos para mejorar la hidráulica de la laguna.



Foto 51. Arqueta de desagüe total

- Rehabilitar o ampliar los lechos de secado de lodos, si son insuficientes, a fin de permitir un secado rápido y evitar problemas de olores y vectores.
- Antes de proponer la construcción de una nueva planta, se debe hacer el análisis de esta propuesta de rehabilitación, a fin de determinar la máxima capacidad que puede alcanzar esta planta antigua.
- Siempre es conveniente implementar un entorno ecológico (cortinas forestales) alrededor de la planta, para la protección (cerco vivo) y amortiguamiento de los impactos del viento en la hidráulica del sistema y el traslado de olores a la zona urbana. Además ofrece un ambiente más estético y agradable.

Para la ampliación de la capacidad de tratamiento con nuevas plantas: en la mayoría de los casos las plantas están trabajando sobrecargadas porque el caudal que reciben es superior al estimado en el diseño, como consecuencia de un crecimiento de la ciudad y la cobertura de alcantarillado. Por tanto es necesario realizar una ampliación de la capacidad de tratamiento, ya sea en la misma ubicación o en una nueva. Para ello serán necesarias las siguientes acciones:

- Evaluar los caudales y características de los desagües actuales y proyectados a 20 años de toda la ciudad o de la zona de cobertura definida. Esto debe llevar finalmente a calcular las cargas orgánica y patógena proyectadas que deberán ser tratadas.
- Evaluar la posibilidad de ampliar la capacidad de la planta existente, si es posible mantenerla en el lugar.
- Evaluar si es necesario cambiar de ubicación todo el sistema de tratamiento, debido a un problema de urbanización cercana al área de la planta antigua y de área disponible para hacer la ampliación.
- En el caso de que se mantenga la ubicación, se debe proyectar la ampliación teniendo en cuenta la capacidad actual y mejorada de la planta existente. Muchas ampliaciones ha ocasionado el abandono de la planta existente, aun cuando la nueva se ubica en el mismo lugar y la antigua puede seguir operando.
- En el caso de una nueva localización, se debe evaluar en ella la posibilidad de utilizar los efluentes para riego, antes de descargarlos en un cuerpo receptor.
- Una ampliación de la planta existente o la construcción de una nueva debe contemplar por lo menos un tratamiento secundario para garantizar un efluente apropiado para el vertimiento o reuso. Si las actividades de uso están bien definidas, solo se debe tratar hasta alcanzar la calidad exigida por estas.
- Se debe ampliar o construir la nueva planta con más de dos baterías, a fin de permitir la limpieza de lodos cuando se requiera, sin tener que parar todo o una parte importante del proceso. Lo ideal es construir de 4 a 5 baterías.
- Evaluar la posibilidad de incluir procesos anaeróbicos, como RAFA y lagunas anaeróbicas, a fin de tener mayor capacidad para remoción de DBO y así reducir el área de terreno necesario para toda la planta. Los sistemas anaeróbicos cubiertos permitirían concentrar el metano para usarlo como combustible.

- Instalar buenos sistemas de pre-tratamiento, medición y distribución de caudales. También instalar más de un dispositivo de entrada y salida en cada reactor o laguna, a fin de favorecer su eficiencia hidráulica. Igualmente se debe instalar dispositivos de vaciado total en cada reactor o laguna, para permitir el secado de los lodos antes de su remoción.
- Diseñar las lagunas con la profundidad adecuada, que en las anaerobias puede ser mayor a 5 metros y en las facultativas hasta 3 metros. Las lagunas primarias puede tener más profundidad o una franja más profunda que el resto del fondo, con el propósito de facilitar el almacenamiento de sedimentos y lodos del crudo y alargar así la frecuencia de limpieza.
- En los sistemas que no tengan capacidad para lograr una remoción natural de patógenos, se debe implementar procesos de desinfección eficientes. Si bien la cloración es el más frecuente, tiene ciertas limitaciones para su uso con aguas residuales, por tanto la radiación ultravioleta (UV) sería más apropiada, siempre que los efluentes tengan poca turbidez.
- Diseñar un moderno sistema de manejo de lodos, incluyendo digestores para obtener un producto final más seco (menos volumen) y con posibilidades de utilizarse en la agricultura.
- Implementar un entorno ecológico de protección y amortiguamiento en la franja de distanciamiento urbano alrededor de la planta.



Foto 52. Ampliación de la PTAR de Jaén
Foto 53. Cámara UV de la PTAR Yunguyo

Como reflexión final debemos considerar que la rehabilitación, mejoramiento y ampliación de sistemas de tratamiento de aguas residuales no significa necesariamente cambiar de tecnología, sino de ampliar la capacidad para responder la creciente demanda de la ciudad por este servicio, y que implica tratar un mayor volumen del agua generada por la población y alcanzar la exigencia de calidad para su disposición final o reuso. Por tanto se debe hacer el máximo esfuerzo por rehabilitar y mejorar la infraestructura existente, y proponer una nueva planta cuando la situación exija un cambio de localización o exista la oportunidad de un adecuado aprovechamiento. Siempre será mejor tratar para reusar que tratar para disponer en un cuerpo receptor.

7.6. Criterios para la evaluación de proyectos de tratamiento y uso de aguas residuales

La evaluación de proyectos de sistemas de tratamiento para disponer el agua residual en un cuerpo receptor es el proceso con mayor experiencia en el país, ya que tradicionalmente se ha diseñado con el enfoque lineal, y por tanto el objetivo ha sido reducir el impacto ambiental sobre ese recurso. Cuando hablamos del tratamiento para el reuso, tenemos que abordar el enfoque integrado al ciclo del agua en la cuenca. Oakley (2015) indica que este manejo integrado de las aguas residuales se sustenta en tres criterios claves:

- El uso de sistemas naturales para el tratamiento.
- Procurar la producción de energía sostenible por los procesos.
- Valorar los efluentes y lodos para su aprovechamiento en la agricultura.

El uso de sistemas naturales para el tratamiento

El uso de sistemas naturales para el tratamiento ha sido discutido ampliamente en el capítulo 7, cuando abordamos los criterios para el diseño del componente de tratamiento, y en donde se resalta que el objetivo del tratamiento debe tener como prioridad el reuso, y por tanto estar orientado a remover los elementos contaminantes, básicamente gérmenes patógenos, y no la materia orgánica y los nutrientes que pueden ser aprovechados por la agricultura. Igualmente al describirse los principales procesos de

tratamiento se han identificado las ventajas de los sistemas naturales, ligadas especialmente a la sostenibilidad. Por último hemos abordado los criterios para la elección de tecnologías de tratamiento compatibles con el reuso, análisis que también contribuye a esta evaluación.



Foto 54. Planta de lagunas de estabilización de Honduras

Entre los criterios que favorecen los sistemas naturales, se pueden rescatar los siguientes:

- Mayor capacidad de remoción de patógenos, especialmente en aquellos con largos periodos de retención como las lagunas.
- No requieren equipos y energía, por tanto su operación es más simple y sostenible.
- No demandan procesos sofisticados para el tratamiento y disposición de lodos, ya que se trata de un manejo eventual diferido a varios años.
- Muy bajo grado de dificultad en la operación y el mantenimiento, lo que hace más factible brindar este servicio adecuadamente.
- El requerimiento de personal es menor que en los procesos tecnificados y demandan de menos calificación para los operarios
- Los requerimientos de terreno son mayores, pero en la mayoría de los casos es posible disponer del área requerida en zonas algo alejadas y que además permitan el desarrollo de una actividad de reuso.
- Los costos de inversión, operación y mantenimiento son sensiblemente más bajos, por tanto es más factible que los asuman las comunidades más pequeñas y con bajos niveles económicos.
- Permiten una mejor valorización de los efluentes y biosólidos, que se pueden aprovechar para la fertilización y producción de energía, temas que a continuación serán abordados.

La producción de energía sostenible por los procesos

McCarty y otros investigadores (2011) han evaluado las características energéticas de las aguas residuales. Reportan que la materia orgánica incorporada a estas aguas está conformada por 175 mg/l de partículas suspendidas y 145 mg/l de sustancias disueltas. Estos dos componentes pueden producir 1.23 kWh por cada metro cúbico de agua residual, si esta materia es descompuesta natural o artificialmente, por tanto un proceso anaeróbico podría liberar una buena parte de esa energía mediante la combustión del metano generado. En cambio una proceso de lodos activados convierte esa materia orgánica en lodos y no en energía, proceso que por el contrario tiene una demanda energética de 0.60 kWh/m³ de agua tratada. La figura 40 muestra que los procesos anaeróbicos generan más energía que la que utilizan, mientras que en los aeróbicos es al revés. Eso significa que podemos optar por un proceso que genere energía, en lugar de demandarlo, y de ese modo generar ingresos económicos en vez de gastos por energía.

También McCarty et.al. estimaron que en promedio las aguas residuales contienen 40 mg/l de nitrógeno total y 8 mg/l de fósforo total, nutrientes que en los fertilizantes comerciales requerirían para su procesamiento un equivalente a los 0.79 kWh ahorrados con los nutrientes contenidos de cada metro cúbico de agua residual. Como referencia se puede mencionar que el proceso Haber-Bosch consume 19 kWh de gas natural por cada kilogramo de nitrógeno producido.

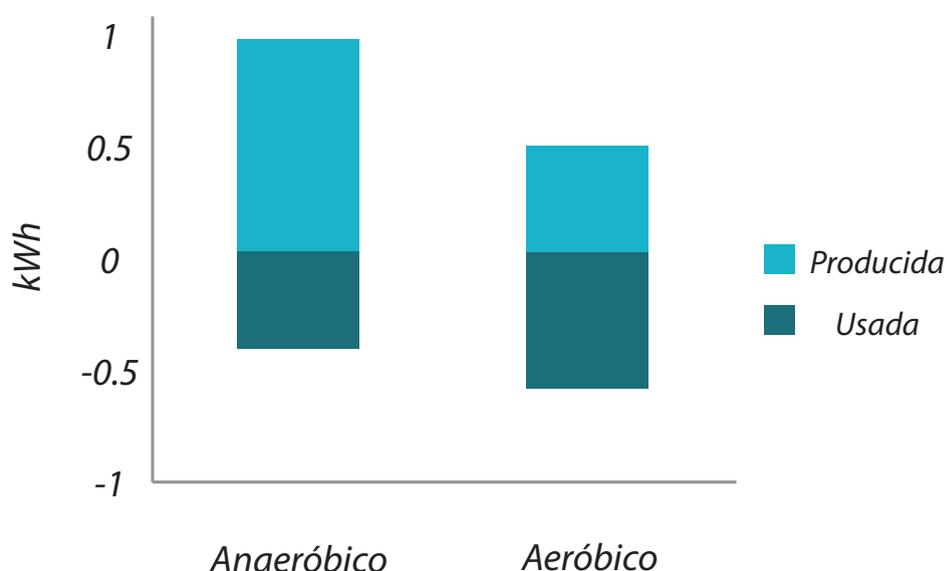


Figura 40. Energía producida y usada en los procesos anaeróbicos y aeróbicos. (Fuente: McCarty et.al. 2011).

La valoración de los efluentes y lodos para su aprovechamiento en la agricultura

Del mismo modo se puede valorar los efluentes y lodos para su aprovechamiento en la agricultura. Cuando hemos discutido el aprovechamiento de los nutrientes de las aguas residuales tratadas en el punto 5.4, dijimos que si bien los procesos de tratamiento remueven una parte importante de los nutrientes, en el caso de las lagunas de estabilización la biomasa de algas que se desarrolla vuelve a reincorporarlos a esa "nueva materia orgánica", generando al final un efluente con importantes concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio total, equivalentes a los fertilizantes comerciales que se aplican en la agricultura. En el caso de las lagunas de San Juan estos equivalentes serían los siguientes:

- Nitrógeno total: 0.0177 kg/m^3 , equivalente a 0.088 kg/m^3 de sulfato de amonio.
- Fósforo total: 0.0048 kg/m^3 , equivalente a 0.063 kg/m^3 de superfosfato.
- Potasio total: 0.0023 kg/m^3 , equivalente a 0.045 kg/m^3 de cloruro de potasio.

Considerando los precios promedios para el país de los fertilizantes comerciales más utilizados para aportar nitrógeno, fósforo y potasio, es posible estimar el valor equivalente de los "fertilizantes naturales" contenidos en el agua residual tratada en lagunas:

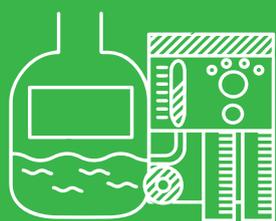
- Sulfato de amonio: S/. 0.15/m³ (US\$ 0.048/m³)
- Superfosfato de calcio: S/. 0.14/m³ (US\$ 0.045/m³)
- Cloruro de potasio: S/. 0.08/m³ (US\$ 0.026/m³)

Por último, cuando se habló del beneficio de integrar el reuso al tratamiento en el punto 5.9, también se presentó la cantidad que “fertilizantes naturales” contenidos en las aguas residuales domésticas del país. Para las aguas actualmente tratadas en un año se calculó que contienen casi 110,000 TM de los nutrientes identificados y que estarían valorizados en S/. 208 millones (US\$ 67 millones). Estas cifras se elevarían a 136,000 TM anuales si todas las aguas generadas actualmente fueran tratadas y reusadas, con un valor que alcanzaría a los S/. 258 millones (US\$ 83 millones). Finalmente, si las aguas que se generen en el 2030 fuesen tratadas y reusadas totalmente, estaríamos suministrando a la agricultura casi 180,000 TM anuales de nutrientes por un valor de S/. 340 millones anuales (US\$ 109 millones).





| 08



OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y REUSO

Este capítulo tiene muy pocas citas bibliográficas porque está básicamente sustentado en la experiencia lograda durante 30 años en el tema y las visitas realizadas a más de 450 plantas de tratamiento de aguas residuales y 80 áreas de reuso del país y América Latina. Es así que por lo general hemos detectado una limitada y/o deficiente operación y mantenimiento (O&M), aun cuando mayormente se trata de sistemas simples como las lagunas de estabilización. Sin embargo esta situación es poco reconocida por las autoridades locales y las poblaciones beneficiarias, que más bien manifiestan que “esa tecnología no funciona bien”, porque propician ambientes pantanosos con gran proliferación de vegetación acuática y palustre, y la acumulación de residuos sólidos en las lagunas, que finalmente generan olores desagradables y vectores como zancudos y roedores. Por tanto proponen el uso de tecnologías más modernas y eficientes. La evaluación deja en claro que los problemas antes enumerados son realmente causados por una deficiente operación y mantenimiento y no por limitaciones de la tecnología aplicada. Cualquier tecnología funciona mal si no recibe una operación y mantenimiento adecuados.

Los diagnósticos realizados por la SUNASS en 2008 y 2014 en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) administradas por las empresas prestadoras de servicios de saneamiento (EPS) reportan en los dos momentos de evaluación casi los mismos problemas, muchos de ellos generados por una limitada y deficiente operación y mantenimiento de las plantas evaluadas (SUNASS. 2015). En azul rescatamos los problemas atribuidos a la deficiente O&M:

- Algunas plantas sobrecargadas, ya que manejan caudales y/o cargas orgánicas mayores que el máximo permitido por el diseño.
- Errores de diseño en algunas plantas y errores constructivos en otras.
- En algunas plantas se cuenta con una sola unidad de cámara de rejillas, desarenador, lagunas, entre otras, lo cual dificulta poder realizar la limpieza de dichas unidades de tratamiento.
- Algunas plantas no cuentan con: (i) lechos de secado o instalaciones de manejo de lodo; (ii) dispositivo de medición de caudal; y (iii) cerco perimétrico.
- En algunas plantas no existe pre-tratamiento lo que resulta en arenamiento y exceso de lodos.
- Muchas plantas generan olores nocivos y sufren de presencia de maleza y macrófitas.
- La mayoría de las plantas sufre de falta de personal y/o falta de personal calificado.
- En la mayoría de las plantas faltan de recursos económicos para su operación y mantenimiento (O&M).
- Varias plantas sufren el rechazo y vandalismo por parte de la población.
- Hay mal uso de los terrenos aledaños de las plantas, ya que son usados como botaderos.

- En varios casos hay invasión de terrenos destinados a construcción de las plantas.
- En ciertos casos se seleccionó una inadecuada alternativa de tecnología de tratamiento, lo cual incrementa la tarifa.
- Por lo general falta de coordinación entre la EPS y los gobiernos local y regional.

También en el punto 7.5 de este documento hemos listado los principales problemas de operación y mantenimiento, identificados en las visitas de campo a numerosas plantas del país, y que son los siguientes:

Problemas de operación:

- No se realiza la medición de caudal a la entrada y salida de la planta.
- No se controla la distribución de caudales en las baterías.
- El pre-tratamiento es deficiente, generando acumulación de sólidos y sedimentos.
- Trabajan sobrecargadas, con caudales y cargas orgánicas por encima de la capacidad de diseño o porque han perdido capacidad por una acumulación excesiva de lodos.
- Reciben cargas contaminantes que afectan los procesos biológicos.
- No se realiza monitoreo de los parámetros básicos, que permitan un control del proceso y estimar las eficiencias del sistema.
- No tienen operadores que supervisen la operación de rutina.
- No tienen vigilancia que evite el robo o vandalismo.

Problemas de mantenimiento:

- Están colmatadas de lodos, cubiertas de vegetación y/o las estructuras básicas están deterioradas.
- En algunos casos las plantas no están en operación y han sido abandonadas.
- No cuentan con presupuesto suficiente para el mantenimiento.
- Se propone la clausura de la planta, bajo la asunción de que la tecnología es deficiente y obsoleta.
- Se propone sustituir la planta existente por una nueva planta con tecnología "de punta" que funcione eficientemente.

Es evidente por tanto que uno de los principales problemas de las plantas de tratamiento de aguas residuales es su deficiente operación y mantenimiento, sustentada en la falta de previsión de los recursos necesarios para asegurar que los procesos se mantengan durante su vida útil.

8.1. El Plan de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales

En principio todo sistema, operación unitaria y equipo cuenta con plan o manual de operación y mantenimiento, sin embargo la mayoría de las PTAR no los reportan. Es probable que si existieran en la puesta en marcha, pero luego por negligencia no se hayan mantenido vigentes y sobre todo disponibles para los operadores. Incluso se presentan casos inauditos, como la PTAR Yunguyo que tiene su Manual de operación y mantenimiento en inglés, como se puede observar en la foto 55. Son indicadores de la poca importancia que le se otorga a este instrumento.



Foto 55. Manual de O&M de la PTAR Yunguyo

Elaboración del Plan de operación y mantenimiento

Si bien esperamos que los contratistas que construyen las nuevas plantas que se están implementando en el país cumplan con entregar el Manual de Operaciones y Mantenimiento, también es necesario que la entidad operadora elabore su Plan de operación y mantenimiento de la planta, que a diferencia del documento anterior, ajusta los planes en el tiempo y a los recursos disponibles. En el caso de las plantas existentes que no cuenten con esta herramienta, es aún más importante elaborar un Plan de O&M actualizado, en base a la situación que al momento presenta el sistema y los recursos asignados y disponibles. Por tanto este Plan de O&M debe comprender los siguientes puntos:

- Diagrama del flujo de las operaciones del sistema.
- Capacidades y eficiencias esperadas en cada etapa del proceso.
- Programación de tareas de O&M y asignación de responsables.

- Identificación de puntos críticos de la O&M.
- Planes de seguridad y protocolo de supervisión de los riesgos.
- Presupuesto para O&M.

El diagrama de flujo de las operaciones del sistema debe listar las instalaciones, equipos y actividades de operación involucradas en cada etapa del proceso (figura 41). Al igual que los planos, una segunda versión del diagrama debe identificar las instalaciones sanitarias y eléctricas que todo el circuito del proceso, a fin de identificar rápidamente tuberías, válvulas, cajas eléctricas y puntos de conexión. Una tercera versión debe ubicar los puntos de control (sensores o medición) establecidos en el diseño.

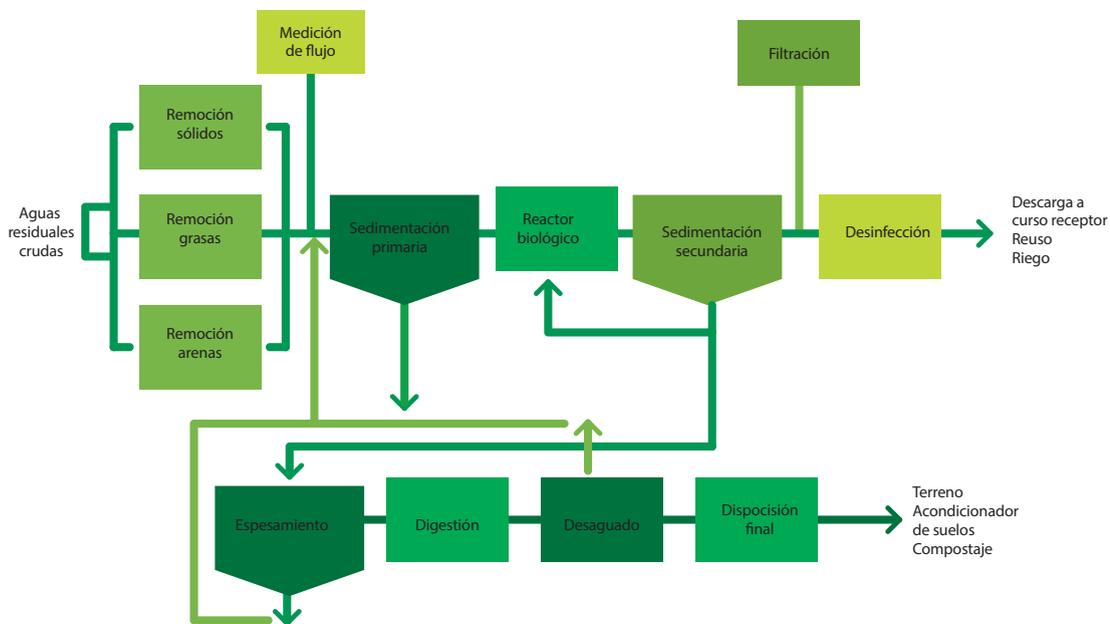


Figura 41. Diagrama de flujo de una PTAR de lodos activados.
(Fuente: IPES, 2008).

Usando también el diagrama de flujo como referencia (otra versión), se debe indicar las capacidades de diseño o actuales que se tienen para operar los caudales y cargas orgánicas. Igualmente se debe señalar los eficiencias que se esperan en la remoción de residuos gruesos, arenas, grasas, sólidos suspendidos, materia orgánica (DBO5) suspendida y soluble, coliformes termo tolerantes, helmintos y protozoarios parásitos humanos. Dependiendo del objetivo y la tecnología aplicada, también se puede incluir nitrógeno total y amoniacal y fósforo total entre otros.

La programación de las tareas de O&M se deben realizar en función a la frecuencia y horario exigido, pudiendo ser permanentes, horarias, diarias, semanales y eventuales. Igualmente se debe programar los operarios que asumirán la ejecución de la tarea, teniendo en cuenta los turnos y calificación de estos.

La supervisión debe estar dirigida en general a todas las operaciones del proceso, pero especialmente a los puntos críticos que cada uno de ellas, por tanto es importante identificar tales puntos y ubicarlos en otra versión del diagrama de flujo. Esta información podrá sustentar un plan de seguridad para la operación del sistema y los protocolos para la prevención, control y manejo de los riesgos.

Por último y no menos importante es calcular los costos de O&M de la planta, que implica gastos de personal, equipos, insumos, servicios básicos (agua y electricidad) y otros servicios especiales, como mantenimiento, reparación y reposición de equipos. Este presupuesto debe ser lo más detallado posible, por tanto debe identificar los gastos mensuales en cada operación del proceso cuando sea necesario. De hecho tiene gastos generales no asignados a una fase específica del proceso. Se espera que este análisis detallado permita establecer el presupuesto anual de O&M que deberá asegurarse antes del periodo ejecutorio, de lo contrario se tendrá que ajustar a los recursos disponibles para ese periodo.

Actividades de la operación

Existen muchas actividades que sustentan la operación de una PTAR y que pueden ser muy específicas para cada sistema y tecnología, por tanto esa relación de actividades tendrá que confeccionarse para cada caso. Sin embargo existen un grupo de actividades generales y comunes a la mayor parte de las PTAR, y en especial de las plantas de lagunas de estabilización, que son los sistemas más utilizados en el país. Por tanto a continuación abordaremos estas actividades comunes:

Control y supervisión diaria:

Las labores de supervisión deben estar a cargo preferentemente del ingeniero responsable cuando se trate de una planta mediana o grande, o del operador principal y labora permanentemente en la planta. Normalmente la primera hora debe ser dedicada para realizar la inspección de las siguientes estructuras y operaciones:

- **Inspección del crudo que ingresa a la planta:** a fin de identificar cambios en la coloración, turbidez o presencia excesiva de residuos, que podría exigir mayor atención en la limpieza de la cámara de rejillas.

Inspección de los caudales de distribución a los reactores o lagunas:

para verificar que el caudal total está siendo bien distribuido en todas las baterías o si hay alguna obstrucción por acumulación de residuos.

Estado del pre-tratamiento: cámara de rejillas, desarenador, medidor de caudal y rebose. Se debe verificar la buena operación del sistema, de la limpieza de residuos, si es manual, o de los equipos mecanizados. Es importante observar si hay huellas de rebose en las estructuras, que podrían indicar deficiencia oportuna de limpieza o algún tipo de obstrucción (foto 56). Merece especial atención verificar el funcionamiento del medidor de caudal y si se llevan los registros adecuadamente.



Foto 56. Supervisión diaria de la PTAR

Estado de canales y dispositivos de entrada y salida: se debe verificar que los flujos de los canales se desplazan adecuadamente, si no han tenido rebose en algún punto y si han acumulado demasiados sedimentos, para indicar la limpieza próxima. Es importante inspeccionar los dispositivos de entrada y salida de las lagunas o reactores, a fin de detectar cualquier obstrucción que deberá ser corregida rápidamente. Esta tarea es más fácil cuando la descarga es superficial.

Estado de los rectores o lagunas: una inspección a través de los diques centrales entre lagunas permite observar la situación de cada una, inspección que comprende la coloración, presencia de natas, vegetación flotante y enraizada en los taludes y afloramiento de burbujas de gas.

- Una coloración rosada en una laguna facultativa estaría indicando sobrecarga, por tanto se indicará una reducción o cierre del flujo.
- La presencia de burbujas de gas indica una descomposición anaerobia intensa de los lodos acumulados, que podrían indicar la necesidad de proceder a su remoción.
- La presencia de natas es permanente, pero no deben ocupar más del 5% de la superficie, de lo contrario debe indicarse su extracción urgente.
- La vegetación flotante o que prolifera en el borde de los diques debe ser inmediatamente extraída para evitar su acumulación, que luego dificulta e incrementa exponencialmente el esfuerzo laboral para extraerla.

Funcionamiento del sistema central automatizado y los equipos distribuidos en toda la planta:

- En las plantas con sistemas automatizados, la inspección diaria se iniciará por comprobar que el panel electrónico central de control del sistema esté operando adecuadamente, comprobando el encendido de luces en "on", pantallas del ordenador, programas, back up de registros y otros dispositivos que conformen este sistema central.
- Una inspección especial está dedicada a los equipos (limpiadores mecanizados de residuos, aireadores, bombas y otros), que se realizará en el recorrido de inspección a las todas las instalaciones, a fin de verificar su buen funcionamiento.
- Aquellos equipos de funcionamiento intermitente se deben activar para comprobar su operatividad y escuchar si muestran ruidos anormales que indiquen la necesidad de mantenimiento o reparación.

Supervisión de vertimientos a ambientes naturales: la inspección diaria debe concluir con observar los dispositivos de vertimiento de los efluentes de la planta.

- La coloración verdosa indica que el proceso está operando satisfactoriamente y el efluente estaría alcanzando la calidad deseada.
- La descarga al cuerpo receptor también debe ser observada para detectar posibles problemas de obstrucción o acumulación de sedimentos.
- Se debe verificar que el flujo del efluente se desplace libremente, ya que con frecuencia los usuarios represan los canales que puede generar un incremento del nivel de las lagunas y afectar la eficiencia del proceso.

Estado del sistema de seguridad: cerco y vigilancia. Una inspección con vehículo se debe hacer alrededor de la planta para verificar que el cerco perimetral esté en buenas condiciones. Se tratar de identificar puntos en donde personas de mal vivir hayan dañado y vulnerado el cerco. En caso se detecten daños, se debe proceder a una reparación inmediata. Por otro lado se debe supervisar el cumplimiento de los turnos de vigilancia, miente visitas imprevistas a diferentes horas del día y la noche.

Tareas de operación diaria:

De acuerdo al programa de operación, las tareas diarias son asignadas al operador de turno, y cuando laboran más de uno, se distribuirán estas tareas de acuerdo al sector asignado y la calificación del operario contratado. Las tareas operativas diarias más importantes son:

Medición y registro de caudales: cuando la medición es manual en una canaleta Parshall (foto 57), el operario debe medir el caudal en las horas establecidas por el Programa y por lo menos dos veces al día. Llevará un cuaderno para registrar los datos diarios. Las PTAR con caudalímetros instalados normalmente transmiten los registros permanentes a la central de control, de lo contrario se debe verificar que el registrador esté funcionando y tomar los datos.



Foto 57. Canaleta Parshall

Foto 58. Medición de parámetros de campo

- **Regulación de caudales en partidores:** en el supuesto de que la PTAR tenga varias baterías con la misma capacidad, se verificará que el dispositivo de distribución esté repartiéndole la misma cantidad de caudal para cada batería. Diariamente se debe realizar una limpieza de sedimentos en dicho dispositivo y regular sus compuertas para obtener esa distribución homogénea.

- **Medición de parámetros de campo (foto 58):** una PTAR debe tener siempre un laboratorio de campo, que permita por lo menos tomar diariamente algunos parámetros básicos como Temperatura, pH, oxígeno, dióxido de carbono, turbidez, amonio entre otros. Generalmente se utilizan equipos de campo previamente calibrados, que permiten tomar la información a la entrada, salida y algunos puntos del proceso. Mayor información facilita la evaluación de la eficiencia del sistema. En plantas automatizadas, pueden haber sensores de oxígeno y amonio entre otros, que transmiten automáticamente la información a la central de control y queda archivada en el programa de operación.

Actividades de mantenimiento

Tareas de mantenimiento diario:

Las tareas diarias de mantenimiento son algo tediosas y prolongadas, por lo que normalmente se asignan varios operarios si la PTAR es grande. Se trata de tareas simples, por tanto no requieren de operarios muy calificados, sino obreros en caso se realicen las tareas en forma manual. Las principales tareas diarias de mantenimiento son:

- **Limpieza de cámara de rejillas:** si se realiza en forma manual, es una actividad que requiere un trabajo muy frecuente durante el día, a fin de evitar la acumulación de residuos gruesos que retenga el flujo del crudo y provoque rebose del canal, tal como se puede apreciar en la foto 56. El comportamiento rutinario del flujo del crudo permite afinar con más detalle el intervalo de tiempo entre una y otra limpieza manual, pero que en general no debería exceder las dos horas. Esta frecuencia tan continua ha determinado que en algunas PTAR se instalen limpiadores mecánicos de las rejillas, que incluso pueden realizar el prensado y el traslado de los residuos retenidos a un contenedor (foto 59)



Foto 59. Limpiadores mecánicos de rejillas

Limpieza de desarenadores: normalmente un desarenador tiene dos celdas que se operan en forma alternada para realizar la limpieza (foto 60). Muchas veces la extracción de arena se realiza en forma manual mediante el uso de palas y luego se deposita en una fosa contigua. En otros casos la estructura tiene un sistema de lavado de arenas, que se descarga a un aliviadero contiguo. Esta operación debe realizarse una vez por día, a menos que la acumulación rutinaria de arena modifique esta frecuencia. Lo importante es que se evite la colmatación que puede derivar en un rebose inesperado, que finalmente afecte las estructuras.



Foto 60. Desarenador de dos celdas

Limpieza de natas y residuos flotantes: la sedimentación de materia orgánica provoca una acumulación paulatina de lodos, que sufren una descomposición anaerobia en el fondo de las lagunas y sedimentadores. Este proceso genera gases que ocasionan la re-suspensión de parte de estos lodos. Los operarios deben retirar diariamente dichos lodos flotantes llamados “natas”, para evitar que ocupen una porción importante de la superficie y limiten la penetración de la radiación solar. Por lo general estas natas son acumuladas por los vientos en una esquina de las lagunas en ciertas horas del día, momento en que es más fácil realizar la labor de extracción, por tanto esta tarea debe programarse para esas horas del día previamente identificadas. También es muy frecuente que ingresen residuos gruesos a las lagunas, debido a un descuido en las cámaras de rejas (foto 61), por tanto también deben ser retirados.



Foto 61. Natas y residuos en la laguna
Foto 62. Acumulación de vegetación

Remoción de vegetación acuática y en taludes: un problema muy frecuente en las PTAR es la acumulación excesiva de vegetación acuática en la superficie de las lagunas, llegando a ocupar un área importante de la superficie y por tanto limitando la penetración de la luz solar requerida para la fotosíntesis. Del mismo modo prolifera otra vegetación en los taludes de los diques, generando un ambiente propicio para la proliferación de zancudos. El problema se agrava porque los operadores no perciben el daño y cuando deciden realizar la recolección, esta tarea se torna muy tediosa y termina demandando mucho personal. Es por ello que se recomienda realizar una remoción diaria de la vegetación diariamente, apenas se observa su presencia. La extracción de plantas pequeñas afecta menos el deterioro de los taludes, que cuando sus raíces ya han crecido demasiado.

Tareas semanales:

Medición de parámetros de laboratorio:

SST, DBO, CTT y parásitos. Una de las mayores deficiencias en las PTAR existentes en el país es la poca o nula evaluación de los parámetros que justamente permiten conocer las eficiencias de remoción del sistema. Lo ideal es que el monitoreo de los parámetros básicos SST, DBO, CTT y parásitos se realice todas las semanas, aunque con frecuencia se hace una vez al mes. Son muestras tomadas en la entrada (crudo) y la salida (efluente), además de algunos puntos clave en el proceso, para identificar la causa de alguna falla en el tratamiento. Normalmente estos análisis son realizados por laboratorios acreditados que brindan este servicio a las plantas.



Foto 63. Toma de muestras para control del proceso

Evaluación de eficiencias e identificación de problemas: tanto la medición diaria de caudales y temperatura, como el monitoreo de los parámetros básicos antes citados constituyen la información necesaria para efectuar una evaluación permanente del manejo de las capacidades y eficiencias de la PTAR. Un programa, o por lo menos una hoja de cálculo, permite alimentar constantemente una matriz con todos los datos acumulados de dichos parámetros. Luego estos datos también pueden calcular en forma automática las cargas y eficiencias del sistema, que comparándolas con las capacidades y eficiencias esperadas, indican si la planta está operando adecuadamente. Generalmente se toma como referencia los datos del diseño, pero si se conoce que hay condiciones que no permiten esas metas, es posible tener valores ajustados a las condiciones actuales.

Las principales cargas y eficiencias que se deben estimar cada semana son:

- Carga hidráulica y periodos de retención en cada fase del proceso, en l/s y días de retención real.
- Carga orgánica, especialmente en los reactores que reciben el crudo, en kg/ha. día o Kg/ m³/día.
- Eficiencia de remoción de sólidos, en porcentaje.
- Eficiencia de remoción de DBO, en porcentaje.
- Eficiencia de remoción de coliformes termo tolerantes, en unidades logarítmicas.
- Eficiencia de remoción de helmintos (nemátodos) y protozoarios parásitos humanos, en unidades logarítmicas
- Cuando sea el caso, eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo, en porcentaje.

Estos datos de cargas y eficiencias pueden también acumularse en una matriz que permita graficar la evolución durante el año y contrastarla con los niveles máximos de carga y eficiencias esperadas. Las variaciones drásticas y las situaciones por encima de los límites de estas variables, permitirá identificar y corregir deficiencias de la operación.

Tareas eventuales:

Limpieza de canales: por lo general los canales acumulan pocos sedimentos porque el flujo los arrastra hasta las lagunas o reactores, por ello es una actividad que debe hacerse cada dos meses, y si la acumulación es muy baja, puede extenderse hasta una frecuencia semestral. Normalmente se trata de una actividad manual realizada con lampa y carretilla. En muchas PTAR la longitud de los canales principales y secundarios podría ser de varios cientos de metros, por tanto se debe programar la limpieza de un tramo cada semana. En otros casos se prefiere programar toda la limpieza cada semestre, incluso contratando el servicio de una retroexcavadora pequeña, debiendo en ese caso tener mucho cuidado de no dañar las paredes de concreto.

Manejo de lodos en sistemas aireados: las plantas con tecnologías como lodos activados generan permanentemente lodos que deben ser extraídos, procesados y dispuestos convenientemente. Por lo general estas PTAR cuentan con los equipos para extraer los lodos sedimentados y trasladarlos con bombas a un espesador, lecho de secado o un digestor.

- Es una tarea que debe ser realizada luego de verificar las alturas acumuladas en los reactores, que generalmente se realiza cada 15 días.
- Una programación permitirá manejar estos lodos en forma secuencial para las diferentes baterías, a fin de optimizar el uso de los equipos y las instalaciones como el lecho de secado.
- Estas tareas serán realizadas con personal calificado que conozca bien el funcionamiento de los equipos.



Foto 64. Lecho de secado de lodos

- Los lodos secados y/o digeridos deben ser almacenados en contenedores para su posterior traslado al lugar de disposición final.
- Los lodos contaminados deberán enviarse a un relleno de seguridad, mientras que los digeridos y depurados podrán ofertarse en la actividad agrícola como mejoradores de suelos o fertilizantes. Para ser considerados fertilizantes deben ser complementados con algunos nutrientes que estandarice su contenido

Batimetría de acumulación de lodos: si bien el manejo de lodos en las lagunas se realiza con una frecuencia de 2 a 8 años, dependiendo de las lagunas, la identificación de esas fechas dependerá finalmente de una evaluación de la acumulación de lodos en cada una de ellas.

- Es evidente que será más frecuente en las lagunas anaeróbicas y facultativas primarias, y más espaciado en las lagunas de pulimento.
- La batimetría es un método de medición de lodos en cuerpos de agua lentos (sin flujo) como lagunas y consiste en trazar una cuadrícula para recorrer con una embarcación varias rectas paralelas y tomar la medida cada trecho de 10 a 20 metros.
- Se utiliza varas largas de madera que se envuelven con un papel absorbente en el tramo final de 50 cm. Cuando la vara se introduce hasta el fondo y luego se extrae, muestra la marca de la profundidad del lodo.
- Los datos tomados en el cuadrante permiten luego elaborar un mapa con curvas de nivel de lodos, que finalmente permiten calcular el volumen total y por zonas acumulado. Ello permitirá también estimar los requerimientos de maquinaria que contratar para la extracción.

Remoción de lodos de lagunas: el caso de las lagunas de estabilización es totalmente diferente a los sistemas de producción continua de lodos, ya que el manejo de los lodos acumulados en el fondo de estas lagunas se difiere al momento en que tengan que ser removidos, que en lagunas anaeróbicas debe ser cada 2 ó 3 años, en las facultativas de 5 a 8 años y en las de pulimento cada 10 a más años. El tiempo para remover los lodos en cada tipo de lagunas dependerá de la velocidad de acumulación y debe ser evaluado con una batimetría previa.

- La forma convencional de remover los lodos de las lagunas de estabilización es realizar un secado por varios meses en la época de mayor calor y de estiaje (foto 65), para permitir la reducción de la humedad, que luego facilite la extracción mecánica con maquinaria excavadora de volúmenes menores.
- Una limpieza más frecuente acelera el secado porque las capas acumuladas son más delgadas.
- El gran problema que tiene una planta con solo una laguna o batería es que el secado de lodos implicaría paralizar la operación completa por un tiempo muy prolongado, por tanto la única opción es usar equipos de dragado o absorción de lodos líquidos que generan una operación muy costosa por el gran volumen que se maneja.
- Otro problema observado en muchas plantas es que las lagunas no fueron diseñadas para permitir el drenado total cuando se quiere secar y remover los lodos, por tanto se termina con la ruptura de un dique para lograrlo (foto 66). Toda laguna debe ser diseñada y construida con un dispositivo de vaciado total del volumen de agua.
- La instalación actual de geomembranas en el fondo y taludes dificulta la limpieza de lodos.



Foto 65. Secado de laguna para remover lodos

Foto 66. Ruptura del dique para secado

Evaluación de la calidad de los lodos por etapas: La normatividad indica que los lodos generados por las plantas son residuos peligrosos, por tanto debe ser dispuestos en rellenos de seguridad. Sin embargo estos lodos pueden sufrir un proceso de digestión que los depure de patógenos. Lo mismo pasa con los lodos acumulados en las lagunas secundarias o terciarias, ya que al haber tenido antes (laguna primaria) más de 10 días de retención, están libres de patógenos y pueden ser utilizados en la agricultura. Por tanto se debe realizar una evaluación de calidad de los lodos que permita definir si tiene agentes patógenos, a fin de decidir su destino final.

- **Mantenimiento de áreas verdes y cercos forestales:** todas las PTAR deben tener un entorno verde alrededor para proteger a la zona urbana (foto 67), evitando también la invasión de la franja de separación estipulada por la norma. En el entendido en que esta zona verde y forestal se habilitó desde la construcción de la planta, es necesario considerar su mantenimiento permanente. El riego con las aguas residuales asegura su fertilización. Las zonas con césped (gras) se deben mantener cada 15 días y las forestales debe podarse anualmente y retirar la hojarasca acumulada.



Foto 67. Franja forestal alrededor de la PTAR

- **Mantenimiento de equipos:** En el caso de las plantas con procesos naturales, prácticamente no existen equipos que deban ser mantenidos o reparados. Algunas plantas pueden tener una cámara de bombeo para elevar el nivel del agua. Las plantas mecanizadas si operan con un número importante de equipos que debe ser mantenido, y debe contar con un operario mecánico que realice las actividades de mantenimiento como lubricación y pintado entre otros. En muchos casos este mantenimiento puede ser contratado, en la medida que son actividades eventuales y especializadas. Un programa de mantenimiento debe ser elaborado para garantizar que cada equipo reciba ese servicio en el momento oportuno.

- **Mantenimiento de sistemas de agua y energía:** un mantenimiento eventual de todo el sistema de instalaciones de agua potable y desagüe deben ser mantenidas y reparadas en la medida que se presenten deterioros y desperfectos. Más importante aún es ofrecer un mantenimiento del sistema eléctrico, especialmente cuando proporciona la energía a los equipos que operan en la planta. Una opción es que la PTAR contrate el servicio de revisión y mantenimiento de agua y luz.

- **Reparación de servicios de agua y energía:** igualmente se puede contratar el servicio especializado de un proveedor para efectuar una reparación eventual de los servicios de agua y energía. Una buena política es reemplazar toda la red de cables y tableros externos a los 10 años que pueden haber sido deteriorados por el ambiente, evitando así cortocircuitos y daños en los equipos.

- **Reparación y reposición de equipos deteriorados:** normalmente el servicio de reparación de equipos es contratado por ser una actividad especializada. Igualmente se debe tener un programa de reposición de los equipos debe ser renovado cada 3 a 5 años, dependiendo del caso. En lo posible se debe reponer con equipos que tengas las mismas especificaciones.

Reparación de estructuras deterioradas:

si bien las estructuras de concreto tiene la ventaja de mantenerse en buen estado durante un largo periodo de tiempo, ciertas condiciones especiales y el uso intensivo de algunos dispositivos generan desgaste y fragilidad en algunas partes de las estructuras de las plantas, especialmente las utilizadas para partición, distribución y descarga del agua (foto 68). No se puede olvidar que las aguas residuales contienen una serie de compuestos corrosivos. Por eso se prefiere no usar elementos plásticos y no metálicos. En la medida que la supervisión identifique estructuras deterioradas, se deberá proceder a realizar la rehabilitación de las mismas.

Algunas instituciones programan en su plan de mantenimiento la reparación general de todas las estructuras deterioradas, por tanto contratan un servicio especializado para tal fin. Lo importante es que esas tareas no afecten la operatividad del sistema por periodos muy prolongados.



Foto 68. Estructuras deterioradas

Reparación de diques: la mayoría de lagunas de estabilización han sido construidas sin ninguna cobertura, por tanto al cabo de los años los taludes sufren una erosión por el viento y el oleaje del agua, que debe ser reparado. Se ha demostrado que el lodo acumulado en el fondo tiene un comportamiento similar a la arcilla cuando es secado, por tanto se recomienda aprovechar el momento de extracción de estos lodos para reparar los diques deteriorados. Un equipo buldócer de pala puede trasladar el lodo seco hacia los taludes internos de la lagunas, logrando al mismo tiempo el afirmado con las cadenas de la máquina.



Foto 69. Reparación de diques en lagunas

La foto 69 muestra este trabajo realizado en una laguna. Actualmente las lagunas están siendo revestidas con geomembrana, con la ventaja que esta cubierta protege los diques. Sin embargo esta cobertura también exige una reposición de las mantas cada 15 o 20 años.

Mantenimiento de cercos e instalaciones: la seguridad de la planta es un elemento importante para evitar robos, manipuleo de los dispositivos y vandalismo. Por tal razón es necesario realizar un mantenimiento anual de los cercos, especialmente cuando son metálicos, sustituyendo las franjas deterioradas por la corrosión. El pintado con un producto epóxico conserva mejor estos cercos. Las instalaciones en general (oficinas, depósitos, baños y laboratorio) también deben ser mantenidos permanentemente, especialmente los accesorios de uso intensivo, como chapas y bisagras de puertas, sanitarios y tomacorrientes.

Pintado general de las instalaciones: el Plan de operación y mantenimiento debe contemplar el pintado general de la planta cada 2 años, independientemente del pintado especial que demanden algunos equipos y dispositivos específicos para su mejor conservación. La planta, además de ser un sistema eficiente, debe tener un aspecto agradable, por tanto el pintado mejora mucho la estética, además de proteger las estructuras.



Foto 70. PTAR mantenida y pintada

Revisión de los planes de O&M y PSS: los Planes de Operación y Mantenimiento debe ser actualizados anualmente, a fin de corregir algunas deficiencias no previstas y añadir los imprevistos que terminan siendo de rutina.

- Es muy frecuente que con el tiempo se añadan nuevos equipos y estructuras, que obviamente también demandan una operación específica y mantenimiento. Por el contrario también habrán algunos equipos y estructuras obsoletas que serán paralizadas. Todos estos cambios demanda una actualización anual del Plan de O&M.
- Por otro lado los Planes de Seguridad en Saneamiento (PSS), que establece las medidas de control de riesgos también debe ser actualizado cada 2 años en forma rutinaria y cada vez que se realicen cambios importantes en los procesos o se tenga un evento especial.

Revisión de los presupuestos para O&M y PSS: la actualización oportuna del Plan de O&M también permitirá revisar, ajustar y/o ampliar el presupuesto anual de operación y mantenimiento, a fin de garantizar los recursos en el momento oportuno.

- Se debe tener presente que los precios y costos varían con el tiempo, por tanto la actualización anual es importante.
- Si bien se incluye un rubro de imprevistos, es conveniente que algunos gastos asumidos como imprevistos, pasen a los rubros definidos cuando se tornan rutinarios. Esto reducirá la vulnerabilidad del presupuesto anual.
- Un cambio de equipos o mecanización de algunos procesos deben ser incluidos en el presupuesto de O&M.
- Normalmente el presupuesto para los PSS están incluidos en el de O&M, sin embargo eso no implica que también deba ser actualizado cada vez que se haga lo propio con ese instrumento.

El presupuesto actualizado con anticipación debe ser la herramienta clave para asegurar la buena operación y mantenimiento de las PTAR, exigencia fundamental para garantizar la buena calidad de los efluentes.

8.2. El manejo de caudales excesivos en una planta de tratamiento de aguas residuales

Toda ciudad debería tener un sistema de alcantarillado de aguas residuales separado del sistema de drenaje, pero desafortunadamente no ocurre así en las ciudades del país, por tanto el sistema de alcantarillado municipal termina recibiendo una parte importante de las aguas de drenaje recolectadas en cada evento de precipitación que se presenta, determinando incrementos fuertes e intempestivos de los caudales que llegan a las PTAR. Estas variaciones de caudal pueden ocasionar serios problemas en los procesos de tratamiento, dependiendo del tipo de sistema:

- Las plantas compactas como filtros percoladores, RAFAS y lodos activados solo garantizan una buena operación cuando los caudales se mantienen igual todo el tiempo, de lo contrario se genera un desequilibrio de lodos activos y en el peor de los casos terminan siendo arrastrados fuera del reactor. Poner nuevamente en operación el sistema puede demandar varias semanas, tiempo en que el agua residual no recibiría ningún tratamiento. Por ello se recomienda instalar un dispositivo que solo permita el ingreso del caudal establecido y elimina los excesos.

- Las plantas de largos periodos de retención, como las lagunas de estabilización, tienen capacidad para recibir caudales mayores, debido a los grandes volúmenes que manejan, por tanto tienen la ventaja de asumir las variaciones de caudal generado por un evento esporádico de lluvias. Sin embargo, cuando este incremento de caudal se torna considerablemente mayor que el habitual y en forma sostenida durante todo el periodo de lluvias, el proceso de tratamiento puede sufrir un deterioro significativo, toda vez que trabajaría con sobrecarga hidráulica que acortaría los periodos de retención requeridos para alcanzar la calidad deseada en el efluente. En tal sentido, también se debe manejar convenientemente los excesos de agua que ingresa a la planta, mediante una caja de regulación de caudal con rebose (aliviadero). El exceso de agua retirado por el rebose deberá ser conducido por un caudal hasta una quebrada o el cuerpo receptor más cercano.

En suma, los excedentes de agua generados por el drenaje pluvial no deben ser incorporados a la planta para evitar un deterioro del proceso y que finalmente no permita el tratamiento esperado de las aguas residuales, incluso en algunos casos por varias semanas. Por tanto toda PTAR debe tener un aliviadero o caja de rebose que permita derivar el exceso a un cuerpo de agua cercano. La discusión actual de los organismos de vigilancia de la calidad de los ambientes acuáticos naturales es que esas descargas de excedentes van mezcladas con aguas residuales sin tratar y pueden generar impactos ambientales y de salud pública. Reconocemos



Foto 71. Canal de ingreso con aliviadero

que el riesgo se incrementa, pero comparativamente es menor que si la PTAR deja de tratar adecuadamente las aguas residuales por un periodo largo después del evento. Además se debe tener presente que las aguas de drenaje producen una dilución importante de los agentes contaminantes y patógeno del agua residual mezclada con esta y que esas descargas de excesos no son permanentes, sino solo cuando ocurre un evento mayor. Aquí nuevamente rescatamos la capacidad de las lagunas de estabilización de recibir mayores cargas hidráulicas, por tanto el manejo de los excedentes sería menor y más esporádico.

8.3. El Plan de manejo eficiente del agua residual tratada en el riego

Al igual que el sistema de tratamiento, el componente de reuso también debe ser manejado en forma organizada y responsable. Desafortunadamente en la mayoría de los casos se trata de un sistema informal manejado por muchas personas que muchas veces no tienen capacidad organizativa y conocimiento de los riesgos, beneficios y capacidades productivas del uso de las aguas residuales.



Foto 72. Empresa bananera con reuso

Diferente puede ser cuando el proyecto de reuso es concebido desde su formulación como una unidad organizada de producción comercial, y por tanto ha previsto los cultivos, el manejo cultural y la gestión orientados a lograr la máxima eficiencia y productividad que redunde en un negocio exitoso.

Aun cuando las circunstancias sean diferentes, en todos los casos se debe promover un plan de manejo eficiente y seguro del uso del agua residual tratada en el riego agrícola, forestal y de áreas verdes recreativas. El manejo eficiente pasa por adoptar los criterios siguientes:

- La elección de cultivos rentables y poco exigentes en calidad y cantidad de agua, tales como tunas, tara, olivo y algunos forrajes entre otros. La forestación es una alternativa que permite ampliar las áreas productivas con el mismo caudal de agua.
- El manejo apropiado del suelo, habilitar de preferencia tierras eriazas y ubicar los cultivos en diferentes lugares de la zona habilitada, de acuerdo a sus capacidades de uso mayor.
- El uso eficiente del agua residual, que implica la elección de cultivos de bajos requerimientos, el uso de métodos de riego tecnificados que incrementan la eficiencia y el almacenamiento de las aguas residuales para las épocas de escasez.

• El aprovechamiento racional de los nutrientes contenidos en las aguas residuales, de modo que remplacen al máximo la aplicación de fertilizantes químicos. Se ha podido comprobar que estos nutrientes se desperdician por excesos generados por riegos ineficientes, por tanto el uso de riegos tecnificados y localizados o la dilución de las aguas residuales deben permitir ofrecer solo la cantidad requerida, y dejar disponible el resto para nuevas áreas de cultivo.

En cambio, el manejo seguro implica abordar una serie de medidas para el control de riesgos implícitos en el uso de las aguas residuales. En el 4.2 se ha descrito con amplitud los criterios que deben gobernar el manejo sanitario y ambiental del uso de las aguas residuales y que se resumen en los siguientes:

• Identificar los principales agentes contaminantes como gérmenes patógenos y otros potencialmente presentes en las aguas residuales crudas utilizadas para el riego agrícola

• Establecer los grupos humanos expuestos. En muchos casos solo se considera el riesgo de las personas que consumen los productos potencialmente contaminados, pero es necesario tener en cuenta que hay otros grupos expuestos como los agricultores y las poblaciones urbanas aledañas.

• Identificar las rutas de transmisión de los agentes patógenos, que pueden ser primarias (a través de exposición por contacto directo) y/o secundarias (exposición a través de una ruta externa).

• Implementar las principales medidas para proteger la salud de los grupos expuestos, que pueden ser las siguientes:

- Tratamiento de las aguas residuales y los lodos.
- Restricción de cultivos y el uso de métodos de riego más seguros.
- Control de la exposición humana.
- Fomento de la higiene.

Las medidas que han recibido mayor atención para proteger la salud pública son el tratamiento de las aguas residuales y la restricción de los cultivos regados con estas. Es evidente que el tratamiento adecuado de las aguas residuales constituye la medida más importante, ya sea si se descarga a un cuerpo de agua receptor o se utiliza para el riego agrícola, forestal o de áreas verdes. Sin embargo es muy frecuente ver la implementación de plantas de tratamiento con tecnologías que por un lado no logran los niveles de calidad esperados, y peor aún, no pueden ser operadas y mantenidas adecuadamente por limitaciones económicas y de operarios con capacidad para manejarlas.

Los lodos generados en los procesos de tratamiento son considerados subproductos valiosos para la agricultura como fuentes de nutrientes y acondicionador de suelos, sin embargo también constituyen un riesgo porque con ellos también sedimentan altas concentraciones de patógenos,

especialmente parásitos. Por tanto lo ideal es que estos lodos reciban un tratamiento, de lo contrario deben ser confinados en rellenos de seguridad para residuos peligrosos. Sin embargo no siempre estas medidas son las más adecuadas, ya que por un lado los lodos acumulados en las etapas finales del tratamiento, como lagunas secundarias y terciarias, podrían estar libres de patógenos. La elaboración anaeróbica de abonos orgánicos y la digestión termófila permite una desactivación de los patógenos por las temperaturas superiores a los 50°C que alcanzan estos procesos (León y Moscoso, 1996).

La restricción de los cultivos es otra medida muy utilizada en las zonas que riegan con aguas residuales. Es cierto que se puede utilizar estas aguas para todo tipo de cultivos (riego irrestricto), si se logra alcanzar las calidades exigidas para no generar riesgos a la salud. Sin embargo efluentes con calidad más baja también podrían utilizarse en un riego restringido, ya que existen cultivos menos exigentes en calidad porque se consumen cocidos o procesados o simplemente no se consumen (OMS, 1989)

Los métodos de riego más utilizados en el país son por gravedad: inundación y surcos, que con llevan el riesgo de contaminar los productos por contacto directo del agua y por exceso la infiltración favorecer la contaminación del suelo y el acuífero. En los últimos años se ha comenzado a utilizar algunos riegos tecnificados, como aspersión, micro-aspersión y goteo. Los dos últimos constituyen los métodos de riego más seguros, ya que no favorecen el contacto con los productos y la infiltración es casi nula. La aspersión podría trasladar gérmenes patógenos en las pequeñas partículas de agua esparcidas por el viento. Sin embargo, cuando el tratamiento es adecuado y permite alcanzar la calidad recomendada, es posible utilizar cualquier método de riego sin riesgos.

El control de la exposición humana para evitar el contacto directo con los patógenos se puede lograr a través de las siguientes medidas preventivas:

- Prohibir el contacto directo con las aguas residuales, especialmente las crudas.
- Usar ropa protectora: botas, guantes y ropa de trabajo.
- Prácticas de higiene: ducha luego de la faena, lavado de manos antes de comer.
- Usar productos desinfectantes, especialmente en lavado de manos.
- Vacunación contra determinadas enfermedades locales.

En suma, es necesario aplicar una combinación de medidas de protección, además del tratamiento, para alcanzar los niveles de protección requeridos para los diferentes grupos expuestos. Por

ejemplo, la restricción de cultivos permitirá proteger a los consumidores, pero también se debe utilizar medidas para proteger a los agricultores, como el uso de botas para evitar el contacto directo con el agua. Incluso estas medidas pueden permitir que en ocasiones un tratamiento no muy exigente pueda ser suficiente.

Un control médico frecuente también permitirá identificar un eventual problema de salud en los trabajadores, y dotar de los recursos necesarios las postas médicas para ofrecer el tratamiento oportuno a los casos que se presenten con diarreas o parasitosis.

Al final queda claro que existen una serie de medidas que permiten manejar los riesgos asociados al uso de las aguas residuales y que el tratamiento es el más importante. Por tanto lo sí debemos de promover con mucha energía es la erradicación de los cultivos regados con aguas residuales crudas.

8.4. El Plan de control de calidad en los sistemas de tratamiento y uso de aguas residuales: criterios, parámetros y protocolos

En el punto anterior y el 4.2 se ha discutido ampliamente que el manejo seguro implica abordar una serie de medidas para el control de riesgos implícitos en el uso de las aguas residuales. Por tanto uno de los soportes importantes será el control de la calidad en los sistemas de tratamiento y uso de las aguas residuales.

Calidad en los sistemas de tratamiento

Es evidente que si el tratamiento de las aguas residuales permite alcanzar la calidad sanitaria requerida por el reuso, el control de calidad en este segundo componente (el reuso) sería menos requerido y exigente, en el entendido que los riesgos ya han sido minimizados desde la primera fase del tratamiento. En ese sentido el plan de control deberá estar orientado principalmente a la calidad del agua generada por sistema de tratamiento. Si aplicamos un “enfoque industrial” al proceso de tratamiento de las aguas residuales, el agua cruda representa la materia prima, el sistema de tratamiento sería el proceso de transformación, y el efluente sería el producto final. En ese sentido el Plan de control de calidad deberá vigilar las siguientes características y condiciones:

La materia prima: el crudo

- Es clave verificar el origen básicamente doméstico del crudo.
- Los vertimientos de las aguas residuales industriales al sistema de alcantarillado deben ser controlados, ya que pueden interferir en los procesos biológicos del tratamiento.

- La EPS debe realizar la vigilancia de vertimientos industriales.

- Los vertimientos orgánicos de la actividad agroindustrial y comercial deben estar identificados para estimar los aportes de cargas que agregan al sistema.

Proceso de transformación: el tratamiento

- Se debe vigilar el funcionamiento del sistema de tratamiento, mediante el control de cargas y eficiencias hasta la etapa final en que se genera sus efluentes.

- Un programa de control detallado para cada etapa del proceso podría ser poco factible de ejecutar por la baja capacidad analítica de los operadores y sus elevados costos

- Sin embargo hay parámetros básicos que si pueden darle seguimiento y con la mayor frecuencia posible. Por ejemplo es relativamente fácil verificar constantemente las cargas hidráulicas y orgánicas en base a la información de caudales, temperatura y concentración de DBO, permitiendo así detectar y explicar cualquier deterioro de la calidad.

- La información sobre el dimensionamiento y características de los procesos incluidos en el diseño permiten establecer con facilidad las capacidades y eficiencias esperadas, por tanto es fácil evaluar si se sobrecargan y reducen las eficiencias de remoción.

- El uso de un modelo de predicción de la calidad microbiológica de los efluentes es una herramienta valiosa para monitorear el sistema de tratamiento. El modelo CEPIS/OPS ha sido ampliamente validado, por tanto es confiable.

- El control de la carga hidráulica permite estimar los tiempos de retención real, información clave para esperar una buena remoción de parásitos cuando se logra pasar los 10 días, y para conocer la evolución de la mejora de la calidad microbiológica en las diferentes etapas del sistema.



Foto 73. Calidad del agua en el efluente

Producto final: el efluente

- El control de la calidad del efluente debe ser refrendada con las Guías de la OMS que establece límites para los diferentes tipos de reuso, básicamente representados por la concentración de coliformes termo tolerantes (fecales) y huevos de nemátodes.

- Si los efluentes alcanzan menos de 1,000 CTT/100 ml y menos de 1 huevo de nemátode por litro, se puede aceptar el riego irrestricto. Sin embargo la legislación peruana prohíbe el cultivo de tallo corto con aguas residuales.

- Si solo se alcanza menos de 1 huevo de nemátode por litro, se debe aplicar la restricción de cultivos: no cultivos de tallo alto y de consumo crudo, ni riego de parques y jardines de contacto primario.

- El Plan de control de la calidad del agua debe exigir la detección de parásitos humanos helmintos y protozoarios.

Calidad de los productos

A diferencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, las actividades de reuso ligadas a la agricultura, ganadería, acuicultura y el manejo de las áreas verdes urbanas normalmente no realizan un control de la calidad de los productos o servicios que brindan. Se trata la mayoría de actividades informales que no tienen capacidad propia para controlar la calidad, por tanto es una tarea que debe ser asumida por el Estado y los gobiernos locales.

Las primeras evaluaciones de calidad de los productos regados con aguas residuales en América Latina se realizaron en el Proyecto “Evaluación de riesgos para la salud por el uso de las aguas residuales en agricultura, desarrollado por CEPIS/OPS entre 1986 y 1990. (Esparza, 1990). En ese caso se adoptó los criterios de calidad recomendados por la Comisión Internacional de Especificaciones Microbiológicas para alimentos (CIEMA), basado en el criterio racional de aceptación o rechazo de los productos, que permite la identificación de riesgos al productor y consumidor y establece tres niveles de calidad:



Foto 74. Toma de muestras de hortalizas

- Aceptabilidad total, cuando en cada una de las 5 unidades de la muestra se tiene menos de 10 E. coli por gramo y se registra ausencia total de Salmonella.
- Aceptabilidad condicional, cuando en un máximo de dos de las cinco unidades de la muestra existe entre 10 y 1,000 E. coli por gramo y ausencia de Salmonella.
- Rechazable, cuando existe más de 1,000 E. coli por gramo en las cinco unidades de la muestra o se verifica presencia de Salmonella.

Adicionalmente las hortalizas deben indicar la ausencia de huevos de helmintos y quistes de protozoarios parásitos humanos en las cinco unidades de la muestra.

La incidencia de las enfermedades transmitidas por los alimentos está aumentando a nivel global y el comercio internacional de alimentos se ve perturbado por frecuentes conflictos acerca de los requisitos de inocuidad y calidad de los mismos. Por tanto se hace necesario revisar y reforzar muchos sistemas de control de los alimentos basados en el concepto moderno de evaluación del riesgo. Es por ello que la FAO y OMS desarrollaron en 2003 las Directrices para el Fortalecimiento

de los Sistemas Nacionales de Control de los Alimentos - Garantía de la Inocuidad y Calidad de los Alimentos, que ofrecen informaciones importantes sobre los principios y prácticas de control de los alimentos y la tendencia a sustituir un planteamiento meramente punitivo por un enfoque preventivo. Estas Directrices ofrecen información para que los organismos gubernamentales puedan ayudar a establecer sistemas nacionales de control de los alimentos y promover la colaboración eficaz entre todos los sectores que intervienen en la gestión y control de la inocuidad y calidad de los alimentos. (FAO y OMS. 2003).

Si bien los componentes y prioridades del sistema de control de los alimentos varían de un país a otro, en la mayor parte de los casos se encuentran los siguientes componentes:

- Legislación y reglamentos alimentarios.
- Gestión del control de los alimentos.
- Servicios de inspección.
- Servicios de laboratorio: seguimiento y datos epidemiológicos de los alimentos.
- Información, educación, comunicación y capacitación.

El Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA) adscrito al Ministerio de Agricultura y riego (MINAGRI) es el organismo público técnico especializado con autoridad oficial en materia de sanidad agraria, calidad de insumos, producción orgánica e inocuidad agroalimentaria. La vigilancia agroalimentaria es la observación y medición de parámetros de control agroalimentario, sistemático y continuo que realiza el SENASA a fin de prevenir, identificar y/o eliminar peligros y riesgos a lo largo de toda la cadena agropecuaria de alimentos destinados al consumo humano y piensos. Basado en el encargo establecido en la Ley de Inocuidad de los Alimentos, establece mecanismos tanto de vigilancia pasiva y activa:

- Vigilancia pasiva, basada en un sistema de recolección de la información sanitaria a partir de las notificaciones de enfermedades transmitidas por alimentos (por ejemplo, alertas sanitarias, nacionales o internacionales). También reúne la información que se pueda obtener para otras finalidades (por ejemplo, diagnóstico, certificaciones emitidas por terceros, otros).
- Vigilancia Activa, es cuando SENASA busca directamente la información específica objeto de la vigilancia, independientemente de que produzca la notificación o de los registros de las actividades controladas rutinariamente (ejemplo: monitoreos, control de las importaciones y exportaciones, inspecciones, auditorías, otros).

En la práctica esta vigilancia es bastante pasiva, por lo que los exportadores de productos agropecuarios acuden a servicios privados para la acreditación de la calidad de sus productos. Los parámetros y niveles de calidad normalmente son establecidos por los compradores y países importadores.

En el ámbito local, tradicionalmente ha sido el Ministerio de Salud que ha realizado un monitoreo esporádico y limitado de la calidad de los productos destinados al consumo humano, que evidentemente es la principal preocupación cuando se manejan riesgos ligados al uso de las aguas residuales. Actualmente el Estado ha encargado al Instituto Nacional de Salud (INS) a través del CENAN realizar el control de calidad solo de alimentos destinados a los programas sociales alimentarios. El CENAN realiza la supervisión de las plantas que elaboren alimentos para los programas alimentarios. Por tanto el control de la calidad de los productos alimenticios que se expenden en las ciudades debe ser asumido por los gobiernos locales, que en la mayoría de los casos no cuentan con un programa formal ni con los recursos necesarios.

La responsabilidad que ha asumido la Autoridad Nacional del Agua (ANA) para otorgar las autorizaciones de vertimientos y uso de las aguas residuales debería llevar a la necesidad de elaborar y ejecutar un Programa Nacional de Control de la Calidad de los productos regados con aguas residuales.

Respecto a la acuicultura, el Proyecto también realizado por CEPIS/OPS "Reuso en Acuicultura de las Aguas Residuales tratadas en las Lagunas de Estabilización de San Juan" aplicó criterios de calificación en los peces criados con efluentes de esa PTAR. Según la clasificación propuesta por Buras (1987), que considera como:

- Muy buenos: aquellos peces con menos de 10 bacterias totales viables (SPC) por gramo de músculo.
- Aceptables: peces con niveles de 10 a 50 bacterias totales viables (SPC) por gramo de músculo.
- Rechazados: peces con más de 50 bacterias totales viables (SPC) por gramo de músculo.

Los cultivos de tilapia del Nilo en estanques abastecidos con aguas residuales tratadas lograron una calificación de "muy buenos" para el 100% de los peces. Sólo en el tercer experimento se encontró un 6% de peces calificados como "rechazables", situación que fue motivada por un incremento deliberado del nivel de coliformes fecales que sobrepasó $10E+5$ CTT/100 ml en el efluente. Ello permitió establecer el límite de calidad del efluente que debe utilizarse en el cultivo de tilapia. Rebasado el límite, el sistema inmunológico de la tilapia se debilita y las bacterias ingresan al músculo. También se pudo observar la capacidad de autodepuración de estos peces, siempre que se reduzcan los coliformes al nivel recomendado durante un período mínimo de



Foto 75. Peces cosechados para el mercado

30 días. Esto significa que en el caso eventual de un “accidente” de sobrecarga del sistema de tratamiento, la calidad sanitaria de los peces afectados puede recuperarse (Moscoso y Flórez, 1991).

Actualmente el Servicio Nacional de Sanidad Pesquera (SANIPES) del Instituto Tecnológico de la Producción (ITP) es la entidad pública encargada de vigilar por la calidad de los productos pesqueros capturados o cultivados en el país. Es así que para el caso de las tilapias cultivadas con aguas residuales se aplica el

protocolo de calidad establecido en el Manual de Indicadores y criterios de seguridad alimentaria e higiene para alimentos y piensos de origen pesquero y acuícola aprobado el 2010, y que aplican para todos los productos hidrobiológicos crudos (frescos).

Calidad del suelo

Los impactos ambientales del uso de las aguas residuales en el riego agrícola estarían enfocados principalmente en los riesgos de contaminación del suelo y eventualmente del acuífero. Existen muy pocos trabajos que sustenten estos riesgos, pero un reciente estudio realizado por la Universidad Autónoma de México en los suelos del Valle de Mezquital (México) muestra resultados muy interesantes al respecto. Este tema se ha desarrollado con mayor amplitud en el punto 4.1 sobre los principales riesgos a la salud y el ambiente del uso de las aguas residuales (página 33).

Normalmente cuando hablamos del control de la calidad de los suelos pensamos solo en los aspectos ambientales, sin embargo también se debe incluir en este concepto de calidad el enfoque agronómico y sanitario, que implica en el primer caso la productividad del suelo para soportar una actividad agrícola eficiente, y en el sanitario, los riesgos a la salud que podrían tener ciertos elementos contaminantes acumulados en los suelos y transferidos a los cultivos agrícolas, especialmente metales pesados. Por tal razón en los programas de control de calidad de los suelos regados con aguas residuales o contaminadas conviene incluir los siguientes parámetros:

- Parámetros físico-químicos en el suelo: pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio y salinidad y metales pesados (As, Cd, Cr, Pb y Hg).
- Parámetros sanitarios en el suelo: coliformes termo tolerantes (fecales), y nemátodos y protozoos parásitos humanos.
- Parámetros químicos en el suelo: metales pesados (As, Cd, Cr, Pb y Hg).

Los resultados de los parámetros físico-químicos están vinculados principalmente a la fertilidad de los suelos, por tanto los valores pueden ser evaluados por los especialistas agrícolas que pueden deducir el nivel de fertilidad y ciertos problemas como la salinidad. Los resultados de los parámetros químicos pueden ser contrastados con valores establecidos por MINAM para las ECAS en suelos (DS 002-2013-MINAM). Estos ECA incluyen los estándares de 21 parámetros químicos para suelos agrícolas, residenciales (parques), y comerciales, industriales y extractivos.

Ejemplo: Programa de control de calidad en la zona agrícola de Lima Este

A manera de referencia se presenta el Programa de Control de Calidad de la zona agrícola de Lima Este, realizado en 2013 por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) del Ministerio de Salud, como parte de Proyecto Global "Uso seguro y productivo de aguas servidas en agricultura. Esta investigación se realizó para evaluar la calidad del agua, suelos, césped y hortalizas regados con las aguas del río y los reservorios existentes, así como de los peces cultivados en estos reservorios. El muestreo contempló los siguientes parámetros para los elementos mencionados:

- Elementos: agua de río y de reservorio, suelo de las zonas con césped y hortalizas, césped de las áreas verdes regadas, hortalizas regadas con agua de canal y de reservorio, y peces criados en los reservorios.
- Parámetros químicos en el agua: Sólidos suspendidos (SS), Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO5), N-total, P-fosfatos, salinidad y metales pesados (As, Cd, Cr, Pb y Hg).
- Parámetros sanitarios en el agua: coliformes termo tolerantes (fecales), nemátodos y protozoos parásitos humanos.
- Parámetros físico-químicos en el suelo: pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio y salinidad y metales pesados (As, Cd, Cr, Pb y Hg).
- Parámetros sanitarios en el suelo: coliformes termo tolerantes (fecales), y nemátodos y protozoos parásitos humanos.
- Parámetros químicos en el suelo: metales pesados (As, Cd, Cr, Pb y Hg).
- Parámetros sanitarios en el césped y hortalizas: coliformes termo tolerantes (fecales), y nemátodos y protozoos parásitos humanos.
- Parámetros sanitarios para peces: aeróbicos mesófilos, Echerichia coli, Salmonella spp, Staphylococcus aureus y parásitos humanos

El cuadro 38 indica el número de muestras de aguas, suelos y césped que fueron tomadas en las tres zonas de evaluación y en las tres fechas de muestreo. Adicionalmente se efectuaron dos muestreos para evaluar cinco tipos de hortalizas y los peces de dos reservorios.

Código	Laboratorio	Punto de muestreo	DIGESA						UNALM		Total
	Parámetro		SS	DBO	Metales	Hg	CF	Parasitos	Fert. Agua	Fert. Suelo	
	Lugar/componente										
NA	UPEU:										
NA-A1	Agua de canal	Garita 1 - puerta principal	1,000 ml	1,000 ml	1,000 ml	500 ml	1,000 ml	2,000 ml	500 ml		7
NA-A2	Agua de reservorio	Riego espalda Fam. Mmani	1,000 ml	1,000 ml	1,000 ml	500 ml	1,000 ml	2,000 ml	500 ml		7
NA-S1	Suelo regado con canal	Frontis colegio			500 g	500 g	500 g	500 g		1,000 g	5
NA-S2	Suelo regado con reservorio	Área verde espalda Fam. Mamani			500 g	500 g	500 g	500 g		1,000 g	5
NA-C1	Césped regado con canal	Frontis colegio					500 g	500 g			2
NA-C2	Césped regado con reservorio	Área verde espalda Fam. Mamani					500 g	500 g			2
	TOTAL UPEU		2	2	4	4	6	6	2	2	28
CA	Parcelas agrícolas de Carapongo:										
CA-A1	Agua de canal	Parcela Raymundo Yaulis	1,000 ml	1,000 ml	1,000 ml	500 ml	1,000 ml	2,000 ml	500 ml		7
CA-A2	Agua de reservorio	Reservorio Raymundo Yaulis	1,000 ml	1,000 ml	1,000 ml	500 ml	1,000 ml	2,000 ml	500 ml		7
CA-S1	Suelo regado con canal	Parcela vecino Yaulis			500 g	500 g	500 g	500 g		1,000 g	5
CA-S2	Suelo regado con reservorio	Parcela Raymundo Yaulis			500 g	500 g	500 g	500 g		1,000 g	5
	Total Carapongo		2	2	4	4	4	4	2	2	24
NI	Parcelas agrícolas de Nievería:										
NI-A1	Agua de canal	Parcela Sr. Serna	1,000 ml	1,000 ml	1,000 ml	500 ml	1,000 ml	2,000 ml	500 ml		7
NI-A2	Agua de reservorio	Reservorio Sr. Serna	1,000 ml	1,000 ml	1,000 ml	500 ml	1,000 ml	2,000 ml	500 ml		7
NI-S2	Suelo regado con reservorio	Parcela Sr. Serna			500 g	500 g	500 g	500 g		1,000 g	5
	Total Nievería		2	2	3	3	3	3	2	1	19

Cuadro 38. Plan de muestreo en la zona agrícola de Lima Este. (Fuente: OPS, 2014).

Los análisis de las muestras fueron realizadas en los laboratorios de DIGESA, de Suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina y del Instituto Tecnológico de la Producción (ITP), en donde se aplicaron los métodos estándares establecidos.

Calidad sanitaria y ambiental de las aguas

Los resultados de los análisis sanitarios de las aguas figuran en el cuadro 39, en donde se añaden los Estándares de Calidad Ambiental para Aguas Naturales (ECA) promulgados por el Ministerio del Ambiente mediante el Decreto Supremo 002-2008-MINAM.

Los ECA de Agua establecen que el agua utilizada para el riego de vegetales no debe tener más de 15 miligramos de DBO5 por litro, valor que está por debajo de los encontrados en las aguas de los reservorios de Carapongo y Nievería utilizadas en para el riego agrícola. Es entendible que estas aguas tengan niveles algo mayores de DBO por efectos de la eutrofización durante los días en que el agua es retenida y favorecida por los restos de alimento y heces de los peces cultivados.

Si bien consideramos que legalmente este valor de 15 mg/l debe ser acatado, técnicamente no sustentaría un riesgo para la salud y el ambiente, toda vez que la materia orgánica existente se utiliza como fuente de nutrientes para las plantas regadas. La única justificación para no usar mayores concentraciones de materia orgánica sería que se requiera filtrar cuando se use riego tecnificado, ya que podría obstruir las tuberías y dispositivos de entrega, pero en la zona evaluada todo el riego es por gravedad.

Código	Parámetro	Punto de muestreo	Muestreo	SS	DBO	Metales					Coliformes termo tolerantes	Protozoos					Helmintos			
						Cadmio	Cromo	Plomo	Arsenico	Mercurio		Blastocystis hominis	Endolimax nana	Entamoeba coli	Giardia lamblia	Iodamoeba butschlii	Ascaris lumbricoides	Hymenolepis nana	Strongyloides sp.	Uricinarias
	Unidad			mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	µg/L	NMP/100 mL	org./L.	org./L.	org./L.	org./L.	org./L.	org./L.	org./L.	org./L.	
NA	Universidad Peruana Unión de Ñaña:																			
NA-A1	Agua de canal	Garita 1 - puerta principal	M1	99	7.4	0.002	0.003	0.052	43.4	0.2	4.9E+05	5	8	20	15	0	3	0	1	0
			M2	15	5.1	<0.001	<0.002	0.009	17.3	0.1	3.3E+02	3	11	24	9	0	2	0	1	1
			M3	13	8.7	<0.001	<0.002	0.011	31.1	<0.1	1.3E+05	2	3	13	7	0	0	0	1	1
NA-A2	Agua de reservorio	Riego espaldada Fam. Mamani	M1	21	5.9	<0.001	<0.002	0.010	32.0	0.1	1.7E+03	0	0	4	0	0	0	0	0	0
			M2	18	6.2	<0.001	<0.002	0.009	21.6	0.1	1.3E+01	0	1	2	0	0	0	0	0	0
			M3	19	3.9	<0.001	<0.002	0.009	20.9	<0.1	1.3E+03	0	1	2	1	0	0	0	0	0
CA	Parcelas agrícolas de Carapongo:																			
CA-A1	Agua de canal	Parcela Raymundo Yaulis	M1	32	2	0.001	<0.002	0.023	32.5	<0.1	3.3E+04	5	8	9	2	0	0	0	1	1
			M2	51	7.5	<0.001	<0.002	0.009	25.7	<0.1	7.0E+05	3	6	11	3	0	0	0	0	1
			M3	36	3.0	0.002	<0.002	0.093	37.4	0.2	7.0E+04	2	3	6	5	0	0	0	0	1
CA-A2	Agua de reservorio	Reservorio Raymundo Yaulis	M1	48	14.6	<0.001	<0.002	0.009	22.3	<0.1	2.2E+02	0	3	0	0	0	0	0	1	0
			M2	150	20.8	<0.001	<0.002	0.034	48.0	<0.1	6.8E+00	5	5	10	0	0	0	0	0	0
			M3	25	16.0	<0.001	<0.002	0.010	26.2	<0.1	4.6E+01	3	0	9	0	0	0	0	0	0
NI	Parcelas agrícolas de Nievería:																			
NI-A1	Agua de canal	Parcela Sr. Serna	M1	18	11.8	<0.001	<0.002	0.012	24.9	<0.1	3.3E+05	9	15	30	11	0	1	1	2	1
			M2	33	13.8	<0.001	<0.002	0.010	25.5	<0.1	8.0E+05	2	8	20	7	0	1	0	0	2
NI-A2	Agua de reservorio	Reservorio Sr. Serna	M1	66	22.6	<0.001	<0.002	<0.009	30.2	<0.1	1.3E+03	3	0	9	0	0	0	0	0	0
			M2	49	20.0	<0.001	<0.002	0.009	26.6	<0.1	7.9E+01	1	0	3	0	0	0	0	0	0
			M3	56	17.4	<0.001	<0.002	0.009	22.1	<0.1	3.3E+04	0	0	4	0	0	0	0	0	0
Ecas de Calidad Ambiental para Agua (DS 002-2008-MINAM):																				
Categoría 3 - Riego de vegetales				15	0.005	0.100	0.050	50	1		0					<1				
		Tallo Alto								2.0E+03										
		Tallo bajo								1.0E+03										

Cuadro 39. Resultados de los análisis de calidad sanitaria y ambiental de las aguas en las zonas agrícolas de Lima Este. (Fuente: OPS, 2014).

Por otro lado, todos los valores para cadmio, cromo, plomo, arsénico y mercurio están por debajo de los establecidos por los ECA, a excepción del plomo en dos muestras de agua tomadas en los canales de riego de Ñaña y Carapongo, valores puntuales que al parecer se presentan eventualmente y que en todo caso podrían indicar descargas mineras o industriales esporádicas. En general consideramos que actualmente estos parámetros no constituyen ningún riesgo a la salud y el ambiente.

Las concentraciones de coliformes fecales o termo tolerantes en las aguas de los canales siguen siendo altas, como se pudo detectar desde 2006 (CIP, 2006), valores que llegan hasta 800,000 NMP/100 ml, mientras que los ECA establecen límites de 1,000 NMP/100 ml para el riego de vegetales de tallo corto como las hortalizas. Por suerte también los resultados han permitido confirmar que las aguas de los reservorios construidos hace ocho años muestran

valores aceptables entre 7 y 17,000 CF/100 ml, salvo un caso de 33,000 en el reservorio de Nievería, que podría estar relacionado con el vertimiento de excretas por los pobladores de los asentamientos humanos vecinos o con periodos de retención menores a los recomendados.

Otro grupo de patógenos constituidos por protozoos y helmintos parásitos humanos también han sido evaluados en esta investigación de campo, lo que permitió verificar que las aguas de los canales mantienen niveles tan altos de hasta 65 protozoos y 5 huevos de helmintos parásitos por litro de agua. En cambio en las aguas de reservorios no se encuentran helmintos y los protozoarios han descendido a 20/l. Es probable que el manejo del efluente de los reservorios facilite la salida por rebose, en cuyo caso los protozoarios salen del reservorio antes de morir. Es por tanto importante insistir en la recomendación de no extraer el agua de los reservorios por rebose, ya que estos parásitos flotan en el agua.



Foto 76. Reservorio de Nievería

Calidad agronómica de las aguas

Además de evaluar los riesgos sanitarios de las, también se evaluó la calidad agronómica de estas aguas, a fin de saber si permitían un buen mantenimiento de la vegetación regada, y si era necesario aplicar enmiendas y fertilizantes que corrijan las deficiencias y excesos del agua. El cuadro 40 muestra los resultados de estos análisis realizados.

En general, no se han encontrado diferencias significativas entre las aguas de canal y de los reservorios. El pH varía entre 6.53 y 8.01, valores que están dentro del rango de 5.5 y 8.2 considerados aceptables. Solo se tiene una muestra que alcanza un valor de 9.82 en el reservorio de Nievería y que podría deberse a una alta actividad fotosintética este tipo de cuerpos de agua. Por esta razón es evidente que el pH siempre ha sido alto en los reservorios superior que en los canales.

La conductividad eléctrica fluctúa entre 0.39 y 0.66 dS/m, valores que puede ser considerado poco salinos e incluidos dentro de la clase C2 (de 0.25 a 0.75 dS/m), por tanto son aguas adecuadas para todo tipo de cultivos. Esto se refuerza con la tasa de absorción del



Foto 77. Toma de muestra de agua en canal

sodio (RAS), que depende a su vez de la proporción de este catión respecto al calcio y magnesio, ya que si se tiene mucho sodio y poco calcio y magnesio, se favorece la absorción del primero, afectando la textura del terreno y evitando su buen drenaje. Las aguas de los canales y de los reservorios mantienen un RAS entre 0.24 y 2.75, valores muy por debajo de 10 establecido como límite para la Clase S1 y que implica que puede usarse en todos los suelos, ya que no hay peligro de destrucción de su estructura. En suma, las aguas de río utilizadas para riego en las zonas agrícolas del Cono Este de Lima han sido consideradas en la clase C2-S1, que implica una salinidad y tasa de absorción de sodio bajas y por tanto pueden ser utilizadas en cualquier suelo. Un aspecto también importante en la calidad agronómica del agua es evaluar el carbonato de sodio residual (CSR), que se calcula restando la concentración de calcio y magnesio de la concentración de carbonatos y bicarbonatos. Si esta resta es mayor que 2.5 el agua no será muy apropiada para el regadío, porque propicia la formación de carbonatos de calcio y magnesio, aumentando por tanto la RAS. En el caso de las aguas del río Rímac usadas en el Cono Este el CSR tiene un valor bajo, por tanto se puede deducir no van a favorecer la precipitación de carbonatos en los suelos.

Código	Parámetro	Punto de muestreo	Muestreo	pH	CE	Cationes	Ca	Mg	K	Na	Aniones	Nitratos	Carbonatos	Bicarb.	Sulfatos	Cloruros	Sodio	RAS	Boro	CLASE
	Unidad			1:1	dS/m	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	%		
Lugar/componente																				
NA	UPEU:																			
NA-A1	Agua de canal	Garita 1 - puerta principal	M1	6.96	0.56	6.74	4.63	0.69	0.08	1.34	6.73	0.02	-	2.18	2.03	2.50	19.88	0.82	0.67	C2-S1
			M2	7.06	1.02	10.36	7.40	0.95	0.14	1.87	10.43	0.06	-	1.99	2.08	6.30	18.05	0.92	0.30	C3-S1
			M3	7.00	0.58	6.39	4.67	0.62	0.29	0.81	6.22	0.02	-	2.56	1.64	2.00	12.68	0.50	0.23	C2-S1
NA-A2	Agua de reservorio	Riego espalda Fam. Mamani	M1	7.23	0.53	6.72	4.27	0.71	0.09	1.65	6.72	0.02	-	1.86	2.09	2.75	24.55	1.05	0.27	C2-S1
			M2	7.02	0.52	4.91	3.56	0.58	0.11	0.66	5.00	0.02	-	1.66	1.32	2.00	13.44	0.46	0.14	C2-S1
			M3	7.93	0.50	5.97	4.53	0.66	0.17	0.61	5.66	0.01	-	1.63	1.82	2.20	10.22	0.38	0.25	C2-S1
CA	Parcelas agrícolas de Carapongo:																			
CA-A1	Agua de canal	Parcela Raymundo Yaulis	M1	8.01	0.52	6.30	4.30	0.61	0.05	1.34	6.30	0.01	-	2.16	1.93	2.20	21.17	0.86	0.23	C2-S1
			M2	7.20	0.54	5.02	3.82	0.52	0.08	0.60	5.19	0.01	-	1.96	1.22	2.00	11.95	0.41	0.15	C2-S1
			M3	7.45	0.39	4.57	3.72	0.46	0.05	0.34	4.49	0.02	-	1.62	1.05	1.80	7.44	0.24	0.16	C2-S1
CA-A2	Agua de reservorio	Reservorio Raymundo Yaulis	M1	7.85	0.52	6.43	3.79	0.75	0.11	1.78	6.43	0.02	-	1.23	2.18	3.00	27.68	1.18	0.22	C2-S1
			M2	6.53	0.50	4.57	3.18	0.62	0.09	0.68	4.74	0.01	-	1.20	1.53	2.00	14.88	0.49	0.26	C2-S1
			M3	6.76	0.51	5.70	4.09	0.81	0.12	0.68	5.44	0.01	-	1.10	2.33	2.00	11.93	0.43	0.30	C2-S1
NI	Parcelas agrícolas de Nievería:																			
NI-A1	Agua de canal	Parcela Sr. Serna	M1	7.03	0.64	8.41	4.96	0.74	0.10	2.61	8.40	0.02	-	2.66	1.82	3.90	31.03	1.55	0.28	C2-S1
			M2	6.71	0.61	5.94	4.37	0.61	0.12	0.84	5.91	0.02	-	2.05	1.34	2.50	14.14	0.53	0.21	C2-S1
NI-A2	Agua de reservorio	Reservorio Sr. Serna	M1	9.82	0.66	7.99	4.18	0.84	0.23	2.74	7.96	0.01	0.29	1.71	2.35	3.60	34.29	1.73	0.29	C2-S1
			M2	7.09	0.63	7.20	2.62	0.65	0.41	3.52	7.09	0.02	-	1.64	1.33	4.10	48.89	2.75	0.20	C2-S1
			M3	7.17	0.67	7.90	5.25	0.74	0.22	1.69	7.54	0.01	-	2.49	2.04	3.00	21.39	0.98	0.32	C2-S1

Cuadro 40. Resultados de los análisis de calidad agronómica de las aguas en las zonas agrícolas de Lima Este. (Fuente: OPS, 2014).

Calidad sanitaria y ambiental de los suelos

Los resultados de los análisis de las muestras de suelos tomadas en las tres zonas agrícolas del Cono Este de Lima se muestran en el cuadro 41. Se incluye los parámetros sanitarios y ambientales, así como los valores establecidos por MINAM para las ECAS en suelos

(DS 002-2013-MINAM). Como se puede apreciar comparativamente con los ECA, los valores de cadmio en los suelos de Ñaña y Carapongo varían entre 2 y 3 mg/kg, por lo que los primeros están por debajo del límite de 10 mg/kg estipulado para el uso en parques, pero los segundos están por encima del límite de 1.4 mg/kg establecido para el uso agrícola. Lo mismo pasa en estas dos zonas con plomo y arsénico, con valores superiores a los establecidos para parques y agricultura. El cadmio proviene del suelo parental y no de la actividad minera, pudiendo ser fácilmente bio-acumulado hasta niveles riesgosos en hortalizas de hojas. El arsénico y plomo proviene principalmente de las aguas contaminadas por los relaves y representa también un riesgo importante en el consumo de hortalizas de follaje.

Codigo	Parámetro	Punto de muestreo	Muestreo							Coliformes termo tolerantes	Helmintos			
				Bario	Cadmio	Cromo	Plomo	Arsenico	Mercurio		Ascaris lumbricoides	Hymenolepis nana	Strongyloides sp.	Uncinarias
	Unidad			mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	NMP/100 g	H/g	H/g	H/g	H/g
	Lugar/componente													
NA	UPEU:													
NA-S1	Suelo regado con canal	Frontis colegio	M1	199	3.0	18	170	81	<5	3.0E+00	0	0	0	0
			M2	140	2.0	14	120	70	<5	2.3E+03	0	0	0	0
			M3	240	3.0	14	211	98	<5	9.0E+02	0	0	0	0
NA-S2	Suelo regado con reservorio	Área verde espalda Fam. Mamani	M1	156	3.0	13	170	114	<5	3.0E+00	0	0	0	0
			M2	152	3.0	11	149	84	<5	3.0E+00	0	0	0	0
			M3	160	3.0	11	159	98	<5	3.0E+02	0	0	0	0
CA	Parcelas agrícolas de Carapongo:													
CA-S1	Suelo regado con canal	Parcela vecino Yaulis	M1	136	2.0	11	145	81	<5	2.0E+04	0	0	0	0
			M2	145	3.0	10	153	84	<5	2.3E+04	0	0	Larvas	0
			M3	154	2.0	10	147	78	<5	9.0E+03	0	0	Larvas	0
CA-S2	Suelo regado con reservorio	Parcela Raymundo Yaulis	M1	186	3.0	12	149	93	<5	2.3E+02	0	0	0	0
			M2	174	3.0	10	144	87	<5	4.0E+03	0	0	Larvas	0
			M3	210	3.0	11	183	103	<5	1.5E+04	0	0	0	0
NI	Parcelas agrícolas de Nievería:													
NI-S2	Suelo regado con reservorio	Parcela Sr. Serna	M1	84	0.7	13	19	13	<5	2.3E+02	0	0	0	0
			M2	96	0.8	10	19	12	<5	2.3E+04	0	0	Larvas	0
			M3	90	0.7	8	16	9	<5	4.0E+03	0	0	Larvas	0
ECAS de Calidad Ambiental para suelos (DS 002-2013-MINAM)														
Suelo agrícola				750	1.4	0.4	70	50	6.6					
Residencial/Parques				500	10.0	0.4	140	50	6.6					

Cuadro 41. Resultados de los análisis de calidad sanitaria y ambiental de los suelos en las zonas agrícolas de Lima Este. (Fuente: OPS, 2014).

Todos los valores de bario, cromo y mercurio son menores a los estipulados por los ECA. Los mejores suelos se observan en Nievería, en donde ninguna muestra presento concentraciones de metales superiores a los establecidos por los ECA.

La presencia de coliformes fecales en los suelos con rangos entre 3 a 23,000 NMP/100 g confirma una contaminación fecal, que podría provenir principalmente del agua de riego. También presenta altos niveles de este indicador y que tiene relación con los niveles más bajos en los suelos regados con aguas de reservorio. No se puede descartar que dicha contaminación también tenga un origen en la defecación al aire libre de la población vecina sobre los campos agrícolas.



Foto 78. Toma de muestras de suelo

Por último todas las muestras de suelos de las tres zonas no muestran presencia de huevos de helmintos, pero es importante indicar que en Carapongo y Nievería se han identificado larvas de vida libre de Strongiloideos, que podrían ser de alguna especie parásita. Por tanto se recomienda que en futuras investigaciones se identifiquen estas larvas y se indague si son endémicas en los agricultores de estas zonas.

Fertilidad de los suelos

Al igual que con las aguas, se incluyó un análisis de la fertilidad de los suelos, a fin de conocer sus condiciones para sostener las áreas verdes y agrícolas, y asumir medidas correctivas si fuesen necesarias. El cuadro 42 muestra los resultados del análisis de fertilidad realizado en los suelos del Cono Este.

Los valores de pH de los suelos regados con aguas del río varían entre 6.86 y 7.94, por lo que son considerados aceptables frente al rango entre 5.5 y 8.3 considerado como adecuado. La conductividad eléctrica (CE) fluctúa entre 0.31 y 1.37, valores que por ser menores a 2 se puede considerar poco salino y apto para cualquier cultivo. La materia orgánica en los suelos de Ñaña se encuentra entre 3.18 y 5.94%, lo que implica que está alrededor del valor de 4% considerado como suelo provisto. En el caso de Carapongo y Nievería, los suelos no superan el 2.29%, por tanto se puede recomendar la aplicación de guanos para mejorar la fertilidad.

La concentración de fósforo es más alta en Carapongo, ya que fluctúa entre 24 y 42 ppm, por tanto es considerado alto ya que es mayor de 14 ppm. En el caso de Ñaña y especialmente de Nievería los niveles de fósforo son en su mayoría menores a 14 ppm, por tanto se recomienda aplicar fertilizantes fosforados.

La concentración de potasio en Ñaña es alta, en Carapongo es media y en Nievería es baja (< 100 ppm), por tanto se recomienda aplicar fertilizantes potásicos en Nievería. Por último la

proporción de nitrógeno es suficiente en Ñaña (entre 0.10 y 0.40%), de nivel medio en Carapongo (mayor de 0.10%), pero en Nievería es bajo (menos a 0.4%), probablemente debido a que se está cultivando césped y se cosecha con toda la capa de suelo superficial. Por tanto se debe aplicar urea para mantener la fertilidad.

Codigo	Parámetro	Punto de muestreo	Muestreo	Fertilidad del Suelo							
				pH	CE	CaCo3	M.O.	P	K	N	Al+3+H+
	Unidad			1:1	dS/m	%	%	ppm	ppm	%	meq/100
	Lugar/componente										
NA	UPEU:										
NA-S1	Suelo regado con canal	Frontis colegio	M1	6.99	0.44	0	4.09	9.8	244	0.20	0
			M2	6.86	0.58	0	3.52	9.7	281	0.21	0
			M3	7.18	0.40	0	5.94	26.7	319	0.36	0
NA-S2	Suelo regado con reservorio	Área verde espalda Fam. Mamani	M1	7.32	0.43	0	3.18	10.7	128	0.28	0
			M2	7.12	0.53	0	3.40	24.0	145	0.27	0
			M3	7.43	0.39	0.60	3.66	18.0	156	0.25	0
CA	Parcelas agrícolas de Carapongo:										
CA-S1	Suelo regado con canal	Parcela vecino Yaulis	M1	7.43	0.53	2.20	1.44	25.4	187	0.11	0
			M2	7.16	1.37	2.20	1.60	42.1	81	0.14	0
			M3	7.79	0.39	2.90	1.81	39.1	116	0.10	0
CA-S2	Suelo regado con reservorio	Parcela Raymundo Yaulis	M1	7.25	0.48	1.90	2.29	24.3	152	0.14	0
			M2	7.27	0.74	1.70	1.46	39.3	106	0.12	0
			M3	7.45	0.37	2.40	2.18	36.6	140	0.14	0
NI	Parcelas agrícolas de Nievería:										
NI-S2	Suelo regado con reservorio	Parcela Sr. Serna	M1	7.83	0.31	0	0.52	5.3	82	0.04	0
			M2	7.94	0.38	0	0.37	11.9	71	0.03	0
			M3	7.75	0.33	0	1.11	6.4	107	0.02	0
Niveles de fertilidad de suelos:											
Bajo			< 5.5	< 2		< 2	< 7	< 100	< 0.10		
Medio			5.5-8.3	2 - 8		2 - 4	7 - 14	100-240	0.10-		
Alto			> 8.3	> 8		> 4	> 14	> 240	> 0.40		

Cuadro 42. Resultados de los análisis de fertilidad de los suelos en las zonas agrícolas de Lima Este. (Fuente: OPS, 2014).

Calidad sanitaria del césped

También evaluó la calidad sanitaria del césped de las áreas verdes de la Universidad Peruana Unión, donde los estudiantes se instalan para realizar actividades recreativas, consumo de sus alimentos y descanso. El cuadro 43 muestra los resultados de los análisis realizados en el césped de la Universidad. Los valores de coliformes termo tolerantes reportados por DIGESA en la evaluación de campo muestra que el césped de la UPeU está algo contaminado con gérmenes

patógenos representados por estos organismos que llegan a niveles de 1,500 CTT/g. Si bien no existen referencias para establecer valores límites permisibles en estos sustratos, se entiende que no deberían tener concentraciones significativas. El solo hecho de aplicar agua de río con concentraciones de hasta 490,000 CTT/100 ml permitiría esperar la presencia de estos organismos en el césped, sin embargo podemos pensar que también existen otras fuentes de contaminación, probablemente las mismas personas y los alimentos que ellas manipulan dentro de las áreas verdes de la Universidad. Frente a esta situación es necesario recomendar una investigación más detallada de las fuentes, concentraciones y riesgos reales para generar enfermedades en la población que tiene contacto con el césped.

Codigo	Parámetro	Punto de muestreo	Muestreo	Coliformes termo tolerantes	Protozoos					Helmintos			
	Unidad				Blastocystis hominis	Endolimax nana	Entamoeba coli	Giardia lamblia	Iodamoeba butsschlii	Ascaris lumbricoides	Hymenolepis nana	Strongyloides sp.	Uncinarias
					NMP/g	A ó P/100 g	A ó P/100 g	A ó P/100 g	A ó P/100 g	A ó P/100 g	A ó P/100 g	A ó P/100 g	A ó P/100 g
NA-C1	Césped regado con canal	Frontis colegio	M1	9.0E+02	A	A	A	A	A	L	A	L	A
			M2	4.0E+02	A	A	A	A	A	L	A	L	A
			M3	9.0E+00	A	A	A	A	A	L	A	L	A
NA-C2	Césped regado con reservorio	Área verde espalda Fam. Mamani	M1	1.5E+03	A	A	A	A	A	A	A	A	A
			M2	4.0E+01	A	A	A	A	A	A	A	A	A
			M3	4.0E+02	A	A	A	A	A	L	A	A	A

Cuadro 43. Resultados de los análisis de calidad sanitaria del césped en la UPeU. (Fuente: OPS, 2014).

Por otro lado, en principio todas las muestras de césped evaluadas reportaron ausencia de protozoos y helmintos parásitos, lo que implica que este sustrato no constituye un riesgo para las personas que tienen contacto directo, especialmente los niños del colegio que juegan en estos lugares. Sin embargo el Laboratorio de DIGESA ha reportado la presencia de larvas de nemátodos de los grupos Ascaroideos y Strongiloideos que podrían ser parásitos, pero que no se puede asegurar por la dificultad de identificar estas especies en estadíos de larvas. Por tanto se recomienda realizar futuras investigaciones para definir si estas larvas corresponden a especies parasitarias humanas, y por tanto puedan representar un riesgo para los usuarios de los jardines. En el caso de que sea positivo, se debe tener presente que las aguas de riego no tienen estos organismos parásitos, por tanto la fuente de contaminación serían las mismas personas que usan los jardines y/o los alimentos que consumen en estos lugares.

Calidad sanitaria de las hortalizas

Al momento de la cosecha se procedió a tomar muestras de lechugas regadas con agua de canal y de reservorio, nabo regado con agua de canal sin lavar y lavado con esa agua, y huacatay regado con agua de canal. El cuadro 44 muestra los resultados de los análisis realizados para detectar coliformes termo tolerantes, protozoarios y helmintos parásitos. Como se puede observar, el nivel de coliformes fecales es mayor en las lechugas regadas con agua del reservorio, aun cuando

ya sabemos que esta agua es de mejor calidad, por tanto existe otra fuente de contaminación, probablemente excretas dispuestas en los campos agrícolas por personas que viven cerca. Por otro lado el nabo lavado con agua de canal tiene concentraciones muy elevadas de coliformes fecales, lo que indica que se ha contaminado con las aguas de canal que vendrían cargadas de aguas residuales o excretas. En general, todas las hortalizas muestreadas tienen concentraciones elevadas de coliformes fecales, lo que implica un riesgo para la salud de los consumidores.

Respecto a los parásitos, todas las muestras de hortalizas tienen presencia de protozoos, no así de helmintos, lo que indica que actualmente el mayor riesgo a la salud está vinculado a estos organismos. Si bien las lechugas regadas con agua de reservorio muestran menos presencia de protozoos parásitos que aquellas regadas directamente con el agua de canal, estas no alcanzan el requerimiento de calidad de que no exista presencia de estos organismos. Del mismo modo el nabo lavado con agua de canal también muestra mayor presencia de protozoarios parásitos que el mismo producto antes del lavado, confirmando que este lavado incrementa la contaminación de los productos.

Código	Parámetro	Punto de muestreo	Muestreo	Coliformes termo tolerantes	Protozoos					Helmintos			
	Unidad				Blastocystis hominis	Endolimax nana	Entamoeba coli	Giardia lamblia	Iodamoeba butschlii	Ascaris lumbricoides	Hymenolepis nana	Strongyloides sp.	Uncinarias
					NMP/g	A ó P/100 g	A ó P/100 g	A ó P/100 g	A ó P/100 g	A ó P/100 g	A ó P/100 g	A ó P/100 g	A ó P/100 g
Ca-H1	Lechuga regada con canal	Parcela vecino Jaulis	M4	9.0E+03	P	P	P	P	A	A	A	A	A
Ca-H2	Lechuga regada con reservorio	Parcela Jaulis	M4	2.0E+04	A	P	P	A	A	A	A	A	A
Ca-H3	Nabo regado con canal, sin lavar	Parcela vecino Jaulis	M4	4.0E+01	P	P	A	A	A	A	A	A	A
Ca-H4	Nabo regado y lavado con canal	Parcela vecino Jaulis	M4	9.0E+06	P	P	P	P	A	A	A	A	A
Ca-H5	Huacatay regado con canal	Parcela vecino Jaulis	M4	4.0E+04	P	A	P	P	A	A	A	P	A

Cuadro 44. Resultados de los análisis de calidad sanitaria de las hortalizas en Carapongo. (Fuente: OPS, 2014).

Ya discutimos antes que estos protozoarios parásitos flotan en la superficie del agua, por tanto se recomendaría que se respete la disposición de no extraer el agua por rebose. De lo contrario, se deberá prohibir en estas zonas la producción de hortalizas de consumo crudo como la lechuga. Del mismo modo se deberá recomendar usar agua de muy buena calidad para el lavado de los productos, a fin de mejorar la calidad de estos y no de contaminarlos. Algunos agricultores trasladan sus productos para su lavado a lugares donde hay agua de pozo y se ha confirmado en investigaciones anteriores que en esos casos se mejora la calidad de las hortalizas.

Calidad sanitaria de los peces

El Servicio Nacional de Sanidad Pesquera (SANIPES) del Instituto Tecnológico de la Producción (ITP) es la entidad pública encargada de vigilar por la calidad de los productos pesqueros capturados o cultivados en el país. Es así que para el caso de las tilapias cultivadas en los reservorios de la zona agrícola del Cono Este de Lima, se aplicaría el protocolo de calidad establecido en el Manual de Indicadores y criterios de Seguridad Alimentaria e Higiene para Alimentos y piensos de origen pesquero y acuícola aprobado el 2010, y que aplican para los productos hidrobiológicos crudos (frescos).



Foto 79. Muestreo de peces en reservorios

Se tomaron 10 muestras de tilapia en cada uno de los reservorios para realizar el análisis de calidad de estos peces y cuyos resultados se muestran en el cuadro 45. Este cuadro también incluye los valores límites establecidos por el Manual antes mencionado

Codigo	Parámetro	Punto de muestreo	Muestreo	Aeróbios mesófilos	Echerichia coli	Salmonella ssp.	Staphylococcus aureus
	Unidad			UFC/g	UFC/g	A ó P/25 g	UFC/g
Ca-P1	Tilapia cultivada en reservorio	Reservorio de Jaulis	M5	2.7E+05	3.3E+00	A	<1.0+E02
			M5	1.2E+05	1.3E+00	A	<1.0+E02
			M5	4.9E+03	5.0E-01	A	<1.0+E02
			M5	5.3E+04	1.4E+00	A	<1.0+E02
			M5	2.8E+05	2.3E+00	A	<1.0+E02
NI	Parcelas agrícolas de Nievería:						
Ni-P1	Tilapia cultivada en reservorio	Reservorio de Serna	M5	4.7E+04	9.2E+01	A	<1.0+E02
			M5	9.8E+04	>1.8E+02	A	<1.0+E02
			M5	2.1E+05	>1.8E+02	A	<1.0+E02
			M5	9.9E+04	>1.8E+02	A	<1.0+E02
			M5	1.4E+05	9.2E+01	A	<1.0+E02
Manual de Indicadores y criterios de Seguridad Alimentaria e Higiene para Alimentos y piensos de origen Pesquero y Acuícola (ITP, 2010)							
	Productos hidrobiológicos crudos	Límite medio		5.0E+05	1.0E+01	A	1.0E+02
		Límite máximo		1.0E+06	1.0E+02	A	1.0E+03

Cuadro 45. Resultados de los análisis microbiológicos y parasitológicos en las tilapias cultivadas en los reservorios de Carapongo y Nievería. (Fuente: OPS, 2014).

De los resultados se puede deducir que ninguna de las muestras de los peces de ambos reservorios supera el límite medio de 50,0000 UFC/g de organismos aerobios mesófilos, así como que los niveles de *Staphylococcus aureus* están por debajo de los 100 UFC/g y hay ausencia de *Salmonella* spp. y de parásitos humanos. Respecto a la concentración de *Echerichia coli*, vemos que los peces provenientes del reservorio de Carapongo tienen un máximo de 3.3 UFC/g, mientras que los de Nievería tienen más de 180 UFC/g. Teniendo en cuenta que el Manual establece un valor máximo de 100 UFC/g, podemos concluir que los peces de Carapongo son aptos para consumo, mientras que los de Nievería no lo son, por tanto en este último caso se recomendaría que los peces no sean consumidos crudos (cebiche), sino que tengan una cocción previa.

El Manual de buenas prácticas para el uso seguro y productivo de las aguas residuales domésticas ha sido elaborado con el propósito de fortalecer las capacidades institucionales y técnicas de la ANA en el uso seguro y productivo de las aguas residuales en la agricultura. Esperamos que los funcionarios y en general todos los profesionales vinculados a este tema puedan utilizar esta herramienta para contribuir a la formalización de las numerosas experiencias de reuso que existen el país.







REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA, 2013. *Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos*. Autoridad Nacional del Agua, Ministerio de Agricultura y Riego. Lima.
- Aquastat. 2015. *Recursos hídricos renovables en América Latina*. Sistema de Información Global sobre el Agua – Aquastat. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma. http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/americas/figure04_eng.pdf
- Arthur, J.P. 1983. *Notes on the design and operation of waste stabilization ponds in warm climates of developing countries*, Technical Paper N° 7, Banco Mundial (BM). Washington, D.C.
- Bartone, C. y Arlosoroff, S. 1987. *Irrigation reuse of point effluents in developing countries*. *Water Science and Technology* 19. Banco Mundial. Annapolis, Washington D.C.
- DIGESA. 2009. *Vigilancia de la calidad sanitaria de los Recursos Hídricos por vertientes a nivel Nacional y parámetros críticos - 2008*. Programa de Vigilancia Sanitaria de las Aguas en el Perú. Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) del Ministerio de Salud. Lima.
- DIGESA. 2011. *Evaluación de la Calidad Sanitaria de las Aguas del río Rímac y tributarios principales - año 2010*. Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) del Ministerio de Salud y el Servicio de Agua Potable y el Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL). Lima.
- Esparza, Maria. 1990. *Evaluación de riesgos para la salud por el uso de las aguas residuales en agricultura*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Panamericana de la Salud (OPS). Lima.
- FAO y OMS. 2003. *Garantía de la Inocuidad y Calidad de los Alimentos: Directrices para el Fortalecimiento de los Sistemas Nacionales de Control de los Alimentos*. Estudio FAO Alimentación y Nutrición 76. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y Organización Mundial de la Salud (OMS). Roma.
- FAO. 2012. *Wealth of waste*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) Water Report 35. Rome.
- Feachem, F. et. al. 1983. *Sanitation and Disease: health aspects of excreta and wastewater management*. Chichester, John Wiley.

- Foresi, Carlos. 2015. *Implementación y gestión del Área de Cultivos Restringidos (ACRE) Campo Espejo, irrigada con los efluentes tratados de la ciudad de Mendoza, Argentina*, Departamento de Recursos Hídricos, Departamento General de Irrigación de la Provincia de Mendoza.
- IAMA. 2007. *Seminario sobre Tecnologías de la desinfección del Agua*. Instituto del Aguas y Medio Ambiente. Lima.
- INEI, 2013. *IV Censo Nacional Agropecuario 2012*. Instituto Nacional de Estadística e Informática, Lima.
- INEI. 2015. *Perú: población total al 30 de junio, según departamento, provincia y distrito, 2015*. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Lima.
- IPES. 2008. *Estudios de Caso de Experiencias de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales en la Ciudad de Lima. Proyecto SWITCH Lima*. IPES – Promoción del Desarrollo Sostenible. Lima.
- León, Guillermo y Julio Moscoso. 1996. *Curso de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Panamericana de la Salud (OPS). Lima.
- Libhaber, Menahem. 2015 (1). *Inversiones y Costos de Operación y Mantenimiento en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en Perú*. Banco Mundial y Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. Lima.
- Libhaber, Menahem. 2015 (2). *Gestión del uso de las aguas residuales en Israel*. Foro Internacional Tratamiento y Uso Seguro de Aguas Residuales en la Agricultura. Autoridad Nacional del Agua (ANA) y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Lima.
- Marais, G. 1974. *Fecal bacterial kinetics in stabilization ponds*. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE 100(EE1):119-139.
- MINAGRI. 2012. *Costos de Producción de la chala*. Dirección General de Competitividad Agraria, Ministerio de Agricultura y Riego. Lima.
- Moscoso, Julio y Alberto Flórez. 1991. *Reuso en Acuicultura de las Aguas Residuales tratadas en las Lagunas de Estabilización de San Juan*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y

Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Panamericana de la Salud (OPS), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Banco Mundial (BM) y Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GTZ). Lima.

- Moscoso, Julio, Egocheaga, Luis y Eduardo La Torre. 1998. *Modelo para la Formulación y Evaluación Económica de Perfiles de Proyectos Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales en Actividades Agropecuarias – CEPIS REUSO 2.1*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Panamericana de la Salud (OPS) y Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC) del Canadá. Lima.
- Moscoso, Julio y Luis Egocheaga. 2002 (1). *“Proyecto Regional Sistemas integrados de Tratamiento y uso de las aguas residuales en América Latina: realidad y potencial: Resumen ejecutivo”*, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Panamericana de la Salud (OPS) y Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC) Canadá. Lima. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/proyecto/rejecutivo.pdf>
- Moscoso, Julio y Luis Egocheaga. 2002 (2). *“Proyecto Regional Sistemas integrados de Tratamiento y uso de las aguas residuales en América Latina: realidad y potencial: Guía para la formulación de Proyectos”*, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Panamericana de la Salud (OPS) y Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC) del Canadá. Lima. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/proyecto/guiaproye.pdf>
- Moscoso, Julio, Egocheaga, Luis y Ramírez, Marco. 2005. *Validación de Lineamientos para Formular Políticas de Gestión del Agua Residual Doméstica en América Latina*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Panamericana de la Salud (OPS) y Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC) Canadá. Lima.
- Moscoso, Julio; Alfaro, Tomás y Henry Juárez. 2007. *Uso de reservorios para mejorar la calidad sanitaria del agua para el riego agrícola en el Cono Este de Lima, Perú*. Centro Internacional de la Papa (CIP) y la Comunidad de Madrid (CESAL). Lima.
- Moscoso, Julio y Tomás Alfaro. 2008. *Panorama de las Experiencias de tratamiento y uso de aguas residuales en Lima y Callao*. IPES Promoción del Desarrollo Sostenible, Lima.
- MVC. 1997. *Norma de Saneamiento S.090 “Plantas de tratamiento de Aguas Residuales”*. Reglamento Nacional de Construcciones. Ministerio de Vivienda y Construcción. Lima.

- MVCS. 2006. *Plan Nacional de Saneamiento 2006 – 2015 “agua es vida”*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Lima.
- MVCS. 2014. *Coberturas de Saneamiento. R.M. 336-2014-Vivienda: Plan de Inversiones del Sector Saneamiento de Alcance Nacional 2014-2021*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS). Lima.
- Oakley, Stewart. 2015. *Manejo Integrado Sostenible de Aguas Residuales en Latinoamérica: éxitos, fracasos y Nuevas estrategias con énfasis en el Perú*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS). Lima.
- OPS. 2014. *Plan de Seguridad en Saneamiento para el Estudio de Caso de la Zona agrícola del Cono Este de Lima, como parte del Proyecto Prueba del Manual de Planes de Seguridad de Saneamiento en Uso de Aguas Residuales en Lima, Perú*. 92 pp. Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la salud, Lima.
- OPS. 2014. *Manual de Planificación de la Seguridad en Saneamiento. Guía para la Gestión de Riesgos en el Uso Seguro de las Aguas Residuales Domésticas en América Latina*. Organización Panamericana de la Salud (OPS), Organización Mundial de la Salud (OMS). Lima.
- OMS. 1989. *Directrices Sanitarias sobre el Uso de Aguas Residuales en Agricultura y Acuicultura. Informe de un Grupo Científico de la OMS*. Serie de Informes Técnicos 778. Organización Mundial de la Salud (OMS). Ginebra.
- OMS. 2006. *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. 5 volúmenes*. Organización Mundial de la Salud (OMS). Ginebra. http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/gsuww/en/
- OMS. 2015. *Sanitation Safety Planning. Manual for safe use and disposal of wastewater, greywater and excreta*. Organización Mundial de la Salud (OMS). Ginebra.
- PROSAP. 2013. *Estudio del Potencial del Uso Alternativo de Fuentes de agua: las Aguas Residuales*. PROSAP, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Organización Mundial de la Salud y Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina. Buenos Aires.
- Sáenz, Rodolfo. 1987. *Predicción de la calidad de efluentes de lagunas de estabilización*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Panamericana de la Salud (OPS). Lima.

- SERPAR. 2014. *Plan de Riego Sostenible en su componente de Riego con Aguas Residuales Tratadas del Plan Maestro de Áreas Verdes y Espacios Públicos de Lima Metropolitana*. Proyecto "Riego Sostenible en Áreas Verdes en el Municipio Metropolitano de Lima. Servicios de Parques de Lima (SERPAR) y Corporación Andina de Fomento (CAF). Lima.
- Shuval, H. et.al. 1986. *Wastewater irrigation in developing countries: health effects and technical solutions*. Documento Técnico No. 51. Serie de Recuperación Integrada de Recursos. Banco Mundial. Washington.
- Siebe, Cristina. 2015. *Gestión del uso de las aguas residuales en México. Impacto en los agro-sistemas*. Instituto de Geología. Universidad Autónoma de México. Ciudad de México.
- Sopper, W.; Kardos, L. 1963. *Vegetation responses to irrigation with treated municipal wastewater*. Pennsylvania State University, School of Forest Resources and Department of Agronomy. Philadelphia.
- SUNASS. 2015. *Diagnóstico de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en el ámbito de las Empresa Prestadoras de Servicios de Saneamiento (EPS)*. Gerencia de Supervisión y Fiscalización de la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS). Lima.
- Sutherland, J.; Cooley, J.; Neary, D. y D. Urie. 1974. *Irrigation of trees and crops with sewage stabilization ponds effluents in Southern Michigan*. EPA 660/2-74-041. US Environmental Protection Agency. Washington D.C.
- Un-Water. 2013. *Proceedings of the UN-Water project on the Safe Use of Wastewater in Agriculture*. Proceedings Series No. 11. UNWater-DPC, Bonn. <http://www.unwater.unu.edu/file/get/784.pdf>
- Yáñez, Fabián. 1980. *Evaluation of the San Juan stabilization ponds. Final Research Report*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Panamericana de la Salud (OPS). Lima.
- Yáñez, Fabián. 1986. *Reducción de organismos patógenos y diseño de lagunas de estabilización en países en desarrollo. Seminario Regional de Investigación sobre Lagunas de Estabilización*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Panamericana de la Salud (OPS). Lima.

Esta publicación ha sido posible gracias al apoyo de :



**Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura**



ANA

Autoridad Nacional del Agua

Facebook: /autoridadnacionaldelagua

Twitter: @ANAPeru

Youtube: /ANAtvagua

Flickr: /anagobpe/sets/

Thinglink: /anagobpe

Calle Diecisiete N° 355,

Urb. El Palomar

San Isidro - Lima, Perú

Telf. (511) - 2243298

www.ana.gob.pe