



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
INSTITUTO DE MECÁNICA DE LOS  
FLUÍDOS E INGENIERÍA AMBIENTAL



FACULTAD DE  
INGENIERÍA

Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental

**ANÁLISIS DE REÚSO DE EFLUENTES Y LODOS DE  
LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES DE FRAY MARCOS – FLORIDA,  
URUGUAY**

Autora: Ing. Mec. Rebeca Suárez Rodríguez

Tutora: Dra. Ing. Alice Elizabeth González

Montevideo, Uruguay

2025





UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



FACULTAD DE  
INGENIERÍA

## PÁGINA DE APROBACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

El tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueba la Tesis de Investigación:

Título

.....  
.....

Autor

.....  
.....

Tutor

.....

Carrera

.....

Puntaje

.....

Tribunal

Profesor.....  
(Nombre y firma)

Profesor.....  
(Nombre y firma)

Profesor.....  
(Nombre y firma)

Fecha

.....





UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



FACULTAD DE  
INGENIERÍA

## **AGRADECIMIENTOS**

A Olivia, por convertirse en el impulso necesario para culminar esta tesis.

A Richi, por su apoyo incondicional y comprensión, que me han permitido alcanzar un equilibrio entre la vida laboral, académica y familiar.

A mi familia, especialmente a mi madre y a mi padre, por el esfuerzo invaluable de darme la posibilidad de estudiar lo que me apasiona y por demostrarme, con su ejemplo, que la formación constante es el camino para ser una mejor profesional.

A Elizabeth González, por su apoyo y guía permanentes, no solo en esta tesis, sino desde el inicio de mis estudios de posgrado.



## Tabla de contenido

<b>RESUMEN.....</b>	<b>III</b>
Palabras claves: .....	iii
<b>ÍNDICES DE TABLAS Y FIGURAS.....</b>	<b>IV</b>
Índice de tablas.....	iv
Índice de figuras .....	vi
<b>LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN: POR QUÉ SURGE LA NECESIDAD DE REUSAR AGUAS RESIDUALES Y LODOS DE UNA PTAR.....</b>	<b>1</b>
1.1. Marco general.....	1
1.2. Problemática y motivación .....	2
1.3. Objetivos generales y específicos.....	3
1.4. Organización del documento.....	4
<b>2. PERSPECTIVA INTERNACIONAL DE REUTILIZACIÓN DE EFLUENTES Y LODOS .....</b>	<b>4</b>
2.1. Perspectiva internacional de reutilización de efluentes. ....	4
2.2. Perspectiva internacional de reutilización de lodos.....	7
<b>3. ALTERNATIVAS DE REUTILIZACIÓN.....</b>	<b>10</b>
3.1. Alternativas para aguas residuales.....	11
3.2. Alternativas para lodos .....	13
<b>4. CONFIABILIDAD Y VIABILIDAD EN LA REUTILIZACIÓN.....</b>	<b>16</b>
4.1. La confianza del público y la aceptación social.....	16
4.2. Gobernanza y economía del reúso: vacíos, limitaciones y oportunidades .....	18
<b>5. NORMATIVAS Y REGLAMENTOS CONSIDERADOS A NIVEL MUNDIAL, REGIONAL Y NACIONAL .....</b>	<b>21</b>
5.1. Metodología para la selección, revisión y comparación de normativas .....	21
5.2. Normativas y reglamentos para reúso de aguas residuales .....	21
5.3. Normativa y reglamentación para reúso de lodos .....	37
<b>6. RESUMEN DE CASOS DE INTERÉS E INVESTIGACIONES RELEVANTES RECIENTES O EN CURSO .....</b>	<b>56</b>

6.1.	Sobre reúso de aguas residuales .....	56
6.2.	Sobre reúso de lodos .....	69
<b>7.</b>	<b>SANEAMIENTO EN URUGUAY .....</b>	<b>75</b>
7.1.	Situación actual .....	75
7.2.	Tratamiento de efluentes.....	76
7.3.	¿Qué esperar después de cada tipo de tratamiento? .....	80
<b>8.</b>	<b>CASO DE ESTUDIO .....</b>	<b>83</b>
8.1.	Fray Marcos .....	83
8.2.	Descripción de la PTAR de Fray Marcos.....	83
8.3.	Información proporcionada por OSE .....	87
8.4.	Estudio de efluentes.....	87
8.5.	Estudio de lodos.....	96
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>100</b>
9.1.	Caso de estudio.....	100
9.2.	Sobre los objetivos de esta tesis.....	102
9.3.	Líneas de trabajo a futuro.....	102
<b>10.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>104</b>
<b>11.</b>	<b>ANEXO – INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR OSE.....</b>	<b>117</b>
11.1.	Caracterización de aguas residuales .....	118
11.2.	FQ y ET Lodo Fray Marcos 2021.....	119
11.3.	MB Lodo Fray Marcos 2021 .....	122
11.4.	PS Lodo Fray Marcos 2021.....	123



## Resumen

Este documento representa una exhaustiva recopilación acerca de las oportunidades de reutilización de aguas residuales y sólidos generados en plantas de tratamiento de efluentes. Se originó a partir de una revisión de las prácticas actuales a nivel mundial y regional, así como un análisis de las normativas vigentes y el impacto ambiental asociado a estas prácticas.

Posteriormente, se examinó la viabilidad de aplicar estas oportunidades de reutilización en el contexto de Uruguay, teniendo en cuenta los tipos de tratamientos de efluentes utilizados en el país. Finalmente, se realizó una evaluación detallada de un caso específico, centrándose en la planta de tratamiento de Fray Marcos como caso de estudio.

El objetivo es que se puedan comprender las posibilidades y limitaciones de la reutilización de aguas residuales y sólidos generados en plantas de tratamiento de efluentes y contribuir con la promoción de prácticas sostenibles y responsables en la gestión del agua y los recursos naturales.

Palabras claves:

*Saneamiento, reutilización de efluentes, reutilización de lodos*

## Índices de tablas y figuras

### Índice de tablas

TABLA 5.1- CALIDAD SUGERIDA DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS SEGÚN PARÁMETROS QUÍMICOS, FÍSICOS Y BIOLÓGICOS <sup>A</sup> .....	23
TABLA 5.2 - CLASES DE CALIDAD DE LAS AGUAS REGENERADAS Y USO AGRÍCOLA Y MÉTODO DE RIEGO PERMITIDOS .....	24
TABLA 5.3 - REQUISITOS DE CALIDAD DE LAS AGUAS REGENERADAS PARA EL RIEGO AGRÍCOLA ...	25
TABLA 5.4 - REQUISITOS PARA LOS VERTIDOS PROCEDENTES DE INSTALACIONES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS. SE APLICARÁ EL VALOR DE CONCENTRACIÓN O EL PORCENTAJE DE REDUCCIÓN. ....	25
TABLA 5.5 - OBJETIVOS BASADOS EN LA SALUD Y OBJETIVOS DE REDUCCIÓN DE HELMINTOS PARA EL USO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS EN AGRICULTURA.....	26
TABLA 5.6 - MONITOREO DE VERIFICACIÓN (NÚMERO DE E. COLI POR 100 ML DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS) PARA LOS DIVERSOS NIVELES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LAS OPCIONES A–G PRESENTADAS EN LA FIGURA 5.1.....	27
TABLA 5.7 – CATEGORÍAS DE REUTILIZACIÓN DEL AGUA Y NÚMERO DE ESTADOS CON NORMAS, REGULACIONES O DIRECTRICES QUE ABORDAN ESTAS CATEGORÍAS DE REUTILIZACIÓN.....	28
TABLA 5.8 – DIRECTRICES SUGERIDAS PARA LA REUTILIZACIÓN DEL AGUA. CATEGORÍAS DE REUTILIZACIÓN, TRATAMIENTOS REQUERIDOS Y CALIDAD DEL AGUA RECICLADA. ....	29
TABLA 5.9 – PARÁMETROS PARA SU REUTILIZACIÓN EN RIEGO AGRÍCOLA .....	30
TABLA 5.10 – PARÁMETROS PRINCIPALES EXIGIDOS PARA GRADO B.....	31
TABLA 5.11 – LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES – PROMEDIO MENSUAL.....	31
TABLA 5.12 - CLASES DE CALIDAD PARA AGUAS UTILIZADAS EN IRRIGACIÓN DE DIVERSOS CULTIVOS (BRASIL, 2005B).....	32
TABLA 5.13 - CLASIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES SEGÚN EL USO. ....	32
TABLA 5.14 - LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA EL REÚSO DE AGUAS RESIDUALES .....	33
TABLA 5.15 – TABLA DE PARÁMETROS FÍSICOS Y MICROBIOLÓGICOS .....	34
TABLA 5.16 – VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE E. COLI SEGÚN NORMA O REGLAMENTO.....	36
TABLA 5.17 - VALORES LÍMITE DE CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LOS SUELOS (MG/KG DE MATERIA SECA DE UNA MUESTRA REPRESENTATIVA DE LOS SUELOS CUYO PH SEA DE 6 A 7)....	38
TABLA 5.18 - VALORES LÍMITE DE CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LOS LODOS DESTINADOS A SU UTILIZACIÓN EN AGRICULTURA (MG/KG DE MATERIA SECA) .....	38
TABLA 5.19 - VALORES LÍMITE DE CONCENTRACIÓN DE METALES EN LOS LODOS.....	40
TABLA 5.20 – ATRACCIÓN DE VECTORES. DETERMINACIONES A REALIZAR SOBRE BARROS (MATRIZ) .....	41
TABLA 5.21 – METALES Y PCBs. DETERMINACIONES A REALIZAR SOBRE BARROS (MATRIZ) .....	41
TABLA 5.22 – NIVEL DE PATÓGENOS. DETERMINACIONES A REALIZAR SOBRE BARROS (MATRIZ) .....	41
TABLA 5.23 – CONDICIONES PARA TRATAMIENTO BIOLÓGICO EN SUELOS (SEGÚN NIVELES GUÍA DE CALIDAD DE SUELOS PARA USO AGRÍCOLA) .....	42
TABLA 5.24 – LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS EN BIOSÓLIDOS .....	42

TABLA 5.25 – LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA PATÓGENOS Y PARÁSITOS EN LODOS Y BIOSÓLIDOS.....	42
TABLA 5.26 – APROVECHAMIENTO DE BIOSÓLIDOS .....	43
TABLA 5.27 – VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CATEGORIZACIÓN DE LODOS PARA APLICACIÓN AL SUELO.....	43
TABLA 5.28 – LODOS DE TRATAMIENTO O PRODUCTOS DERIVADOS – SUSTANCIAS INORGÁNICAS .....	44
TABLA 5.29 – CLASES DE LODO DE TRATAMIENTO O PRODUCTO DERIVADO – AGENTES PATÓGENOS .....	44
TABLA 5.30 – CARGAS ACUMULADAS TEÓRICAS PERMITIDAS DE SUSTANCIAS INORGÁNICAS PARA LA APLICACIÓN DE LODO DE TRATAMIENTO O PRODUCTOS DERIVADOS EN SUELOS AGRÍCOLAS.....	44
TABLA 5.31 – CLASES DE LODO DE TRATAMIENTO .....	45
TABLA 5.32 – CONCENTRACIONES MÁXIMAS DE METALES EN SUELO RECEPTOR .....	45
TABLA 5.33 – CONCENTRACIONES MÁXIMAS DE METALES EN LODOS PARA APLICACIONES AL SUELO .....	46
TABLA 5.34 – VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CATEGORIZACIÓN DE BIOSÓLIDOS PARA SU USO .....	46
TABLA 5.35 – PARÁMETROS DE TOXICIDAD QUÍMICA EN BIOSÓLIDOS DE CLASE A Y CLASE B.....	48
TABLA 5.36 – PARÁMETROS HIGIENIZACIÓN DE BIOSÓLIDOS .....	48
TABLA 6.1 – PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA DE NEWATER.....	57
TABLA 6.2 – CALIDAD PROMEDIO DEL AGUA RECICLADA PURIFICADA EN 2024.....	62
TABLA 6.3 – CALIDAD PROMEDIO DEL AGUA RECICLADA PURIFICADA EN 2024 .....	63
TABLA 6.4 – CALIDAD DE AGUA PARA REÚSO EN TORRES DE ENFRIAMIENTO .....	63
TABLA 6.5 – PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA PARA LA NUEVA PLANTA GOREANGAB.....	67
TABLA 7.1- UBICACIÓN Y TIPOS DE TRATAMIENTO REALIZADOS POR OSE .....	75
TABLA 7.2 – ESTÁNDARES ESPERADOS PARA TRATAMIENTOS SECUNDARIOS.....	78
TABLA 7.3- CALIDAD SUGERIDA DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS Y SU POTENCIAL TRATAMIENTO CORRESPONDIENTE .....	82
TABLA 8.1- CAUDALES ESPERADOS PARA LA PTAR FRAY MARCOS SEGÚN CADA ETAPA.....	84
TABLA 8.2- CALIDAD DE EFLUENTE OBJETIVO FIJADA PARA PTAR DE FRAY MARCOS.....	88
TABLA 8.3- ESTÁNDARES DE VERTIDO DIRECTO A CUERPO DE AGUA .....	88
TABLA 8.4- PARÁMETROS DE CALIDAD DE EFLUENTE EN PTAR FRAY MARCOS .....	89
TABLA 8.5- ESTIMACIÓN DE VALORES DE TURBIEDAD EN PTAR FRAY MARCOS.....	91
TABLA 8.6- ESTIMACIÓN DE VALORES DE E. COLI POST UV EN PTAR FRAY MARCOS.....	94
TABLA 8.7- PARÁMETROS DE CALIDAD DE LODOS EN PTAR FRAY MARCOS .....	96
TABLA 8.8- COMPARACIÓN DE VALORES DE METALES EN LODO DE PTAR FRAY MARCOS CON NORMATIVAS INTERNACIONALES.....	96
TABLA 8.9- COMPARACIÓN DE VALORES DE AGENTES PATÓGENOS EN LODO DE PTAR FRAY MARCOS CON NORMATIVAS INTERNACIONALES .....	97
TABLA 8.10- ESCENARIOS TÍPICOS DE APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS.....	98

## Índice de figuras

FIGURA 3.1 – RECUPERACIÓN DE RECURSOS EN PTAR.....	10
FIGURA 5.1 - EJEMPLOS DE OPCIONES PARA LA REDUCCIÓN DE PATÓGENOS VIRALES, BACTERIANOS Y PROTOZOARIOS MEDIANTE DIFERENTES COMBINACIONES DE MEDIDAS DE PROTECCIÓN DE LA SALUD QUE LOGRAN EL OBJETIVO BASADO EN LA SALUD DE $\leq 10^{-6}$ AVAD POR PERSONA POR AÑO .....	27
FIGURA 5.2 – VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE DBO <sub>5</sub> SEGÚN NORMA O REGLAMENTO.....	35
FIGURA 5.3 – VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE SST SEGÚN NORMA O REGLAMENTO .....	35
FIGURA 5.4 – VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE COLIFORMES FECALIS SEGÚN NORMA O REGLAMENTO .....	36
FIGURA 5.5 – VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE TURBIEDAD SEGÚN NORMA O REGLAMENTO ..	37
FIGURA 5.6 – VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE ARSÉNICO SEGÚN NORMA O REGLAMENTO ....	50
FIGURA 5.7 – VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CADMIO SEGÚN NORMA O REGLAMENTO.....	51
FIGURA 5.8 – VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE COBRE SEGÚN NORMA O REGLAMENTO.....	51
FIGURA 5.9 – VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CROMO SEGÚN NORMA O REGLAMENTO .....	52
FIGURA 5.10 – VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE MERCURIO SEGÚN NORMA O REGLAMENTO ..	52
FIGURA 5.11 – VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE NÍQUEL SEGÚN NORMA O REGLAMENTO.....	53
FIGURA 5.12 – VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE PLOMO SEGÚN NORMA O REGLAMENTO .....	53
FIGURA 5.13 – VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE ZINC SEGÚN NORMA O REGLAMENTO .....	54
FIGURA 6.1 – CICLO CERRADO DE AGUA PROPUESTO POR PUB.....	56
FIGURA 6.2 – ETAPAS DE PURIFICACIÓN DE NEWATER.....	57
FIGURA 6.3 – BOTELLA DE NEWATER PARA CONSUMO HUMANO .....	59
FIGURA 6.4 – MAPA DE LOCALIZACIÓN DEL SISTEMA DE GWRS.....	60
FIGURA 6.5 – DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE ERA CAMP DE TARRAGONA .....	64
FIGURA 6.6 – ESQUEMA DEL PROYECTO PILOTO (CS1) PARA CAMP DE TARRAGONA.....	65
FIGURA 6.7 – COMPARACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE LA VIEJA Y LA NUEVA PLANTA DE GOREANGAB.....	68
FIGURA 6.8 – BIO-BUS.....	70
FIGURA 6.9 – DIAGRAMA DE FLUJO DE UNA BIOFACTORÍA .....	71
FIGURA 6.10 – DIAGRAMA DE FLUJO DE LA FARFANA.....	72
FIGURA 8.1 – VISTA AÉREA DE LA PTAR DE FRAY MARCOS .....	86
FIGURA 8.2 – VALORES DE DBO <sub>5</sub> OBTENIDOS DE MUESTRAS DE EFLUENTES DE PTAR DE FRAY MARCOS EN COMPARACIÓN CON NORMATIVAS INTERNACIONALES DE REÚSO DE AGUA .....	92
FIGURA 8.3 – VALORES DE SST OBTENIDOS DE MUESTRAS DE EFLUENTES DE PTAR DE FRAY MARCOS EN COMPARACIÓN CON NORMATIVAS INTERNACIONALES DE REÚSO DE AGUA .....	92
FIGURA 8.4 – VALORES DE TURBIEDAD OBTENIDOS DE MUESTRAS DE EFLUENTES DE PTAR DE FRAY MARCOS EN COMPARACIÓN CON NORMATIVAS INTERNACIONALES DE REÚSO DE AGUA .....	93
FIGURA 8.5 – CURVA DOSIS-RESPUESTA A UV .....	94
FIGURA 8.6 – VALORES ESTIMADOS DE E. COLI POST UV PTAR DE FRAY MARCOS EN COMPARACIÓN VALORES DE ESTABLECIDOS EN NORMATIVAS INTERNACIONALES DE REÚSO DE AGUA .....	95

FIGURA 8.7 – COMPARACIÓN DE CONCENTRACIONES DE METALES EN LODOS CON LÍMITES NORMATIVOS.....	97
---	----

## Lista de abreviaturas y acrónimos

AIDIS: Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental

BID: Banco Interamericano de Desarrollo

CAF: Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe

CEE: Comunidad Económica Europea

CF: Coliformes Fecales

COTAMA: Comisión Técnica Asesora de la Protección del Medio Ambiente

DBO<sub>5</sub>: demanda bioquímica de oxígeno a 5 días

DINACEA: Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental

DNAPyS: Dirección Nacional de Agua Potable y Saneamiento de Argentina

DQO: Demanda Química de Oxígeno

F/M: Relaciones alimento/microorganismo (F/M por sus siglas en inglés, Food-to-Microorganism).

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GESTA: Grupo Técnico de Estandarización Ambiental

GWRS: Sistema de Recarga de Acuífero (GWRS por sus siglas en inglés)

IM: Intendencia de Montevideo

INE: Instituto Nacional de Estadística

INIA: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria

MEVIR: Movimiento de Erradicación de la Vivienda Insalubre Rural

MF: Filtración por membranas

MS: Materia Seca

NMP: Número Más Probable

NTU: Unidades de Turbidez Nefelométricas

nZLD: Sistema de Casi Vertido Cero (nZLD, por sus siglas en inglés)

OCSD: Distrito de Saneamiento del Condado de Orange (OCSD por sus siglas en inglés)

OCWD: Distrito de Agua del Condado de Orange (OCWD por sus siglas en inglés)

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

OMS: Organización Mundial de la Salud (también citada como WHO por sus siglas en inglés)

ONU: Organización de las Naciones Unidas

OSE: Obras Sanitarias del Estado

PIR: Política, Institucionales y Regulaciones

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

PUB: Public Utilities Board

RO: Ósmosis Inversa (RO por sus siglas en inglés)

SST: Sólidos Suspendidos Totales

UE: Unión Europea

Udelar: Universidad de la República

UFC: Unidad Formadora de Colonias

UFP: Unidad Formadora de Placas

UNICEF: Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia

URSEA: Unidad Reguladora de Servicios de Energía y Agua

USEPA: Agencia Estadounidense de Protección Ambiental

UV: Desinfección Ultravioleta

WHO: World Health Organization

## 1. Introducción: por qué surge la necesidad de reusar aguas residuales y lodos de una PTAR

### 1.1. Marco general

Se puede ver una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) como un sistema, donde ingresan aguas residuales, que pueden ser domésticas e industriales y, dependiendo del tipo de saneamiento de la localidad, aguas pluviales, y cuya salida son aguas residuales tratadas y, dependiendo del tipo de tratamiento, lodos.

Las aguas residuales generalmente son devueltas a cauces de agua cercanos a la planta donde fueron generadas y los lodos, mayoritariamente, son llevados a disposición final en vertederos. Estas prácticas causan algunos impactos ambientales como la contaminación del agua superficial y subterránea, desbalance hídrico, generación de lixiviados y emisión de olores entre otros.

Tanto el agua como los lodos salidos de las PTAR pueden reutilizarse y convertirse en subproductos para otras prácticas, reduciendo el impacto ambiental y contribuyendo a una economía circular (Rodríguez *et al.*, 2020).

Como seres humanos necesitamos agua para vivir. El agua nos atraviesa más allá de las necesidades básicas que podemos imaginarnos a diario. El agua es indispensable para el consumo, pero también para mantener la higiene, construir una vivienda e incluso para poder obtener la materia prima de nuestra ropa.

El agua se usa para la agricultura, para la industria, en nuestras casas, para transporte, como recreación y como recurso natural; se podría decir que casi todas las actividades que realizamos implican un consumo de agua.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) estima que, dependiendo de la dieta, son necesarios entre 2000 y 5000 litros de agua diarios para producir el alimento que consume una persona (FAO, 2019). Y la relación entre el aumento de población y el uso del recurso hídrico no es lineal: en el siglo pasado la población mundial se triplicó, mientras que el consumo de agua se sextuplicó (Tello *et al.*, 2016).

La Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2016) prevé que para el año 2050 un 25 % de la población mundial viva en un país afectado por la escasez del agua.

También es necesario considerar que, si bien, el 70 % de la superficie de la Tierra está cubierta de agua, solo el 0,025 %, es apta para el consumo humano. Según la FAO (2020) debido a efectos del cambio climático, principalmente la incertidumbre de precipitaciones y la disponibilidad de agua, la cantidad de recursos de agua dulce disponible anualmente por persona ha disminuido más de un 20 % en los dos últimos decenios.



Considerando lo mencionado, es un hecho que se debe generar conciencia en preservar el recurso hídrico.

Por otro lado, el saneamiento es fundamental para la salud y el progreso social y económico. Fue reconocido como un derecho específico por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 2015. La meta 6.2 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) menciona:

“De aquí a 2030, lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos y poner fin a la defecación al aire libre, prestando especial atención a las necesidades de las mujeres y las niñas y las personas en situaciones de vulnerabilidad”. (Naciones Unidas, 2015, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>).

## 1.2. Problemática y motivación

En 2021, Mendoza mencionaba en su artículo ‘Uso potencial de las aguas residuales en la agricultura’:

“Anualmente se producen 380 000 millones de m<sup>3</sup> (380 billones de litros) de aguas residuales en todo el mundo, estimaciones sugieren que se espera que la producción de agua residual a nivel mundial alcance los 470 000 millones de m<sup>3</sup> al final de 2030, lo que representa un aumento de 24% sobre la producción actual de aguas residuales y en 2050 alcanzará los 574 billones de m<sup>3</sup>, 51% más que el nivel actual”. (Mendoza et al., 2021, p.118).

Uno de los propósitos de esta tesis es examinar si el reúso de las aguas residuales generadas a nivel global, que actualmente alcanzan cerca de 400 billones de m<sup>3</sup> anuales (Christou et al., 2024), puede constituir, total o parcialmente, una respuesta viable al desafío de la escasez hídrica. Teniendo conocimiento de que la regeneración y reutilización de agua se ha convertido en la opción más aconsejable debido a dos motivos fundamentales: aumentar la cantidad de agua disponible y reducir el nivel de contaminación ambiental al disminuir el volumen de descarga de aguas residuales (Lazarova et al., 2007, en Sala-Garrido et al., 2020).

A su vez, el saneamiento trae aparejada la generación de lodos, que es un problema económico y ambiental para el mundo, y que se incrementa proporcionalmente al incremento demográfico y de creación o mejora en el tratamiento de las PTAR.

Los lodos se contemplan como un residuo sólido urbano, que la mayoría de la población no sabe que existe, y la que conoce de su existencia, no cuenta con la información necesaria, por lo que desconfía de que su aprovechamiento o reutilización como materia prima para muchos propósitos sea benéfica (Rojas & Mendoza, 2012).

Dependiendo del tipo de saneamiento, el aumento de éste puede implicar un incremento del aumento de lodos provenientes de las PTAR. Los lodos son el producto de la

concentración de los sólidos contenidos en afluente y efluente, según la etapa del tratamiento en que se generen. Y el problema que trae aparejado este incremento de generación de lodos es que el vertido de estos puede originar severos problemas de contaminación.

Según Rizzardini, entre 1999 y 2009 la generación de lodos relacionados a las PTAR se incrementó un 50 % debido a las exigencias ambientales para el tratamiento de las aguas residuales con la finalidad de disminuir los impactos ambientales al ser descargadas en cuerpos de agua (Rojas & Mendoza, 2012).

Pérez Rocamora *et al.*, en 2017, estimó que en Uruguay la generación de lodos aumentaría un 96 % entre 2015 y 2030 y un 136 % para el 2045, detallando además que si bien, en 2015, las regiones que más generaban lodos eran las sureste y centro del país, para el año 2045 se espera que la mayor generación de lodos se de en el litoral norte con un 29 % de la generación nacional.

A su vez, los lodos tienen propiedades beneficiosas que pueden ser aprovechadas en la agricultura o en el mejoramiento de suelos porque contienen componentes valiosos como materia orgánica y nutrientes. De aquí deriva el otro propósito de esta tesis: analizar las alternativas de reutilización de estos lodos.

### *1.3. Objetivos generales y específicos*

El objetivo general de esta tesis consiste en analizar las oportunidades de reúso de efluentes y lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de Fray Marcos (Florida, Uruguay), evaluando su viabilidad ambiental, técnica y normativa. Para alcanzar este propósito, se plantean una serie de metas específicas orientadas a construir una comprensión integral del tema.

En primer lugar, se propone realizar una revisión del estado del arte y de las experiencias internacionales en materia de reúso de efluentes y lodos, con el fin de identificar las principales prácticas y aprendizajes y evaluar cuales de ellas son aplicables al contexto uruguayo.

En segundo lugar, se busca analizar las normativas y regulaciones existentes a nivel internacional, regional y nacional, con especial énfasis en los marcos que establecen los requisitos de calidad y las condiciones de uso para los distintos tipos de reúso. Asimismo, se pretende evaluar la calidad de los efluentes y lodos de la PTAR de Fray Marcos en relación con los estándares de reúso definidos por las normativas consideradas.

Finalmente, se aspira a formular recomendaciones y líneas de acción que contribuyan a fomentar la implementación del reúso en Uruguay, promoviendo una gestión sostenible y alineada con los principios de la economía circular.

#### 1.4. Organización del documento

El contenido de este documento se estructura en nueve capítulos. En el Capítulo 2 se presenta una revisión de la perspectiva internacional sobre la reutilización de efluentes y lodos, analizando cómo diferentes países gestionan estos recursos. El Capítulo 3 expone las principales alternativas de reutilización, abordando tanto las opciones para las aguas residuales como para los lodos. En el Capítulo 4 se analizan los aspectos vinculados a la confiabilidad y viabilidad del reúso, considerando factores técnicos, económicos y sociales. El Capítulo 5 revisa las normativas y reglamentaciones relevantes a nivel mundial, regional y nacional. Posteriormente, el Capítulo 6 reúne casos de estudio y experiencias recientes que aportan referencias prácticas al análisis. El Capítulo 7 describe la situación actual del saneamiento en Uruguay y los tipos de tratamiento implementados. El Capítulo 8 desarrolla el caso de estudio correspondiente a la PTAR de Fray Marcos, evaluando los resultados de calidad de efluentes y lodos. Finalmente, el Capítulo 9 presenta las conclusiones generales y las recomendaciones derivadas del trabajo, junto con posibles líneas de investigación futura.

## 2. Perspectiva internacional de reutilización de efluentes y lodos

La idea de este capítulo es tener una perspectiva de qué está pasando a nivel mundial con este tema y cómo gestionan los diferentes países el reúso de aguas residuales y lodos extraídos de las PTAR.

#### 2.1. Perspectiva internacional de reutilización de efluentes.

Es importante considerar que la motivación de buscar soluciones al tema de escasez del agua viene muy asociada a la necesidad de la región y/o país. Tanto es así que, en 1968, Namibia, considerado uno de los países africanos más áridos, se convierte en el primero en reciclar aguas residuales para el consumo humano (Maquet, 2020).

En Durban, Sudáfrica, el 98 % del agua salida de las plantas de tratamiento, es reutilizada en procesos de manufactura, lo que, como indica Maquet (2020), tiene sentido si se considera que construir un auto insume una huella hídrica de 400 mil litros de agua, confeccionar un pantalón jean, 11 mil litros de agua y hacer un teléfono, 1300 litros.

En Marruecos, específicamente en la ciudad de Tánger, desde 2015 se ha optado por introducir gradualmente el reúso de aguas residuales para el riego de campos de golf y espacios verdes municipales. En 2020 se lograron regar 225 hectáreas, 39 % de los espacios verdes de la ciudad, con un ahorro anual de 1.5 millones de m<sup>3</sup> de agua potable y tienen la ambición de llegar a los 325 millones de m<sup>3</sup> ahorrados anualmente para 2030 (Riffi Temsamani<sup>1</sup>, 2021).

---

<sup>1</sup> Vicepresidente del municipio de Tánger.

Además de África, Asia experimenta los procesos de urbanización más rápidos: para 2050, se proyecta que el 52 % de la población urbana mundial resida en Asia. A la vez, Asia presenta una de las disponibilidades de agua per cápita más bajas del mundo (sólo ~36 % de los recursos hídricos con ~60 % de la población), según datos del Banco Mundial/FAO-AQUASTAT y síntesis de ONU-Hábitat (Liao *et al.*, 2021).

Singapur, calificado por la FAO como un país con escasez de agua, cubre el 40 % de las necesidades con aguas residuales tratadas y la Agencia Nacional del Agua espera que el valor aumente a 55 % para el 2060. La mayor parte de esa agua se utiliza en la industria, pero una parte se utiliza como agua para consumo (Bassi *et al.*, 2023).

Si bien el Gobierno de China se ha fijado la meta de lograr que la reutilización de aguas recicladas en las ciudades a nivel de prefectura o superior que padecen escasez de agua sobrepase el 25 % para 2025, la implementación del reciclaje de agua ha sido problemática. En 2019, solo alrededor del 4 % de las aguas residuales de China se reciclaban (Neighbour, 2019).

La zona urbana de India genera 72.368 millones de litros de aguas residuales cada día, de los cuales solo el 28 % se trata y reutiliza. En 2023, un nuevo informe del Consejo de Energía, Medio Ambiente y Agua indica que el 80 % de las aguas residuales generadas por la India urbana tiene el potencial de ser tratada y reutilizada para fines no potables (Bassi *et al.*, 2023).

Sólo 10 estados de India cuentan con políticas instauradas de reutilización de aguas residuales. En Gujarat, las plantas de energía eléctrica térmica que se sitúan a menos de 50 km de una PTAR o en los límites de la ciudad tienen obligatoriedad de usar aguas residuales (Bassi *et al.*, 2023). En Karnataka, las industrias que se encuentran a menos de 30 km de una PTAR también están obligadas a priorizar el uso de agua tratada en sus procesos (Bassi *et al.*, 2023). En Gwalior hay una PTAR con capacidad de tratar 145 millones de litros de aguas residuales diarios, que utiliza casi la totalidad del agua tratada en irrigación (Kumar & Goyal, 2020). En Nagpur, desde 2015, se utilizan aproximadamente 200 millones de litros de aguas residuales diarias para la generación de energía térmica (Kumar & Goyal, 2020). Karnataka, además, reutiliza aguas residuales tratadas para la reconstrucción de humedales y aumento de nivel de ríos: desde 2018 se bombean 440 millones de litros de aguas residuales tratadas, desde Bengaluru hasta Kolar, que se encuentra a 53 km y es uno de los distritos más afectados en términos de sequía y cambio climático. Esta agua se distribuye luego en varios tanques locales y se usa principalmente para riego (Padmanabhan *et al.*, 2023).

Israel constituye un caso paradigmático en relación con el tratamiento y reutilización de agua residual. En este país, se trata el 93 % del agua residual producida (aproximadamente 470 millones de m<sup>3</sup>/año) y se reutiliza el 85 % del total de agua residual, lo que implica que anualmente se reutilizan aproximadamente 400 millones de m<sup>3</sup> (Ramón Sala-Garrido *et al.*, 2020).

Hoy en día se han creado más de 3.300 instalaciones de regeneración de agua a nivel mundial, en Japón (cerca de 1.800) y los Estados Unidos de América (cerca de 800) (Mendoza *et al.*, 2021).

Australia y la Unión Europea cuentan con 450 y 230 proyectos respectivamente. La zona mediterránea y el Medio Oriente tienen alrededor de 100 plantas, América Latina 50 y el África subsahariana 20, con diversos grados de tratamiento y para diversas aplicaciones. Entre tales aplicaciones se encuentran: riego agrícola, diseño urbano, usos recreativos, procesamiento y refrigeración industrial, producción indirecta de agua potable y como recarga de las aguas subterráneas (Intriago *et al.*, 2018, en Mendoza, 2021).

La Unión Europea incluyó el agua regenerada como parte de la economía circular considerándola un recurso hídrico alternativo para combatir la sequía y la escasez de agua. Sin embargo, la piedra angular en la implementación de agua regenerada para riego es el desarrollo del Reglamento EU-2020/741 requisitos mínimos para la reutilización del agua residual (Mesa y Berbel, 2020, en Mendoza, 2021).

En América Latina y el Caribe la agricultura es el mayor usuario de agua (Miralles & Muñoz, 2018). De acuerdo con Mahlkecht *et al.* (2020), se estima que, a nivel regional, 73 % de la extracción del agua se atribuye a la agricultura. Del total de superficie irrigada en América Latina y el Caribe, se estima que aproximadamente 10 % se encuentra dentro de los espacios urbanos, más de 30 % en un perímetro de 10 km alrededor de las ciudades y casi 50 % en un radio de 20 km (Mendoza, 2021).

En Chile, hasta 1990 el tratamiento de las aguas servidas era prácticamente inexistente, y la región del Gran Santiago vertía la totalidad de sus aguas servidas al río Mapocho (De la Peña *et al.*, 2022). El país emprendió, a nivel nacional, un plan para tratar las aguas servidas de todas las zonas urbanizadas que incluyó la construcción de dos plantas de tratamiento para el Gran Santiago (El Trebal y La Farfana), y de 12 plantas de tratamiento para las localidades urbanas ubicadas en la periferia. Actualmente, la mayor parte del agua tratada se reutiliza en agricultura (De la Peña *et al.*, 2022). Una parte pequeña del agua se reutiliza directamente por alimentación de canales de riego (canal Rinconada con entrega de 129.600 m<sup>3</sup>/día de agua tratada de la planta La Farfana), mientras que la mayor parte se utiliza indirectamente a través de las captaciones del río Mapocho al cual se vierten las aguas tratadas de las plantas (De la Peña *et al.*, 2022). Por otra parte, el canal Las Mercedes abastece una central hidroeléctrica y otras zonas agrícolas más alejadas. Por último, 10.368 m<sup>3</sup>/día del agua tratada se entrega como agua de reúso a una empresa minera mediante camiones (De la Peña *et al.*, 2022).

En Argentina, el Ministerio de Obras Públicas y la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica llevaron a cabo el Relevamiento Nacional de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales entre 2019 y 2020, con apoyo de Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe (CAF). El relevamiento permitió georreferenciar 600 plantas y evaluar in situ 376 de ellas, concentradas en localidades urbanas mayores a 10.000 habitantes. Los resultados evidenciaron que solo el 27,6 % de las aguas residuales recolectadas recibe un

tratamiento adecuado, mientras que el 38,9 % se trata de manera deficiente y un 6,9 % se descarga sin ningún tipo de tratamiento. Las experiencias identificadas muestran que solo el 1,75 % de las aguas residuales generadas son destinadas a algún tipo de reúso. De ese total, el 72 % se utiliza en cultivos forestales, mientras que los usos agrícolas alcanzan el 22 % y los reusos industriales el 6 % (DNAPyS, 2023).

En Cerro Verde, una zona muy árida del sur de Perú, en 2008 se presenta un caso particular donde la Sociedad Minera Cerro Verde, una minera, decide construir la PTAR La Enlozada, con el objetivo de aumentar el agua disponible para su actividad y así facilitar la expansión de sus operaciones. La PTAR trata y reusa el 100 % de las aguas residuales de la población de Arequipa. Si bien la motivación principal de construcción de esta planta fue la expansión de la actividad minera, sin comprometer el uso de agua del río que era para consumo humano, solo el 55 % de las aguas tratadas se utilizan con este fin, mientras que el 45 % restante es aprovechada por los agricultores para el riego de cultivos de la región (World Bank, 2018, en De la Peña et al., 2022).

Monterrey en México tiene un sistema de reúso que abarca 7 de las 52 PTAR de la zona. Esas 7 plantas suman un volumen total tratado de 1.072.025 m<sup>3</sup>/día, de los cuales un 58 % se utilizan para riego agrícola y 22 % se destinan a la industria, sirviendo a un total de 120 usuarios. La distribución del agua tratada se realiza por una red de 300 km, compuesta por diez líneas troncales y cinco puntos de suministros. Las principales actividades a las que finalmente se vuelca el agua de reúso son: torres de enfriamiento, mitigación de polvos, riegos de áreas verdes y generación de energía (De la Peña et al., 2022).

## 2.2. Perspectiva internacional de reutilización de lodos

El tratamiento de aguas residuales trae aparejado el crecimiento en la generación de lodos, que son el producto de la concentración de los sólidos contenidos en el efluente. Los lodos contienen gran cantidad de materia orgánica, microorganismos, macro y micronutrientes, metales y agua (Amador-Díaz et al., 2015).

Dentro de las estrategias más habituales que se están implementando a nivel mundial para la gestión y valorización del lodo se encuentran (Rodríguez et al., 2020), (Cortés, 2022), (OECD, 2025):

- La producción de energía a través de la generación de biogás por medio de digestión anaerobia, donde el biogás puede utilizarse como fuente de energía térmica, eléctrica o como biocombustible.
- Uso de lodos en la agricultura, donde los lodos tratados pueden transformarse en mejoradores de suelos ricos en nutrientes como nitrógeno y fósforo.

Un ejemplo de esto es la PTAR de Chennai, India, que desde 2020 ha implementado un programa para generar biogás. Son 7 plantas que con este sistema logran la recuperación de energía con capacidad total de 7 MW. Esta energía cubre el 50 % de las necesidades

energéticas que tienen las plantas para funcionar y el costo de la inversión realizada para adaptar las plantas para la generación de energía fue recuperado en 2,8 años (World Bank, 2023).

Senegal, hace 2 décadas empezó a sentar bases en la economía circular. La Oficina Nacional de Saneamiento de Senegal está convirtiendo los subproductos de aguas residuales y saneamiento en activos con la ayuda del sector privado. La empresa, además de generar biogás para producir electricidad y calefaccionar la planta, vende lodos fecales secos y estabilizados como mejoradores de suelos a los agricultores y floricultores de la zona, logrando así una economía de escala y la reutilización eficiente de los lodos (World Bank, 2022).

En el caso de la Unión Europea, en 2006 enfatizan en la promoción de reutilización y aprovechamiento de los lodos residuales, desde ese momento hasta 2012, se constató que al menos 7 países pertenecientes a la Comunidad Europea lograron reutilizar el 50 % de sus lodos como fertilizante agrícola, mejorador de suelos y materia prima para fábricas de composta (Rojas & Mendoza, 2012).

Según Kokkinos (2022), los países europeos están utilizando los lodos de las PTAR principalmente para fines agrícolas, como mejoradores de suelos o enmiendas del suelo. España es el país europeo más activo en el reciclaje de aguas tratadas: el Registro Nacional de Lodos estima que se llegan a producir 1,2 millones de toneladas de lodo al año.

En Uruguay se evaluó el potencial agronómico y sanitario de lodos urbanos provenientes de PTAR para su aplicación directa como enmienda orgánica en cultivos hortícolas. El estudio se realizó en el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) Las Brujas (Canelones) durante 2005–2007, utilizando lodos de la PTAR de OSE–Florida en un sistema de lechuga, un cultivo sensible a nitratos y contaminación microbiológica. Se compararon seis manejos: lodo fresco, lodo fresco con mulch<sup>2</sup> plástico, lodo “compostado” (mezcla con cáscara de arroz, estacionada a campo), cama de pollo, cama de pollo con mulch, y fertilización química (convencional). La experiencia pudo demostrar que los lodos urbanos, frescos o compostados, pueden sustituir parcialmente la fertilización mineral en hortalizas de ciclo corto, manteniendo la inocuidad bajo condiciones controladas y con mejoras de rendimiento cuando se combina con mulch (Gilsanz et al., 2012).

En León, Guanajuato México, desde 2011 la PTAR de la localidad cuenta con un sistema de cogeneración para la producción de energía y la utilización del calor producido durante la digestión. La energía producida es suficiente para satisfacer el 75 % de la demanda energética necesaria para la operación de la PTAR (Rojas & Mendoza, 2012).

---

<sup>2</sup> También llamado acolchado o mantillo, es una capa protectora que se aplica sobre la superficie del suelo, en jardines y huertos, utilizando materiales tanto orgánicos (como hojas, paja, compost o corteza) como inorgánicos (como rocas o plástico). Su función principal es conservar la humedad del suelo, regular su temperatura, controlar las malas hierbas y, en el caso del mulch orgánico, fertilizar la tierra gradualmente al descomponerse.

La PTAR de Atotonilco trata el 60 % de las aguas residuales de Ciudad de México. Los lodos de esta planta son utilizados para generar 32,4 MW de energía, lo que cubre un 62 % de la demanda eléctrica de la planta; también se reutilizan en agricultura, forestación y mejoramiento de suelos. Se estima además que se ha logrado disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) hasta en 145.000 toneladas anuales de CO<sub>2</sub>eq (EnRes, 2018, World Bank, 2018).

En San Paulo, Brasil, la empresa Tera Ambiental se especializa en el compostaje termofílico de lodos en escala industrial. La planta cuenta con una instalación cubierta de 30.000 m<sup>2</sup>. La empresa reportó un aumento de casi 82 % de ventas en 2021, que atribuyó a la creciente demanda del mercado por productos sostenibles y obtenidos a partir de procesos ambientalmente adecuados (ArqBrasil, 2021).

En la PTAR La Farfana, en Santiago de Chile, se estima una generación de biogás de 25 millones m<sup>3</sup>/año, de los cuales al inicio solo se utilizaba el 24 % para calentar digestores y el resto era quemado en antorchas. En 2002, Aguas Andinas encargado de la operación de La Farfana firma un acuerdo con Metrogas para aprovechar la producción de gas; en 2009 se inicia un sistema de purificación, compresión y transporte del biogás mediante un gasoducto de 13,5 km que unía La Farfana con Metrogas. El proyecto además evito la emisión de 138.500 toneladas de CO<sub>2</sub>eq entre 2011 y 2018, lo que permitió una financiación en bonos verdes y corporativos (World Bank, 2019).

También existen otras opciones para la revalorización; según Andreola *et al.* (2005), la construcción podría absorber parte de los lodos y convertirlos en materia prima para el sector. Una de las preocupaciones que genera el reúso de lodos para materiales de construcción es la pérdida de algunas propiedades como resistencia a la compresión, absorción, durabilidad, aislamiento térmico y acústico. Esta perspectiva ha venido cambiando con las investigaciones (Babu y Ramana, 2013; Hegazy, *et al.*, 2012; Victoria, 2013) que reportan los efectos positivos en las propiedades tales como menor peso, baja densidad, mejoras en las propiedades mecánicas con porcentajes de adición específicos, bajo consumo de energía, entre otros (en Fuentes *et al.*, 2019).

En 2019, en la Universidad de la Guajira, Colombia, se realiza un estudio donde lograron demostrar mejoras en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los ladrillos. Por lo tanto, los resultados fortalecen la estrategia de aprovechamiento de los lodos generados en las PTAR como adicción de remplazo de arcilla para la elaboración de matrices cerámicas. Además de la evidencia de excelentes resultados físico-mecánicos de los ladrillos, representa beneficios ambientales importantes porque los contaminantes de origen orgánico (nutrientes, materia orgánica y agentes patógenos) resultan inactivos al momento de la cocción y los metales permanecen encapsulados evitando así su mal manejo e inadecuada disposición final (Fuentes *et al.*, 2019).



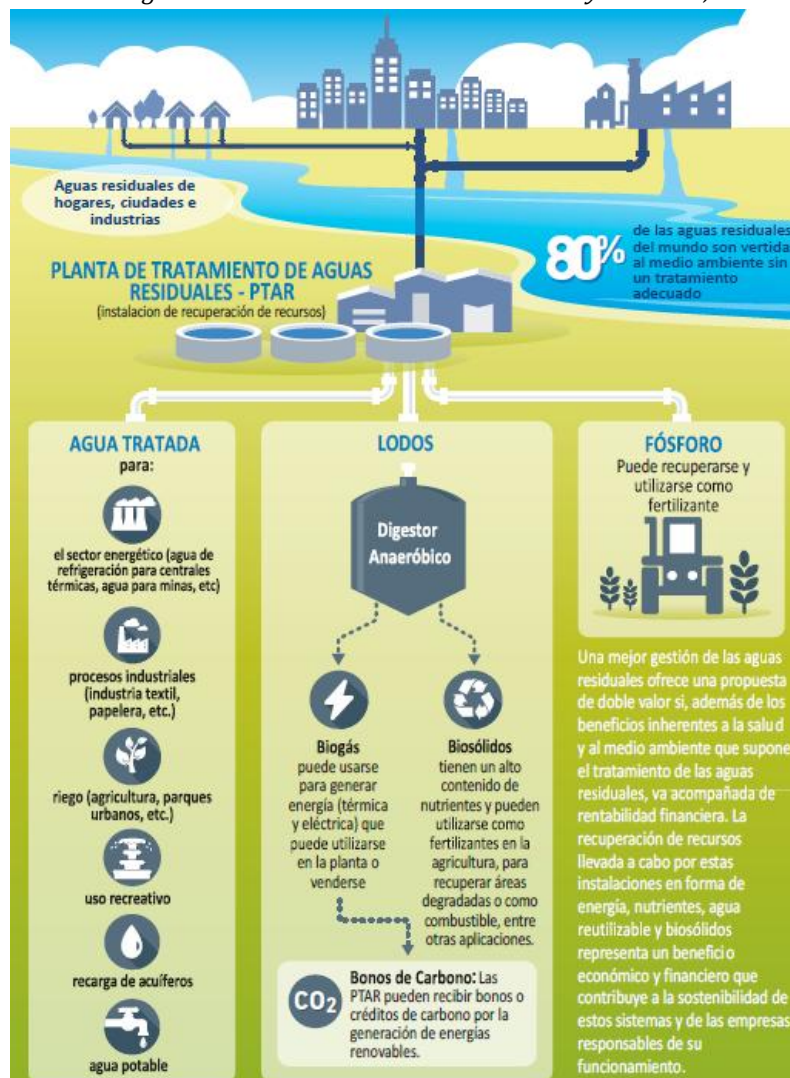
### 3. Alternativas de reutilización

Además de los beneficios ambientales y para la salud que ofrece el tratamiento de aguas residuales, se ha demostrado que es posible lograr ingresos financieros que cubran total o parcialmente los costos de operación y mantenimiento de las PTAR a través de propuestas de reutilización o generación de subproductos (De la Peña *et al.*, 2022).

Este capítulo pretende mencionar las posibilidades de reutilización que pueden lograrse al realizar una gestión de las aguas residuales pensando en una economía circular. En la Figura 3.1 se muestran las alternativas de recuperación de recursos de una PTAR.

**Figura 3.1 – Recuperación de recursos en PTAR**

Fuente: *El reúso de agua residual tratada en América Latina y el Caribe*, De la Peña 2022



*Nota: La figura ilustra el concepto de una PTAR como instalación de recuperación de recursos. El esquema muestra cómo a partir del tratamiento de aguas residuales se obtienen subproductos valorizables: agua tratada, lodos y fósforo.*

### 3.1. Alternativas para aguas residuales

El principal uso del agua a nivel mundial es en agricultura (Boretti & Rosa, 2019). El agua de alta calidad es cada vez más escasa (Vasilyev & Domashenko, 2018). Por ende, los recursos hídricos deben ser utilizados sosteniblemente y una de las propuestas para lograrlo han sido las aguas residuales (Jaramillo y Restrepo, 2017, en Mendoza *et al.*, 2021).

Es importante destacar, que la sobre explotación de los recursos de agua dulce se ha derivado en gran medida del crecimiento de la demanda agropecuaria (incluida la irrigación, la ganadería y la acuicultura). La agricultura es el mayor consumidor de agua, dado que representa 70 % de las extracciones anuales de agua a nivel mundial principalmente para la producción de alimento, fibras y para el procesado de productos agrícolas (Weinzettel & Pfister, 2019). Por otro lado, la industria (incluyendo la generación de energía) explica 19 % y los hogares 12 % (Bijl *et al.*, 2016). Por lo tanto, es probable que la porción de la agricultura en el uso total de agua disminuya en comparación con otros sectores, pero seguirá siendo el mayor usuario en general en las próximas décadas (Mendoza *et al.*, 2021).

Una gama diversa de factores tanto económicos, institucionales, ambientales, tecnológicos y sociológicos impulsan la reutilización de aguas en los países desarrollados y en los países en desarrollo. A pesar de eso, existen problemas comunes como el aumento de la población y la demanda de alimentos, escasez de agua y preocupación por la contaminación ambiental. Estos factores hacen que el agua regenerada sea un recurso potencialmente valioso (Mendoza *et al.*, 2021).

La regeneración y reutilización de agua se ha convertido en la opción más aconsejable debido a dos motivos fundamentales: aumentar la cantidad de agua disponible y reducir el nivel de contaminación ambiental al disminuir el volumen de descarga de aguas residuales (Lazarova *et al.*, 2007, en Sala-Garrido *et al.*, 2020). Incluso, la Unión Europea (UE) identificó en 2012 la insuficiente reutilización del agua como responsable de su escasez (Helmecke *et al.*, 2020). Además, hay otros motivos que justifican la reutilización del agua residual tratada como medio de aumentar la cantidad de recursos hídricos disponibles frente a otras alternativas como los trasvases o la desalinización: la reutilización resulta ser más estable, emplear menos consumo de energía sin ceder calidad en aquellos usos para los que se destina y ser más barata, y todo a pesar de que el coste de la reutilización ofrece una alta variabilidad en función de diferentes factores a los que está condicionado y que involucran aspectos tales como el origen del agua a tratar y, el posterior fin concreto al que sea destinada (Jordar-Abellán *et al.*, 2019, en Sala-Garrido *et al.*, 2020).

En cualquier caso, la reutilización presenta una importancia crucial dentro del modelo de gestión hídrico para reducir costos económicos y ambientales en el proceso, al ser una opción más económica y de mayor calidad ambiental que otras alternativas (Jordar-Abellán *et al.*, 2019, en Sala-Garrido *et al.*, 2020).

Las aguas residuales tratadas pueden ser utilizadas para una amplia variedad de usos municipales, industriales, agrícolas, recreativos y para la recarga de acuíferos, lo que promueve un uso sostenible del agua y el uso racional del agua potable.

1. Uso agrícola y en jardinería: riego de cultivos y zonas verdes
  - 1.1. Beneficios para el suelo: el reúso de aguas residuales en la agricultura reduce la presión sobre las fuentes de agua dulce. También contribuye al aumento de la disponibilidad de nutrientes y metales en el suelo, mejorando su capacidad de intercambio catiónico y estabilizando su estructura, además de incrementar el contenido de materia orgánica disponible para los cultivos (Jaramillo, 2020).
  - 1.2. Recuperación de suelos degradados: las aguas residuales pueden utilizarse para la recuperación, restauración o mejoramiento de suelos degradados (Ospina López *et al.*, 2017).
2. Usos urbanos e industriales
  - 2.1. Los usos urbanos se refieren a la aplicación de aguas residuales tratadas en diversas actividades dentro de las ciudades y áreas residenciales, donde no se requiere agua potable. Estos usos ayudan a reducir la demanda de agua dulce para fines no esenciales y a mantener los espacios verdes.
    - 2.1.1. Limpieza urbana: incluye lavado de calles, alcantarillados, vehículos entre otros (Martin & Fay, 2020).
    - 2.1.2. Riego de áreas verdes: Esto abarca el riego de césped, jardines (públicos y residenciales), parques, áreas verdes y campos de golf (Tello *et al.*, 2016).
    - 2.1.3. Usos recreativos y ornamentales: mantenimiento de lagos o humedales, lagunas artificiales y fuentes ornamentales (Martin & Fay, 2020).
    - 2.1.4. Control de polvo: en vías de comunicación y en la industria de la construcción (Tello *et al.*, 2016).
  - 2.2. El sector industrial es uno de los mayores consumidores de agua dulce (Tello *et al.*, 2016). El reúso de aguas residuales tratadas en la industria representa una alternativa crucial para reducir la presión sobre las fuentes de agua dulce y optimizar los recursos.
    - 2.2.1. Sistemas de enfriamiento: especialmente en torres de refrigeración, que requieren grandes volúmenes de agua (De la Peña *et al.*, 2022).
    - 2.2.2. Calderas: uso en procesos de generación de vapor para calderas (Tello *et al.*, 2016 y De la Peña *et al.*, 2022).
3. Recarga de acuíferos y restauración ambiental: ambas aplicaciones, son esenciales para la sostenibilidad hídrica y la resiliencia frente a los desafíos del cambio climático, y deben integrarse en una planificación a nivel de cuenca que considere la economía circular y la valoración de las aguas residuales como un recurso (PROSAP, 2014).
  - 3.1. Recarga artificial de acuíferos: consiste en el uso de mecanismos subterráneos naturales, como la filtración en la margen del río y el tratamiento a través del suelo y el acuífero, para mejorar la calidad del agua recargada (superficial, pluvial, reciclada) antes de su reutilización. El agua se infiltra mediante embalses, se

- inyecta en el acuífero o se capta en pozos adyacentes a ríos (Hettiarachchi & Ardakanian, 2017).
- 3.2. Reúso en restauración ambiental: se refiere a la aplicación de agua residual tratada en proyectos y actividades destinadas a la recuperación y mejora de los ecosistemas (Tello *et al.*, 2016 y De la Peña *et al.*, 2022).
    - 3.2.1. Recuperación del ambiente: utilización de agua de reúso para la implementación de proyectos que recuperen o mejoren el estado ecológico de cuerpos de agua y áreas naturales (Tello *et al.*, 2016 y Cortes Latorre, 2022).
    - 3.2.2. Mejora de la calidad de los ecosistemas acuáticos: reducir la contaminación y salvaguardar los ecosistemas acuáticos al minimizar los desechos vertidos (Saravia *et al.*, 2022).
    - 3.2.3. Aumento de caudales de ríos: incrementar el flujo de los ríos, lo que puede mejorar su calidad (Martin & Fay, 2020 y PROSAP, 2014).
  4. Agua potable: implica transformar las aguas residuales en agua segura para el consumo humanos (Martin & Fay, 2020).
    - 4.1. Reúso potable indirecto (RPI): se refiere a aguas residuales altamente tratadas que reciben un tratamiento natural adicional en un acuífero o un humedal (conocido como "buffer ambiental"). Posteriormente, esta agua se extrae, se trata hasta alcanzar los estándares de agua potable y se distribuye directamente a hogares y empresas para todos los fines (Martin & Fay, 2020)
    - 4.2. Reúso potable directo (RPD): implica que las aguas residuales se tratan directamente hasta alcanzar los estándares de agua potable y luego se envían a hogares y empresas para todos los fines (Saravia *et al.*, 2022). Esto puede incluir la mezcla del agua tratada con el agua de una fuente determinada para un tratamiento posterior, o incluso la mezcla directa en la tubería con el agua potable (Tello *et al.*, 2016).

En resumen, la reutilización de efluentes residuales es una estrategia clave para abordar la escasez de agua, reducir la contaminación y promover la economía circular, ofreciendo soluciones sostenibles en agricultura, industria, usos urbanos y recuperación de energía y nutrientes.

### 3.2. Alternativas para lodos

Los lodos son residuos generados en grandes cantidades durante los procesos de tratamiento de aguas residuales y, si no se gestionan adecuadamente, representan un grave problema de contaminación para el suelo, el agua y el aire. Sin embargo, la gestión de lodos se está transformando para recuperar y valorizar estos "residuos", convirtiéndolos en recursos valiosos en el marco de una economía circular (Tello *et al.*, 2016).

A continuación, se presentan las principales alternativas de reutilización para los lodos:

1. Uso agrícola y mejoramiento de suelos: los lodos tratados, denominados biosólidos, son una fuente valiosa de materia orgánica y nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio. Su aplicación es una de las prácticas más habituales y prioritarias en la gestión de lodos (Oropeza García *et al.*, 2006).
  - 1.1. Mejoradores y acondicionadores de suelos: pueden ser utilizados como mejoradores de suelos agrícolas para incrementar el rendimiento de los cultivos, a veces hasta en un 10-85 % en comparación con fertilizantes comunes. También actúan como acondicionadores físicos del suelo, mejorando características como la porosidad y la infiltración, y aumentando la resistencia a la erosión (Rojas & Mendoza, 2012).
  - 1.2. Recuperación de suelos degradados: contribuyen a la recuperación, restauración o mejoramiento de suelos degradados, incluyendo aquellos con problemas de salinidad y alcalinidad (Rodríguez *et al.*, 2020).
  - 1.3. Áreas verdes y forestales: se utilizan en zonas verdes como cementerios, separadores viales, campos de golf, lotes vacíos, jardines, antejardines, patios, plantas ornamentales, arborización y también son aptos para plantaciones forestales (Benavente y Castro *et al.*, 2023).
  - 1.4. Control de contaminación: en algunos casos, los lodos tratados se utilizan para frenar la contaminación de acuíferos por productos fitosanitarios y sus impurezas, y para acelerar la descontaminación de suelos afectados (Oropeza García *et al.*, 2006).
  - 1.5. Compostaje: pueden ser empleados para compostaje (Rodríguez *et al.*, 2020).
2. Recuperación de nutrientes específicos: además del uso general como fertilizante, ciertos nutrientes valiosos pueden ser extraídos de los lodos para su comercialización (Saravia *et al.*, 2022).
  - 2.1. Fósforo: este puede extraerse de los lodos y venderse como fertilizante (Rodríguez *et al.*, 2020).
  - 2.2. Nitrógeno: también se puede recuperar, especialmente de las cenizas de incineración de lodos (Saravia *et al.*, 2022).
3. Recuperación energética: los lodos pueden ser una fuente valiosa para la generación de energía, contribuyendo a la autosuficiencia energética de las plantas de tratamiento o entregando energía a la red y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Rodríguez *et al.*, 2020).
  - 3.1. Producción de biogás: la digestión anaerobia de los lodos es una tecnología adecuada para la obtención de biogás, que tiene un contenido de metano de aproximadamente 60 %. Este biogás puede ser utilizado para generar energía térmica, eléctrica o como biocombustible, lo que permite el autoconsumo en las propias plantas de tratamiento y contribuye a la neutralidad climática y la economía circular (Rojas & Mendoza, 2012).
  - 3.2. Combustible: los lodos deshidratados pueden servir como combustible en hornos para generar energía eléctrica, lo que además reduce los desechos al mínimo (Cortes Latorre, 2022).

4. Materiales de construcción: pueden ser procesados para utilizarse en la fabricación de materiales de construcción (Rodríguez *et al.*, 2020).
  - 4.1. Cerámicos y ladrillos: la incorporación de lodos en la producción de cerámicos, como ladrillos y tejas, es una aplicación frecuente y prometedora. Los estudios indican que los lodos pueden sustituir parcialmente la arcilla, lo que reduce el consumo de este recurso mineral (Iglesias Gordillo *et al.*, 2024)
  - 4.2. Hormigón y cemento: se ha demostrado la viabilidad de utilizar lodos en la producción de hormigón de baja resistencia y como adición mineral en cemento Portland, sustituyendo parte del cemento en pastas y morteros (Bezerra *et al.*, 2022).
  - 4.3. Eco-bloques: mediante procesos avanzados de deshidratación y moldeo, los lodos pueden servir como base para la construcción de eco-bloques, ya que son excelentes aislantes térmicos (Kokkinos *et al.*, 2022).

Es fundamental destacar que, para cualquier forma de reutilización, los lodos deben someterse a un tratamiento adecuado que reduzca su volumen, el contenido de patógenos y asegure la estabilidad de la materia orgánica, así como el cumplimiento de los límites máximos permisibles de contaminantes como metales.

La transformación de lodos en biosólidos y su posterior reúso representa una oportunidad clave para la gestión sostenible de las aguas residuales, impulsando la economía circular y generando valor a partir de lo que antes era un desecho (Tello *et al.*, 2016).

Además, cabe destacar que, aunque existen múltiples alternativas de reutilización, la viabilidad económica y la existencia de normativas específicas son factores clave para su implementación a gran escala.

## 4. Confiabilidad y viabilidad en la reutilización

El limitado aprovechamiento de las aguas residuales tratadas se atribuye a varios factores, entre los que se destacan: la falta de un marco normativo y regulatorio adecuado que defina, con claridad, las facultades de los actores sectoriales para el aprovechamiento de las aguas residuales; la falta de conocimiento y/o experiencia sobre el potencial de reusar el agua tratada a nivel técnico y político; la falta de programas institucionales y de financiamiento que promuevan y apoyen estas prácticas; la desconfianza que puede existir, entre la población, para el reúso de agua residual tratada en actividades productivas; y, por último, la incertidumbre financiera en la inversión pública y privada. (De la Peña *et al.*, 2022).

Los puntos antes mencionados podrían abarcarse en dos grandes subgrupos, (i) la confianza del público y la aceptación social del reúso y (ii) la gobernanza y economía, donde se detallen los vacíos, las limitaciones y las oportunidades.

Resaltar frente a esto, que las aguas residuales no deberían ser vistas como una carga para los gobiernos y la sociedad, sino como una oportunidad económica que puede convertirse en un recurso valioso (Rodríguez *et al.*, 2020).

### 4.1. La confianza del público y la aceptación social

Antes de ser técnico y regulatorio, el desafío de la reutilización del agua es antropológico y cultural, ya que conduce a cambiar una división entre “lo puro” y “lo impuro” establecida desde hace más de un siglo.

Desde la construcción de infraestructuras de agua y saneamiento, mujeres y hombres han tenido una relación con el agua simbólicamente lineal: por un lado, obtenemos agua pura, por otro, arrojamus nuestros excrementos impuros. La historia de la construcción de las redes de agua ha consistido desde ese entonces en separar los flujos. Es por ello que el reciclaje de las aguas residuales toca un fuerte desafío cultural ya que aspira a hacerlos encontrarse de nuevo, convirtiéndolo en un ciclo cerrado.

Para responder a este nuevo momento cultural, las técnicas están disponibles. Fueron probadas durante más de 40 años principalmente en los países donde el agua es más escasa. Los expertos hablan de que la reutilización de aguas residuales tratadas ha llegado a la madurez en un momento en que, con la escasez de agua dulce, su utilidad se vuelve más palpable. El desafío ahora es su amplio despliegue, para satisfacer las necesidades de agua de las personas y de la naturaleza (Veolia – Relato 6, s.f).

Las percepciones negativas sobre el reúso de efluentes y de los otros subproductos provenientes de las aguas residuales no se han contrarrestado de manera adecuada. Es necesario conciencia pública y campañas de educación para desarrollar la confianza y

cambiar las percepciones de la población respecto al uso de subproductos reciclados a partir de los desechos humanos (Rodríguez *et al.*, 2020).

En 2009, Rodríguez *et al.*, presentan en el artículo “Indirect Potable Reuse: A Sustainable Water Supply Alternative” un estudio basado en 14 proyectos de reúso indirecto de agua potable bien documentados (varios anteriores a 1980), que abarcaban poblaciones de entre 60.000 a 2,3 millones de habitantes en el que estudiaron entre otras el efecto sobre la salud de los pobladores que consumían el agua residual tratada. Entre los estudios epidemiológicos se descarta evidencia de asociación entre agua reciclada, cáncer, mortalidad, enfermedad infecciosa y/o eventos adversos de nacimiento, mientras que los estudios toxicológicos, realizados en su mayoría con animales descartan efectos adversos relacionados a toxicidad subcrónica/crónica, reproductiva y carcinogénesis atribuibles al agua reciclada.

Para avanzar en prácticas de reúso, es necesario promocionar a través del entendimiento, basado en evidencia, las posibilidades con las que se cuenta. Se requiere nuevas formas de sensibilización para modificar las creencias de que el reúso de aguas residuales acarrea riesgos para la salud (DNAPyS, 2023).

Un rol proactivo de la sociedad civil es eficaz para disminuir conflictos. Es importante para este punto la comunicación, concientización y transparencia de los proyectos presentados principalmente en materia de salud, productividad y ambiente. Es necesario que quienes lideran los proyectos de reutilización, sean estatales o privados, tengan en cuenta que es necesaria la intervención de actores que expliquen los proyectos, sus beneficios y que actúen como articuladores y reguladores de los trabajos frente a la sociedad (De la Peña *et al.*, 2022).

Sin embargo, no se puede ignorar el hecho de que los proyectos que implican la reutilización de aguas residuales pueden ser motivo de preocupación. El reciclaje equivale a la reutilización de desechos y, sin importar su potencial, para algunas personas esto sigue siendo inaceptable por ciertas razones religiosas o culturales. En todos los casos, este tipo de proyectos deben estar respaldados por una gama completa de medidas educativas y de concientización, que son fundamentales para ganarse la confianza de todas las partes interesadas (Maquet, 2020). Nuevamente se remarca que responder a las inquietudes de la comunidad es absolutamente crucial.

Un cambio terminológico deliberado también podría ayudar, por ejemplo, la imposición a nivel cultural de nuevos términos, como hablar de aguas regeneradas, introduce no sólo un cambio de paradigma a nivel de gestión de recursos hídricos, sino también un cambio en la percepción del público respecto a las aguas residuales tratadas, porque esta denominación las presenta de una forma más positiva y contribuye a la aceptación de las actividades de reúso al eliminar la connotación de peligrosidad de las aguas (Cortes, 2022).



En esta misma línea, de acuerdo con un estudio de percepción realizado en Estados Unidos en 2002, el desconocimiento de la gente sobre la existencia de los lodos residuales y su rechazo a ser reutilizados ocasionaron se haya acordado que los lodos residuales que pueden aprovecharse benéficamente se denominen “biosólidos”; con la intención de no ser tipificado como un residuo negativo (Beecher *et al.*, 2005 en Rojas & Mendoza, 2012).

#### *4.2. Gobernanza y economía del reúso: vacíos, limitaciones y oportunidades*

La viabilidad de los proyectos de reutilización de lodos y efluentes es multifactorial y requiere un enfoque integral. Se requiere una perspectiva que además del reúso en sí mismo, considere las ciudades y el ambiente dado que los tres son interdependientes del ciclo del agua y por tanto es necesaria la consideración de las sinergias y la integración entre ellos para que un proyecto de reúso tenga sentido (PROSAP, 2014).

Sin embargo, la mayoría de los servicios de saneamiento y tratamiento de aguas residuales todavía se piensan y planifican de manera lineal. Habitualmente se planifica en primera instancia el suministro de agua, luego los sistemas de alcantarillado y por último se suelen considerar los insumos energéticos que estos requieren (Rodríguez *et al.*, 2020).

La tendencia debería ir hacia planes de reúso de las aguas tratadas, tal que se incluya el aprovechamiento integral de los recursos hídricos dentro del ciclo de vida del agua. El cambio de paradigma se tiene que hacer considerando que donde los recursos hídricos son particularmente escasos, el reúso coincide con dos objetivos fundamentales: protección a la salud y gestión ambiental de recursos hídricos (Ministerio del Ambiente Perú, s. f.).

El cambio en la forma de planificar y analizar la cantidad y calidad de agua, y empezar a verlo en forma integral conduce a soluciones que son más sostenibles financiera, social y ambientalmente. Este enfoque permite un aprovechamiento óptimo de instalaciones y programas de saneamiento que incluye la ubicación estratégica de las plantas y de las distintas etapas de infraestructura necesarias. Además, permite diseñar normas basadas en contextos específicos en lugar de normas uniformes o arbitrarias para todo un país o región (Rodríguez *et al.*, 2020).

El saneamiento a nivel mundial es un bien público, que necesita de la financiación pública para que todos puedan gozar de los beneficios que aporta en la mejora de la salud, así como el desarrollo social y económico. La regulación adecuada de toda la cadena de saneamiento es esencial para garantizar que todo el mundo aproveche sus beneficios (UNICEF y OMS, 2020).

La coordinación multisectorial entre los diferentes actores del estado, las empresas privadas, los investigadores y los beneficiarios de los proyectos de reúso es fundamental. Las plataformas conformadas por grupos de interés múltiples buscan desarrollar

consenso entre necesidades que compiten entre sí y objetivos comunes para la sociedad y las cuencas hidrográficas (Rodríguez *et al.*, 2020).

Además de la planificación integral de la que se habla anteriormente, también es necesario un marco político, institucional y regulatorio que integren saneamiento y reúso en políticas y planes gubernamentales.

Las iniciativas de política, institucionales y regulaciones (PIR) pueden promover o convertirse en una barrera para los proyectos de reutilización y recuperación de recursos. Es necesario un gobierno que establezca un precio correcto para el uso de agua dulce y genere incentivos para el uso de agua residual tratada. También la promoción de la generación de energía en las plantas de tratamiento como parte de su cartera de recursos renovables (Rodríguez *et al.*, 2020).

La política planteada por los gobiernos debe ser específica sobre qué temas desea resolver. Esta debe incluir una razón clara para la reutilización y recuperación de los recursos que puedan integrarse a un marco jurídico, institucional y regulatorio. La especificidad de las políticas podría incrementar la posibilidad de una ejecución exitosa y reducir las posibilidades de imitación (Rodríguez *et al.*, 2020).

En la mayoría de los países de América Latina y el Caribe, los productos secundarios (agua residual tratada, energía y biosólidos) no están claramente regulados y no tienen un valor o precio claro; esto desincentiva a los inversionistas privados de participar en proyectos para convertir los residuos en recurso (Rodríguez *et al.*, 2020). Es necesario que el Estado estimule el uso de los productos secundarios, como biosólidos en agricultura o venta de electricidad a la red, para incentivar a las empresas a desarrollar el negocio. Este punto también se fortalece desincentivando el uso de recursos indispensables, por ejemplo, aumentando los costos del agua dulce para usos industriales o riego, logrando que el agua residual tratada se vuelva más atractiva por su costo.

Es importante destacar que se requieren tanto regulaciones técnicas que protejan la salud y seguridad humana y ambiental, como las regulaciones económicas.

El apoyo institucional hacia los esquemas de reúso de aguas tratadas es un aspecto clave para el éxito de las gestiones. Un análisis de 10 casos realizados por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en 2022 demuestra que el reúso de aguas tratadas debe ser una cuestión de Estado, donde éste facilite la gestión de los proyectos desde diferentes puntos como: mejoras en las tasas de préstamos y mayores plazos de concesión a los privados para el desarrollo de estos proyectos o en su defecto mayores porcentajes de financiación pública, así como también generando un marco regulatorio sólido y claro basado en conocimientos técnicos (De la Peña *et al.*, 2022).

Todo en conjunto, perseguirá los fines de garantizar que las aguas regeneradas sean seguras para el riego, la salud humana y animal, promover la economía circular y contribuir a alcanzar los ODS de la Agenda 2030.

Para garantizar la viabilidad de la reutilización, requiere abordarse este tema bajo un enfoque estructural y no como actuaciones puntuales de carácter coyuntural. En otras palabras, una planta de tratamiento debe ser considerada como una fuente de agua de calidad y, como tal, debe incluirse dentro de la estrategia de adaptación al cambio climático contribuyendo a paliar los efectos de la escasez hídrica. Para garantizar la viabilidad de la reutilización en un ámbito territorial deben, por un lado, incorporarse las plantas de tratamiento como fuentes de agua dentro de la planificación hídrica y, por otro lado, utilizar el sistema tarifario para la financiación de las inversiones requeridas (Sala-Garrido *et al.*, 2020).

Todo parece estar reunido para superar en los próximos años estas barreras, mezclando los usos de manera oportuna, entre fines agrícolas, industriales, de ocio y de seguridad urbana (limpieza, espacios verdes, defensa contra incendios, entre otros), de abastecimiento de agua potable o para fines ambientales (recarga de acuíferos y zonas húmedas). Sin más, la propuesta de modificación del decreto 253/79 de nuestro país, que se encuentra en este momento en consulta pública, tiene énfasis en la protección ecosistémica desde una visión de cuenca, avanzando en la incorporación de prevención, uso sostenible y economía circular (COTAMA y GESTA Agua, 2025). Esto podría considerarse como un indicio de que el gobierno uruguayo está poniendo sobre la mesa algunos temas de mejora ambiental.

El reúso seguro de lodos y efluentes de plantas de tratamiento es una necesidad imperativa para enfrentar la crisis hídrica global y avanzar hacia una economía circular. Para lograrlo, es fundamental trascender la visión tradicional del agua residual como un problema y adoptarla como un recurso valioso. Esto implica superar los desafíos relacionados con la aceptación social mediante la comunicación transparente y la participación ciudadana, establecer marcos políticos y regulatorios claros que incentiven la inversión, desarrollar modelos financieros innovadores y fortalecer las capacidades técnicas y la recopilación de datos para una gestión informada y sostenible. La implementación de estas acciones conjuntas es necesaria para garantizar un futuro con agua segura, salud pública protegida y ecosistemas saludables.

## 5. Normativas y reglamentos considerados a nivel mundial, regional y nacional

### 5.1. Metodología para la selección, revisión y comparación de normativas

La selección de las normativas analizadas en este capítulo se realizó con el propósito de identificar marcos regulatorios que establezcan criterios de calidad para el reúso de efluentes tratados y lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales. Dado que Uruguay no cuenta actualmente con una normativa específica que regule el reúso de estos subproductos, el análisis comparativo se orientó a determinar los valores de referencia más representativos que permitan evaluar la factibilidad del reúso en el contexto nacional.

En particular, se priorizó el estudio de aquellas normativas que establecen parámetros de calidad para el reúso de aguas residuales en riego agrícola y de las reglamentaciones específicas sobre el reúso de lodos como mejoradores de suelos. La elección de estas categorías responde a que ambos usos representan las alternativas de aplicación más viables y de implementación potencialmente inmediata en Uruguay, considerando las condiciones climáticas, los tipos de cultivo predominantes y la infraestructura existente.

Para el caso de las aguas residuales tratadas, se revisaron las normativas internacionales y regionales que diferencian los niveles de calidad del agua en función del tipo de riego permitido. Con el fin de establecer una base comparativa uniforme, se seleccionaron los valores correspondientes a la calidad superior del agua, es decir, aquella que permite su uso en riegos sin restricciones, incluyendo cultivos alimentarios que puedan ser consumidos crudos.

En cuanto a los lodos generados en las PTAR, se analizaron las regulaciones que contemplan su aprovechamiento agrícola como mejoradores de suelos. Estas normativas establecen límites máximos permitidos para metales pesados y agentes patógenos, diferenciando los niveles de calidad según el tipo de cultivo y el grado de exposición humana asociado. En este caso, se consideraron los valores límite aplicables a lodos de clase o categoría superior, aptos para su utilización sin restricciones, en consonancia con los estándares más exigentes en materia sanitaria y ambiental.

El análisis comparativo resultante permite identificar coincidencias, divergencias y vacíos entre los distintos marcos normativos, ofreciendo una referencia útil para la eventual elaboración de una reglamentación nacional que regule el reúso de efluentes y lodos en Uruguay.

### 5.2. Normativas y reglamentos para reúso de aguas residuales

A nivel mundial se podrían considerar tres organismos y directivas claves: Organización Mundial de la Salud (OMS) con las Directrices sobre uso de aguas residuales en la agricultura y otras aplicaciones (2006), ISO 16075 que establece valores de referencia

internacionales para el uso de aguas residuales tratadas en la agricultura y otros sectores (2020) y el Reglamento de la Unión Europea 2020/741 que establece requisitos mínimos para la reutilización del agua, con el objetivo de garantizar que las aguas regeneradas sean seguras para el riego agrícola.

El Reglamento de la UE es un documento específico para los Estados que integran la UE; deja establecida la responsabilidad de los operadores en el control y la frecuencia con que se deben realizar los controles. Mientras, las Directrices de la OMS son meramente de orientación para que cada país realice la implementación y establezca sus propios mecanismos de monitoreo según sus necesidades y capacidades. En el caso de la ISO 16075 se trata de recomendaciones técnicas sobre la supervisión de la calidad del agua que será utilizada con fines de riego.

Los tres se basan en la necesidad de proteger la salud pública al reutilizar aguas residuales. Se trata de establecer, en cada documento, criterios claros para garantizar que el agua tratada cumpla con los estándares de calidad que eviten riesgos para la salud, especialmente cuando el uso que se plantea es en riego de cultivos que podrían consumirse crudos.

En todos los casos se pretende establecer una guía dando flexibilidad a que las regulaciones se puedan adaptar a las condicionares locales, como epidemiología, infraestructura y prácticas agrícolas. La ISO 16075 por ejemplo resalta un enfoque donde la calidad del agua se ajusta según el destino final de los productos, y las directrices de la OMS sugieren ajustar las medidas de protección en función del riesgo epidemiológico local.

Si bien todas emplean un enfoque basado en la gestión del riesgo, hay algunas diferencias a resaltar entre ellas.

El alcance es distinto: tanto la ISO 16075 como el Reglamento de la UE están enfocadas en riego agrícola con aguas residuales tratadas, mientras que las Directrices de la OMS son más amplias y abarcan además del uso de aguas residuales, excretas y aguas grises, no sólo en la agricultura sino también en la acuicultura.

Respecto a los requisitos sobre la calidad del agua, el Reglamento de la UE establece parámetros mínimos específicos para la calidad del agua tratada destinada a riego agrícola, lo que incluye estándares como la cantidad de E. coli y niveles de turbidez. Estos parámetros son comparables a los estándares internacionales mencionados en la ISO 16075 pero son más estrictos. La OMS adopta un enfoque más flexible, basado en la evaluación del riesgo, sin especificar límites exactos para todos los contextos.

En la Tabla 5.1 se pueden ver los valores de calidad considerados por la ISO 16075.

**Tabla 5.1- Calidad sugerida de aguas residuales tratadas según parámetros químicos, físicos y biológicos <sup>a</sup>**

Fuente - ISO 16075-2:2020(E)

Cat.	Calidad	DBO <sub>5</sub> <sup>b</sup>		SST		Turbidez <sup>c</sup>		Coliformes termotolerantes <sup>d</sup>		Nematodos <sup>e</sup> intestinales		Usos potenciales sin barreras
		mg/l		mg/l		NTU		n°/100ml		huevos/litro		
		Prom.	Max	Prom.	Max	Prom.	Max	Per. 95	Max	Prom.	Max	
A	Muy alta calidad de agua residual tratada <sup>d</sup>	≤5	10	≤5	10	≤3	6	≤10 o debajo del límite de detección	100	-	-	Riego urbano sin restricciones y riego agrícola de cultivos alimentarios consumidos crudos.
B	Alta calidad de agua residual tratada <sup>d</sup>	≤10	20	≤10	25	-	-	≤200	1000	-	-	Riego urbano restringido y riego agrícola de cultivos alimentarios procesados
C	Buena calidad de agua residual tratada	≤20	35	≤30	50	-	-	≤1000	10000	≤1	-	Riego agrícola de cultivos no alimentarios
D	Calidad media de agua residual tratada	≤60	100	≤90	140	-	-	-	-	≤1	5	Riego restringido de cultivos industriales y sembrados.
E	Agua residual tratada de manera extensiva	≤20	35	-	-	-	-	-	-	≤1	5	Riego restringido de cultivos industriales y sembrados.

NOTA: Con cada tipo de calidad de aguas residuales tratadas, siempre es posible utilizar un agua residual tratada de mayor calidad.

<sup>a</sup> Un ejemplo de los límites se elabora sobre la base de regulaciones internacionales, p. ej. OMS (2006) y USEPA (2012), y se aplican al agua reutilizada en la salida de la instalación de tratamiento. Después del almacenamiento en reservorios abiertos y para riego por aspersión o localizado, podría ser necesaria una filtración adicional. La frecuencia de muestreo y el cálculo de los valores promedio se indican en la ISO 16075-4.

<sup>b</sup> La DBO<sub>5</sub> se determina con una prueba de cinco días.

<sup>c</sup> Se puede implementar la medición continua de la turbidez. El valor promedio debe basarse en un período de 24 horas. Si se utilizan sólidos suspendidos en lugar de turbidez, el promedio de SST no debe exceder 5 mg/l. Si se utiliza filtración por membranas para el tratamiento, la turbidez no debe exceder 0,2 NTU.

<sup>d</sup> La dosificación de cloro residual entre 0,2 mg/l y 1 mg/l, medida después de un tiempo de contacto de 30 minutos, puede ser necesaria para agua residual tratada de alta y muy alta calidad. Si se utiliza otro método de desinfección, también debe ser monitoreado.

<sup>e</sup> Los nematodos intestinales (huevos de helmintos) pueden no ser monitoreados de manera rutinaria si se demuestra que el número de huevos de helmintos en aguas residuales no tratadas está consistentemente por debajo de 10 huevos/l.

En la Tabla 5.2 se presentan las clases de calidad de agua definidas por la UE y en la Tabla 5.3 los valores límites admitidos para cada clase de calidad.

**Tabla 5.2 - Clases de calidad de las aguas regeneradas y uso agrícola y método de riego permitidos**

*Fuente - Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo.*

<b>Clase de calidad mínima de las aguas regeneradas</b>	<b>Categoría de cultivo (*)</b>	<b>Método de riego</b>
A	Todos los cultivos de alimentos que se consumen crudos en los que la parte comestible está en contacto directo con las aguas regeneradas y los tubérculos que se consumen crudos	Todos los métodos de riego
B	Los cultivos de alimentos que se consumen crudos cuando la parte comestible se produce por encima del nivel del suelo y no está en contacto directo con las aguas regeneradas, los cultivos de alimentos transformados y los cultivos no alimenticios, incluidos los cultivos utilizados para alimentar a animales productores de carne o leche	Todos los métodos de riego
C	Los cultivos de alimentos que se consumen crudos cuando la parte comestible se produce por encima del nivel del suelo y no está en contacto directo con las aguas regeneradas, los cultivos de alimentos transformados y los cultivos no alimenticios, incluidos los cultivos utilizados para alimentar a animales productores de carne o leche	Riego por goteo (**) u otro método de riego que evite el contacto directo con la parte comestible del cultivo
D	Cultivos destinados a la industria y a la producción de energía y de semillas	Todos los métodos de riego (***)

(\*) En caso de que un tipo determinado de cultivo regado corresponda a varias categorías del cuadro 1, se le aplicarán los requisitos de la categoría más estricta.  
(\*\*) El riego por goteo es un sistema de microrriego capaz de suministrar el agua en gotas o pequeños chorros a los vegetales y consiste en un goteo de agua sobre el suelo o directamente bajo la superficie en cantidades muy pequeñas (2-20 litros/hora) con un sistema de tubos de plástico de pequeño diámetro provistos de unos orificios denominados goteros de riego.  
(\*\*\*) En el caso de métodos de riego que imitan la lluvia, debe prestarse especial atención

**Tabla 5.3 - Requisitos de calidad de las aguas regeneradas para el riego agrícola**

*Fuente - Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo.*

Clase de calidad de aguas regeneradas	Tratamiento indicativo	Requisitos de calidad				
		E. Coli (n°/100ml)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	SST (mg/l)	Turbidez (NTU)	Otros
A	Tratamiento secundario, filtración y desinfección	≤10	≤10	≤10	≤5	Legionella spp.: <1000 UFC/l cuando exista un riesgo de aerosolización. Nematodos intestinales (huevos de helmintos): ≤1 huevo/l para el riego de pastos o forraje.
B	Tratamiento secundario y desinfección	≤100	De conformidad con la Directiva 91/271/CEE (anexo 1, cuadro 1)	De conformidad con la Directiva 91/271/CEE (anexo 1, cuadro 1)	-	
C	Tratamiento secundario y desinfección	≤1000			-	
D	Tratamiento secundario y desinfección	≤10000			-	

La Tabla 5.4 es el cuadro 1 del anexo 1 de la Directiva 91/271/CEE que se cita en la tabla 3.

**Tabla 5.4 - Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas. Se aplicará el valor de concentración o el porcentaje de reducción.**

*Fuente - Directiva 91/271/CEE Sobre tratamiento de aguas residuales urbanas/ Anexo 1 – Cuadro 1*

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción (1)	Método de medida de referencia
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> a 20°C) sin nitrificación (2)	25 mg/l O <sub>2</sub>	70-90 40 de conformidad con el apartado 3 del artículo 5 R.D.L (3)	Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar. Determinación del oxígeno disuelto antes y después de cinco días de incubación a 20 °C ± 1 °C, en completa oscuridad. Aplicación de un inhibidor de la nitrificación.
Demanda química de oxígeno (DQO)	125 mg/l	75	Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar. Dicromato potásico.
Total de sólidos en suspensión	35 mg/l (4) 35 de conformidad con el apartado 3 del artículo 5 R.D.L (más de 10.000 h-e) (3) 65 de conformidad con el apartado 3 del artículo 5 R.D.L (de 20.000 a 10.000 h-e) (3)	90 (4) 90 de conformidad con el apartado 3 del artículo 5 R.D.L. (más de 10.000 h-e) (3) 70 de conformidad con el apartado 3 del artículo 5 R.D.L. (de 2.000 a 10.000 h-e) (3)	Filtración de una muestra representativa a través de una membrana de filtración de 0,45 micras. Secado a 105 °C y pesaje. Centrifugación de una muestra representativa (durante cinco minutos como mínimo, con una aceleración media de 2.800 a 3.200 g), secado a 105° C y pesaje.
(1) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada. (2) Este parámetro puede sustituirse por otro: carbono orgánico total (COT) o demanda total de oxígeno (DTO), si puede establecerse una correlación entre DBO <sub>5</sub> y el parámetro sustituido.			



(3) Se refiere a los supuestos en regiones consideradas de alta montaña contemplada en el apartado 3 del artículo 5 del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre.

(4) Este requisito es optativo.

Los análisis de vertidos procedentes de sistemas de depuración por lagunaje se llevarán a cabo sobre muestras filtradas; no obstante, la concentración de sólidos totales en suspensión en las muestras de agua sin filtrar no deberá superar los 150 mg/L.

En las Tablas 5.5 y 5.6 se fijan valores objetivo, establecidos por la OMS, según el tipo de riego en el que se pretenda utilizar el agua residual. La Figura 5.1 sirve como apoyo para la Tabla 5.6.

**Tabla 5.5 - Objetivos basados en la salud y objetivos de reducción de helmintos para el uso de aguas residuales tratadas en agricultura**

*Fuente - WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater 2006 vol. 1*

Tipo de riego	Objetivo de salud para patógenos virales, bacterianos y protozoarios	Objetivo de reducción microbiana para huevos de helmintos
Sin restricciones	$\leq 10^{-6}$ AVAD <sup>3</sup> diarios por persona por día <sup>a</sup>	$\leq 1$ por litro (media aritmética) <sup>b,c</sup>
Restringido	$\leq 10^{-6}$ AVAD <sup>3</sup> diarios por persona por día <sup>a</sup>	$\leq 1$ por litro (media aritmética) <sup>b,c</sup>
Localizado (ej. riego por goteo)	$\leq 10^{-6}$ AVAD <sup>3</sup> diarios por persona por día <sup>a</sup>	(a) Cultivos de bajo crecimiento <sup>d</sup> $\leq 1$ por litro (media aritmética) (b) Cultivos de alto crecimiento <sup>d,e</sup> Sin recomendación

<sup>a</sup> El objetivo basado en la salud se puede lograr, para riego sin restricciones y riego localizado, mediante una reducción de patógenos de 6–7 unidades logarítmicas (obtenida a través de una combinación de tratamiento de aguas residuales y otras medidas de protección de la salud); para riego restringido, se logra mediante una reducción de patógenos de 2–3 unidades logarítmicas.

<sup>b</sup> Cuando los niños menores de 15 años están expuestos, se deben utilizar medidas adicionales de protección de la salud.

<sup>c</sup> Se debe determinar una media aritmética a lo largo de la temporada de riego. El valor medio de  $\leq 1$  huevo por litro debe obtenerse en al menos el 90 % de las muestras para permitir la ocasional muestra de alto valor (es decir, con  $>10$  huevos por litro). Con algunos procesos de tratamiento de aguas residuales (por ejemplo, lagunas de estabilización de desechos), el tiempo de retención hidráulica puede utilizarse como un sustituto para asegurar el cumplimiento de  $\leq 1$  huevo por litro.

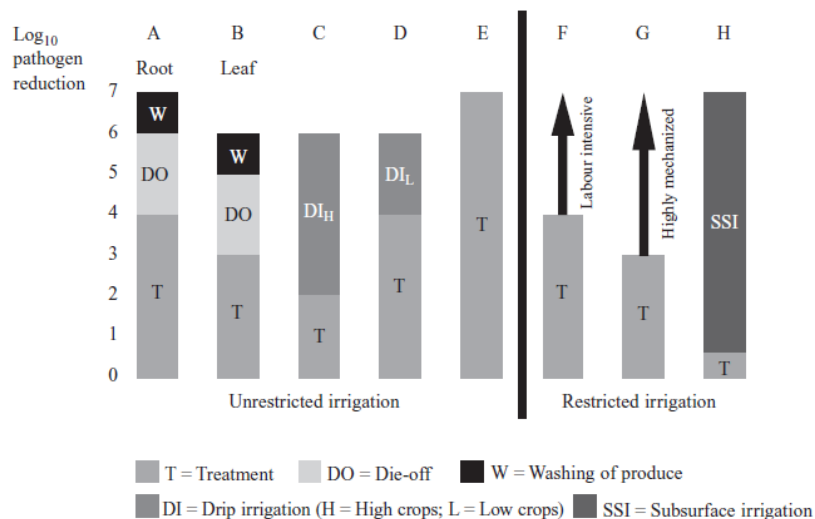
<sup>d</sup> Los cultivos de alto crecimiento incluyen árboles frutales, aceitunas, etc.

<sup>e</sup> No se deben recolectar cultivos del suelo.

<sup>3</sup> Años de Vida Ajustados por Discapacidad

**Figura 5.1 - Ejemplos de opciones para la reducción de patógenos virales, bacterianos y protozoarios mediante diferentes combinaciones de medidas de protección de la salud que logran el objetivo basado en la salud de  $\leq 10^{-6}$  AVAD<sup>4</sup> por persona por año**

*Fuente: WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater 2006 vol 1*



**Tabla 5.6 - Monitoreo de verificación (número de E. Coli por 100 ml de aguas residuales tratadas) para los diversos niveles de tratamiento de aguas residuales en las Opciones A–G presentadas en la Figura 5.1**

*Fuente - WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater 2006 vol. 1*

Tipo de riego	Opción (figura 5.1)	Requerimiento de reducción de patógenos por tratamiento (unidad log)	Verificación por nivel de monitoreo (E. Coli /100 ml)	Notas
Sin restricciones	A	4	$\leq 10^3$	Cultivos de raíz
	B	3	$\leq 10^4$	Cultivos de hoja
	C	2	$\leq 10^5$	Riego por goteo de cultivos de alto crecimiento
	D	4	$\leq 10^3$	Riego por goteo de cultivos de bajo crecimiento
	E	6 o 7	$\leq 10^1$ o $\leq 10^0$	El nivel de verificación depende de los requisitos de la agencia reguladora local <sup>b</sup>
Restringido	F	3	$\leq 10^4$	Agricultura intensiva en mano de obra (protectora de adultos y niños)

<sup>4</sup> Años de Vida Ajustados por Discapacidad

				menores de 15 años)
	G	2	$\leq 10^5$	Agricultura altamente mecanizada
	H	0,5	$\leq 10^6$	Eliminación de patógenos en un tanque séptico
<sup>a</sup> “El monitoreo de verificación” se refiere a lo que anteriormente se conocía como “normas de efluentes” o “niveles de directrices de efluentes” <sup>b</sup> Por ejemplo, para el tratamiento secundario, filtración y desinfección: demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO <sub>5</sub> ), <10 mg/l; turbidez, <2 unidades de nefelométricas de turbidez (NTU); residual de cloro, 1 mg/l; pH, 6–9; y coliformes fecales, no detectables en 100 ml (Estado de California, 2001).				

Existe una cuarta entidad de renombre, que es la Agencia Estadounidense de Protección Ambiental (USEPA por sus siglas en inglés). En general, los países que no tienen una normativa sobre el reúso de las aguas residuales han tomado como referencia lo establecido por la USEPA; un ejemplo de ello es la Norma Chilena (NCh1333. Of78 Modificada en 1987) que en el agua que se usa para riego indica que se deben considerar los valores establecidos por la USEPA.

La USEPA, en su guía de reúso de agua del año 2012, presenta sugerencias para la caracterización del agua según su uso y los valores de determinados parámetros dependiendo de cada uno de los usos que define. Se presentan en la Tabla 5.7 las categorías de reutilización de agua que considera.

**Tabla 5.7 – Categorías de reutilización del agua y número de estados con normas, regulaciones o directrices que abordan estas categorías de reutilización.**

*Fuente - Guidelines for Water Reuse, U.S. Environmental Protection Agency, 2012*

<b>Categoría de reutilización</b>	<b>Descripción</b>
Reutilización urbana - No restringida	Uso de agua reciclada para aplicaciones no potables en entornos municipales donde el acceso público no está restringido.
Reutilización urbana - Restringida	Uso de agua reciclada para aplicaciones no potables en entornos municipales donde el acceso público está controlado o restringido por barreras físicas o institucionales, como cercas, señalización, o restricción temporal de acceso
Reutilización agrícola - Cultivos alimentarios	Uso de agua reciclada para regar cultivos alimentarios destinados al consumo humano
Reutilización agrícola - Cultivos procesados y no alimentarios	Uso de agua reciclada para regar cultivos que son procesados antes del consumo humano o que no son consumidos por humanos
Cuerpos de agua (embalses) - No restringida	Uso de agua reciclada en cuerpos de agua donde no se imponen limitaciones al contacto corporal (algunos estados incluyen la producción de nieve en esta categoría)
Cuerpos de agua (embalses) - Restringida	Uso de agua reciclada en cuerpos de agua donde el contacto corporal está restringido (algunos estados incluyen la pesca y la navegación en esta categoría)
Reutilización ambiental	Uso de agua reciclada para crear, mejorar, sostener o aumentar cuerpos de agua, incluidos humedales, hábitats acuáticos o caudales ecológicos
Reutilización industrial	Uso de agua reciclada en aplicaciones industriales como instalaciones de producción, generación de energía o extracción de combustibles fósiles

Categoría de reutilización	Descripción
Recarga de acuíferos – Reutilización no potable	Uso de agua reciclada para recargar acuíferos que no se utilizan como fuente de agua potable
Reutilización potable - Indirecta (IPR)	Aumento de una fuente de agua potable (superficial o subterránea) con agua reciclada, seguido de una barrera ambiental antes del tratamiento para agua potable
Reutilización potable - Directa (DPR)	Introducción de agua reciclada (con o sin almacenamiento previo en una barrera ambiental artificial) directamente en una planta de tratamiento de agua potable, ya sea en el mismo lugar o a distancia del sistema de tratamiento avanzado de aguas residuales

Si bien en la guía de reúso de la USEPA se presentan valores mínimos de parámetros para cada una de estas categorías, a efectos de este documento se presentarán solamente los valores para los casos de reutilización urbana y reutilización agrícola, los cuales se detallan en la Tabla 5.8.

**Tabla 5.8 – Directrices sugeridas para la reutilización del agua. Categorías de reutilización, tratamientos requeridos y calidad del agua reciclada.**

*Fuente - Guidelines for Water Reuse, U.S. Environmental Protection Agency, 2012*

Categoría y descripción de reutilización	Tratamiento	Calidad del agua reciclada
Reutilización Urbana - No restringida Uso de agua reciclada en aplicaciones no potables en entornos municipales donde el acceso público no está restringido.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tratamiento secundario</li> <li>• Filtración</li> <li>• Desinfección</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH = 6.0–9.0</li> <li>• ≤ 10 mg/l DBO</li> <li>• ≤ 2 NTU</li> <li>• Sin coliformes fecales detectables / 100 ml</li> <li>• 1 mg/l Cl<sub>2</sub> residual (mín.)</li> </ul>
Reutilización Urbana - Restringida Uso de agua reciclada en aplicaciones no potables en entornos municipales donde el acceso público está controlado o restringido mediante cercas, señalización o acceso temporal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tratamiento secundario</li> <li>• Desinfección</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH = 6.0–9.0</li> <li>• ≤ 30 mg/l DBO</li> <li>• ≤ 30 mg/l SST</li> <li>• ≤ 200 coliformes fecales / 100 ml</li> <li>• 1 mg/l Cl<sub>2</sub> residual (mín.)</li> </ul>
Reutilización Agrícola - Cultivos alimentarios Uso de agua reciclada para riego superficial o por aspersión de cultivos alimentarios destinados al consumo humano crudo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tratamiento secundario</li> <li>• Filtración</li> <li>• Desinfección</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH = 6.0–9.0</li> <li>• ≤ 10 mg/l DBO</li> <li>• ≤ 2 NTU</li> <li>• Sin coliformes fecales detectables / 100 ml</li> <li>• 1 mg/l Cl<sub>2</sub> residual (mín.)</li> </ul>
Reutilización Agrícola - Cultivos procesados Uso de agua reciclada para riego superficial de cultivos alimentarios no consumidos crudos, destinados al procesamiento comercial.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tratamiento secundario</li> <li>• Desinfección</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH = 6.0–9.0</li> <li>• ≤ 30 mg/l DBO</li> <li>• ≤ 30 mg/l SST</li> <li>• ≤ 200 coliformes fecales / 100 ml</li> <li>• 1 mg/l Cl<sub>2</sub> residual (mín.)</li> </ul>
Reutilización Agrícola - Cultivos no alimentarios Uso de agua reciclada para riego de cultivos no alimentarios consumidos por humanos, incluyendo flores, pasto, madera, y otros cultivos comerciales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tratamiento secundario</li> <li>• Desinfección</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH = 6.0–9.0</li> <li>• ≤ 30 mg/l DBO</li> <li>• ≤ 30 mg/l SST</li> <li>• ≤ 200 coliformes fecales / 100 ml</li> <li>• 1 mg/l Cl<sub>2</sub> residual (mín.)</li> </ul>

Se presentan además las normativas de Israel y China para completar las normas consideradas a nivel mundial.

Israel es uno de los países con mayor porcentaje de reutilización de aguas de tratamiento en el mundo. En 2010, el Ministerio de Salud de Israel presentó regulaciones para el reúso de aguas tratadas; la información se encuentra en “Public Health Regulations (Effluent Quality and Wastewater Treatment)”. Aquí se definen los valores máximos permisibles para riego con y sin restricciones. En la Tabla 5.9 se presentan los valores para riego sin restricciones.

**Tabla 5.9 – Parámetros para su reutilización en riego agrícola**

*Fuente - Public Health Regulations Israel 2010*

Parámetro	Valor Límite Permissible
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	≤ 10 mg/L
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	≤ 10 mg/L
Coliformes Fecales	≤ 10 NMP/100 mL
Turbidez	≤ 2 NTU
Nitrógeno Total	≤ 25 mg/L
Fósforo Total	≤ 5 mg/L
Carbono Orgánico Total (COT)	≤ 10 mg/L
Amonio (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	≤ 4 mg/L
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	≤ 2 mg/L
Boro	≤ 0.5 mg/L
Cloruros	≤ 250 mg/L
Conductividad Eléctrica (CE)	≤ 1.5 dS/m

China cuenta con Directrices para la gestión de la calidad en plantas de reutilización de agua (GB/T 41018-2021) publicadas en diciembre 2021 y que rigen desde 2022. Estas directrices establecen distintos grados de calidad de agua:

- Grado A: agua de alta calidad (ósmosis inversa, nanofiltración, oxidación avanzada).
- Grado B: agua de calidad intermedia (tratamiento secundario mejorado + desinfección).
- Grado C: agua para riego agrícola o usos menos exigentes, con requisitos básicos de calidad.

En la Tabla 5.10 se presentan los valores máximos permisibles de los parámetros considerados para las aguas de Grado B que considera entre sus usos posibles:

- Riego de áreas urbanas (parques, calles, jardines públicos).
- Riego agrícola de cultivos NO comidos crudos (por ejemplo, cultivos industriales o para procesamiento).
- Refrigeración industrial (torres de enfriamiento).
- Usos paisajísticos de exposición media.

**Tabla 5.10 – Parámetros principales exigidos para Grado B**

*Fuente – GB/T 41018-2021 China*

Parámetro	Valor Límite para Grado B
DBO <sub>5</sub> (Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días)	≤ 10 mg/L
SST (Sólidos Suspendidos Totales)	≤ 10 mg/L
Coliformes Fecales	≤ 10 <sup>3</sup> NMP/100 mL
Turbidez	≤ 5 NTU
pH	6.0 – 9.0
Nitrógeno Total	≤ 20 mg/L
Conductividad Eléctrica	≤ 2.0 dS/m (adaptable según sensibilidad del suelo o cultivo)
Otros contaminantes	(metales pesados, residuos de plaguicidas) deben cumplir límites para usos urbanos y agrícolas seguros

A continuación, se presentan algunas normas de países de la región ordenadas por año de aprobación.

México cuenta con la Norma NOM-003-ECOL-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Diferencia los límites en servicios al público con contacto directo y servicios al público con contacto indirecto u ocasional

- Con contacto directo: llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines.
- Con contacto indirecto u ocasional: riego de jardines y camellones en autopistas, camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad y panteones.

En la Tabla 5.11 se presentan los límites máximos para cada tipo de contacto.

**Tabla 5.11 – Límites máximos permisibles – promedio mensual**

*Fuente - Norma NOM-003-ECOL-1997*

Tipo de reúso	Coliformes fecales NMP/100 ml	Huevos de helminto (huevos/l)	Grasas y aceites mg/l	DBO <sub>5</sub> mg/l	SST mg/l
Contacto directo	240	≤1	15	20	20
Contacto indirecto	1000	≤5	15	30	30

En Brasil, el Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) constituyó un Grupo Técnico sobre el Reúso del Agua. A partir de las recomendaciones de este grupo, el CNRH aprobó la Resolución N° 54, del 28 de noviembre de 2005, la cual define las siguientes modalidades de reúso directo no potable del agua (Brasil, 2005a):

- Reúso para fines urbanos: irrigación paisajística, lavado de espacios públicos y vehículos, desobstrucción de tuberías, construcción civil, edificaciones y combate de incendios.

- Reúso para fines agrícolas y forestales: aplicación para producción agrícola y cultivo de bosques plantados.
- Reúso para fines ambientales: implantación de proyectos de recuperación del ambiente.
- Reúso para fines industriales: reúso en procesos, actividades y operaciones industriales.
- Reúso para acuicultura: crianza de peces o cultivo de vegetales acuáticos.

En la Tabla 5.12 se presentan los valores límites establecidos para cada calidad.

**Tabla 5.12 - Clases de calidad para aguas utilizadas en irrigación de diversos cultivos (Brasil, 2005b)**

*Fuente - Resolución N°357/2005*

Uso	Clase de calidad	Límites de concentración establecidos
Irrigación de hortalizas que son consumidas crudas y de frutas que se desarrollan próximas al suelo y que son ingeridas sin remoción de películas	Clase 1	Coliformes fecales $\leq 200/100$ ml Turbiedad $\leq 40$ NTU DBO (5 días, 20°C) $\leq 3$ mg/L Sólidos disueltos totales $\leq 500$ mg/L Mercurio $\leq 0,2$ µg/L Hg
Irrigación de hortalizas, plantas frutales y de parques, jardines, campos de deporte y recreación, con los cuales el público pueda tener contacto	Clase 2	Coliformes fecales $\leq 1000/100$ ml Turbiedad $\leq 100$ NTU DBO (5 días, 20°C) $\leq 5$ mg/L Sólidos disueltos totales $\leq 500$ mg/L Mercurio $\leq 0,2$ µg/L Hg
Irrigación de cultivos de árboles, cereales y forraje	Clase 3	Coliformes fecales $\leq 2500/100$ ml Turbiedad $\leq 100$ NTU DBO (5 días, 20°C) $\leq 10$ mg/L Sólidos disueltos totales $\leq 500$ mg/L Mercurio $\leq 0,2$ µg/L Hg

Costa Rica cuenta, desde el 2006, con el Decreto N° 33601 – Reglamento de vertido y Reúso de aguas residuales. El capítulo IV que trata sobre el reúso de aguas residuales clasifica el tipo de reúso que se va a dar al agua y determina los valores de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para cada caso.

En la Tabla 5.13 se detalla la clasificación de aguas residuales determinadas según su uso final y en la Tabla 5.14 se incluyen los valores límites para cada clase.

**Tabla 5.13 - Clasificación de aguas residuales según el uso.**

*Fuente – Decreto N° 33601 Costa Rica – Capítulo IV*

Tipo	Uso	Detalle
1	Reúso urbano	Riego de zonas en donde haya acceso del público (por ejemplo, en zona verdes, campos de golf, parques, plazas deportivas y cementerios), lavado de automóviles, inodoros, combate de incendios y otros usos con similar acceso o exposición al agua.
2	Riego con acceso restringido	Cultivo de césped, silvicultura y otras áreas donde el acceso del público es prohibido o restringido.
3	Reúso agrícola en cultivos de alimentos que no se procesan previo a su venta	Riego superficial o por aspersión, de cualquier cultivo comestible que no se procese previo a su venta, incluyendo aquellos que se consumen crudos.

Tipo	Uso	Detalle
4	Reúso agrícola en cultivos de alimentos que se procesan previo a su venta	Riego de cultivos que, previo a su venta al público, han recibido el procesamiento físico o químico necesario para la destrucción de los organismos patógenos que pudieran contener.
5	Reúso agrícola en cultivos no alimenticios	Riego de pastos de piso, forrajes, cultivos de fibras y semillas, y otros cultivos no alimenticios.
6	Reúso recreativo	Reúso en cuerpos de agua artificiales donde pueda existir un contacto ocasional (por ejemplo: pesca, canotaje y navegación).
7	Reúso paisajístico	Aprovechamientos estéticos donde el contacto con el público no es permitido, y dicha prohibición esté claramente rotulada.
8	Reúso en la construcción	Compactación de suelos, control del polvo, lavado de materiales, producción de concreto.

**Tabla 5.14 - Límites máximos permisibles para el reúso de aguas residuales**

*Fuente – Decreto N° 33601 Costa Rica – Capítulo IV*

Tipo de reúso	Nematodos intestinales (huevos/litro)	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	SST (mg/l)	Grasas y Aceites (mg/l)
1	1	1000	50	50	30
2	1	10000	75	75	45
3	1	1000	50	50	30
4	1	10000	75	75	45
5	1	-	100	100	60
6	1	10000	50	50	30
7	1	-	100	100	60
8	1	1000	50	50	30

Perú, si bien no cuenta con una Norma específica para el reúso de aguas residuales, su Ley N° 29338 de recursos hídricos del 2009 (Artículo 82. Reutilización de agua residual) y su reglamento del 2010 (Título V - Capítulo VII: Reúso de aguas residuales tratadas) cuentan con un capítulo destinado a este tema, dejando ver la preocupación de este país por el uso adecuado de sus recursos. Los criterios para evaluar la calidad del agua para reúso se detallan en el Artículo 150 del Decreto Supremo N°001-2010-AG: “Las solicitudes de autorización de reúso de aguas residuales tratadas serán evaluadas tomándose en cuenta los valores que establezca el sector correspondiente a la actividad a la cual se destinará el reúso del agua o, en su defecto, las guías correspondientes de la Organización Mundial de la Salud.”

Colombia aprobó, en 2014, la resolución RN1207 que en su artículo 7 define los valores máximos permisibles para el reúso de aguas residuales con fines agrícolas. Los usos agrícolas que define esta norma son:

- Cultivos de pastos y forrajes para consumo animal
- Cultivos no alimenticios para humanos o animales
- Cultivos de fibras celulósicas y derivados
- Cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburante) incluidos lubricantes
- Cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles



- Cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos.

En la Tabla 5.15 se presentan los valores considerados para parámetros físicos y microbiológicos.

**Tabla 5.15 – Tabla de Parámetros Físicos y Microbiológicos**

*Fuente – Reglamento RN1207 - 2014*

Variable	Unidad de Medida	Valor Límite Máximo Permisible
<b>FÍSICOS</b>		
pH	Unidades de pH	6,0 - 9,0
Conductividad	μS/cm	1.500,0
<b>MICROBIOLÓGICOS</b>		
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	100.000,0
Enterococos Fecales	NMP/100 mL	100,0
Helminthos Parásitos Humanos	Huevos y Larvas/L	1,0
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes/L	1,0
Salmonella sp	NMP/100 mL	1,0

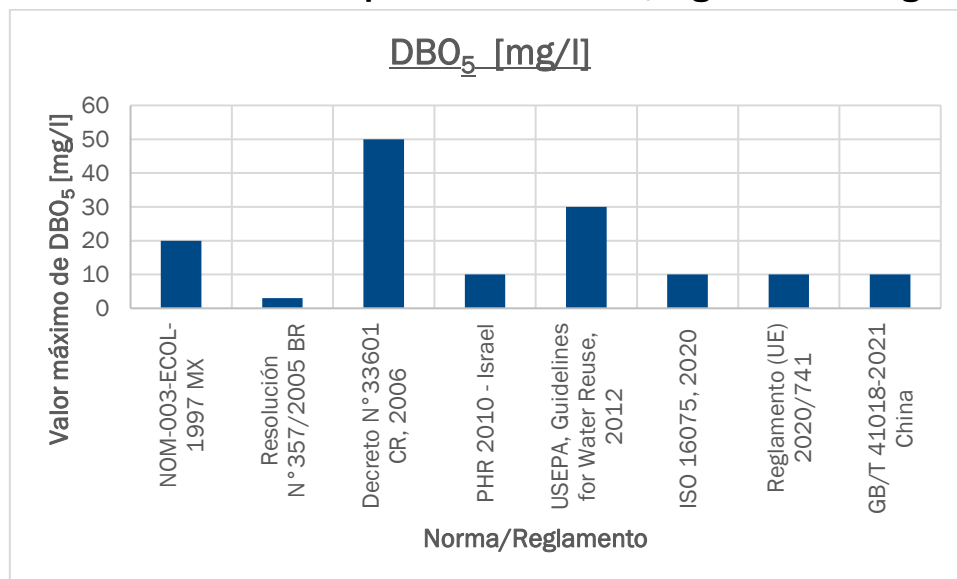
Para el caso de reúso en riego este reglamento no define valores de SST, ni tampoco de DBO<sub>5</sub>.

En 2018 el gobierno de Bolivia presenta la Guía Técnica para el Reúso de Aguas Residuales en la Agricultura, donde se proporciona un marco detallado para la reutilización de aguas residuales tratadas en la agricultura. La guía fue desarrollada en cooperación con México y Alemania, por lo que los valores que considera para determinar la calidad del agua tratada se basan en la norma mexicana. Tiene algunos aspectos a detallar, entre ellos, el hecho de que proporciona información de la calidad del agua respecto al tipo de técnica que se utiliza en la agricultura, así como también recomendaciones para la mitigación de riesgos post cosecha.

Considerando los datos de las distintas normativas y reglamentos, se elaboraron gráficos comparativos para los valores de DBO<sub>5</sub>, SST, Coliformes Fecales y Turbiedad que son los parámetros que se repiten en los distintos documentos

Se presentan a continuación las 4 figuras comparativas. Las mismos están ordenadas de izquierda a derecha por año en que fueron aprobados.

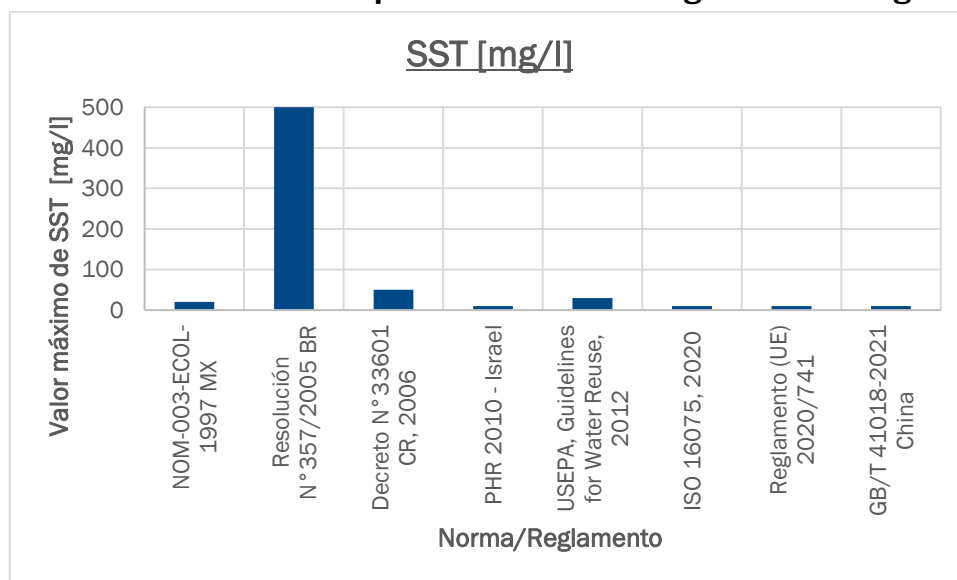
**Figura 5.2 – Valores máximos permisibles de DBO<sub>5</sub> según norma o reglamento**



*Nota: La figura muestra los valores máximos de DBO<sub>5</sub> establecidos por diferentes normativas internacionales para reúso de aguas residuales tratadas.*

Se observa que Israel, ISO, UE y China coinciden en exigir DBO<sub>5</sub> ≤ 10 mg/L, lo que refleja un nivel alto de tratamiento (terciario), mientras que normativas como la de Costa Rica o USEPA aceptan niveles mayores, más típicos de tratamiento secundario avanzado.

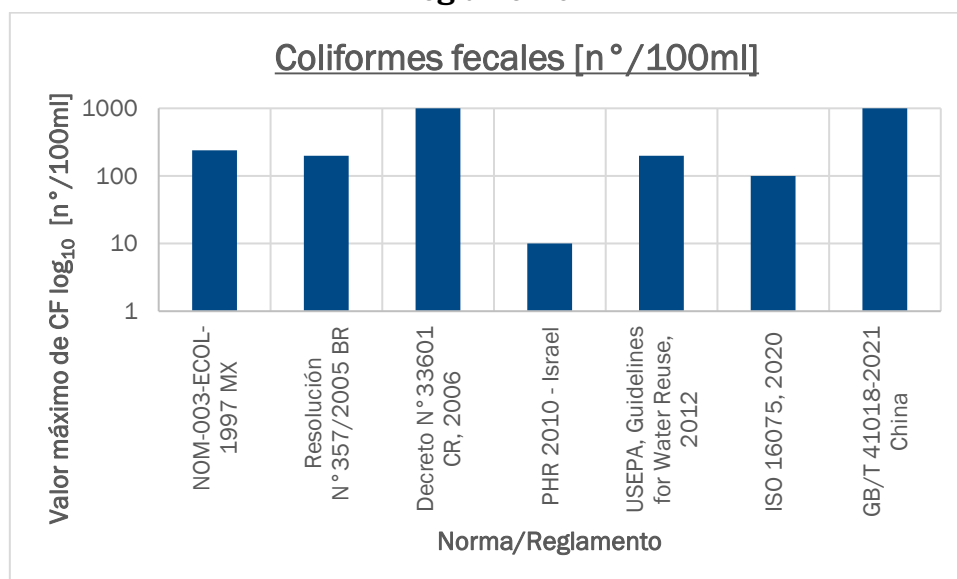
**Figura 5.3 – Valores máximos permisibles de SST según norma o reglamento**



*Nota: La figura muestra los valores máximos de SST establecidos por diferentes normativas internacionales para reúso de aguas residuales tratadas.*

En SST se repite el patrón anterior: Israel, UE e ISO se alinean en ≤10 mg/L, lo cual asegura baja carga de partículas en suspensión para proteger suelos y cultivos. El caso de Brasil es muy permisivo y reflejaría un enfoque más básico de tratamiento (secundario sin refinamiento).

**Figura 5.4 – Valores máximos permisibles de Coliformes Fecales según norma o reglamento**



*Nota: La figura muestra los valores máximos de Coliformes Fecales establecidos por diferentes normativas internacionales para reúso de aguas residuales tratadas.*

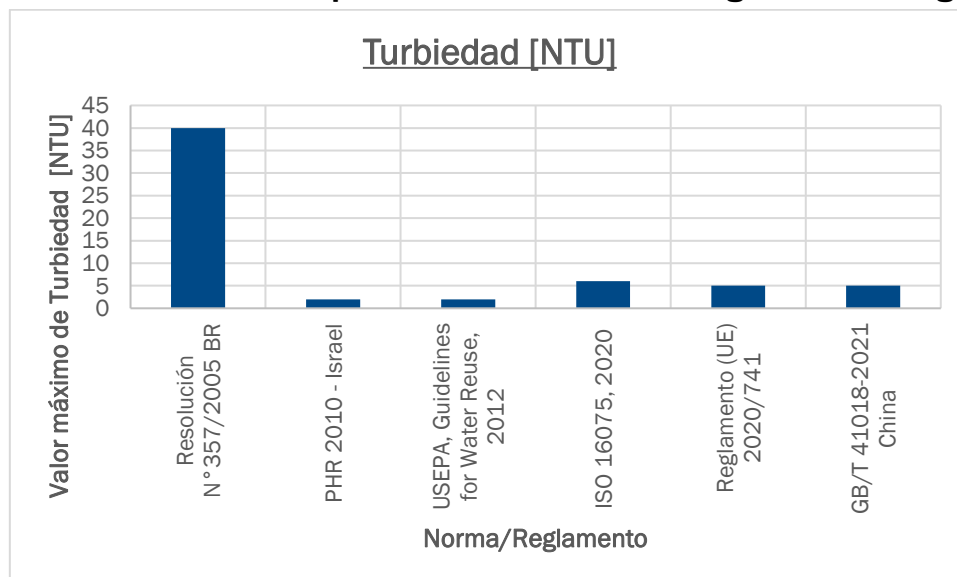
Para coliformes fecales Israel busca asegurar agua prácticamente libre de coliformes para riego de cultivos comestibles o zonas públicas. En cambio, China para Grado B y Costa Rica permiten niveles más altos, adecuados para riego con restricciones (por ejemplo, cultivos no comidos crudos o riego subterráneo).

**Tabla 5.16 – Valores máximos permisibles de E. Coli según norma o reglamento**

Norma o reglamentos	Valor máximo de E. Coli (n°/100 ml)
Reglamento (UE) 2020/741	10
OMS 2006	1000

Además de las normas y/o reglamentos mencionados anteriormente, que tienen exigencias para coliformes fecales, el reglamento de UE y OMS aconsejan controlar E. Coli. Los valores de ambas se presentan en la Tabla 5.16, donde se puede observar que el Reglamento de la UE es el más exigente.

**Figura 5.5 – Valores máximos permisibles de Turbiedad según norma o reglamento**



*Nota: La figura muestra los valores máximos de Turbiedad establecidos por diferentes normativas internacionales para reúso de aguas residuales tratadas.*

En este caso Israel y USEPA exigen turbideces muy bajas, indicativas de filtración fina y desinfección efectiva. Brasil por su parte permite valores mucho más altos en comparación con el resto.

Como conclusiones generales, se podría decir que Israel, la Unión Europea y la ISO 16075 son las que presentan los estándares más estrictos, seguidos por China, que se sitúa en un nivel intermedio dado que permite algo más de carga microbiológica que las anteriormente nombradas, pero exige buena calidad fisicoquímica. Con el menor nivel de exigencia se encuentran las normativas de Brasil y Costa Rica, lo que no sería extraño si se considera que estas normas fueron redactadas en 2005 y 2006. No se encontró evidencia de que alguno de estos países haya actualizado la Normativa en los siguientes años. En el caso específico de Brasil se observa que algunos estados han desarrollado normativa complementaria con valores más bajos que los aprobados a nivel nacional.

### 5.3. Normativa y reglamentación para reúso de lodos

La primera aproximación a una normativa sobre este tema se sancionó en 1986, cuando la Comunidad Económica Europea (CEE) estableció la Directiva 86/278 para “La protección del medio ambiente, y en particular, de los suelos y lodos de depuradora que se utilizan en la agricultura”, donde menciona las características, los tratamientos y la disposición final de lodos para uso en la agricultura, brindando un panorama más amplio sobre un uso alternativo a estos materiales. Estados Unidos continuó con este tema, publicando en 1993 “Normas para el uso o eliminación de lodos de depuradora (503)” (Tello et al., 2016).

La Directiva 86/278 establece valores límite de concentración de metales en suelos y valores límites de concentración de metales en los lodos destinados a su utilización en la agricultura. Los valores se pueden ver en las Tablas 5.17 y 5.18 respectivamente.

**Tabla 5.17 - Valores límite de concentración de metales pesados en los suelos (mg/kg de materia seca de una muestra representativa de los suelos cuyo pH sea de 6 a 7)**

*Fuente – Directiva 86/278 de la CEE, Anexo 1A*

Parámetros	Valores límite (1)
Cadmio	1 a 3
Cobre (2)	50 a 140
Níquel (2)	30 a 75
Plomo	50 a 300
Zinc (2)	150 a 300
Mercurio	1 a 1.5
Cromo (3)	-

- (1) Los Estados miembro podrán autorizar que se sobrepasen los valores límites arriba citados en el caso de la utilización de los lodos en tierras que, en el momento de la notificación de la presente Directiva, estén dedicadas a la eliminación de los lodos, pero en las que se efectúen cultivos con fines comerciales destinados exclusivamente al consumo animal. Los estados miembros comunicarán a la Comisión el número y la naturaleza de los lugares afectados. Velarán, además, porque de ello no resulte ningún peligro para el ser humano ni para el medio ambiente.
- (2) Los Estados miembros podrán autorizar que se sobrepasen los valores límite para dichos parámetros en suelos cuyo pH sea constantemente superior a 7. En ningún caso las concentraciones máximas autorizadas de dichos metales pesados deberán sobrepasar en más de un 50% los valores arriba citados. Los Estados miembros velarán, además, porque de ello no resulte peligro alguno para el hombre ni el medio ambiente, especialmente para las capas de agua subterránea.
- (3) No es posible en esta fase fijar los valores límite para el cromo. El Consejo fijará estos valores límite en una fase posterior sobre la base de propuestas que presentará la Comisión en un plazo de un año tras la notificación de la presente Directiva.

**Tabla 5.18 - Valores límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización en agricultura (mg/kg de materia seca)**

*Fuente – Directiva 86/278 de la CEE, Anexo 1B*

Parámetros	Valores límite (1)
Cadmio	20 a 40
Cobre (2)	1000 a 1750
Níquel (2)	300 a 400
Plomo	750 a 1200
Zinc (2)	2500 a 4000
Mercurio	16 a 25
Cromo (1)	-

- (1) No es posible en esta fase fijar los valores límite para el cromo. El Consejo fijará estos valores límite en una fase posterior sobre la base de propuestas que presentará la Comisión en un plazo de un año tras la notificación de la presente directiva.

Tras revisar las fuentes disponibles, no se encontró evidencia de que se hayan establecido valores límite específicos para el cromo en una actualización posterior de la Directiva 86/278/CEE.

La Directiva 86/278 sigue siendo la normativa principal de la UE. Se introdujeron cambios en la misma a través del Reglamento 2019/1010 pero los mismos son referentes a las obligaciones de información para lograr garantizar mayor transparencia.

En 1993 la USEPA presenta la “*Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge (40 CFR Part 503)*”. Esta guía establece los estándares para el tratamiento, uso y disposición de los biosólidos.

En ella se clasifican los biosólidos en base a su nivel de tratamiento y presencia de contaminantes:

- Clase A: Biosólidos con niveles de patógenos reducidos a niveles seguros, que pueden usarse sin restricciones.
- Clase B: Requieren restricciones de uso y monitoreo adicional debido a niveles más altos de patógenos.

Para cada uno de ellos define los siguientes valores de patógenos:

- Clase A - Cultivos de organismos indicativos:
    - *Salmonella* spp.: menos de 3 NMP/ 4 gramos de ST
    - O bien, colifagos o enterovirus: menos de 1 UFP/ 4 gramos de ST
- Y además cumplir con uno de los 6 procesos autorizados de tratamiento:
- Compostaje: los biosólidos deben alcanzar una temperatura de al menos 55°C durante:
    - 15 días para el método de pila estática con aireación forzada, o
    - 14 días para la pila volteada, con al menos 5 volteos y temperaturas mantenidas a  $\geq 55^{\circ}\text{C}$ .
  - Secado térmico: los biosólidos deben secarse a una temperatura suficientemente alta para reducir el contenido de humedad a  $\leq 10\%$ . La temperatura del material debe superar los 80 °C durante el proceso.
  - Secado al aire en camas solares: solo aceptado en climas cálidos. El material debe exponerse al sol, calor y aire durante un período suficiente para alcanzar niveles aceptables de patógenos. Este proceso está limitado a ciertas condiciones climáticas.
  - Digestión termófila aerobia o anaerobia: debe mantenerse a una temperatura de al menos 50 °C por 5 a 7 días, dependiendo del tipo de digestión.
  - Pasteurización: el biosólido debe exponerse a una temperatura de  $\geq 70^{\circ}\text{C}$  durante por lo menos 30 minutos. Este tratamiento asegura la eliminación de patógenos sin necesidad de compostaje.
  - Lodos alcalinizados (aumento de pH): se eleva el pH a  $\geq 12$  por al menos 72 horas, y la temperatura del material debe mantenerse  $> 52^{\circ}\text{C}$  durante al menos 12 horas dentro de ese período. Normalmente se logra agregando cal (óxido o hidróxido de calcio).
- Clase B - Cultivos de organismos indicativos:
    - *Salmonella* spp.:  $< 2 \times 10^6$  NMP/ gramo de ST

No exige eliminación completa de patógenos, pero sí cumplir con al menos uno de los procesos de reducción de patógenos mencionados para los biosólidos de clase A.

En cuanto a los metales, los valores límites se presentan en la Tabla 5.19.

**Tabla 5.19 - Valores límite de concentración de metales en los lodos**

*Fuente – Sección 503.13 del 40 CFR Parte 503, UESPA 1993*

<b>Metales pesados</b>	<b>Límite Máximo uso con restricciones (mg/kg base seca)</b>	<b>Límite Máximo uso sin restricciones – Clase A (mg/kg base seca)</b>
Arsénico	75	41
Cadmio	85	39
Cromo	3000	1200
Cobre	4300	1500
Plomo	840	300
Mercurio	57	17
Molibdeno	75	40
Níquel	420	420
Selenio	100	36
Zinc	7500	2800

En cuanto a las Normas ISO, la ISO 275:2004 “Sludge — Good practice for sludge utilization in agriculture” fue una de las primeras en sugerir prácticas seguras para el uso agrícola de lodo. En 2020 se presenta la Norma ISO 19698:2020 “Sludge recovery, recycling, treatment and disposal — Bio-dried sludge — Requirements and test methods” que es la que continúa vigente hoy día.

En lo que respecta a la región se presenta la normativa relevada ordenada según el año de aprobación.

En Argentina está actualmente vigente la Resolución 97/2001, que aprueba el Reglamento para el Manejo Sustentable de Barros Generados en Plantas de Tratamiento de Efluentes Líquidos.

En el artículo 1 de dicho reglamento se definen los barros como la acumulación de sólidos separados en los procesos de tratamiento de efluentes líquidos.

Según el artículo 8, los barros se categorizan según superen o no el valor-límite establecido para los parámetros contemplados en la Tabla 5.20. Los que cumplen con la totalidad de los valores límite establecidos para los parámetros contemplados serán considerados barros de categoría A, mientras que aquellos barros en los que alguno de los parámetros supere el valor límite establecido serán considerados de categoría B.

**Tabla 5.20 – Atracción de Vectores. Determinaciones a realizar sobre barros (matriz)**

*Fuente – Resolución 97/2001 de la República Argentina – Tabla N°1 del Anexo III*

Indicador (*)	Método Analítico	Valor límite
Sólidos volátiles (SV)	Método 2250 (Standard Methods for the examination of water and wastewater EPA ed. 20 - 1988)	Reducción de SV > al 40 %
Nivel de Estabilización (para 5, 10, 20 y 40 g de muestra a 5, 10, 20 y 30 minutos)	Método 423 (Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1985)	Deflexión de oxígeno disuelto no mayor en promedio del 10 % del oxígeno disuelto del agua destilada de dilución.

También presentan los valores límites de metales y bifenilos policlorados (PCBs) en la Tabla 5.21 y los valores para caracterización microbiológica en la Tabla 5.22. Es importante destacar que la resolución es explícita en definir el método para la determinación; esa información no aparece detallada en este texto.

**Tabla 5.21 – Metales y PCBs. Determinaciones a realizar sobre barros (matriz)**

*Fuente – Resolución 97/2001 de la República Argentina – Tabla N°1 del Anexo III*

Parámetro	Valor límite en barros (mg/kg base materia seca)
Arsénico	75
Cadmio	20-40
Cinc	2500 a 4000
Cobre	1000 a 1750
Cromo Total	1000 a 1500
Mercurio	16 a 25
Níquel	300 a 400
Plomo	750 a 1200
Bifenilos policlorados (principales orígenes: 28, 52, 101, 118, 138, 153 y 180)	0,8

**Tabla 5.22 – Nivel de Patógenos. Determinaciones a realizar sobre barros (matriz)**

*Fuente – Resolución 97/2001 de la República Argentina – Tabla N°3 del Anexo III*

Parámetro	Valor límite nivel A	Valor límite nivel B
Escherichia coli	< 1000 NMP/g MS	<2.000.000 NMP/g MS
Salmonella	< 3 NMP/ 4g MS	
Huevos viables de Helminths	< 1/ 4g MS	
Indicadores virales	Resolución del 99,9% de la densidad de bacteriófago somáticos de Escherichia Coli	

Se definen valores límites de sustancias inorgánicas de los suelos en los que va a ser aplicado el lodo, estos valores se detallan en la Tabla 5.23.



**Tabla 5.23 – Condiciones para tratamiento biológico en suelos (según niveles guía de calidad de suelos para uso agrícola)**

*Fuente – Resolución 97/2001 de la República Argentina – Tabla N°6 del Anexo III*

Parámetros	Nivel guía uso agrícola (mg / Kg peso seco)
Cadmio (total)	3
Cobalto	40
Cromo (total)	750
Cromo (+6)	8
Mercurio (total)	0,8
Níquel (total)	150
Plata (total)	20
Plomo (total)	375
Vanadio	200

En 2002 México aprueba la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, 'Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final'.

Para efectos de esta Norma Oficial Mexicana los biosólidos se clasifican en tipo: excelente y bueno en función de su contenido de metales pesados; y en clase: A, B y C en función de su contenido de patógenos y parásitos. Se presentan a continuación las Tablas 5.24 y 5.25 con límites máximos de metales pesados, patógenos y parásitos.

**Tabla 5.24 – Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos**

*Fuente – Norma Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002*

Contaminante (determinados en forma total)	Excelentes (mg/kg en base seca)	Buenos (mg/kg en base seca)
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1 200	3 000
Cobre	1 500	4 300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2 800	7 500

**Tabla 5.25 – Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos**

*Fuente – Norma Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002*

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación (Coliformes fecales NMP/g en base seca)	Patógenos (Salmonella spp. NMP/g en base seca)	Parásitos (Huevos de helmintos/g en base seca)
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1 <sup>(a)</sup>
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

(a) Huevos de helmintos viables

El aprovechamiento de los biosólidos se establece en función del tipo y clase, como se especifica en la Tabla 5.26 y su contenido admisible de humedad hasta el 85 %.

**Tabla 5.26 – Aprovechamiento de biosólidos**

*Fuente – Norma Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002*

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación</li> <li>– Los establecidos para clase B y C</li> </ul>
Excelente o bueno	B	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación</li> <li>– Los establecidos para clase C</li> </ul>
Excelente o bueno	C	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Usos forestales</li> <li>– Mejoramientos de suelos</li> <li>– Usos agrícolas</li> </ul>

Guatemala, en mayo de 2006, aprueba el acuerdo gubernativo N° 236-2006 con el Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos.

Ese reglamento, en su artículo 41, establece que la disposición final de lodos se puede realizar mediante:

- Aplicación al suelo: acondicionador, abono o compost.
- Disposición en rellenos sanitarios.
- Confinamiento o aislamiento.
- Combinación de las antes mencionadas.

Y para cada una de estas formas establece parámetros y límites máximos permisibles para lodos, que se presentan en la Tabla 5.27.

**Tabla 5.27 – Valores máximos permisibles de categorización de lodos para aplicación al suelo**

*Fuente – Acuerdo Gubernativo N° 236-2006– Artículo 41*

Variable	Unidad de Medida	Aplicación al suelo
Arsénico (As)	mg/kg de biosólido (base seca a 104 °C)	50
Cadmio (Cd)		50
Cromo (Cr)		1.500
Mercurio (Hg)		25
Plomo (Pb)		500

Brasil cuenta con la Resolución N° 375 (2006) que define criterios y procedimientos para uso agrícola de lodos generados en estaciones de tratamiento de efluentes y sus derivados. La resolución define requisitos mínimos de calidad de lodos. Estos requisitos se miden de acuerdo a sustancias inorgánicas y los agentes patógenos que contiene el lodo; se detallan los valores en las Tablas 5.28 y 5.29.

**Tabla 5.28 – Lodos de tratamiento o productos derivados – sustancias inorgánicas**

*Fuente – Resolución N° 375 (2006) – Sección III*

<b>Sustancia Inorgánica</b>	<b>Concentración Máxima permitida en el lodo o producto derivado (mg/kg base seca)</b>
Arsénico	41
Bario	1300
Cadmio	39
Plomo	300
Cobre	1500
Cromo	1000
Mercurio	17
Molibdeno	50
Níquel	420
Selenio	100
Zinc	2800

**Tabla 5.29 – Clases de lodo de tratamiento o producto derivado – agentes patógenos**

*Fuente – Resolución N° 375 (2006) – Sección III*

<b>Tipo de lodo o producto derivado</b>	<b>Concentración de Patógenos</b>
A	Coliformes termotolerantes <10 <sup>3</sup> NMP/g de ST Huevos viables de helmintos < 0,25 huevos/g de ST Salmonella ausencia en 10 g de ST Virus < 0,25 UFC/g de ST
B	Coliformes termotolerantes <10 <sup>6</sup> NMP/g de ST Huevos viables de helmintos < 10 huevos/g de ST

La resolución indica que, pasados 5 años desde la publicación, es decir a partir de 2011, solamente se permite la aplicación de lodos de clase A, excepto que sean propuestos nuevos criterios y/o límites basados en estudios con evaluación de riegos y datos epidemiológicos nacionales que demuestren la seguridad en el uso del lodo de clase B.

También se definen valores límites de sustancias inorgánicas de los suelos en los que va a ser aplicado el lodo, las que se detallan en la Tabla 5.30.

**Tabla 5.30 – Cargas acumuladas teóricas permitidas de sustancias inorgánicas para la aplicación de lodo de tratamiento o productos derivados en suelos agrícolas.**

*Fuente – Resolución N° 375 (2006) – Sección VII*

<b>Sustancia Inorgánica</b>	<b>Concentración acumulada teórica permitida de sustancias inorgánicas para la aplicación del lodo o producto derivado (kg/ha)</b>
Arsénico	30
Bario	265
Cadmio	4
Plomo	41
Cobre	137
Cromo	154
Mercurio	1.2
Molibdeno	13
Níquel	74

<b>Sustancia Inorgánica</b>	<b>Concentración acumulada teórica permitida de sustancias inorgánicas para la aplicación del lodo o producto derivado (kg/ha)</b>
Selenio	13
Zinc	445

Chile, por su parte, tiene el Decreto Supremo N°004 aprobado en enero de 2009 que aprueba el Reglamento para el manejo de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas.

Este reglamento clasifica a los lodos en Clase A y Clase B, donde los de Clase A son lodos sin restricciones sanitarias para aplicación al suelo, mientras que los de Clase B tienen restricciones sanitarias de aplicación según tipo y localización de los suelos o cultivos. En la Tabla 5.31 se detallan las concentraciones de patógenos para cada clase.

**Tabla 5.31 – Clases de lodo de tratamiento**

*Fuente – Decreto Supremo N°004 – Artículos 7 y 8*

<b>Clase de lodo</b>	<b>Concentración de Patógenos</b>
A	Coliformes fecales < 1000 NMP/g de ST base seca Salmonella sp. < 3 NMP / 4 g de ST base seca. Huevos viables de helmintos < 1 huevos / 4 g de ST base seca
B	Coliformes fecales* < 2.000.000 NMP/ g de ST base seca
(*) el valor hace referencia a la media geométrica del contenido de coliformes fecales, producto del análisis de un número de muestras no inferior a 7, tomadas al momento de su uso o su eliminación.	

En los artículos 22 y 24 se detallan las concentraciones máximas de metales en el suelo receptor y en lodos para aplicación al suelo. Los valores se presentan en las Tablas 5.32 y 5.33.

**Tabla 5.32 – Concentraciones máximas de metales en suelo receptor**

*Fuente – Decreto Supremo N°004 – Artículo 22*

<b>Metal</b>	<b>Concentración máxima en mg/kg suelo (en base materia seca)</b>		
	<b>Macrozona norte</b>		<b>Macrozona sur</b>
	<b>pH&gt;6,5</b>	<b>pH≤6,5</b>	<b>pH&gt;5</b>
Arsénico	20	12,5	10
Cadmio	2	1,25	2
Cobre	150	100	75
Mercurio	1,5	1	1
Níquel	112	50	30
Plomo	75	50	50
Selenio	4	3	4
Zinc	175	120	175

**Tabla 5.33 – Concentraciones máximas de metales en lodos para aplicaciones al suelo**

*Fuente – Decreto Supremo N°004 – Artículo 24*

Metal	Concentración máxima en mg/kg de ST (base materia seca)	
	Suelos que cumplen con los requisitos establecidos en este título	Suelos degradados que cumplen los requisitos establecidos en este título
Arsénico	20	40
Cadmio	8	40
Cobre	1000	1200
Mercurio	10	20
Níquel	80	420
Plomo	300	400
Selenio	50	100
Zinc	2000	2800

Colombia cuenta con el Decreto 1287 aprobado en el año 2014. Este decreto define “biosólidos” como el producto resultante de la estabilización de la fracción orgánica de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales municipales, con características físicas, químicas y microbiológicas que permiten su uso.

Para estos biosólidos indica los valores máximos permisibles separando estos valores según categoría A y B, tal como se presenta en la Tabla 5.34.

**Tabla 5.34 – Valores máximos permisibles de categorización de biosólidos para su uso**

*Fuente – Decreto 1287 – Artículo 5*

Criterio	Variable	Unidad de Medida	Categoría Biosólido A	Categoría Biosólido B
Químicos– Metales	Arsénico (As)	mg/kg de biosólido (base seca)	20,0	40,0
	Cadmio (Cd)		8,0	40,0
	Cobre (Cu)		1.000,0	1.750,0
	Cromo (Cr)		1.000,0	1.500,0
	Mercurio (Hg)		10,0	20,0
	Molibdeno (Mb)		18,0	75,0
	Níquel (Ni)		80,0	420,0
	Plomo (Pb)		300,0	400,0
	Selenio (Se)		36,0	100,0
	Zinc (Zn)		2.000,0	2.800,0
Microbiológicos	Coliformes fecales	UFC/g de biosólido (base seca)	<1,00 E(+3)	<2,00 E(+6)
	Huevos de Helmintos Viables	Huevos viables/4 g de biosólido (base seca)	<1,0	<10,0
	Salmonella sp.	Unidades Formadoras de Colonias UFC en 25g de biosólido (base seca)	Ausencia	<1,00 E(+3)
	Virus Entéricos	Unidades Formadoras de Placas UFP/4 g de biosólido (base seca)	<1,0	

En el artículo 8 del Decreto 1287 se determinan los posibles usos de los biosólidos dependiendo de la categoría y clasificación en que se encuentran.

#### Categoría A

- En zonas verdes tales como cementerios, separadores viales, campos de golf y lotes vacíos.
- Como producto para uso en áreas privadas tales como jardines, antejardines, patios, plantas ornamentales y arborización.
- En agricultura.
- Los mismos usos de la Categoría B.

#### Categoría B

- En agricultura, se aplicará al suelo.
- En plantaciones forestales.
- En la recuperación, restauración o mejoramiento de suelos degradados.
- Como insumo en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes orgánicos o productos acondicionadores para suelos a través de tratamientos físicos, químicos y biológicos que modifiquen su calidad original. Los procesos de elaboración y características de los productos finales y su uso, queda sujeto a la regulación establecida por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).
- Para remediación de suelos contaminados, lechos biológicos para el tratamiento de emisiones y vertimientos, soporte físico y sustrato biológico en sistemas de filtración, absorción y adsorción.
- Como insumo en la fabricación de materiales de construcción.
- En la estabilización de taludes de proyectos de la red vial nacional, red vial secundaria o terciaria.
- En la operación de rellenos sanitarios como: cobertura diaria, cobertura final de cierre y de clausura de plataformas y en actividades de revegetalización y paisajismo.
- Actividades de revegetalización y paisajismo de escombreras.
- En procesos de valorización energética.

Perú, en el 2017 aprueba el Decreto Supremo N°015-2017-VIVIENDA que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.

Este reglamento clasifica los biosólidos de acuerdo con sus características:

- Biosólido de Clase A: son aquellos aplicables al suelo sin restricciones sanitarias
- Biosólido de Clase B: son aquellos aplicables al suelo con restricciones sanitarias.

Para poder ser calificados como clase A o clase B deben ser estabilizados, para ello el reglamento establece que la concentración de materia orgánica (SV) < 60 % de materia seca (ST).

**Tabla 5.35 – Parámetros de toxicidad química en biosólidos de Clase A y Clase B**

*Fuente – Decreto Supremo N°015-2017-VIVIENDA – Artículo 13*

Parámetro químico	mg/kg ST Materia Seca
Arsénico	40
Cadmio	40
Cromo	1200
Cobre	1500
Plomo	400
Mercurio	17
Níquel	400
Zinc	2400

En caso la concentración exceda uno de los valores indicados en la Tabla 5.35, el lodo no puede ser calificado como biosólido de Clase A ni de Clase B.

Además, en el artículo 14 se establecen los parámetros de higienización que se presentan en la Tabla 5.36.

**Tabla 5.36 – Parámetros higienización de biosólidos**

*Fuente – Decreto Supremo N°015-2017-VIVIENDA – Artículo 14*

Indicador	Clase A	Clase B
Indicadores de contaminación fecal	Escherichia coli < 1000 NMP/1g ST o Salmonella spp. < 1 NMP/10g ST	El nivel de higienización se puede demostrar con el cumplimiento de los procesos previstos en el Anexo I, en su defecto mediante alguna de las tecnologías indicadas para la higienización, en la sección B del Anexo II
Indicador de huevos de helmintos	Huevos viables de Helmintos < 1/4g ST o Prueba de utilización de tecnologías indicadas para la higienización	

El anexo I plantea las siguientes tecnologías de estabilización:

- 1- Proceso de tratamiento de aguas residuales que permitan la permanencia de lodo por varios años: lagunas de estabilización, lagunas anaerobias facultativas, aireadas y lagunas utilizando el proceso de fitodepuración.
- 2- Procesos de tratamiento de aguas residuales con tiempo prolongado de permanencia de lodo en ambiente aerobio: lodos activados por aireación extendida, filtro percolador con recirculación del efluente.
- 3- Procesos de tratamiento de aguas residuales con tiempo prolongado de permanencia de lodo en ambiente anaerobio: tanques Imhoff, RAFAML (reactor anaerobio de flujo ascendente y manto de lodos), otros sistemas anaerobios debidamente justificados en los que se demuestre un tiempo prolongado de permanencia de lodos.
- 4- Procesos de digestión anaerobia y aerobia de lodos: digestor de lodo y compostaje de lodo.

Observación: para la eficiencia de estos procesos, los lodos pueden ser mezclados con sustratos complementarios que no tengan efecto negativo a la calidad del biosólido.

- 5- Otros procesos: es necesario que se pruebe la eficiencia en relación a la estabilización de los lodos frente a la Autoridad Sanitaria.

Los lodos residuales que se extraen de procesos de tratamiento de aguas residuales señalados en los incisos 1, 2 y 3 en condiciones de operación de acuerdo con el diseño, se consideran como estabilizados sin necesidad de comprobar la relación de SV a ST

Los procesos alternativos de higienización mencionados en la Sección B del Anexo II son:

- 1- Secado al aire: es el proceso de secado sobre una cama de arena en lechos de poca profundidad. El proceso debe comprender un tiempo mínimo de tres meses de secado.
- 2- Mineralización: es el proceso de secado de lodo combinado con la fitodepuración (lechos de lodo sembrado con macrófitos) que permitan la permanencia de lodo por tiempo prolongado de varios meses hasta años.
- 3- Digestión anaerobia mesofílica: los valores del tiempo de residencia medio de lodo son de 25 días como mínimo a una temperatura entre 30°C a 38°C o de 40 días a una temperatura entre 20°C a 29°C.
- 4- Compostaje: es el proceso de compostaje confinado, pilas aireadas estáticas o pilas de volteo, la temperatura mínima de los lodos debe elevarse durante 5 días a un mínimo de 40°C.
- 5- Estabilización con cal: procedimiento en el cual se agrega cal, viva o apagada, para elevar el pH de los lodos a 12, durante un período no inferior a dos horas.
- 6- Proceso de tratamiento equivalente: es el proceso cuyo uso sea previamente aprobado por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

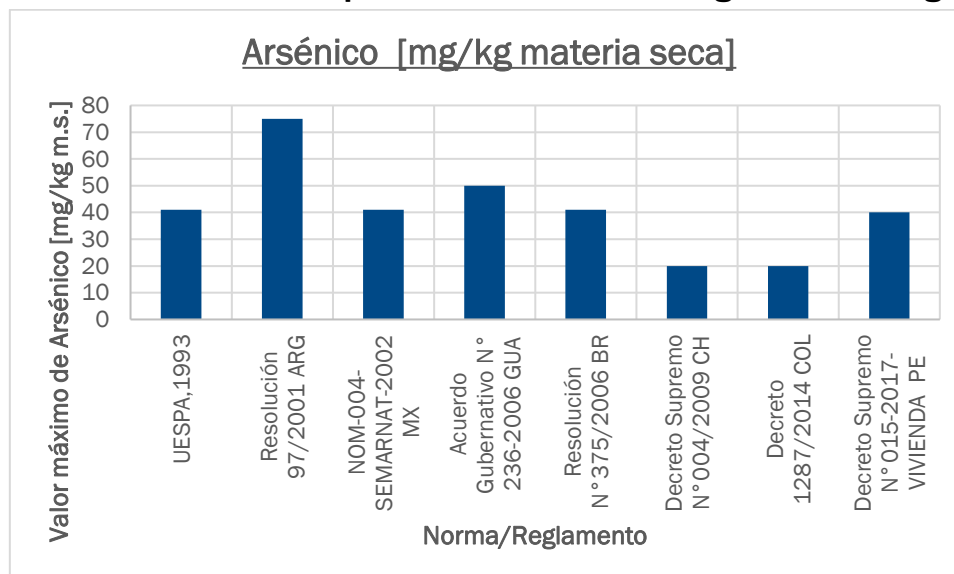
En noviembre 2020, El Salvador presenta lineamientos técnicos para la evaluación de actividades, obras o proyectos que comprendan el manejo y reúso de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales. Estos lineamientos se basan en la normativa de México en el entendido que en ella se establecen parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que son aplicables en El Salvador por la similitud de las regiones y las actividades consideradas para el reúso y disposición final de lodos residuales.

A continuación, se presenta una comparativa de los valores de metales de las distintas normativas, para esta comparativa se consideran los metales más reiterados en las normativas: arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc.

Al igual que las figuras comparativas presentadas para los efluentes, los valores de cada metal están ordenados de izquierda a derecha por año en que fueron aprobados.



**Figura 5.6 – Valores máximos permisibles de arsénico según norma o reglamento**

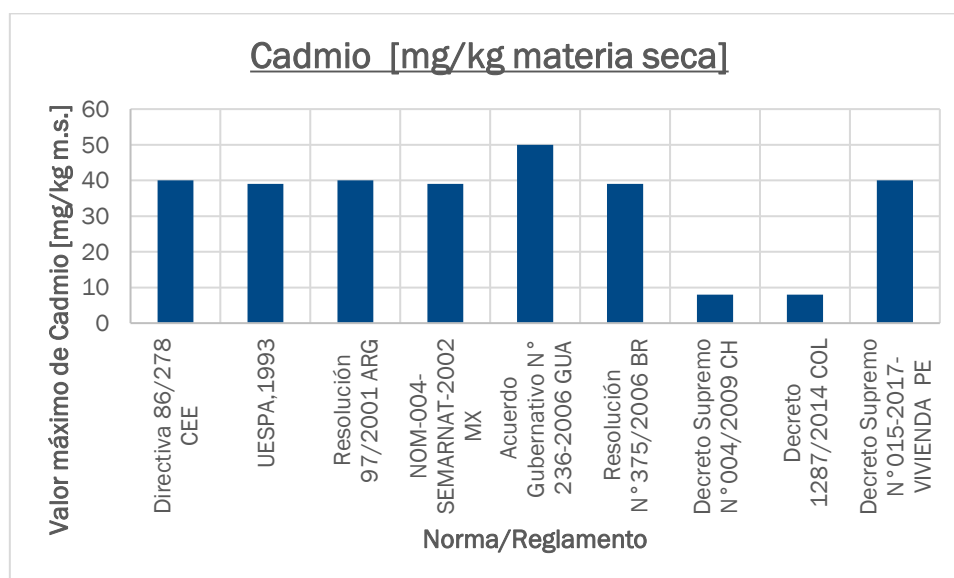


*Nota: La figura muestra los valores máximos de arsénico establecidos por diferentes normativas internacionales para reúso de lodos de PTAR.*

Se observan diferencias entre las regulaciones analizadas, lo cual refleja distintos niveles de exigencia ambiental y sanitaria en relación con la presencia de arsénico en los lodos reutilizados.

La norma más permisiva es la Resolución 97/2001 de Argentina, que establece un límite cercano a los 75 mg/kg. Le siguen la EPA de EE. UU. (1993) y la Resolución N°375/2006 de Brasil, ambas con límites en torno a los 40–41 mg/kg. En un rango intermedio se encuentran USEPA, México, Brasil y Perú, con límites que oscilan entre los 30 y 40 mg/kg. Mientras, los límites más restrictivos corresponden a Chile y Colombia con 20 mg/kg.

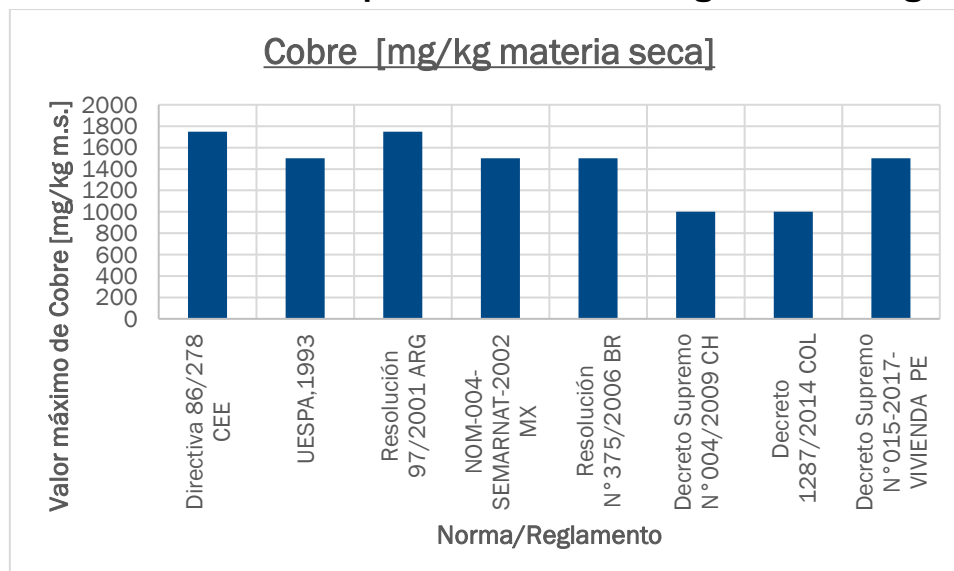
**Figura 5.7 – Valores máximos permisibles de cadmio según norma o reglamento**



*Nota: La figura muestra los valores máximos de cadmio establecidos por diferentes normativas internacionales para reúso de lodos de PTAR.*

En la Figura 5.7 se observa que la mayoría de los países establecen límites relativamente similares para el cadmio, en torno a los 40 mg/kg ms. Guatemala presenta el valor más permisivo del grupo, mientras que en el otro extremo se encuentran Colombia y Chile con valores notoriamente más restrictivos que el promedio.

**Figura 5.8 – Valores máximos permisibles de cobre según norma o reglamento**

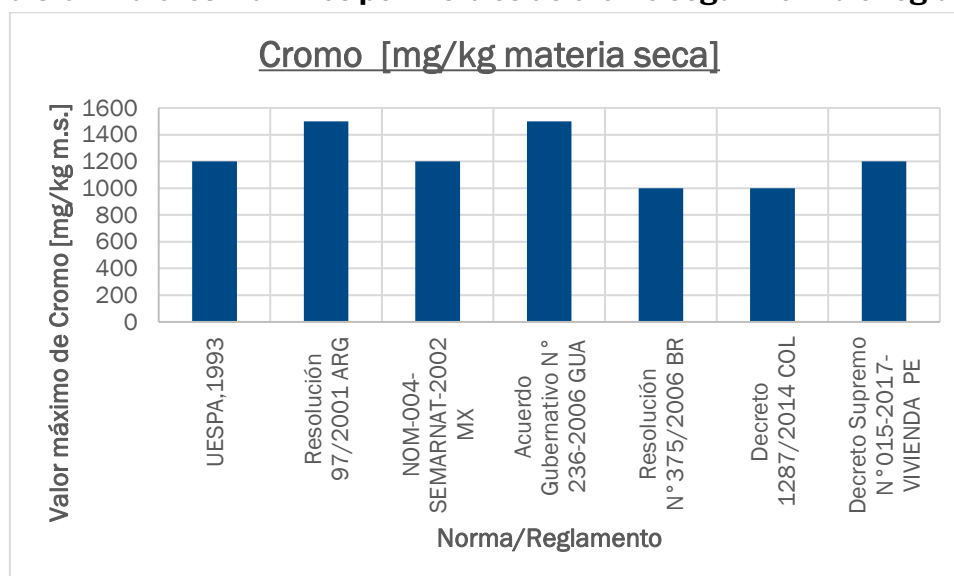


*Nota: La figura muestra los valores máximos de cobre establecidos por diferentes normativas internacionales para reúso de lodos de PTAR.*

La Figura 5.8 revela que hay un acuerdo considerable en los límites admisibles de cobre; para la mayoría de los países estudiados los valores oscilan entre 1500 y 1750 mg/kg ms,

siendo nuevamente Chile y Colombia los países más restrictivos con un límite de 1000 mg/kg ms.

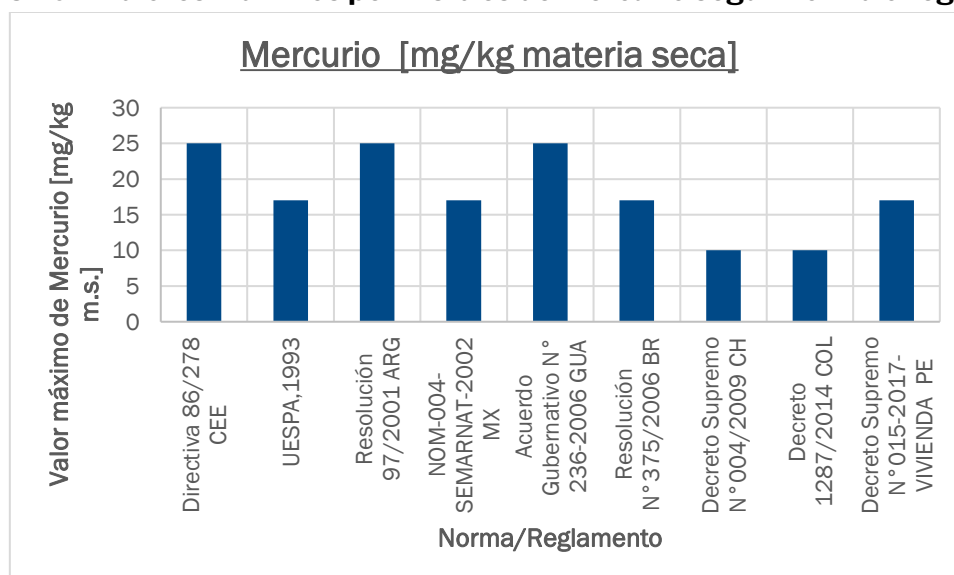
**Figura 5.9 – Valores máximos permisibles de cromo según norma o reglamento**



*Nota: La figura muestra los valores máximos de cromo establecidos por diferentes normativas internacionales para reúso de lodos de PTAR.*

Para el caso del cromo, Argentina y Guatemala son los más permisivos. En un punto intermedio se encuentran USEPA, México y Perú. Y nuevamente aparecen como los más restrictivos Chile y Colombia.

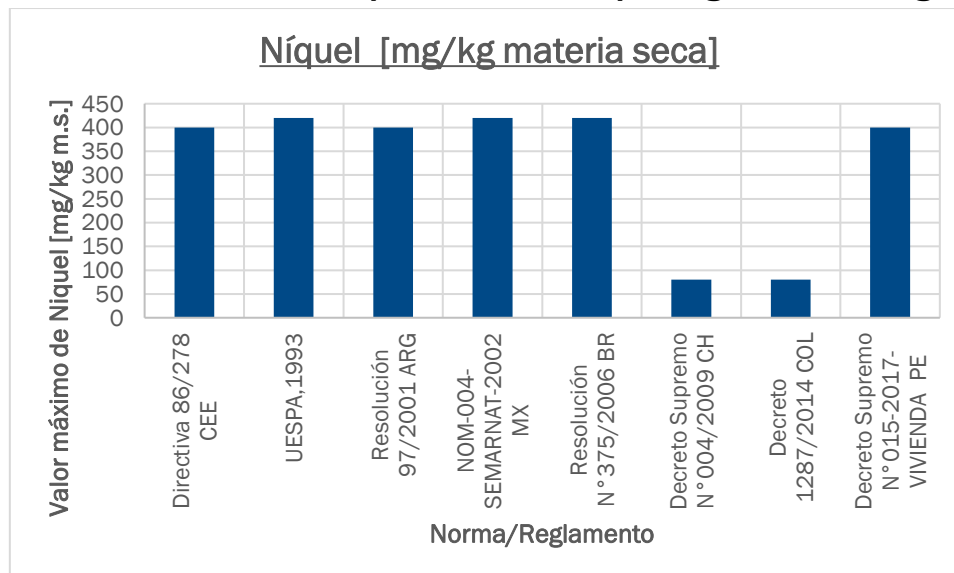
**Figura 5.10 – Valores máximos permisibles de mercurio según norma o reglamento**



*Nota: La figura muestra los valores máximos de mercurio establecidos por diferentes normativas internacionales para reúso de lodos de PTAR.*

Como se ve en la Figura 5.10, las normas más permisivas en cuanto al mercurio son la Directiva 86/278 de la CEE, así como las de Argentina y Guatemala, que establecen límites cercanos a los 25 mg/kg ms, en el otro extremo como las más restrictivas aparecen Chile y Colombia, con límites en torno a los 10 mg/kg ms.

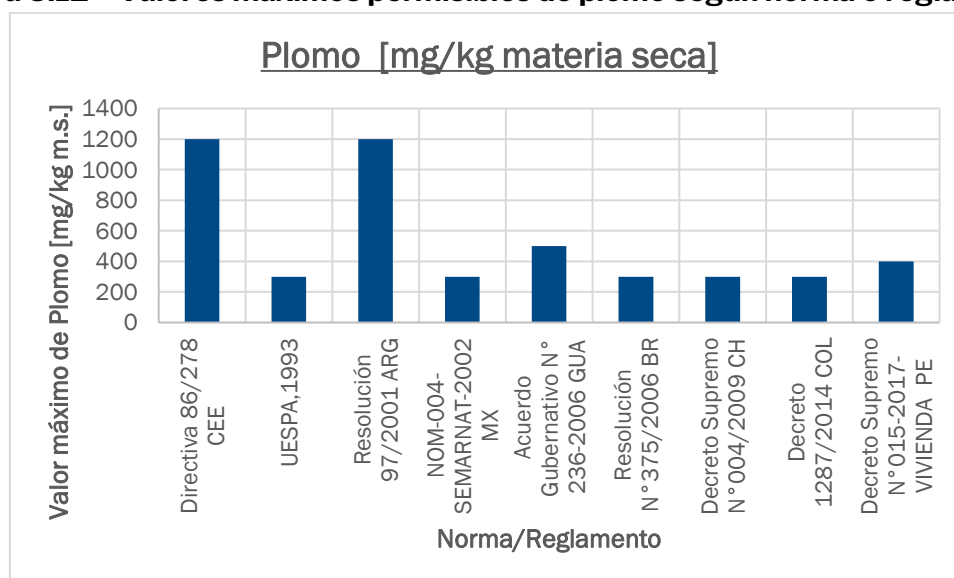
**Figura 5.11 – Valores máximos permisibles de níquel según norma o reglamento**



*Nota: La figura muestra los valores máximos de níquel establecidos por diferentes normativas internacionales para reúso de lodos de PTAR.*

En el caso del níquel, como se ve en la figura 5.11, la gran mayoría de las normas están de acuerdo en que el valor admisible está en torno a los 400 mg/kg ms, volviendo a ser los más restrictivos Chile y Colombia con un valor bastante por debajo 80 mg/kg ms.

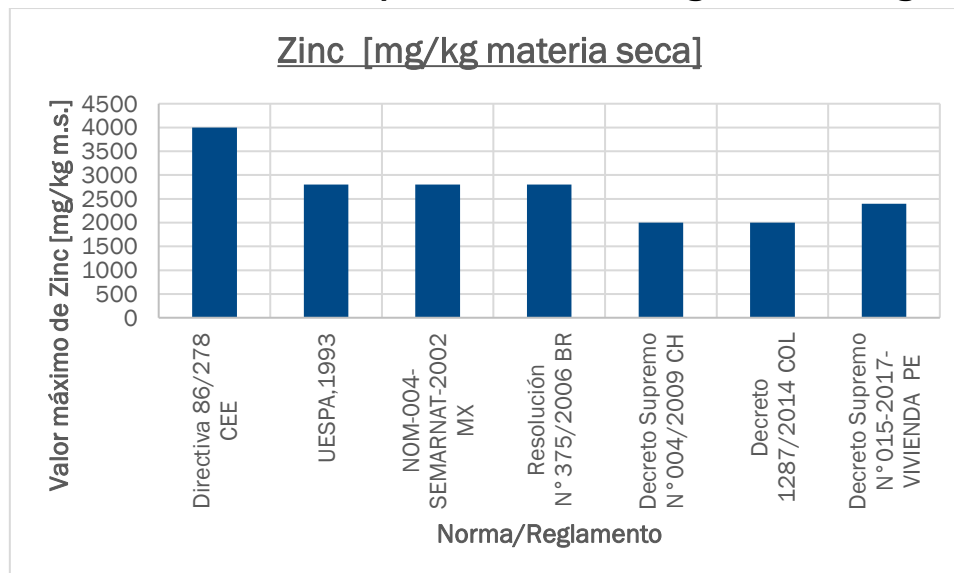
**Figura 5.12 – Valores máximos permisibles de plomo según norma o reglamento**



*Nota: La figura muestra los valores máximos de plomo establecidos por diferentes normativas internacionales para reúso de lodos de PTAR.*

En la Figura 5.12, se observa que tanto la Directiva 86/278 de CEE como la norma argentina son las más permisivas con un valor aceptado de plomo de 1200 mg/kg ms. El resto de los países son bastante más restrictivos admitiendo valores entre 300 y 500 mg/kg ms.

**Figura 5.13 –Valores máximos permisibles de zinc según norma o reglamento**



*Nota: La figura muestra los valores máximos de zinc establecidos por diferentes normativas internacionales para reúso de lodos de PTAR.*

Para el caso del zinc, como se ve en la Figura 5.13, el valor más permisivo es el de la Directiva 87/278 de CEE. El resto de las normativas son un poco más conservadoras y aceptan valores entre 2000 y 2800 mg/kg ms.

En general, se puede observar que las normas más antiguas, como la EPA de Estados Unidos (1993) y la Directiva 86/278 de la CEE, tienden a presentar valores más permisivos en varios metales (especialmente cobre, níquel, plomo y cromo). Esto se explica porque fueron elaboradas en una etapa temprana de desarrollo del marco regulatorio para el reúso de lodos, con menor conocimiento acumulado sobre los efectos a largo plazo de la acumulación de metales en suelos.

Algunos países como Argentina, Brasil, Guatemala y México adoptan valores intermedios o relativamente más permisivos que otras normas más actuales.

Las normas de países latinoamericanos aprobadas desde los años 2000 en adelante, como Chile (2009), Colombia (2014) y Perú (2017) tienden a ser más estrictas, especialmente con metales de alta toxicidad como arsénico, cadmio y mercurio. Estas regulaciones reflejan una adopción más reciente de criterios precautorios y posiblemente una mayor influencia de lineamientos internacionales actualizados y evidencia científica más reciente.

En conjunto, puede afirmarse que las regulaciones más recientes tienden a ser más conservadoras, especialmente en países donde el enfoque precautorio se ha fortalecido.

Algunas normativas como las de México, Brasil, Argentina, Chile y Perú además de valores de metales presentan valores para agentes patógenos. Los valores comparables son coliformes fecales, huevos de helminto y salmonella.

En el caso de los coliformes fecales todas las normas coinciden en que el valor admisible es de 1000 NMP/g de ST.

Para el caso de los huevos de helminto hay coincidencia total en que el valor admisible es de huevos/4g de ST.

En el caso de la Salmonella, Brasil y Colombia coinciden en que tienen que haber ausencia de salmonella cada 10g de ST, mientras que el resto de los países coinciden en que el valor admisible es de 3 huevos/4g de ST.

## 6. Resumen de casos de interés e investigaciones relevantes recientes o en curso

### 6.1. Sobre reúso de aguas residuales

#### NEWater Singapur

Singapur es una isla de 719,9 km<sup>2</sup>, situada al sudeste asiático, con una población de 5.9 millones de habitantes. Desde su independencia en 1965 el abastecimiento de agua potable dependía en gran medida de las importaciones de agua a Malasia. Sin embargo, Malasia amenazó repetidamente con detener las entregas y aumentar los precios. De ahí surgieron tensiones bilaterales y el temor de que acabara en un conflicto militar en 2002.

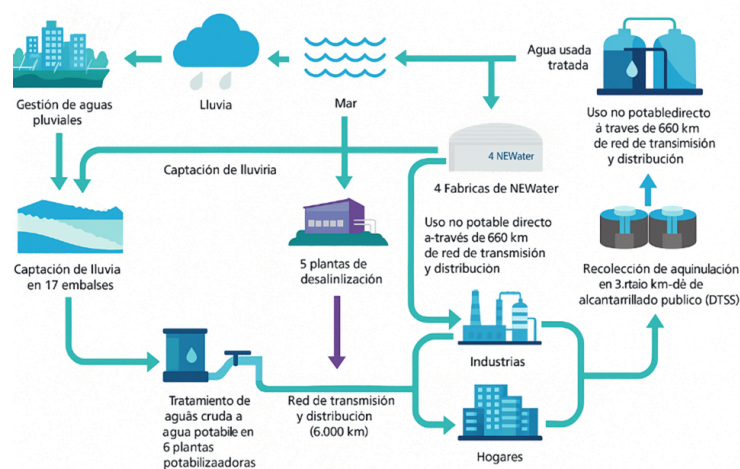
En la búsqueda de tener otras fuentes de agua, Singapur adopta un enfoque holístico donde una agencia supervisa todo el ciclo de agua, es decir, se encarga de captar, tratar, distribuir, recolectar y regenerar el agua. “Public Utilities Board” (PUB), difunde su filosofía mediante un programa llamado “The Four National Taps” (las cuatro canillas nacionales), dado que cuenta con 4 fuentes de suministro que son (Irvine et al., 2014):

1. importaciones desde Malasia
2. NEWater con su plan de reutilización
3. desalinización
4. cuencas locales y embalses.

Esta sección se centra en su plan de reutilización. En la Figura 6.1 se observa un diagrama de flujo que representa el ciclo cerrado de agua que propone PUB.

**Figura 6.1 – Ciclo cerrado de agua propuesto por PUB**

*Fuente - página web de PUB, consultada en agosto 2025*

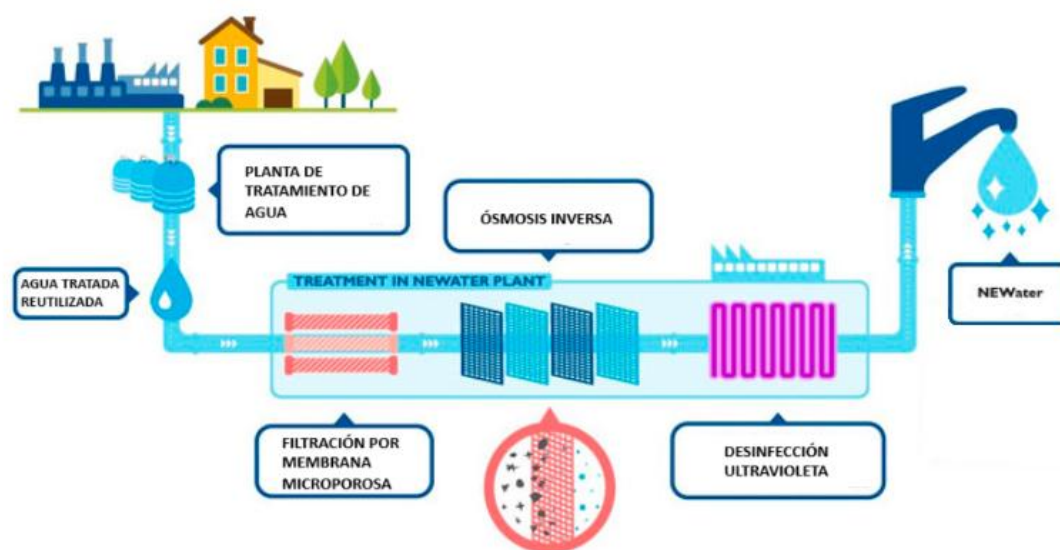


*Nota: La figura muestra la gestión integral del agua propuesta por PUB, dónde se pueden observar “The Four National Taps”*

NEWater es el término acuñado por PUB para describir el producto de la regeneración de agua mediante un proceso de purificación en múltiples etapas que incluye filtración por membrana microporosa, ósmosis inversa y desinfección ultravioleta ubicada aguas debajo de la planta de tratamiento de aguas residuales de Bedok, en la Figura 6.2 se observa un diagrama con las etapas mencionadas (H Seah et al., 2003).

**Figura 6.2 – Etapas de purificación de NEWater**

*Fuente – página web de PUB, consultada en agosto 2025*



*Nota: La figura muestra el tratamiento del efluente aguas debajo de la PTAR hasta llegar a convertirse en "NEWater"*

El tratamiento de NEWater es auditado frecuentemente, de forma rigurosa, por especialistas multidisciplinarios locales e internacionales. Aunque el producto final no está regulado como agua de bebida, cumple la reglamentación de calidad para agua potable de la Singapore Food Agency (2019) y cumple con las exigencias de la National Primary Drinking Water Regulations (NPDWR) de 2014 de la USEPA y las Directrices de calidad de agua potable de la OMS de 2022 (USEPA et al., 2025).

En la Tabla 6.1 se presentan los parámetros de calidad de agua provistos por NEWater a sus usuarios en 2022 y 2023.

**Tabla 6.1 – Parámetros de calidad de agua de NEWater**

*Fuente – Summary of Singapore's Water Reuse Guideline, USEPA 2025*

Parámetro	Valor
E. coli	< 1 UFC/100 mL
Color	< 5 Hazen
Conductividad	< 250 $\mu$ S/cm
Cloro (total)	< 2 mg/L
pH	7,0 – 8,5
Sólidos disueltos totales (TDS)	< 150 mg/L



Parámetro	Valor
Turbidez	< 5 NTU
Amonio (como N)	< 1 mg/L
Aluminio	< 0,1 mg/L
Bario	< 0,1 mg/L
Boro	< 0,5 mg/L
Calcio	< 20 mg/L
Cloruro	< 20 mg/L
Cobre	< 0,05 mg/L
Fluoruro	< 0,5 mg/L
Hierro	< 0,04 mg/L
Manganeso	< 0,05 mg/L
Nitrato (como N)	< 5 mg/L
Sodio	< 20 mg/L
Sulfato	< 5 mg/L
Sílice (como SiO <sub>2</sub> )	< 3 mg/L
Estroncio	< 0,1 mg/L
Trihalometanos totales (TTHM)	< 0,08 mg/L
Carbono orgánico total (COT/TOC)	< 0,5 mg/L
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	< 50 mg/L
Zinc	< 0,1 mg/L

Las fábricas de NEWater en Singapur tienen una capacidad de suministro de 760.000 m<sup>3</sup>/día, lo que representa el 40 % de la demanda de agua del país, y son una pieza clave de la estrategia de abastecimiento para preservar las reservas de agua potable para el consumo humano, a la vez que se garantiza un suministro sostenible de agua reciclada para uso industrial. Para 2060, se proyecta que el sector no doméstico aumente del 55 % actual al 70 % de la demanda futura de agua de Singapur, y que la capacidad de agua tratada avanzada se amplíe para esa demanda futura (PUB, 2018, en USEPA *et al.*, 2025).

La implementación de NEWater ha sido acompañada de campañas educativas y de concienciación, logrando una alta aceptación entre la población. El gobierno ha embotellado NEWater para su consumo, como se ve en la Figura 6.3, y la ha distribuido en eventos y festivales masivos demostrando su confianza en la calidad del agua producida.

En resumen, el proyecto NEWater es un ejemplo destacado de innovación en la gestión del agua, demostrando cómo la tecnología y la planificación estratégica pueden abordar desafíos críticos de recursos hídricos en entornos urbanos densamente poblados.

### **Figura 6.3 – Botella de NEWater para consumo humano**

*Fuente – página web de la Agencia Nacional de Agua de Singapur, consultada en agosto 2025*



*Nota: La figura muestra uno de los envases de NEWater*

### The Groundwater Replenishment System (GWRS) in Orange County, California

Orange County está al sur de California, con clima árido y 3 millones de habitantes. El Sistema de Recarga de Acuíferos (GWRS) en el condado de Orange, California, es la instalación de purificación de agua más grande del mundo destinada al reúso indirecto potable. Este sistema fue desarrollado en colaboración entre el Distrito de Agua del Condado de Orange (OCWD por sus siglas en inglés) y el Distrito de Saneamiento del Condado de Orange (OCSO por sus siglas en inglés). Utiliza aguas residuales altamente tratadas, que normalmente habrían sido vertidas al océano Pacífico, y las purifica mediante un proceso avanzado que incluye microfiltración, ósmosis inversa y desinfección con luz ultravioleta y peróxido de hidrógeno. El agua resultante cumple con todos los estándares federales y estatales para el consumo humano.

El acuífero del norte abastece a la mayoría de la población y economía. La sobreexplotación se detectó en 1930. En 1933 se creó OCWD para gestionar agua superficial y subterránea. En 1975 inició Water Factory 21, primera planta en California en usar ósmosis inversa para reutilización potable, operando hasta 2004. En 2008 comenzó el GWRS, basado en avances tecnológicos y necesidad de independencia de agua importada, con una capacidad de 243.000 m<sup>3</sup>/día (Miller *et al.*, 2019).

Posteriormente, en 2015 y 2020 se realizaron dos expansiones que elevaron la capacidad llegando a 452.000 m<sup>3</sup>/día en 2023, alcanzando así el objetivo final. Este hito permitió reciclar el 100% del flujo de aguas residuales recuperables del Distrito de Saneamiento del Condado de Orange (OC San), suficiente para abastecer a un millón de personas (Clark *et al.*, 2025).

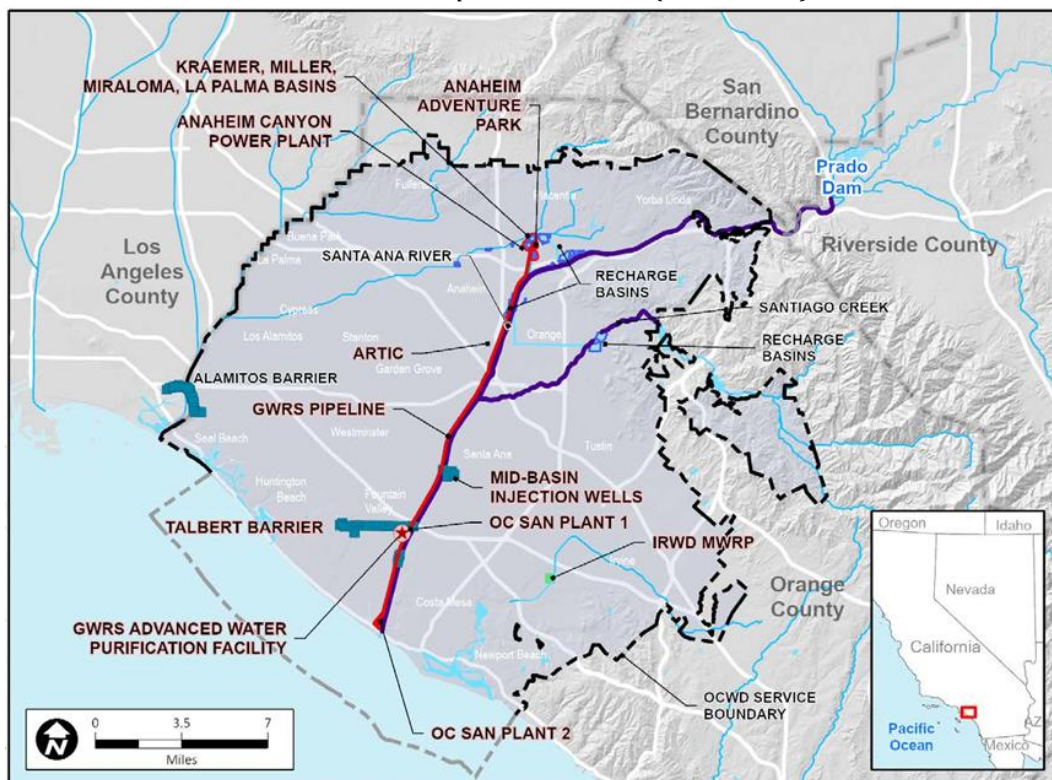
En el reporte anual del GWRS, se detalla que este consta de cinco componentes principales:

- Planta de Purificación Avanzada de Agua (AWPF): que es dónde se realiza el proceso de tratamiento de agua reciclada purificada.
- Barrera contra la intrusión salina de Talbert (Talbert Barrier): compuesta por 36 pozos de inyección, respaldados por una extensa red de pozos de monitoreo de aguas subterráneas.
- Cuencas Kraemer-Miller-Miraloma-La Palma (K-M-M-L Basins): cuatro estanques de infiltración autorizados, apoyados por bombas de desagüe para mantenimiento y numerosos pozos de monitoreo de aguas subterráneas.
- Proyecto de Inyección de Media Cuenca (Mid-Basin Injection, MBI): consta de cinco pozos de inyección y respaldados por pozos de monitoreo ubicados aguas abajo.
- Tres usuarios finales no potables: la Planta de Energía Anaheim Canyon (Anaheim CPP), el Centro Regional de Transporte Intermodal de Anaheim (ARTIC) y el Anaheim Adventure Park (AAP), que opera en la Cuenca Miraloma y utiliza el agua reciclada purificada ya entregada a ese sitio para recarga.

En la Figura 6.4 se puede ver el mapa de localización del sistema de GWRS

**Figura 6.4 – Mapa de localización del sistema de GWRS**

*Fuente – GWRS reporte anual 2024 (Burris, 2025)*



*Nota: La figura muestra el mapa de localización del sistema de GWRS.*

La AWPf recibe aguas residuales tratadas secundarias de las instalaciones de OC San, que pueden complementarse con cantidades limitadas de aguas residuales tratadas terciarias de las instalaciones del Irvine Ranch Water District (IRWD).

La AWPf trata el agua fuente para superar los estándares de agua potable mediante un proceso avanzado completo que incluye:

- Filtración por membranas (MF),
- Ósmosis inversa (RO),
- Oxidación avanzada/desinfección, que consiste en la adición de peróxido de hidrógeno y exposición a luz ultravioleta (UV/AOP),
- seguido de descarbonatación parcial y estabilización con cal.

Durante 2024, la mayor parte del agua reciclada purificada producida por la AWPf fue inyectada en la Barrera Talbert o infiltrada en las Cuencas K-M-M-L; un volumen menor se inyectó en el Proyecto MBI y se suministró a clientes de agua no potable.

La Barrera Talbert es abastecida por tuberías desde la Estación de Bombeo de Barrera de la AWPf. El OCWD construyó la barrera de inyección para formar un montículo hidráulico subterráneo, que evita la intrusión de agua de mar cerca de la costa en el área de Talbert Gap. Sin la Barrera Talbert, el agua de mar migraría tierra adentro y contaminaría el suministro de agua dulce del acuífero.

Además de proporcionar control de intrusión salina, la Barrera Talbert también inyecta agua reciclada purificada en el acuífero principal, con el propósito principal de recargar el acuífero. Agua potable también puede inyectarse en la barrera cuando es necesario, aunque no se requiere mezclarla con el agua reciclada.

La recarga con agua reciclada del GWRS en Kraemer y Miller Basins comenzó en enero de 2008 junto con la puesta en marcha del resto de los componentes originales del GWRS. La Cuenca Miraloma comenzó a infiltrar agua reciclada purificada en julio de 2012, y la Cuenca La Palma en noviembre de 2016. Mientras que la recarga con agua reciclada purificada se limita a las Cuencas K-M-M-L, otras aguas también pueden recargarse en estas cuencas.

Las derivaciones desde la tubería del GWRS abastecen de agua reciclada purificada al Proyecto MBI, a la Planta de Energía Anaheim Canyon (CPP) y al Centro Regional de Transporte Intermodal de Anaheim (ARTIC).

El primer componente del Proyecto MBI (*Demonstration MBI o DMBI Project*) comenzó a operar en abril de 2015 con un pozo de inyección (MBI-1) cerca del Río Santa Ana en Fountain Valley. El segundo elemento del Proyecto MBI (*MBI Centennial Park Project*) en Santa Ana comenzó a inyectar agua reciclada purificada en cuatro pozos de inyección (MBI-2 a MBI-5) en marzo de 2020.

Los suministros de agua reciclada purificada para usos no potables a Anaheim CPP y ARTIC comenzaron en julio de 2011 y noviembre de 2014, respectivamente. Un tercer usuario no potable, el Anaheim Adventure Park (AAP), comenzó a operar en la Cuenca Miraloma en julio de 2021.

Durante 2024, la AWPf produjo aproximadamente 341.00 m<sup>3</sup>/día. En la Tabla 6.2 se resumen la calidad promedio del agua reciclada purificada. En el resumen anual 2024 se detalla además que:

- Las concentraciones de constituyentes inorgánicos en el agua purificada, como aluminio y cromo, fueron no detectables o, cuando se detectaron, estuvieron muy por debajo de los límites establecidos.
- Las concentraciones de contaminantes orgánicos, tales como compuestos orgánicos volátiles, pesticidas y otros compuestos orgánicos sintéticos, también fueron no detectables o muy inferiores a los límites normativos.
- Los análisis de agua purificada respecto a compuestos no regulados y contaminantes emergentes, como disruptores endocrinos y productos farmacéuticos, resultaron no detectables o, si se detectaron, estuvieron en niveles inferiores a los umbrales de riesgo para la salud pública.

**Tabla 6.2 – Calidad promedio del agua reciclada purificada en 2024**

*Fuente – GWRS reporte anual 2024 (Burris, 2025)*

Nombre del parámetro	Unidades	Agua producto final	Límite permitido
Conductividad eléctrica	µS/cm	94	900
Sólidos disueltos totales	mg/L	47	500
pH	unidades	8,25	6 – 9
Cloruro	mg/L	3,7	55
Nitrógeno total	mg/L	0,8	10
Arsénico	µg/L	<1	10
1,2,3-Tricloropropano (1,2,3-TCP)	µg/L	<0,005	0,005
N-nitrosodimetilamina (NDMA)	ng/L	0,3	N/A
1,4-Dioxano	µg/L	<0,5	N/A
Ácido perfluorooctanoico (PFOA)	ng/L	<2	N/A
Ácido perfluorooctano sulfónico (PFOS)	ng/L	<2	N/A
Ácido perfluorobutano sulfónico (PFBS)	ng/L	<2	N/A
Ácido perfluorohexano sulfónico (PFHxS)	ng/L	<2	N/A
Carbono orgánico total (no filtrado)	mg/L	0,06	0,5
Coliformes totales	MPN/100 mL	0,2	2,2

Durante 2024, el GWRS cumplió con los requisitos de reducción de microorganismos patógenos. En la Tabla 6.3 se muestran los valores diarios de reducción logarítmica total de patógenos alcanzados en 2024 en comparación con los requisitos normativos.

**Tabla 6.3 – Calidad promedio del agua reciclada purificada en 2024**

*Fuente – GWRS reporte anual 2024 (Burris,2025)*

Patógeno	Requisito mínimo de reducción log <sup>1</sup>	Tratamiento secundario <sup>2</sup>	MF y Cl <sub>2</sub>	RO <sup>3</sup>	UV/AOP	Tiempo de retención subterránea <sup>4</sup> / Total
Quistes de Giardia	10	0	≥4.0	2.0	6.0	0 / ≥10
Ooquistes de Cryptosporidium	10	0	≥4.0	2.0	6.0	0 / ≥10
Virus	12	0	0	2.0	6.0	4 (5) / ≥12

Notas:  
1. Según los Criterios de Reciclaje de Agua del Título 22 (CCR, 2018) y el permiso GWRS (RWQCB, 2022a).  
2. No se reclamaron créditos de reducción logarítmica por tratamiento secundario en OC San.  
3. Los créditos de reducción logarítmica diarios alcanzados por la ósmosis inversa (RO) en 2024 fueron iguales o superiores a 2,0-log, excepto el 31/7/2024, cuando el crédito fue de 1,9-log. El proceso de MF logró una reducción logarítmica de 4,5-log de quistes de Giardia y ooquistes de Cryptosporidium el 31/7/2024 para compensar la deficiencia de la RO.  
4. Los créditos diarios de reducción logarítmica de virus (LRV) fueron de 4-log para el tiempo de retención subterránea durante todo 2024, aunque se disponía de créditos de 5-log cuando era necesario para cumplir el requisito total.

La expansión final del GWRS, en 2023, representa un hito histórico para la gestión del agua en California. Con capacidad para atender a un millón de personas, el proyecto se erige como ejemplo mundial de resiliencia, innovación tecnológica y cooperación institucional en la gestión de recursos hídricos (Clark *et al.*, 2025).

#### Camp de Tarragona Estación Regeneradora de Agua

El Camp de Tarragona es un complejo industrial que agrupa a varias empresas relacionadas con los sectores químico y petrolero. Más de 30 empresas que se centran en producción de cloro, sales alcalinas, oxígeno, fertilizantes, insecticidas, combustible y plástico.

Desde 1971, cuando inicia su actividad, el Camp dependía del suministro de agua de *Aigües Industrials de Tarragona Societat Anònima* (AITASA) cuyo suministro era transferido desde el río Ebro. En 2008, tras el creciente consumo industrial y la superación de la capacidad del sistema, se lleva a cabo la implementación de la Estación Regeneradora de Agua (ERA), planta que se destina exclusivamente al agua industrial, evitando consumir los recursos de producción de agua potable (Naves *et al.*, 2023).

La ERA recibe efluente secundario de las plantas de tratamiento de Tarragona y Vilaseca-Salou, estas plantas fueron interconectadas con una tubería de 4 km para asegurar el suministro a la estación regeneradora. El agua regenerada debe cumplir con el Real Decreto 1620/2007, que establece los requisitos de calidad para la reutilización en la industria, estos se muestran en la Tabla 6.4 (Naves *et al.*, 2023).

**Tabla 6.4 – Calidad de agua para reúso en torres de enfriamiento**

*Fuente – Real Decreto Español 1620/2007*

Parámetro	Requerimiento	Unidad
Legionela	Ausencia	UFC/1 L
Huevos Nematodos	<1	Huevos/10 L
E. Coli	Ausencia	UFC/100 mL
SST	<5	mg/L



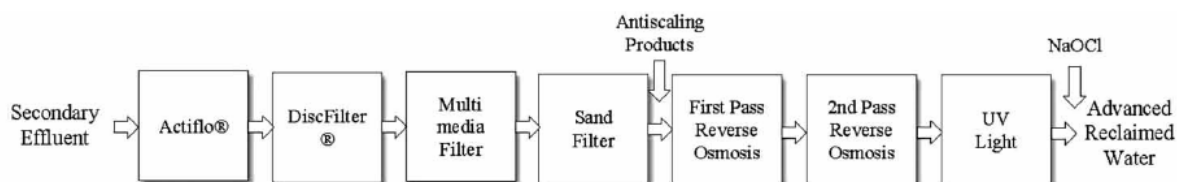
Turbiedad	<1	NTU
-----------	----	-----

El efluente secundario recibe un proceso básico de regeneración que consiste en una etapa de clarificación lastrada, seguida por filtración por discos, filtración multimedia y filtración de arena (Sanz et al., 2015).

Posteriormente, el efluente es sometido a un proceso avanzado de regeneración que incluye un tratamiento de ósmosis inversa en doble paso y una desinfección mediante luz ultravioleta y cloro, antes de ingresar al sistema de distribución de agua regenerada. El diagrama de flujo del proceso de la ERA de Camp de Tarragona (Salgado, 2012 en Sanz 2015) se muestra en la Figura 6.5.

**Figura 6.5 – Diagrama de flujo del proceso de ERA Camp de Tarragona**

*Fuente – Reclaimed water for the Tarragona petrochemical park, Sanz et al., 2015*



*Nota: La figura muestra el diagrama de flujo del proceso de ERA Camp de Tarragona*

Cuando se pone en marcha la planta, en 2011, se realizan pruebas de rendimiento utilizando 3 fuentes distintas de entrada: efluente secundario de la planta de tratamiento de Tarragona, efluente secundario de la planta de tratamiento de Vilaseca-Salou y una mezcla 70/30 (Tarragona/Vilaseca-Salou) de ambos efluentes.

El resultado de las pruebas de rendimiento del sistema de ósmosis inversa mostró una disminución en la producción de agua regenerada cuando se usaba el efluente de Vilaseca-Salou. Se determinó que las causas de la baja calidad de estos efluentes secundarios venía dada por las sobrecargas hidráulicas y orgánicas durante los períodos de verano, especialmente en episodios de tormentas. Por lo tanto, desde ese momento son necesarias reuniones periódicas de coordinación con los equipos de operación de las distintas plantas de tratamiento, para evaluar la disponibilidad y calidad de los caudales de entrada y poder ajustar la operación de la ERA (Sanz et al., 2015)

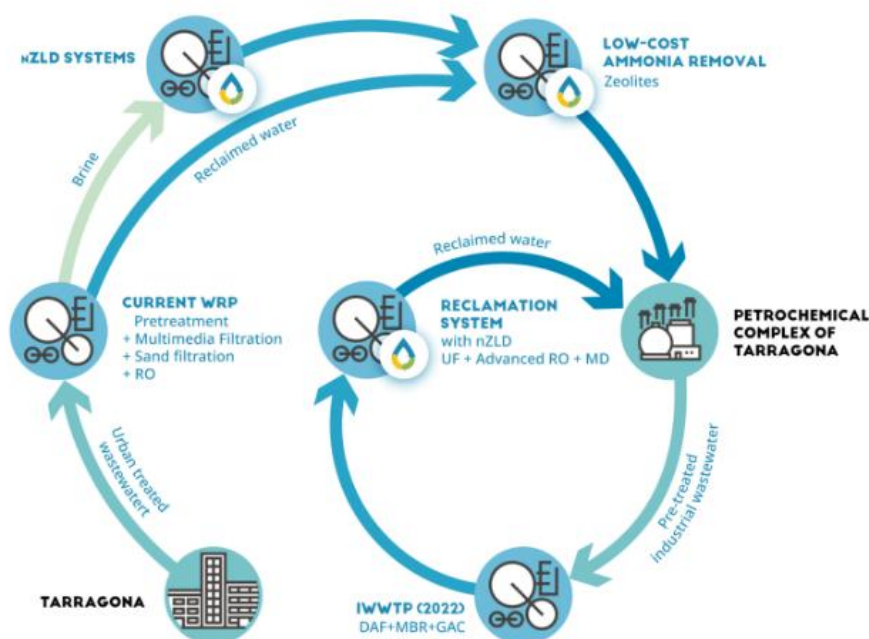
En 2014 se suma a la ERA una instalación para obtener agua altamente desmineralizada ( $0,2 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) para poder alimentar calderas para uso industrial y generación eléctrica, esto se logró mediante un proceso de intercambio iónico y agua regenerada suministrada por ERA.

En 2015 la capacidad de producción de ERA alcanzó  $1,37 \text{ hm}^3/\text{año}$  (Sanz et al., 2015). En 2023 Veolia, que es quien se encarga de la operación en conjunto con AITASA desde 2013, informaba que la planta estaba en una producción anual de  $6,9 \text{ hm}^3$ .

En 2022 se puso en operación una planta de tratamiento de aguas residuales industriales (iWWTP) para tratar las aguas residuales del complejo. Al mismo tiempo AITASA junto con ULTIMATE<sup>5</sup>, inician un proyecto piloto con el fin de cerrar más aún el ciclo de agua del complejo, regenerando también el agua tratada de la iWWTP con sistema de casi vertido cero (nZLD, por sus siglas en inglés). A la vez, se optimiza la actual ERA, maximizando su producción de agua y reduciendo el consumo energético (Naves et al., 2023). En la Figura 6.6 se muestra un esquema del proyecto.

**Figura 6.6 – Esquema del proyecto piloto (CS1) para Camp de Tarragona**

*Fuente – Página web ultimatewater.eu, Consultada en agosto 2025*



*Nota: La figura muestra el esquema del proyecto piloto CS1 para Camp de Tarragona*

Los objetivos de este proyecto son:

- Cerrar el ciclo de agua en el complejo industrial
- Incrementar la disponibilidad hídrica (>20 %) para cubrir futuras demandas industriales
- Optimizar la ERA para aumentar la producción y reducir el consumo energético
- Demostrar un nuevo tratamiento casi vertido cero (nZLD) y técnicas de bajo costo (zeolitas) para mejorar eficiencia y sostenibilidad.

En workshop realizado en agosto 2024 por ULTIMATE, Neves presentó resultados preliminares de este proyecto donde detalló que de lo testeado para el sistema nZLD (ultra filtración + ósmosis inversa + destilación por membrana) se obtuvo como resultado

<sup>5</sup> ULTIMATE es un proyecto, financiado por el programa Horizon 2020 de la Unión Europea, dentro del marco “Agua en el Contexto de la Economía Circular”. El objetivo es crear valor económico e incrementar la sostenibilidad, mediante la valorización de recursos dentro del ciclo del agua.



positivo un permeado de alta calidad (conductividad  $< 40 \mu\text{S}/\text{cm}$ ,  $\text{NH}_4^+ < 0,8 \text{ mg/L}$ ); pero se encontraron algunas limitaciones con la destilación por membrana que no alcanzó los estándares de calidad requeridos por elevada conductividad y amonio; la adsorción en zeolitas mostro una capacidad insuficiente como sustituto completo de la segunda etapa de ósmosis inversa.

Este proyecto piloto se realizó considerando una duración de 5 años, por lo que todavía continúan en la búsqueda de soluciones realizando estudios con distintas membranas y realizando ensayos con distintas zeolitas comerciales.

### Planta de recuperación de agua de Goreangab, Namibia

Windhoek es la capital y la única ciudad de Namibia. Según la Agencia Nacional de Estadísticas, en 2022 tenía unos 400.000 habitantes (Expert Africa, 2021; World Population Review, 2022, en Mapani et al., 2023).

Debido a las altas tasas de evaporación solo el 2 % de la lluvia se convierte en escorrentía, el 1 % recarga el acuífero y alrededor del 97 % se pierde por evaporación (Pietilä, 2005; DRFN, 2009; City of Windhoek, 2017 en Mapani et al., 2023). Esto genera una creciente dependencia de los sistemas subterráneos, dado que las lluvias no alcanzan a sostener la demanda de una población en crecimiento.

La ciudad ha practicado el reúso de agua desde hace más de 50 años. Tras extensas pruebas piloto, en 1968 se puso en marcha la planta de tratamiento de Goreangab con una operación de dos trenes, tratando respectivamente efluente cloacal secundario y agua de represa. Ambas corrientes tratadas se combinaban e introducían directamente en el suministro de agua potable. El 24 de noviembre de 1968, el periódico *Sunday Tribune* declaró: “¡Windhoek bebe aguas residuales! Es un mundo purificado por primera vez”. En ese entonces, la capacidad total de esta planta era de  $4.300 \text{ m}^3/\text{día}$ , lo que representaba entre el 10 y 12 % de la demanda diaria máxima (Du Pisani et al., 2013).

En 2002 se inauguró la nueva planta de potabilización Goreangab, con capacidad de  $21.000 \text{ m}^3/\text{día}$  (Lahnsteiner & Lempert, 2007, en Mapani, 2023). Esta usaría en partes iguales efluente cloacal secundario tratado y agua del embalse Goreangab como alimentación porque los estudios realizados en la época demostraron ambas fuentes eran lo suficientemente similares como para tratarlas en un mismo esquema (Du Pisani et al., 2013).

Dado que, en ese momento, no existían guías ni normas específicas para la reutilización potable directa, se consideraron las siguientes referencias para desarrollar lineamientos de calidad para la Nueva Planta:

- Guías para la Evaluación de Agua Potable para Consumo Humano (1991), Departamento de Asuntos Hídricos, Namibia.
- Criterios de Calidad de Agua Potable (Rand Water, 1994).
- Guías de la OMS para Agua Potable (OMS, 1993).

- Normas Nacionales de Agua Potable y Avisos de Salud de la USEPA (USEPA, 1996).
- Directivas de la Comunidad Europea para el consumo humano (80/778/EEG, 1980 y borrador de 1994).
- Guía para la planificación, diseño e implementación de un esquema de recuperación de agua (Meiring & Partners, 1982).

Los valores de calidad de agua esperados se presentan en la Tabla 6.5.

**Tabla 6.5 – Parámetros de calidad del agua para la Nueva Planta Goreangab**

*Fuente – Direct potable reclamation in Windhoek, Du Pisani 2013*

Categoría	Unidades	Objetivo	Máximo
<b>FÍSICOS Y ORGANOLÉPTICOS</b>			
Potencial de precipitación de carbonato de calcio	mg/L CaCO <sub>3</sub>	4	0–8
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	10	15
Color	mg/L Pt	8	10
Carbono orgánico disuelto (DOC)	mg/L	3	5
Sólidos disueltos totales (TDS)	mg/L	≤1.000	≤1.200
Turbidez	NTU	0,1	0,2
UV <sub>254</sub>	abs/m	5,0	6,0
<b>MACRO-ELEMENTOS</b>			
Aluminio (Al)	mg/L	N/A	0,15
Amoníaco (N)	mg/L	N/A	0,10
Cloruro (Cl)	mg/L	No removido	250
Hierro (Fe)	mg/L	0,05	0,1
Manganeso (Mn)	mg/L	0,0025	0,005
Nitrato y nitrito (N)	mg/L	No removido	10
Nitrito (N)	mg/L	No removido	0,2
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	mg/L	No removido	200
<b>INDICADORES MICROBIOLÓGICOS</b>			
Recuento en placa heterotrófica	por ml	80	100
Coliformes totales	por 100 ml	N/A	0
Coliformes fecales	por 100 ml	N/A	0
<i>Escherichia coli</i>	por 100 ml	N/A	0
Colífagos	por 100 ml	N/A	0
Enterovirus	CPE por 10 <sup>1</sup>	N/A	≤0 o 4 log Rem
<i>Streptococci</i> fecales	por 100 ml	N/A	0
Esporas de <i>Clostridium</i>	por 100 ml	N/A	0
Células viables de <i>Clostridium</i>	por 100 ml	N/A	0
<b>SUBPRODUCTOS DE DESINFECCIÓN</b>			
Trihalometanos totales	µg/L	20	40
<b>BIOLÓGICOS</b>			
Clorofila a	µg/L	N/A	1
<i>Giardia</i>	por 100 l	≤0 o 6 log Rem	≤0 o 5 log Rem
<i>Cryptosporidium</i>	por 100 l	≤0 o 6 log Rem	≤0 o 5 log Rem

El diseño final de la nueva planta se realiza con la filosofía de múltiples barreras como principio rector. Si un contaminante pasaba a través de un proceso específico, habría etapas posteriores capaces de removerlo o reducirlo hasta niveles seguros; para ello se

introdujo una estructura más sofisticada, con barreras redundantes frente a contaminantes microbiológicos, químicos, organolépticos e inorgánicos, garantizando un producto final acorde a los estándares esperados (Du Pisani et al., 2013).

La operación y el mantenimiento de esta nueva planta está a cargo de un consorcio compuesto por Veolia Water, Berlin Water International y VA Tech Wabag. El acuerdo se basa en la calidad del agua alcanzada, con fuertes penalizaciones por exceder cualquier valor objetivo y prohibición de suministrar agua que supere ciertos valores absolutos.

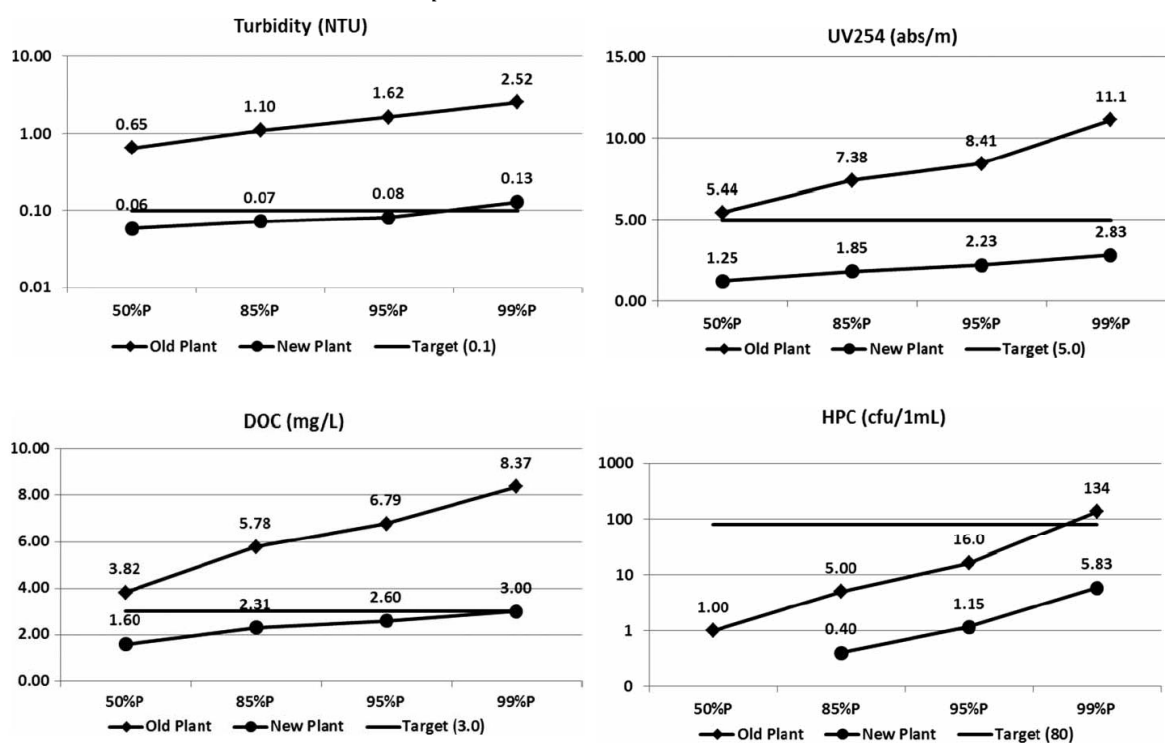
En 2013, Du Pisani, realiza una comparación de mejora de calidad de algunos parámetros donde tiene en cuenta valores desde 1995 a 2001 de la planta vieja y valores desde 2002 a 2010 de la planta nueva. Los parámetros que elige para su análisis son:

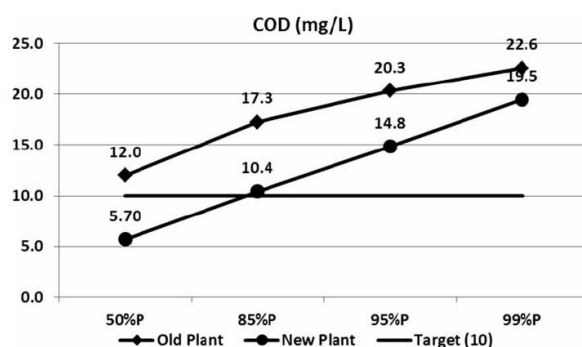
- Turbidez
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Carbono Orgánico Disuelto (DOC)
- Absorbancia UV254
- Recuento heterotrófico en placa (HPC)

El resultado de esa comparación se muestra en las gráficas de la Figura 6.7.

**Figura 6.7 – Comparación de parámetros de calidad de la vieja y la nueva planta de Goreangab**

*Fuente – Direct potable reclamation in Windhoek, Du Pisani 2013*





*Nota: La figura muestra los gráficos de comparación de los parámetros de calidad de la vieja y la nueva planta de Goreangab*

Los datos al 95 % de probabilidad muestran que la Nueva Planta alcanzó los valores objetivo en todos los parámetros, excepto la demanda química de oxígeno. La calidad del agua mejoró por un factor de 10, y el riesgo microbiano se redujo en 1 log comparado con la planta vieja. Además, el carbono orgánico disuelto, la demanda química de oxígeno y absorbancia UV254 mostraron reducciones y mejoras considerables, lo que prueba que las barreras adicionales (pre-ozonización, coagulación mejorada, ozono, carbón biológicamente activado y adsorción en carbón activado granular) implementadas en la Nueva Planta frente a la Vieja (coagulación + adsorción en carbón sin oxidación) mejoraron ampliamente la eliminación de materia orgánica.

La conclusión de este estudio es que las barreras de tratamiento adicionales de la Nueva Planta han incrementado el margen de seguridad, como muestran los datos. Además, se concluye que con un tren de tratamiento del tipo: [Membranas – Ozono – Coagulación mejorada – Carbón biológicamente activado – Ósmosis inversa – UV] las bacterias, virus y protozoos serían eliminados completamente, incluso en condiciones de alta variabilidad. Los contaminantes orgánicos (DOC) se reducirían a valores <0,01 mg/L y también se mitigarían las variaciones en amoníaco del agua cruda (Du Pisani *et al.*, 2013).

A lo largo de estos más de 50 años, la experiencia de Windhoek ha demostrado que la recuperación potable directa tiene futuro en regiones donde no existen alternativas de suministro.

## 6.2. Sobre reúso de lodos

### GENeco – Avonmouth Biomethane Project

El Avonmouth Biomethane Project, desarrollado por GENeco (subsidiaria de Wessex Water), fue pionero en el Reino Unido en la inyección de biometano a la red nacional de gas. El proyecto forma parte de la estrategia de valorización de residuos de la empresa, integrando la digestión anaerobia de lodos y residuos alimentarios para producir biogás, purificarlo y convertirlo en un combustible renovable (Carver, 2015).

GENeco opera un esquema de codigestión de lodos y biorresiduos que produce biogás y lo convierte en biometano para inyectarlo a red (gas-to-grid) y emplearlo como combustible vehicular. La instalación procesa y actualiza el biogás hasta 98 % CH<sub>4</sub> (≈1,5 % N<sub>2</sub>) mediante lavado en depurador biológico para remover CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, pulido con carbón y enriquecimiento con propano para cumplir el poder calorífico de la red. La capacidad de diseño declarada es de 2.500 m<sup>3</sup>/h de biogás y 1.900–1.950 m<sup>3</sup>/h de biometano inyectable.

GENeco reporta más de 7,5 millones de m<sup>3</sup> inyectados hasta 2015 y el abastecimiento de más de 3.000 hogares en Bristol (red de Wales & West Utilities), además de ahorros de 13 mil toneladas de CO<sub>2</sub>/año, comunicados. Este proyecto fue pionero en el Reino Unido en 2014–2015 dentro del marco de incentivos de calor renovable (Beavis, 2015).

Como “vitrina” de uso vehicular, el Bio-Bus (2014–2015) fue el primer bus del Reino Unido alimentado con gas derivado de residuos alimentarios, aguas residuales y desechos líquidos comerciales. El autobús puede recorrer más de 300 km con un tanque lleno de gas (almacenado en el techo), una cantidad de combustible que puede producirse a partir de los residuos anuales de comida y aguas residuales de solo cinco pasajeros (Carver, 2015).

### Figura 6.8 – Bio-Bus

*Fuente – página web de GENeco, consultada en agosto 2025*



*Nota: La figura muestra el ploteo de uno de los Bio-Bus, que se realizó para resaltar a la población el combustible utilizado*

Las emisiones de escape de los vehículos a gas ofrecen mejoras notables frente al diésel. Estas pueden ser:

- Reducción de hasta un 97 % en emisiones de partículas peligrosas (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>)
- Reducción del 80–90 % en óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>): gases que contribuyen a la formación de lluvia ácida y smog urbano, además de tener un efecto negativo en el crecimiento de la vegetación.

- Reducción de CO<sub>2</sub>: en el análisis “well-to-wheel”, el biometano produce 95 % menos CO<sub>2</sub> que el diésel; en el análisis “tank-to-wheel”, las emisiones de CO<sub>2</sub> son 20–30 % menores que en vehículos diésel.

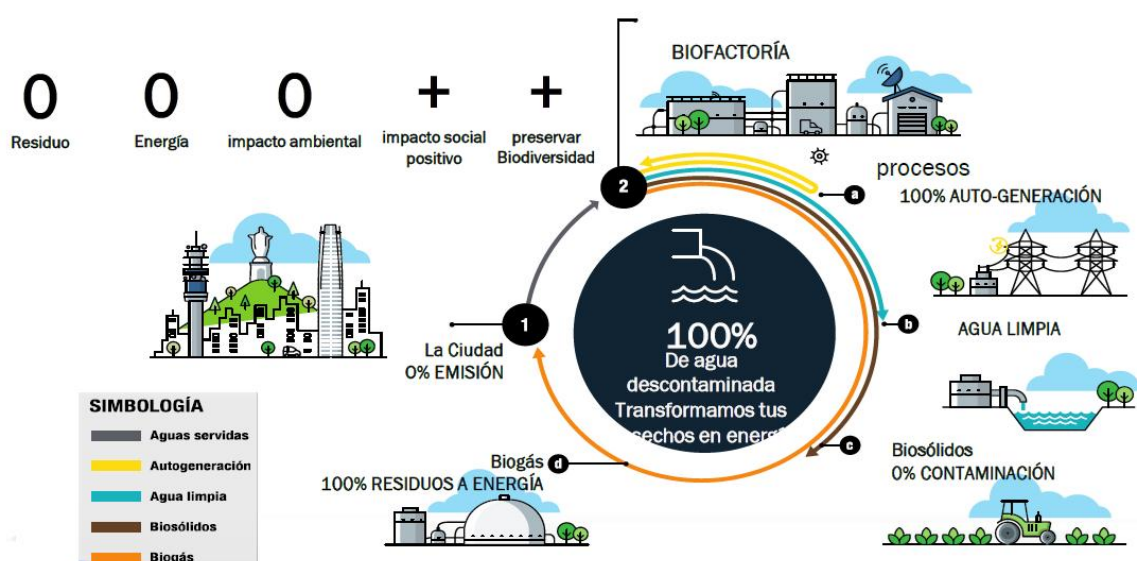
En el largo plazo, el biometano representa una alternativa sostenible y renovable frente a los combustibles fósiles (GENeco web, s.f.).

### Aguas Andinas – Biofactoría La Farfana (Santiago, Chile)

Aguas Andinas recibió el premio de Acción Climática Mundial de las Naciones Unidas 2018, por haber convertido sus PTAR en “biofactorías” que convierten las aguas residuales y los lodos de alcantarillado, un subproducto del tratamiento de aguas residuales, en energía limpia. Las plantas de tratamiento son cero residuos, autosuficientes energéticamente y neutras en carbono desde 2022. En la Figura 6.9 se muestra un diagrama de flujo para una biofactoría.

**Figura 6.9 – Diagrama de flujo de una biofactoría**

*Fuente – Un día en las Biofactorías del Gran Santiago de Chile, Ybarra 2020*

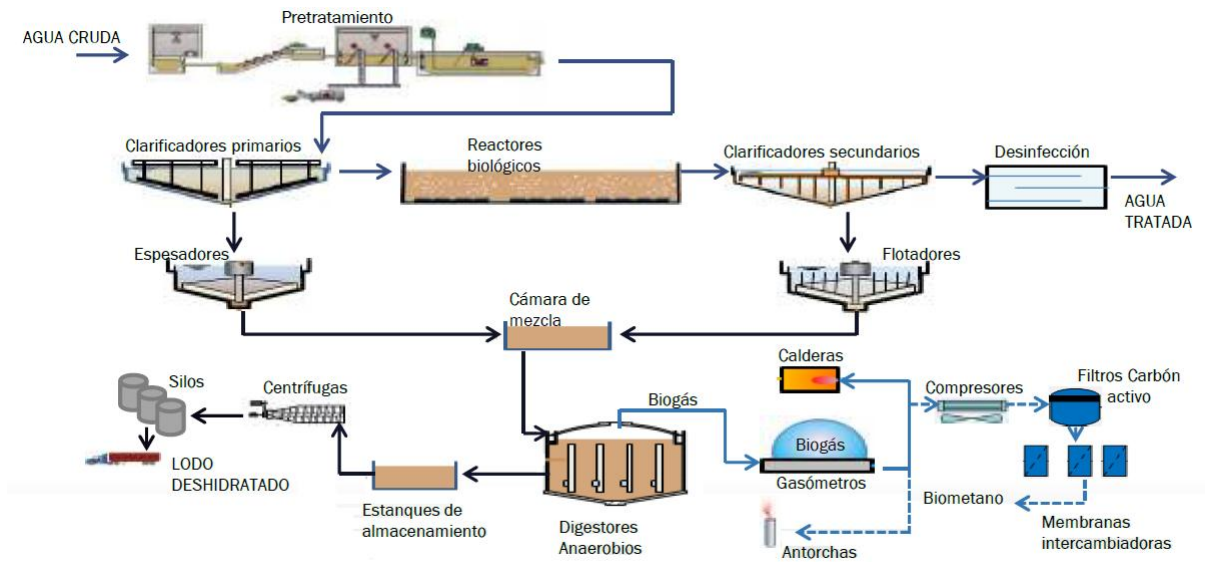


*Nota: La figura muestra el diagrama de flujo de una biofactoría*

La Farfana es una biofactoría que cuenta con una capacidad de 8,8 m<sup>3</sup>/s. Su fin es tratar las aguas urbanas provenientes del 50 % de la población de Santiago (equivalente a 3,7 millones de personas). Las aguas residuales siguen el recorrido tradicional de cribado, luego remoción de arenas y grasas, sedimentación primaria, tratamiento biológico y clarificación, antes de ser finalmente desinfectadas con cloro previo a su descarga. Y los lodos cuentan con una línea completa de tratamiento: espesamiento por gravedad o mediante flotación, digestión, deshidratación, secado y disposición final (SUEZ, s.f.). El diagrama de flujo de la planta se observa en la Figura 6.10.

**Figura 6.10 – Diagrama de flujo de La Farfana**

*Fuente – Un día en las Biofactorías del Gran Santiago de Chile, Ybarra 2020*



*Nota: La figura muestra el diagrama de flujo de La Farfana*

Aguas Andinas aplica un modelo de economía circular para eliminar los residuos, el consumo de energía fósil y la contaminación de sus procesos de tratamiento de aguas residuales. El modelo de economía circular busca mantener los recursos en uso durante el mayor tiempo posible.

Las aguas residuales de entornos urbanos e industriales se dirigen a sus biofábricas. Estos residuos contienen materia orgánica y otros sólidos, como arena. Gracias al proceso de tratamiento, las arenas se purifican y reciclan para proyectos de construcción urbanos o para fines agrícolas y de jardinería.

Una vez tratada y desinfectada, el agua se vierte al ambiente y puede servir como fuente de riego limpio para los agricultores.

En lo que respecta al proceso de lodos, La Farfana trata los lodos para convertirlos en biosólidos con fines agrícolas y también genera energía a partir de la digestión anaerobia.

Según World Bank (s.f.) La Farfana produce aproximadamente 800 toneladas de lodos al día, que después del proceso de deshidratación y secado, resulta en cerca de 120 toneladas de biosólidos secos al día.

La valorización directa de los biosólidos es considerada uno de los subproductos generados por las Biofactorías. Alrededor del 40 % de los biosólidos son utilizados en la agricultura. Estos son entregados sin costo a los agricultores. Aguas Andinas cubre el costo del transporte (un promedio de \$13 USD por tonelada) porque este costo es más bajo que el de disponer los lodos en vertederos (\$40 USD por tonelada). Esta práctica



permite a la empresa un ahorro de aproximadamente \$27 USD por tonelada, lo que se traduce en una reducción de costos de \$3.2 millones de dólares al año (World Bank, s.f.).

Aguas Andinas está evaluando la viabilidad de entrar en el negocio de compostaje para incrementar la cantidad de lodo que puede ser utilizado por los agricultores.

La Farfana, además, es reconocida por su proyecto de metanización del biogás, fue la primera planta de biogás en Sudamérica en llevar a cabo este proceso (Chapple, 2009). Los volúmenes de biogás generados son empleados tanto para autoconsumo interno, principalmente en el calentamiento de los digestores, como para su inyección a la red urbana a través de la Town Gas Factory, beneficiando a aproximadamente 30.000 clientes de la ciudad. Este modelo permite desplazar parte del consumo de gas natural y posiciona al biogás como un recurso energético estratégico dentro de la matriz local. Según estimaciones, el aprovechamiento equivale a cerca de 38 GWh térmicos por año, evidenciando el potencial del sector saneamiento para contribuir a la seguridad energética y a la economía circular. La experiencia de La Farfana demuestra que, además de la autosuficiencia de las PTAR, es posible integrar los subproductos del tratamiento en la infraestructura energética urbana, constituyendo un caso replicable en otras megaciudades con problemas de gestión de lodos y alta demanda energética (Chrispim, 2021).

En marzo de 2025, Aguas Andinas reportó frente al Congreso de Diputados de Chile, algunas cifras de La Farfana:

- Ratio Energético: 0,250 kWh elec/m<sup>3</sup>
- Producción de biogás: 90.000 Nm<sup>3</sup>/día
- Biometanización: 2.500 Nm<sup>3</sup>/h; 96,5 % CH<sub>4</sub>
- Lodos a 25 %: 500 t lodos/día

Si bien este proyecto destaca por su generación energética, es uno de los más relevantes a nivel de economía circular.

#### Investigación de NTU Singapore (Nanyang Technological University)

En noviembre de 2024, NTU Singapore publicó en *Nature Water*, con notas de prensa y divulgación en marzo de 2025, sobre un proceso solar-electroquímico integrado que valoriza lodos de PTAR en hidrógeno verde y proteína unicelular para uso como ingrediente de alimento animal (Zhao et al., 2024; Nanyang Technological University, 2025).

La propuesta de los investigadores es un proceso de tres pasos alimentado con energía solar que integra técnicas mecánicas, químicas y biológicas.

El primer paso, consiste en un proceso de desintegración mecanoquímica con un catalizador alcalino, en particular hidróxido de potasio (KOH), para solubilizar eficazmente la materia orgánica y remover metales (Zhao et al., 2024).



El efecto destacado del tratamiento se aprecia en la reducción del tamaño de partícula en tres a cuatro órdenes de magnitud, lo que corrobora la ruptura efectiva de las estructuras celulares y la desagregación. Además, se muestra que más del 97 % de S, 85 % de P, 86 % de K y 91 % de sodio (Na) se disolvieron; estos valores se sitúan entre las solubilidades más altas reportadas hasta la fecha (Zhao *et al.*, 2024).

Como segundo paso, un proceso electroquímico alimentado con energía solar utiliza electrodos especializados para transformar los materiales orgánicos en productos valiosos, como ácido acético y generar hidrógeno verde (Zhao *et al.*, 2024; Nanyang Technological University, 2025).

Finalmente, en el flujo de líquido procesado se introducen bacterias púrpuras fototróficas (PPB), para producir proteína unicelular (SCP) aptas para la alimentación animal (Zhao *et al.*, 2024).

Las pruebas de laboratorio demostraron que el nuevo método recupera el 91,4 % del carbono orgánico presente en los lodos de depuradora y convierte el 63 % en proteínas unicelulares sin producir subproductos nocivos. En comparación, la digestión anaeróbica tradicional suele recuperar y convertir alrededor del 50 % de la materia orgánica presente en los lodos de depuradora, además de reducir las emisiones de carbono en un 99,5 % y el consumo de energía en un 99,3 % en comparación con los métodos tradicionales.

En resumen, las ventajas de este desarrollo frente a otras tecnologías de tratamiento de lodos son:

- > 90 % de recuperación del carbono orgánico
- captura completa de metales
- producción eficiente y segura de hidrógeno verde utilizando directamente electricidad solar fluctuante
- huella de carbono y consumo energético muy reducidos
- viabilidad económica

Si bien el proceso recientemente desarrollado es prometedor, se necesitan más estudios para determinar si su escalabilidad es factible (Nanyang Technological University, 2025).

## 7. Saneamiento en Uruguay

### 7.1. Situación actual

En nuestro país hay dos grandes responsables por el saneamiento. Por un lado, está la Intendencia de Montevideo (IM), que es responsable por el Saneamiento de la ciudad homónima, mientras que en el resto del país el organismo responsable del servicio de saneamiento es Obras Sanitarias del Estado (OSE).

Montevideo cuenta con 2 plantas de pretratamiento con emisarios con salida al Río de la Plata (Punta Carretas y Punta Yeguas). Según el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el 92 % de la población de Montevideo cuenta con acceso a servicios de saneamiento mejorado, lo que significa que la mayoría de los hogares están conectados a la red de alcantarillado operativa y con recolección adecuada.

En el interior del país hay más de 40 plantas de tratamiento de líquidos residuales domésticos correspondientes a localidades de mediano y gran porte, y más de un centenar de pequeños sistemas correspondientes a programas habitacionales de MEVIR y otros gestores públicos de programas de vivienda, esto abarca a un 51 % de la población del interior del país.

En la Tabla 7.1 se detallan las ubicaciones y los tipos de tratamiento realizados por OSE en Uruguay.

**Tabla 7.1- Ubicación y tipos de tratamiento realizados por OSE**

*Fuente – Web institucional OSE, consultada en julio 2025*

Departamento	Ciudades	Tipo
Artigas	Artigas Bella Unión	Terciaria Secundaria
Salto	Salto Belén Constitución	Terciaria Secundaria Secundaria
Paysandú	Paysandú Guichón	Primaria Secundaria
Río Negro	Fray Bentos Young	Primaria con proyecto de Terciaria Secundaria
Soriano	Mercedes Dolores Risso Cardona	Primaria con proyecto de Terciaria Proyecto de Terciaria Secundaria Secundaria
Colonia	Colonia Carmelo Rosario Pueblo Gil	Primaria Primaria Secundaria Secundaria
Rivera	Rivera Tranqueras	Secundaria Secundaria
Tacuarembó	Tacuarembó Ansina Paso de los Toros	Secundaria Secundaria Secundaria con proyecto de Terciaria
Durazno	Durazno Sarandí del Yí	Terciaria Primaria con proyecto de Terciaria

Departamento	Ciudades	Tipo
Flores	Trinidad Andresito	Terciaria Secundaria
Florida	Florida Sarandí Grande Fray Marcos Casupá	Terciaria Terciaria Terciaria Terciaria
San José	San José Ecilda Paullier Villa Rodríguez Libertad	Terciaria Secundaria Secundaria Proyecto de Terciaria
Canelones	Canelones Las Piedras La Paz Santa Lucía Aguas Corrientes San Ramón Ciudad de la Costa Atlántida	Terciaria Secundaria Secundaria Terciaria Secundaria Terciaria Secundaria Primaria
Cerro Largo	Melo Río Branco Aceguá	Terciaria Secundaria Terciaria
Treinta y Tres	Treinta y Tres Vergara	Terciaria Terciaria
Lavalleja	Minas José Pedro Varela	Terciaria Terciaria
Maldonado	Maldonado Pan de Azúcar Piriápolis San Carlos	Secundaria Secundaria Secundaria Secundaria
Rocha	Rocha Castillos Chuy Lascano	Secundaria Primaria Secundaria Secundaria

En ambos casos, Montevideo e interior, son servicios de prestadores públicos consolidados, y regulados por la Unidad Reguladora de Servicios de Energía y Agua (URSEA) en temas de garantía de los usuarios, tarifas y calidad de servicio, aunque con desafíos de profundización y mejora en varios aspectos, y por la Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental (DINACEA) del Ministerio de Ambiente en exigencias ambientales para el vertido de sus efluentes.

## 7.2. Tratamiento de efluentes

- Recolección y llegada a planta

Las aguas residuales domésticas se conducen desde las viviendas a través de redes de alcantarillado que, según el diseño urbano, pueden ser separativas o unitarias.

En un sistema separativo, un conjunto de tuberías recoge las aguas residuales de viviendas y comercios y las conduce a una planta de tratamiento de aguas residuales a través de colectores sanitarios. Otro conjunto de tuberías recoge el agua de lluvia de los

desagües pluviales y la conduce a un cuerpo de agua local mediante los sistemas municipales separados de alcantarillado pluvial (USEPA, 2025).

Mientras, en un sistema unitario, tanto las aguas residuales como las aguas pluviales fluyen por las mismas tuberías, lo que ocasiona que, durante eventos de lluvia, el agua pluvial también ingrese al sistema de saneamiento (USEPA, 2025).

El transporte de las aguas residuales es mayormente por gravedad, y se cuenta con estaciones de bombeo donde las cotas lo requieren.

- Proceso en la PTAR

En la planta de tratamiento de aguas residuales, el caudal afluente se distribuye hacia líneas de tratamiento. El efluente final se descarga a un cuerpo receptor (río o mar), cumpliendo los parámetros regulatorios locales; en paralelo, se gestionan los lodos generados en cada etapa.

- Pretratamiento

El pretratamiento remueve sólidos gruesos, arenas y grasas para proteger equipos y estabilizar la operación aguas abajo. Las unidades típicas son:

- Desbaste (rejas/cribas): retienen sólidos mayores que la luz de barra o malla. Es usual disponer de reja gruesa seguida de otra fina y/o tamices rotativos, con extracción manual o mecánica (USEPA, 2003).
- Desarenado: cámaras horizontales, aireadas o vórtex para sedimentar arenas. Una remoción eficaz evita abrasión, pérdida de volumen útil en clarificadores y atascos (USEPA, 2003).
- Desengrasado: canales con aireación suave o unidades específicas para separar flotantes (grasas y aceites) por flotación y/o raspado superficial (USEPA, 2003).

- Tratamiento Primario

El objetivo es remover sólidos en suspensión y materia sedimentable/flotante por sedimentación/escurrimiento superficial. Se emplean clarificadores primarios (rectangulares o circulares) con barredores de fondo y recolección de grasas. De manera orientativa, los rangos de diseño más citados son: tiempo de detención hidráulica 1–2 h, con tasas de remoción típicas de 50–70 % de SST y 25–40 % de DBO<sub>5</sub>, dependiendo del afluente y la hidráulica (WEF, 2018; Metcalf & Eddy/AECOM, 2014).

- Tratamiento secundario

El objetivo es oxidar materia orgánica biodegradable (DBO) y, cuando corresponde, iniciar/rematar un proceso de nitrificación. Las tecnologías más comunes incluyen:

- Lodos activados (convencional, aireación extendida, SBR, zanjas de oxidación): procesos en suspensión con control de edad de lodos, oxígeno disuelto y

relaciones alimento/microorganismo (F/M por sus siglas en inglés, Food-to-Microorganism).

- Lechos percoladores: biofilm adherido a medio soporte (piedra/plástico) con distribución por aspersores; pueden configurarse para nitrificación con recirculación y medios de alta superficie (USEPA, 2000a).
- Lagunas (aireadas, facultativas, anaerobias): opciones robustas para bajas cargas y disponibilidad de terreno.
- Reactores anaerobios de alta tasa para afluentes con cargas elevadas y baja temperatura de operación, según el caso.

En la Tabla 7.2 se presentan estándares de desempeño esperados para un tratamiento secundario según USEPA y la Unión Europea.

**Tabla 7.2 – Estándares esperados para tratamientos secundarios**

*Fuentes – EPA/eCFR y compendio estatal (NY DEC) para límites y promedios; Directiva (UE) 2024/3019*

*Anexo I para DBO/DQO/SST*

Parámetro	EPA (40 CFR 133)	UE 2024/3019 (Tabla 1)
DBO <sub>5</sub>	30 mg/L (30 d) / 45 mg/L (7 d), ≥85 %	25 mg/L, 70–90 %
DQO	—	125 mg/L, 75 %
SST	30/45 mg/L, ≥85 %	35 mg/L, 90 % (opcional)
pH	6,0–9,0	— (no fija pH)

#### ➤ Tratamiento terciario

El objetivo del tratamiento terciario es la remoción de nutrientes y pulir el efluente que ya pasó por el primario y secundario para cumplir metas más estrictas de calidad (normativas o de reúso) que protejan la salud pública y ambiente.

- Remoción de Fósforo (P):
  - Químico: precipitación (aluminio, hierro, cal) seguida de sedimentación/filtración; robusto y compatible con ampliaciones.
  - Biológico (EBPR): alternancia anaerobia/aerobia con acumulación de organismos polifosfatos, requiere control de ácidos grasos volátiles y edad de lodos, y condiciones anaerobias (USEPA, 2010).
- Remoción de Nitrógeno (N): esquemas con zonas aerobias/anóxicas en serie o recirculaciones internas (nitrificación-desnitrificación); cuando hay límites bajos de N se integran filtros de desnitrificación (medios granulares y fuente de carbono) o procesos de nitrificación parcial/Anammox en corrientes laterales (USEPA, 2010; MPCA, 2018).
- Pulimiento: filtración granular o terciaria por membranas para turbidez baja y control de SST/nutrientes residuales (WEF, 2017).

Estos compuestos no perjudican a la mayoría de los cursos de agua hacia donde son conducidos los efluentes, pero debe tenerse presente que son nutrientes para las algas, que ven estimulada su multiplicación en embalses de agua bajo ciertas circunstancias. Si

los cursos de agua se emplean como fuente de agua bruta, ante un exceso de nutrientes pueden requerir costosos procedimientos de potabilización.

La directiva 2024/3019 de la Unión Europea establece como estándares esperados la reducción de más del 80 % de N, valores entre 10 y 8 mg/L. Y valores de P entre 0,7 y 0,5 mg/L con reducciones mayores a 87,5 %.

#### ➤ Desinfección

El objetivo de este proceso es inactivar microorganismos patógenos antes del vertido o reúso. Las tecnologías más difundidas son:

- Radiación UV: inactivación física del ADN/ARN; no genera residual ni subproductos halogenados, pero exige baja turbidez y limpieza de mangas/lámparas (USEPA, 1999a).
- Cloración (gas, hipocloritos) con dechloración (tiosulfato, bisulfito/metabisulfito) para cumplir límites de cloro residual y proteger biota; mayor formación potencial de subproductos (USEPA, 1999b; 2000b).
- Alternativas: ozono u otros oxidantes cuando se requieren inactivaciones elevadas y baja formación de subproductos.

Los objetivos esperados de la desinfección se fijan por el uso final del efluente y/o por la categoría del cuerpo receptor.

Los procesos de tratamiento generan lodos que, antes de su destino final o valorización, deben pasar por operaciones de espesamiento, estabilización y deshidratación.

#### ➤ Estabilización de lodos

La estabilización busca reducir patógenos y reducir la atracción de vectores, además de controlar olores. Las alternativas más comunes incluyen:

- Digestión anaerobia (mesofílica/termofílica): estabiliza sólidos y produce biogás; con diseño y operación adecuados contribuye al cumplimiento de la reducción de patógenos, la reducción de atracción de vectores y a la valorización energética. (USEPA, 2020).
- Digestión aerobia: opción extendida en PTAR de menor escala (NEIWPCC, 2005).
- Compostaje (pilas volteadas, estáticas, in-vessel): logra excelente calidad de lodos cuando se cumplen los regímenes tiempo-temperatura y monitoreos; genera un material estable para uso en suelos (USEPA, 2020).
- Estabilización alcalina (cal) e incineración: tecnologías aplicables según contexto regulatorio y objetivos de patógenos/olores (USEPA, 2020).

### ➤ Deshidratación

La deshidratación reduce el contenido de agua tras la estabilización (o, en algunos esquemas, antes y después), esto simplifica transporte/almacenamiento. Las tecnologías habituales son:

- Lechos de secado: solución robusta y de bajo costo para caudales pequeños o medios y climas favorables; exige superficie y manejo de drenajes y escorrentías (Water Environment Federation, 2011)
- Filtros prensa de bandas: equipos electromecánicos ampliamente difundidos en PTAR; con capturas de sólidos altas y operación continua (USEPA, 2000).
- Centrífugas (espesamiento y/o deshidratación): separación por fuerza centrífuga, compacta y automatizable; aplicable a la mayoría de los lodos (USEPA, 2000).
- Bolsas geotextiles y filtro prensa de placas: alternativas según espacio, logística y objetivos de sólidos finales (USEPA, 2024).

Una vez estabilizado y deshidratado, el biosólido puede: (i) aplicarse a suelos, (ii) compostarse, (iii) enviarse a incineración o (iv) a disposición en relleno según el marco regulatorio del país (USEPA, 2020 y USEPA, 2024).

### 7.3. ¿Qué esperar después de cada tipo de tratamiento?

Luego de un tratamiento primario de las aguas residuales, se pueden esperar las siguientes mejoras en la calidad del agua:

- Remoción de sólidos suspendidos y partículas grandes: el objetivo principal del tratamiento primario es la separación de los sólidos en suspensión, partículas grandes y no disueltas presentes en el agua residual.
- Eliminación de materia orgánica: se remueve una porción de la materia orgánica del agua residual, a menudo a través de operaciones físicas como la sedimentación y floculación.
- Generación de lodos primarios: como consecuencia de esta remoción, se forman lodos residuales (lodos primarios).

Es importante destacar que, aunque el tratamiento primario es eficaz en la eliminación de una parte significativa de los sólidos y la materia orgánica, el efluente resultante usualmente todavía contiene un alto nivel de materia orgánica y una Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) relativamente alta (Ospina López *et al.*, 2017).

Después de un tratamiento secundario de las aguas residuales, se pueden esperar mejoras significativas en la calidad del agua, ya que esta etapa está diseñada para remover la mayor parte de la materia orgánica y los sólidos restantes después del tratamiento primario.

Se obtienen rendimientos superiores al 80 % en la eliminación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y los Sólidos Suspendidos (SS) (Morató *et al.*, 2006). Además de lograr la reducción de microorganismos patógenos y parásitos (Amador-Díaz *et al.*, 2015).

Como resultado de la remoción de materia orgánica y sólidos, en este tipo de tratamiento se generan lodos residuales que requieren luego un tratamiento adicional.

La eficacia del tratamiento secundario puede depender de factores como la composición del afluente, el mantenimiento y el diseño del sistema.

El tratamiento terciario, también conocido como tratamiento avanzado, tiene como objetivo principal la eliminación de materiales no deseados específicos para alcanzar una calidad de agua aún superior, especialmente cuando el agua se destina a usos más exigentes o se va a descargar en cuerpos receptores que demandan una alta calidad.

Las mejoras de calidad que se pueden esperar después de un tratamiento terciario incluyen:

Remoción de sustancias: esta etapa permite eliminar sustancias que no fueron removidas por los procesos biológicos previos, como:

- Metales.
- Fósforo y nitrógeno.
- DQO soluble.
- Otros compuestos inorgánicos disueltos.
- Compuestos carbonados.

Se logra una remoción adicional de sólidos suspendidos y partículas muy finas que no fueron removidos previamente. Además, el tratamiento terciario es crucial para la eliminación de microorganismos patógenos, reduciendo significativamente la carga bacteriológica, con métodos como:

- Filtración en membranas o en medios filtrantes. Las aguas tratadas por membrana pueden alcanzar una eliminación total del 100 % de bacterias presentes y sólidos solubles, con una reducción cercana al 90 % en turbidez y DQO (Passarini *et al.*, 2012).
- Vías químicas como el uso de cloro o lejía.
- Rayos ultravioletas (UV).
- Ozono.
- Adsorción en carbón activado.
- Intercambio iónico.
- Ósmosis inversa y electrodiálisis.

La gestión de lodos residuales generados en esta etapa también es crucial, ya que pueden ser aprovechados como mejoradores de suelos o fertilizantes, o incluso para la recuperación energética.



En definitiva, el tratamiento terciario representa el nivel más alto de purificación del agua residual, preparando el efluente para usos que requieren una calidad muy específica o para su descarga en ambientes sensibles.

El efluente del tratamiento terciario alcanza una calidad que lo hace apto para una amplia gama de usos, lo que contribuye a la gestión sostenible del agua y a la economía circular. En la Tabla 7.3 se pueden ver una vinculación entre los distintos tratamientos de aguas residuales y su posible calidad a la salida de la PTAR.

**Tabla 7.3- Calidad sugerida de aguas residuales tratadas y su potencial tratamiento correspondiente**

*Fuente - ISO 16075-2:2020(E)*

Cat.	Calidad	Usos potenciales sin barreras	Potencial tratamiento correspondiente
A	Muy alta calidad de agua residual tratada <sup>d</sup>	Riego urbano sin restricciones <sup>i</sup> y riego agrícola de cultivos alimentarios consumidos crudos.	Filtración secundaria <sup>f</sup> , filtración por contacto o filtración por membranas <sup>g</sup> y desinfección <sup>h</sup> .
B	Alta calidad de agua residual tratada <sup>d</sup>	Riego urbano restringido y riego agrícola de cultivos alimentarios procesados	Tratamiento secundario <sup>f</sup> , filtración y desinfección <sup>h</sup>
C	Buena calidad de agua residual tratada	Riego agrícola de cultivos no alimentarios	Tratamiento secundario <sup>f</sup> y desinfección <sup>h</sup>
D	Calidad media de agua residual tratada	Riego restringido de cultivos industriales y sembrados.	Clarificación secundaria <sup>f</sup> de alta tasa con coagulación y floculación <sup>i</sup>
E	Agua residual tratada de manera extensiva	Riego restringido de cultivos industriales y sembrados.	Estanques de estabilización y humedales <sup>j</sup>

NOTA: Con cada tipo de calidad de aguas residuales tratadas, siempre es posible utilizar un agua residual tratada de mayor calidad.

<sup>d</sup> La dosificación de cloro residual entre 0,2 mg/l y 1 mg/l, medida después de un tiempo de contacto de 30 minutos, puede ser necesaria para agua residual tratada de alta y muy alta calidad. Si se utiliza otro método de desinfección, también debe ser monitoreado.

<sup>f</sup> El tratamiento secundario incluye lodos activados, filtros de goteo, contactores biológicos rotativos, biofiltros, biorreactores, reactores por lotes secuenciales, etc.

<sup>g</sup> La filtración incluye microscreening, filtración en cartucho, filtración en arena de alta tasa, filtración de medios duales, filtros de tela y filtros de disco sin o con adición química (filtración de contacto), así como procesos de membrana que incluyen biorreactores de membrana.

<sup>h</sup> La desinfección incluye irradiación UV, ozonización, cloración u otros procesos químicos, físico-químicos o de membrana.

<sup>i</sup> La clarificación de alta tasa incluye coagulación, floculación y sedimentación en láminas.

<sup>j</sup> Los sistemas de estanques de estabilización bien diseñados pueden cumplir con los límites de coliformes sin desinfección adicional. Se consideran los valores de DBO soluble.

<sup>k</sup> Los parámetros físico-químicos (DBO, SSS) podrían ajustarse de acuerdo con las regulaciones locales de tratamiento de aguas residuales con la posible adición de DQO.

<sup>l</sup> Si hay un riesgo de aerosolización, las *Legionella spp* deben ser menos de 1,000 UFC/l para invernaderos.

En base a esto, se puede decir que las estaciones definidas en la tabla 36, como plantas de tratamiento secundario y terciario, tienen potencial para ser clasificadas como aguas tratadas de alta calidad.

## 8. Caso de estudio

En el marco del caso de estudio, se analizará si el efluente tratado en la planta de tratamiento de aguas residuales de Fray Marcos presenta condiciones de aptitud para su reutilización en riego agrícola, así como si los lodos generados en dicha planta cumplen con los criterios necesarios para su aprovechamiento como mejoradores de suelos. Este análisis se sustenta en el relevamiento de normativas y reglamentaciones nacionales e internacionales expuesto en el capítulo 5, lo que permite contrastar los parámetros de calidad obtenidos con los valores de referencia establecidos en los diferentes marcos regulatorios. Los datos utilizados, en este capítulo, para la evaluación fueron proporcionados por OSE en respuesta a la solicitud de información pública N° 3467, lo que asegura la validez y procedencia oficial de la información considerada.

### 8.1. Fray Marcos

Fray Marcos es un municipio del departamento de Florida, Uruguay. Está ubicada en el sureste del departamento, sobre la Ruta 7 (empalme con la Ruta 94), próxima al río Santa Lucía y al arroyo Chamizo; fue fundada en 1888. Según el Censo 2023, la localidad de Fray Marcos tiene 2.701 habitantes y el municipio totaliza 3.017 personas (INE, 2024/2025).

En términos de perfil productivo, Fray Marcos no concentra industrias manufactureras de gran escala ni un tejido industrial diversificado; su base económica se vincula principalmente a actividades agropecuarias, comercio y servicios del entorno rural.

Desde 2019, Fray Marcos cuenta con un sistema de saneamiento que incluye redes, estaciones de bombeo y una planta de tratamiento de aguas residuales de tratamiento terciario, inaugurada el 12 de setiembre de 2019 por OSE en el marco del Plan de Acción para la protección de la cuenca del río Santa Lucía. La PTAR opera con lodos activados en modalidad de aireación extendida, incorpora remoción biológica de nitrógeno, remoción físico-química de fósforo y desinfección por radiación ultravioleta, y dispone el efluente tratado mediante emisario al río Santa Lucía; el sistema además habilita el desagote controlado de barométricas de la zona (Presidencia de la República, 2019; CIEMSA, s.f.).

### 8.2. Descripción de la PTAR de Fray Marcos

Como primer paso para este análisis, se realiza una descripción de las particularidades de la PTAR de Fray Marcos. La información detallada a continuación se basa en el Manual de Operación, Mantenimiento y Control de la PTAR mencionada, el cual ha sido aprobado por OSE en 2018.

La PTAR Fray Marcos es una planta con tratamiento terciario que consiste en un proceso de lodos activados en la modalidad de aireación extendida del tipo escalonada (decreciente) con eliminación de nutrientes (denitrificación y eliminación de fósforo).

Fue proyectada en dos etapas: la Etapa 1 considera una población servida de 2.000 habitantes y la Etapa 2 prevé su ampliación para atender a 3.000 habitantes, permitiendo modular la capacidad hidráulica y de tratamiento conforme crezcan la cobertura de redes y la demanda.

Para esas etapas se consideran los caudales presentados en la Tabla 8.1.

**Tabla 8.1- Caudales esperados para la PTAR Fray Marcos según cada etapa**

*Fuente – Manual de operación, mantenimiento y control de PTAR Fray Marcos (2018)*

Parámetro	Unidades	Etapa 1	Etapa 2
Pob. Equiv.	Hab	2000	3000
Dotación	L/hab.d	216	216
$k_1$	adim	1.5	1.5
$k_2$	adim	1.5	1.5
k pico	adim	2.25	2.25
Q medio	L/s	5.00	7.50
Q max_d	L/s	7.5	11.25
Q max_h	L/s	11.25	16.88
Q_bombeo	L/s	17.1	27

La planta cuenta con 2 reactores principales, los cuales comprenden en un mismo volumen, el reactor anóxico y aerobio, así como el sedimentador secundario, a semejanza de lo que sería una planta de tratamiento modular o transportable.

La denominación de aireación extendida del tipo escalonada hace referencia al tiempo de retención celular en el sistema, el cual es del orden de 25 días. Esto hace que el lodo purgado ya se encuentre estabilizado, con un contenido de materia orgánica del entorno del 60 % (relación sólidos volátiles sobre los sólidos totales en el entorno de 0,60).

El sistema de aireación mecánica consiste en compresores de lóbulos rotativos, los cuales alimentan grillas de difusores de membrana, o también difusores de membrana de burbuja fina.

Se trata de un sistema de aireación del tipo escalonado, por el hecho de que la densidad de difusores disminuye a lo largo del reactor en el sentido del flujo, y en consecuencia disminuye el gasto másico de aire entregado a la masa líquida.

El reactor aerobio se encuentra compartimentado en 3 celdas, en donde cada celda cuenta con una grilla de difusores cuya cantidad varía. La grilla de mayor densidad se encuentra en la celda inicial, mientras que la de menor densidad se encuentra en la última celda, previo pasaje al sedimentador secundario.

La planta fue proyectada para realizar eliminación de nutrientes, es decir nitrógeno (N) y fósforo (P). La eliminación de N se realiza biológicamente mediante acción bacteriana.

Por su parte, la remoción de fósforo se realiza por la acción conjunta de la síntesis biológica (en menor proporción), y por medios químicos (en mayor proporción) mediante aplicación de sales metálicas, en este caso cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ).

La denitrificación proyectada para la PTAR Fray Marcos es una denitrificación de “cabecera”, en la cual el líquido aireado - con un alto contenido de nitratos (nitrificado) – es recirculado hacia el extremo de ingreso al reactor, en conjunto con el líquido residual crudo.

Previo a la celda aerobia inicial, se proyectó una celda una celda anóxica (ausencia de oxígeno libre, bajo la forma de  $\text{O}_2$ ), la cual se encuentra separada de la celda aerobia inicial mediante un tabique.

La celda anóxica está provista de mezcladores sumergibles, cuyo objetivo es generar las condiciones de mezcla homogénea que favorezca el adecuado desarrollo del proceso, así como mantener la biomasa en suspensión.

En esta celda ocurre el ingreso de agua residual cruda – pasada por rejillas y desarenador – además del líquido aireado con alto contenido de nitratos. Dado que en esta zona no ocurre aireación, la mezcla resultante (agua residual cruda y líquido aireado) presenta bajo contenido de oxígeno disuelto, muy próximo a cero, ya que el mismo es rápidamente consumido.

Estas condiciones favorecen el crecimiento y desarrollo de bacterias anóxicas, las cuales son capaces de metabolizar la materia orgánica presente en ausencia de oxígeno libre. Para ello, utilizan el oxígeno combinado bajo la forma de nitrato ( $\text{NO}_3$ ), el cual se encuentra en abundancia en el reactor anóxico producto de la recirculación de líquido aireado.

El nitrato, al ser utilizado por las bacterias (“respirado”), se transforma (reduce) en nitrógeno gas  $\text{N}_2$  (gas), que se libera a la atmósfera y por tanto es eliminado del sistema (línea de tratamiento).

La remoción de P se realiza en mayor proporción por medios químicos mediante aplicación de sales metálicas, en este caso cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), el cual provoca la precipitación química – formación de fosfato férrico ( $\text{FePO}_4$ ), un compuesto insoluble en agua – de las diversas especies de fósforo bajo la forma de ortofosfato.

La dosificación se realiza en la tubería de ingreso al sedimentador secundario desde la celda aerobia 3, en donde se tiene un régimen turbulento que favorece la reacción del químico con la masa líquida.

El fosfato férrico generado en la reacción química sedimenta en el sedimentador secundario, desde donde es purgado hacia el sistema de deshidratación de lodos (lechos de secado) conjuntamente con el lodo biológico.

Por la escala de la planta, así como las características del proceso, el sistema seleccionado para la deshidratación de los lodos (reducción de volumen) es un lecho de secado.

Los lodos purgados son bombeados a un tanque satélite, que permite uniformizar la calidad del lodo a deshidratar, y realizar una purga de sobrenadante (concentrado adicional) previo a su descarga en los lechos para deshidratación.

Además de las unidades propias del sistema de lodos activados, la PTAR Fray Marcos cuenta con las siguientes unidades accesorias que en conjunto permiten dar cumplimiento a la calidad objetivo establecida, detallada en la Tabla 8.2, para el efluente tratado:

- Canal de rejillas de limpieza manual;
- Infraestructura de descarga de barométricas – sector de descarga provisto de conexión con acople rápido, y reguera de piso para captación de pérdidas y/o aguas de lavado;
- Canal desarenador de flujo horizontal;
- Estación de bombeo de levante, desde donde se alimentan los reactores;
- Cámara seca y sector de bombas de proceso – bombas de recirculación de lodos, bombas de purga de lodos, y bombas de recirculación de licor mezcla (denitrificación);
- Canal de desinfección UV;
- Sistema de dosificación de cloruro férrico (precipitación de P y control de olores)

### **Figura 8.1 – Vista aérea de la PTAR de Fray Marcos**

*Fuente – página web de CIEMSA, consultada en agosto 2025*



*Nota: La figura muestra una fotografía aérea de la PTAR de Fray Marcos*

### *8.3. Información proporcionada por OSE*

La información utilizada para la evaluación de la calidad de los efluentes y los lodos correspondientes a la planta de tratamiento de Fray Marcos fue proporcionada por OSE en respuesta a una solicitud de acceso a la información pública SIP N°3467. Los datos entregados comprenden resultados analíticos de calidad de agua y de lodos generados en la planta, los cuales constituyen la base del análisis desarrollado en el presente capítulo.

En relación con los efluentes tratados, OSE proporcionó una planilla con resultados de laboratorio correspondientes al período comprendido entre noviembre de 2019 y febrero 2025, totalizando 22 muestras analizadas. Se constató que las muestras no fueron tomadas con una periodicidad regular, por lo que no se dispone de una secuencia temporal continua. Además, se descartaron dos de las muestras debido a que en la planilla se especificaba que las condiciones de toma no habían sido las adecuadas.

Todas las muestras de efluente corresponden a mediciones realizadas antes del UV. La información original incluía valores de E. Coli, SST y DBO<sub>5</sub>, entre otros parámetros. No obstante, dado que las normativas internacionales de reúso de aguas establecen criterios de calidad basados en coliformes fecales, SST, turbiedad y DBO<sub>5</sub>, fue necesario realizar ciertos ajustes metodológicos para permitir la comparación.

En primer lugar, dado que el conjunto de datos no incluía mediciones de turbiedad, se procedió a estimar los valores de turbidez (NTU) a partir de los SST. En segundo lugar, se trabajó con los valores de E. Coli para obtener valores comparables con las condiciones post UV, se supuso una inactivación de por radiación UV de 2 log, lo que permitió estimar las concentraciones esperadas en el efluente tratado final. Se volvieron a revisar los reglamentos y normativas y se seleccionaron aquellos que tenían referencias de E. Coli en vez de coliformes fecales.

En lo que respecta a los lodos generados en la planta, OSE proporcionó un único análisis correspondiente a octubre de 2021, que incluye determinaciones de carácter físico-químico y microbiológico.

### *8.4. Estudio de efluentes*

Actualmente, en Uruguay, la normativa vigente que regula los valores de los parámetros para los cursos de agua, así como para la descarga de efluentes o vertidos a un cuerpo receptor es el Decreto 253/79.

En el caso particular de la PTAR de Fray Marcos, cuyo emisario descarga en la cuenca del Río Santa Lucía, aplican además los parámetros y medidas complementarias establecidas en la Resolución Ministerial RM 966/2013, que se enmarca en el Plan de Acción para la Protección de la Calidad Ambiental y la Disponibilidad de las Fuentes de Agua Potable en la Cuenca del Río Santa Lucía.

Dicho plan tiene por objetivo específico limitar el aporte de nutrientes al Río Santa Lucía (N y P), a efectos de evitar o minimizar las probabilidades de eutrofización de dicho cuerpo receptor.

De este modo, la calidad de efluente objetivo fijada para la planta en condición de régimen (estacionaria) es la que se establece en la Tabla 8.2.

**Tabla 8.2- Calidad de efluente objetivo fijada para PTAR de Fray Marcos**

*Fuente – Manual de operación, mantenimiento y control de PTAR Fray Marcos, 2018*

Parámetro	Unidad	Valor
DBO	mg/L	< 20
SST	mg/L	< 40
P total	mg/L	< 5
[N-NH <sub>4</sub> ]	mg/L	< 2
[NKT]	mg/L	< 10
[N-NO <sub>3</sub> ]	mg/L	< 20
Aceites y Grasas	mg/L	< 10

El Decreto 253/79 de Uruguay, que regula la prevención de la contaminación del agua, está siendo modificado para actualizar la normativa a los desafíos actuales, incluyendo la gestión de contaminantes emergentes como las cianobacterias y genes de resistencia a antibióticos. El Ministerio de Ambiente convocó al Grupo de Estandarización Técnica de Agua (Gesta Agua) para elaborar una propuesta que está siendo sometida a consulta pública entre el 18 de agosto y el 29 de septiembre de 2025. Se presentan los valores de calidad de agua considerados para casos de vertidos a un cuerpo receptor en la Tabla 8.3.

**Tabla 8.3- Estándares de vertido directo a cuerpo de agua**

*Fuente – Propuesta técnica para la modificación del Decreto 253/7, 2025*

Parámetro	Unidad	Valor límite
DBO <sub>5</sub>	mg/L	60
SST	mg/L	150
P total	mg/L	5
[N-NH <sub>4</sub> ]	mg/L	5
[NKT]	mg/L	10
[N-NO <sub>3</sub> ]	mg/L	20
Aceites y Grasas	mg/L	40

Se puede observar que los valores de calidad considerados para la PTAR de Fray Marcos permanecen por debajo de los valores límites que establece la propuesta de modificación del actual Decreto 253/79.

A continuación, se presenta la Tabla 8.4, con los parámetros de calidad aportados por OSE para el estudio planteado en esta tesis. Todas las muestras de efluente fueron tomadas antes del UV, por lo que los resultados bacteriológicos no son representativos de la calidad del efluente vertido.

**Tabla 8.4- Parámetros de calidad de efluente en PTAR Fray Marcos**

*Fuente – Datos aportados por OSE en SIP N°3467*

Nº Muestra	Fecha de Extracción	pH	DBO <sub>5</sub> mg/l	DQO mg/l	SST mg/l	Amonio mg/l	Nitrato mg/l	E.Coli NMP/100 ml	Ac y Gr mg/l	NTK mg/l	Fósforo Tot mg/l	Observaciones de análisis
190048860	6/11/2019 11:40	7	29	204	45	<1			14	5,55	9,37	No se recibieron muestras para análisis bacteriológico.
200007030	12/2/2020 9:45	5,9	29	57	30	<1	127	83000	<10	3,4	14,8	
200024099	4/6/2020 12:00	6,8	20	39	15	<1	103	12000	<10		19,4	
200043475	30/9/2020 11:30	7,5	9	56	28	<1	77	42000	<10	4,23	10,4	
200055867	10/12/2020 10:00	7,6	5	48	30	<1	108	6200	11	4,75	10,1	
210010644	11/3/2021 11:00	8,1	4	33	11	<1	91	1000	<10	1,12	0,17	
210024594	16/6/2021 10:00	7,2	8	27	16	8,6	59	44000	<10	12	2,23	
210039069	21/9/2021 11:10	6,8	9	36	10	13	70	8600	<10	14,6	2,4	
210051129	1/12/2021 10:45	6,6	4	19	10	<1	58	960	<10	1,04	0,62	
220010412	9/3/2022 12:00	4,1	2	3	15	<1	69	2800	<10	1,13	0,33	
220023591	2/6/2022 11:40	7,5	6	26	14	13	19	100	<10	17,1	0,38	
220036641	23/8/2022 11:45	7,3	5	19	31	<1	58	100	<10	2,45	0,37	
220055071	14/12/2022 10:30	8,4	2	33	10	<1	69	200	<10	2,12	1,39	
230009063	23/2/2023 11:47	8,3	2	19	10	<1	88	100	<10	2,77	1,7	
230028635	14/6/2023 11:20	7,1	2	19	10	<1	76	100	<10	0,96	0,16	
230047639	28/9/2023 11:40	7,2	7	37	11	2	60	100		4,4	0,21	
230055504	16/11/2023 10:30	6,8	5	93	10	3,2	72	24000	<10	4,57	0,94	
240009730	29/2/2024 11:15	5,9	4	29	10	<1	57	5300	<10	1,52	0,27	
240037869	29/8/2024 10:40	7,1	9	18	12	3,5	45	5100	<10	4,78		
240047636	30/10/2024 11:40	7,7	10	74	12	85	1	240000	<10	17,1		
240051034	20/11/2024 11:00	7,2	46	46	15	<1	40		<10	2,9		No se informan los resultados de Coliformes totales ni Escherichia coli, debido a que no fue posible ingresar al laboratorio los días 21 y 22 de noviembre por ocupación gremial.



Nº Muestra	Fecha de Extracción	pH	DBO <sub>5</sub> mg/l	DQO mg/l	SST mg/l	Amonio mg/l	Nitrato mg/l	E.Coli NMP/100 ml	Ac y Gr mg/l	NTK mg/l	Fósforo Tot mg/l	Observaciones de análisis
250009295	27/2/2025 11:10	7	6	23	10	<1		2000	15	3,2		No se informa el resultado de Nitrato debido a problemas técnicos internos del laboratorio.

De los datos aportados no se tomarán en consideración los correspondientes a las muestras 190048860 y 240051034, ya que como lo indica las observaciones estos se vieron afectados debido a algunos problemas.

Como se detalla en el capítulo 6, los parámetros relevantes a evaluar en el caso de reutilización de efluentes para riego son: DBO<sub>5</sub>, SST, Turbiedad y Coliformes fecales.

En los datos aportados por OSE, no se incluyen datos de turbiedad, por lo que estos se estimarán de acuerdo con la relación  $1 \text{ mg/L SST} \approx 3 \text{ NTU}$ <sup>6</sup>; se presenta a continuación la Tabla 8.5 con los valores de turbiedad a considerar.

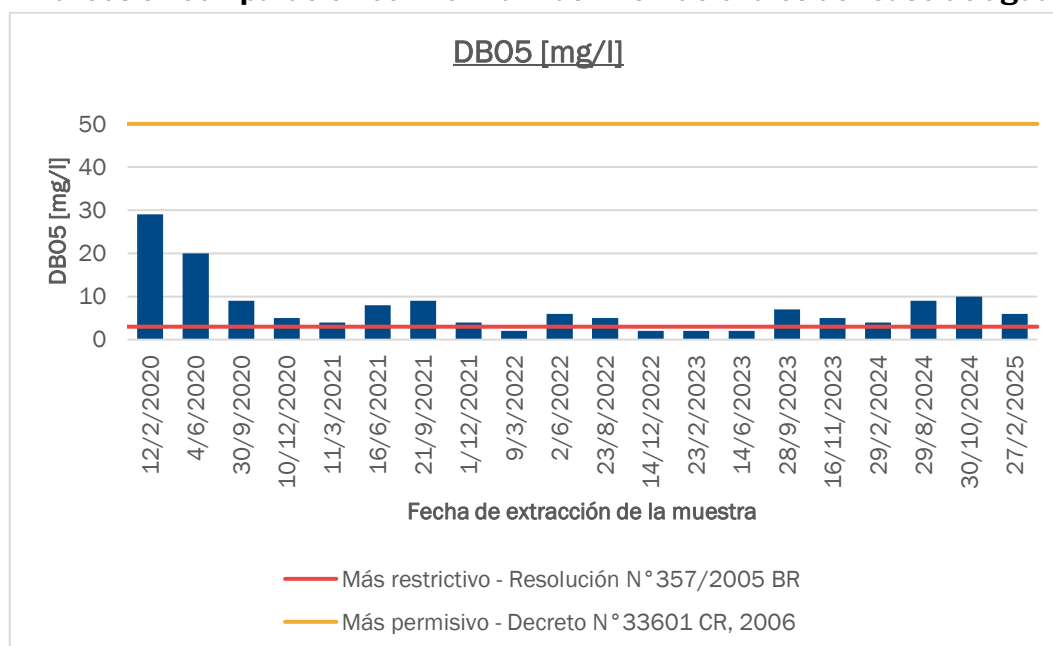
**Tabla 8.5- Estimación de valores de turbiedad en PTAR Fray Marcos**

Nº Muestra	Fecha de Extracción	SST (mg/l)	Turbiedad (NTU)
200007030	12/2/2020 9:45	30	90
200024099	4/6/2020 12:00	15	45
200043475	30/9/2020 11:30	28	84
200055867	10/12/2020 10:00	30	90
210010644	11/3/2021 11:00	11	33
210024594	16/6/2021 10:00	16	48
210039069	21/9/2021 11:10	10	30
210051129	1/12/2021 10:45	10	30
220010412	9/3/2022 12:00	15	45
220023591	2/6/2022 11:40	14	42
220036641	23/8/2022 11:45	31	93
220055071	14/12/2022 10:30	10	30
230009063	23/2/2023 11:47	10	30
230028635	14/6/2023 11:20	10	30
230047639	28/9/2023 11:40	11	33
230055504	16/11/2023 10:30	10	30
240009730	29/2/2024 11:15	10	30
240037869	29/8/2024 10:40	12	36
240047636	30/10/2024 11:40	12	36
250009295	27/2/2025 11:10	10	30

En las gráficas 13, 14, 15 y 16 se muestran los valores de cada uno de los parámetros; además, se grafican como referencia los valores más permisivo y más restrictivo de las normativas y/o reglamentos presentados en el capítulo 6.

<sup>6</sup> Esta información se obtuvo en la web de [agua.es](http://agua.es) consultada en agosto/2025; la misma relación figura en las notas del curso de Calidad de Aguas de FING, Udelar

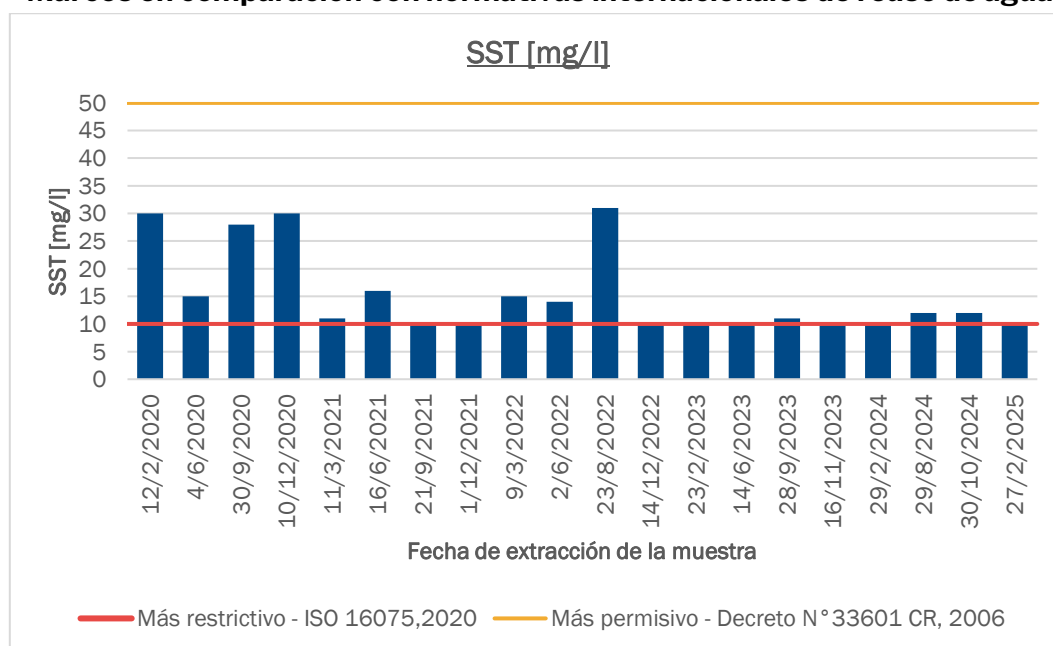
**Figura 8.2 – Valores de DBO<sub>5</sub> obtenidos de muestras de efluentes de PTAR de Fray Marcos en comparación con normativas internacionales de reúso de agua**



*Nota: La figura muestra los valores de DBO<sub>5</sub> obtenidos de muestras de efluentes de PTAR de Fray Marcos en comparación con normativas internacionales de reúso de agua*

Se puede observar que todos los casos muestreados tienen valores de DBO<sub>5</sub> dentro del rango de valores permisibles en las normativas internacionales; incluso algunos de los valores obtenidos se encuentran por debajo de 3 mg/L de DBO<sub>5</sub> considerado como valor límite en la Resolución N° 357/2005 de Brasil.

**Figura 8.3 – Valores de SST obtenidos de muestras de efluentes de PTAR de Fray Marcos en comparación con normativas internacionales de reúso de agua**

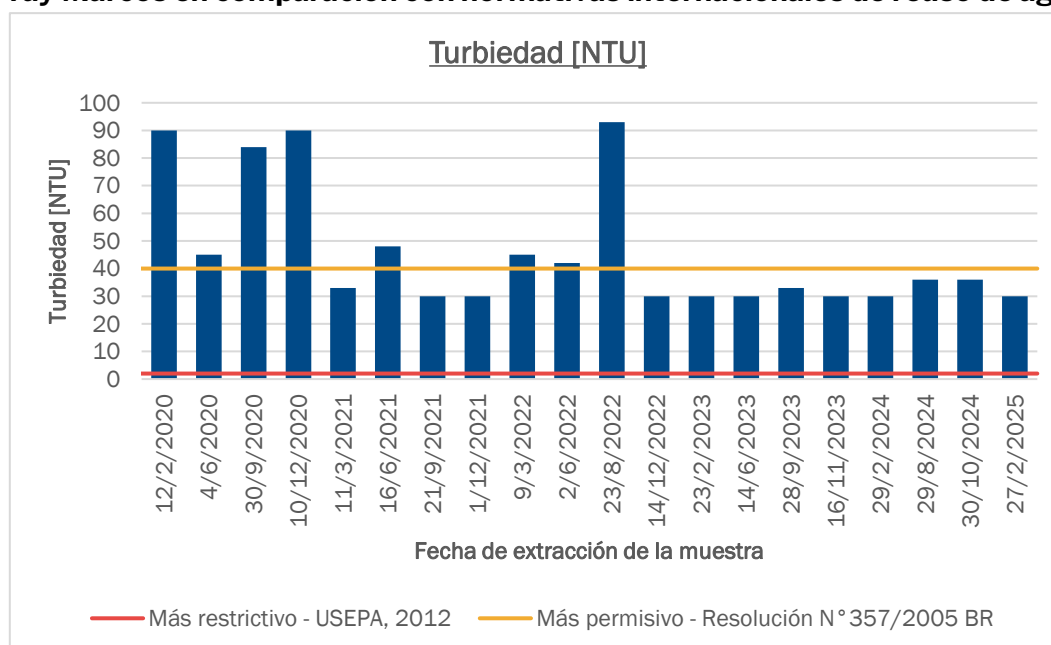


*Nota: La figura muestra los valores de SST obtenidos de muestras de efluentes de PTAR de Fray Marcos en comparación con normativas internacionales de reúso de agua*

Para el caso de SST, la Resolución N°357/2005 de Brasil es la más permisiva admitiendo un valor de 500 mg/l de SST. Para este estudio se optó por una opción más conservadora, por lo que se considera como valor más permisivo el del Decreto N°33601 de Costa Rica que admite valores límites de 50 mg/l.

Al igual que para el caso anterior se puede ver que los valores de todas las muestras se encuentran dentro del rango admisible, encontrando nuevamente algunos valores por debajo del valor considerado más restrictivo.

**Figura 8.4 – Valores de turbiedad obtenidos de muestras de efluentes de PTAR de Fray Marcos en comparación con normativas internacionales de reúso de agua**



*Nota: La figura muestra los valores de turbiedad obtenidos de muestras de efluentes de PTAR de Fray Marcos en comparación con normativas internacionales de reúso de agua*

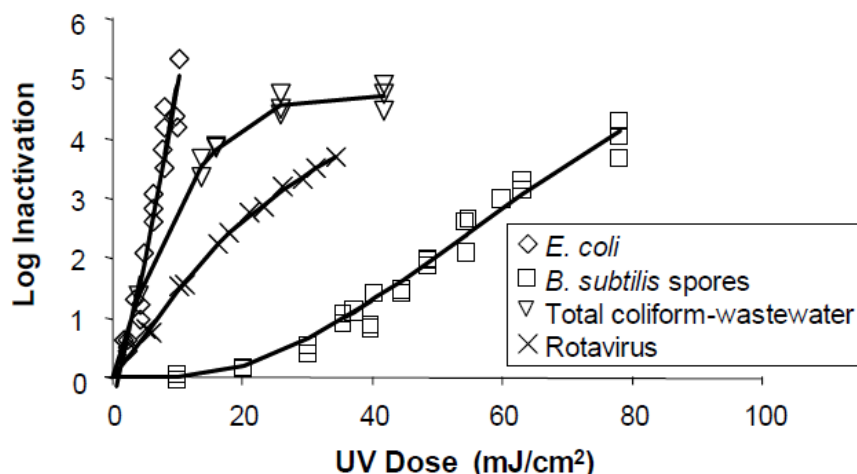
Los valores de turbiedad fueron estimados a partir de los valores medidos de SST. De igual forma, se observa que el 60 % de los valores se encuentra dentro del rango considerado según las distintas normativas.

Para el caso de E. Coli, los valores proporcionados por OSE, corresponden a valores de muestras extraídas antes del UV. Como el agua a reusar se extraería después del UV, se realizará una estimación de los valores post UV.

La Figura 8.5, muestra las curvas de dosis-respuesta a UV para distintos microorganismos.

**Figura 8.5 – Curva dosis-respuesta a UV**

*Fuente – Ultraviolet disinfection guidance manual for the final Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule (EPA 815-R-06-007)*



*Nota: La figura muestra las curvas de dosis-respuesta UV para distintos microorganismos.*

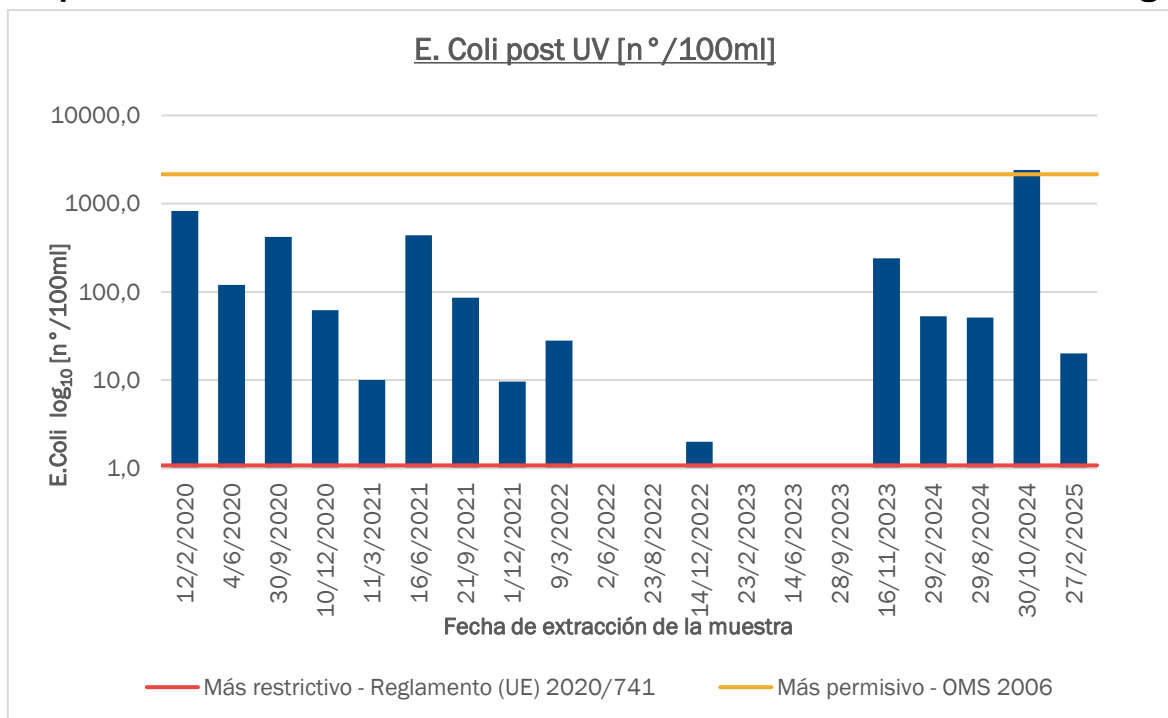
Como no hay suficientes datos para determinar con precisión el valor de inactivación de E. Coli, considerando la Figura 8.5, se supone para el cálculo una inactivación de 2 log. Se obtienen así los valores presentados en la Tabla 8.6.

**Tabla 8.6- Estimación de valores de E. Coli post UV en PTAR Fray Marcos**

Nº Muestra	Fecha de Extracción	E.Coli antes UV (NMP/100ml)	E.Coli post UV (NMP/100ml)
200007030	12/2/2020 9:45	83000	830,0
200024099	4/6/2020 12:00	12000	120,0
200043475	30/9/2020 11:30	42000	420,0
200055867	10/12/2020 10:00	6200	62,0
210010644	11/3/2021 11:00	1000	10,0
210024594	16/6/2021 10:00	44000	440,0
210039069	21/9/2021 11:10	8600	86,0
210051129	1/12/2021 10:45	960	9,6
220010412	9/3/2022 12:00	2800	28,0
220023591	2/6/2022 11:40	100	1,0
220036641	23/8/2022 11:45	100	1,0
220055071	14/12/2022 10:30	200	2,0
230009063	23/2/2023 11:47	100	1,0
230028635	14/6/2023 11:20	100	1,0
230047639	28/9/2023 11:40	100	1,0
230055504	16/11/2023 10:30	24000	240,0
240009730	29/2/2024 11:15	5300	53,0
240037869	29/8/2024 10:40	5100	51,0
240047636	30/10/2024 11:40	240000	2400,0

N° Muestra	Fecha de Extracción	E.Coli antes UV (NMP/100ml)	E.Coli post UV (NMP/100ml)
250009295	27/2/2025 11:10	2000	20,0

**Figura 8.6 – Valores estimados de E. Coli post UV PTAR de Fray Marcos en comparación valores de establecidos en normativas internacionales de reúso de agua**



*Nota: La figura muestra los valores de E. Coli obtenidos de muestras de efluentes de PTAR de Fray Marcos en comparación con normativas internacionales de reúso de agua*

En la Figura 8.6 se observan los valores estimados de E. Coli post UV, en escala logarítmica, se observa que solo una de las muestras, que representa el 5 % estaría por encima del valor más permisivo que es el sugerido por OMS. El 35 % de los valores se encuentra por debajo del valor más restrictivo y un 60 % se encuentra en el rango intermedio entre el valor más permisivo y el más restrictivo.

En general, el efluente muestra buen desempeño en cuanto a DBO<sub>5</sub> y SST, pero presenta desafíos en turbidez y E. coli que lo alejan de cumplir con normativas internacionales más estrictas. Este análisis presenta algunas limitaciones que son el supuesto de inactivación de 2 log de UV y la estimación de la turbiedad. En ambos casos la recomendación sería realizar las mediciones que exigen las normas y/o reglamentos, es decir turbiedad y coliformes fecales post UV.

Considerando estos caudales de la Tabla 8.1 y suponiendo que el efluente se utilizará en riego por aspersión con una eficiencia del 80 % y una demanda hídrica de cultivo de 5 mm/día, sería posible regar aproximadamente 7 hectáreas diarias con el caudal de la etapa 1 y 10 hectáreas diarias si se considera el caudal de la etapa 2; para hacerlo más visible, esto representa entre 10 y 14 canchas de fútbol tamaño FIFA por día.

### 8.5. Estudio de lodos

Para el caso de lodos, OSE proporciona los resultados de un único ensayo realizado en octubre 2021, que se presentan en la Tabla 8.7.

**Tabla 8.7- Parámetros de calidad de lodos en PTAR Fray Marcos**

*Fuente – Datos aportados por OSE en SIP N°3467*

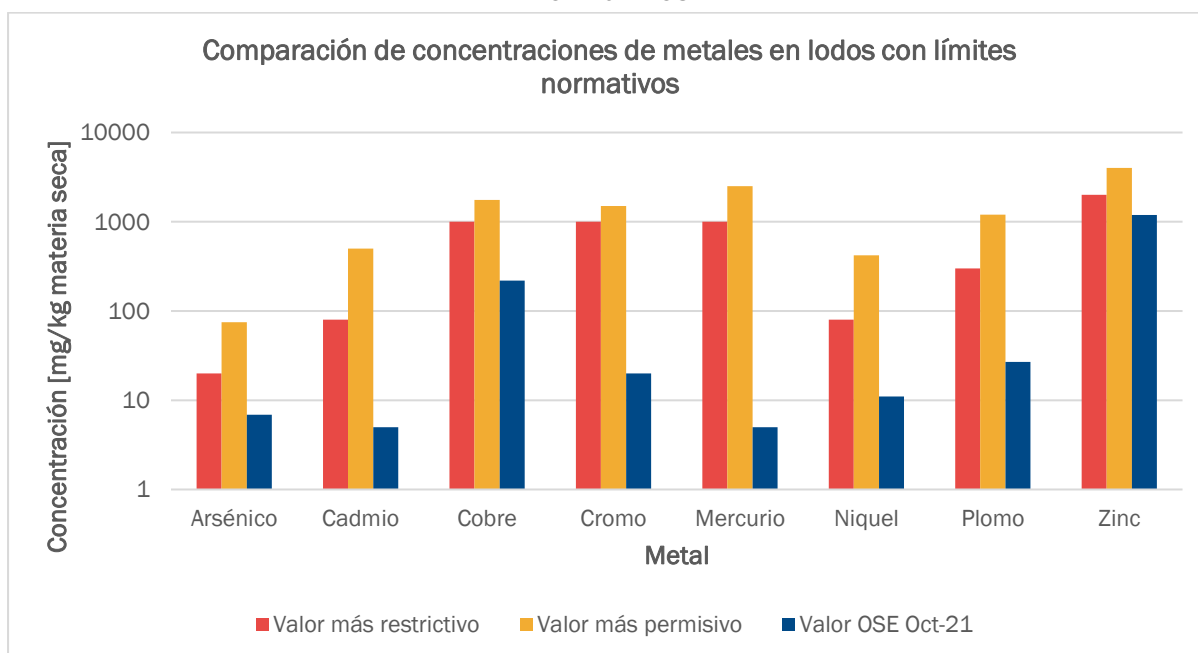
Parámetro	Resultado	Unidades
Arsénico	6.9	mg As/Kg
Cadmio	0.5	mg Cd/Kg
Cobre	220	mg Cu/Kg
Cromo total	20	mg Cr/Kg
Mercurio	<0.05	mg Hg/Kg
Níquel	11	mg Ni/Kg
Plomo	27	mg Pb/Kg
Zinc	1191	mg Zn/Kg

Para realizar la comparación de estos valores con los sugeridos por las normativas internacionales, se diseña la Tabla 8.8, y para una mejor visualización se presenta la gráfica 17 con los mismos datos.

**Tabla 8.8- Comparación de valores de metales en lodo de PTAR Fray Marcos con normativas internacionales**

Metal	Valor más restrictivo		Valor más permisivo		Valor de OSE octubre 2021
	Norma	Valor mg/kg	Norma	Valor mg/kg	
Arsénico	Dec. Supremo N°004/2009 CH	<b>20</b>	Resolución 97/2001 ARG	<b>75</b>	6,9
Cadmio	Dec. Supremo N°004/2009 CH	<b>8</b>	Acuerdo Gubernativo N° 236-2006 GUA	<b>50</b>	0,5
Cobre	Dec. Supremo N°004/2009 CH	<b>1000</b>	Directiva 86/278 CEE	<b>1750</b>	220
Cromo	Decreto 1287/2014 COL	<b>1000</b>	Acuerdo Gubernativo N° 236-2006 GUA	<b>1500</b>	20
Mercurio	Dec. Supremo N°004/2009 CH	<b>10</b>	Directiva 86/278 CEE	<b>25</b>	0,05
Níquel	Dec. Supremo N°004/2009 CH	<b>80</b>	Resolución N°375/2006 BR	<b>420</b>	11
Plomo	Dec. Supremo N°004/2009 CH	<b>300</b>	Directiva 86/278 CEE	<b>1200</b>	27
Zinc	Dec. Supremo N°004/2009 CH	<b>2000</b>	Directiva 86/278 CEE	<b>4000</b>	1191

**Figura 8.7 – Comparación de concentraciones de metales en lodos con límites normativos**



*Nota: La figura muestra los valores de metales obtenidos en muestra de lodos de PTAR de Fray Marcos en comparación con normativas internacionales de lodos*

En todos los metales analizados, las concentraciones se encuentran muy por debajo de los límites establecidos por las normativas más restrictivas, lo que indica un alto margen de seguridad para la reutilización de lodos en aplicaciones agrícolas o de mejora de suelos.

Los metales que muestran mayor cercanía relativa a los límites son el cobre y el zinc, aunque se mantienen dentro de rangos ampliamente seguros.

La baja presencia de mercurio y cadmio es especialmente relevante, dado que son de los metales más tóxicos para la salud humana y los ecosistemas.

Además de los valores de metales, las normas indican que es necesario evaluar agentes patógenos, en especial coliformes fecales, salmonella y huevos de helminto. Para esto se presenta en la Tabla 8.9 la comparación entre normativa y los valores proporcionados por OSE.

**Tabla 8.9- Comparación de valores de agentes patógenos en lodo de PTAR Fray Marcos con normativas internacionales**

Parámetro	Valor admisible	Unidades	Valor de OSE octubre 2021
Coliformes fecales	1000	NMP/g de ST	390
Huevos de helminto	1	huevos/4g de ST	confirma existencia, no indica valores
Salmonella	3	huevos/4g de ST	0



Respecto a los agentes patógenos se puede ver que tanto para coliformes como para salmonella los valores que informa OSE se encuentran por debajo del valor admisible. En el caso de huevos de helminto, al no tener un valor numérico, no es posible deducir una conclusión concreta.

Si bien los valores obtenidos, tanto para metales como para patógenos, son admisibles y muestran un perfil favorable, es importante señalar que OSE proporcionó únicamente un resultado analítico en todo el período histórico disponible (desde noviembre de 2019 hasta la fecha del análisis). Esto implica que no se dispone de un seguimiento temporal que permita evaluar la estabilidad de las concentraciones a lo largo del tiempo. Por lo tanto, sería recomendable implementar un programa de monitoreo periódico que confirme la consistencia de estos resultados antes de establecer un plan de reutilización.

Según el manual de operación y mantenimiento de la PTAR de Fray Marcos, se estima que con un caudal de 5 l/s de efluente, la producción de lodos es de 66,46 kg/día, lo que significa una producción de 24 ton/año en el caso de la etapa 1 y 36 ton/año en el caso de la etapa 2.

La ficha técnica EPA 832-F-00-064, sobre aplicación de biosólidos a la tierra, contiene la Tabla 8.10 que se utiliza como referencia.

**Tabla 8.10- Escenarios típicos de aplicación de biosólidos**

*Fuente – USEPA 832-F-00-064, septiembre 2000*

Tipo de sitio/Vegetación	Calendario	Frecuencia de aplicación	Dosis de aplicación (ton secas/ha)
<b>TIERRAS AGRÍCOLAS</b>			
Maíz	Abril, mayo, después de la cosecha	Anualmente	12,3 a 24,6
Cereales de grano pequeño	Marzo-junio, agosto, otoño	Hasta 3 veces por año	4,9 a 12,3
Soja	Abril-junio, otoño	Anualmente	12,3 a 49,4
Heno	Después de cada corte	Hasta 3 veces por año	4,9 a 12,3
<b>TIERRAS FORESTALES</b>			
—	Durante todo el año	Una vez cada 2-5 años	12,3 a 246,9
<b>TIERRAS DE PASTOREO</b>			
—	Durante todo el año	Una vez cada 1-2 años	4,9 a 148,1
<b>SITIOS DE RESTAURACIÓN</b>			
—	Durante todo el año	Una vez	148,1 a 246,9

El *National Manual of Good Practice for Biosolids* (WEF, 2011) indica que las tasas de aplicación agronómica de biosólidos en agricultura “suelen estar entre 5 y 20 toneladas métricas de SS por hectárea, aplicadas de forma repetida cada 1-5 años” (capítulo 9, página 1).

Considerando las dos fuentes anteriores, y suponiendo una tasa de aplicación anual de 5 toneladas secas de biosólidos anuales, el lodo que sale de la PTAR de Fray Marcos en la etapa 1 es suficiente para mejorar anualmente 4,8 hectáreas, mientras que en la etapa 2 se alcanzaría hasta 7,2 ha/año. Esto sería el equivalente a 6 canchas de fútbol tamaño FIFA en la etapa 1 y 10 canchas en la etapa 2.

## 9. Conclusiones y recomendaciones

### 9.1. Caso de estudio

El estudio confirma la viabilidad técnica del reúso de efluentes y lodos de la PTAR de Fray Marcos bajo condiciones operativas reales y en referencia a marcos normativos internacionales y regionales. En términos de efluente, los objetivos de calidad fijados para la planta en régimen ( $\text{DBO} < 20 \text{ mg/L}$ ,  $\text{SST} < 40 \text{ mg/L}$ ,  $\text{P total} < 5 \text{ mg/L}$ ,  $\text{N-NH}_4 < 2 \text{ mg/L}$ ,  $\text{NKT} < 10 \text{ mg/L}$ ,  $\text{N-NO}_3 < 20 \text{ mg/L}$  y Aceites y Grasas  $< 10 \text{ mg/L}$ ) constituyen una base adecuada para usos no potables con requerimientos sanitarios bien definidos. Todas las muestras consideradas en esta tesis fueron tomadas por OSE antes de la desinfección UV, por lo que la aptitud sanitaria para usos sensibles debe consolidarse con monitoreo posterior a la desinfección.

Con relación al desempeño observado, los SST de todas las campañas estuvieron dentro de rangos admisibles cuando se comparan contra referencias internacionales para reúso (criterio conservador:  $50 \text{ mg/L}$ ), e incluso con valores por debajo de los límites más restrictivos en varios muestreos. La  $\text{DBO}_5$  mostró también un comportamiento compatible con las metas del efluente objetivo de la planta.

La turbiedad y el E. Coli, ambos estimados a partir de la información disponible, evidenciaron que aproximadamente el 60 % de los registros se ubican dentro de los rangos de referencia utilizados; al tratarse de valores estimados, se recomienda complementar con medición directa y continua para poder realizar una evaluación más concreta.

Desde la perspectiva de oferta hídrica para reúso, y bajo supuestos operativos razonables (riego por aspersión, eficiencia del 80 % y demanda hídrica de  $5 \text{ mm/día}$ ), el caudal de la etapa 1 permitiría regar del orden de  $7 \text{ ha/día}$ , y el de la etapa 2,  $\approx 10 \text{ ha/día}$ . Estos resultados respaldan usos en riego urbano/agrícola, con selección de barreras sanitarias acorde al destino.

En cuanto a lodos/biosólidos, la caracterización disponible (muestra de octubre de 2021) mostró concentraciones de metales muy por debajo de los límites de las normas más estrictas consideradas (por ejemplo, As  $6,9 \text{ mg/kg}$ ; Cd  $0,5 \text{ mg/kg}$ ; Cu  $220 \text{ mg/kg}$ ; Cr  $20 \text{ mg/kg}$ ; Hg  $< 0,05 \text{ mg/kg}$ ; Ni  $11 \text{ mg/kg}$ ; Pb  $27 \text{ mg/kg}$ ; Zn  $1191 \text{ mg/kg}$ ), lo cual habilita usos agronómicos desde el punto de vista de metales. El análisis comparativo evidencia alto margen de seguridad respecto de los valores normativos más restrictivos para aplicación al suelo, aunque no debe olvidarse que se dispuso de un solo análisis puntual.

Sobre agentes patógenos, los valores reportados se encuentran por debajo de los admisibles para coliformes fecales y *Salmonella*; en huevos de helminto no se dispone de valor cuantitativo (se confirma presencia), de modo que no es posible una conclusión definitiva para ese parámetro. Dados estos resultados y el enfoque precautorio requerido

para usos en suelo, se recomienda contabilizar huevos de helmintos en el plan de control cuando el destino sea agrícola.

En materia de generación de lodos, y conforme al Manual de operación de la PTAR de Fray Marcos (2018), con un caudal de 5 L/s se estima una producción del orden de 66,46 kg SS/día, equivalente a  $\approx 24$  t SS/año en etapa 1 (y  $\approx 36$  t SS/año en etapa 2). Estas magnitudes permiten dimensionar logísticamente alternativas de valorización local como acondicionamiento/compostaje y aplicación controlada a suelos.

En síntesis:

- Efluente: cumple consistentemente con metas de SST y muestra  $\text{DBO}_5$  compatible con el objetivo de calidad. La medición de E. Coli, estimada con desinfección UV en línea, también sería compatible con los objetivos para su aptitud para usos no potables (limpieza urbana, riego de áreas verdes y riego agrícola con selección de barreras sanitarias según el cultivo y método de riego); ante este punto es importante destacar que la mayoría de los reglamentos/normas revisadas en esta tesis tienen en cuenta Coliformes Fecales (NMP/100ml) en vez de E. Coli (NMP/100ml) por lo que se sugiere realizar las mediciones adecuadas para mayor rigurosidad. De igual forma, la turbiedad, al ser estimada, requiere verificación instrumental si se pretende habilitar usos con exigencias más estrictas.
- Lodos: perfil favorable para valorización por contenido de metales muy por debajo de límites exigentes; patógenos en condiciones admisibles para coliformes y *Salmonella*, con incertidumbre en helmintos que debe resolverse con monitoreo específico según destino.
- Potencial de uso: con los caudales proyectados, existe suficiente cantidad de agua para abastecer superficies de riego relevantes a escala local (7–10 ha/día), fortaleciendo la economía circular a partir de una oferta estable de efluente tratado.
- Limitaciones del estudio:
  - todas las muestras de efluente analizadas fueron tomadas antes de la desinfección
  - turbiedad estimada en lugar de medida en línea
  - se realizan mediciones de E. Coli en vez de Coliformes Fecales
  - un único set analítico de lodos en todo el histórico disponible, lo que limita la inferencia temporal.

En consecuencia, se recomienda un programa de monitoreo periódico (post-UV en efluente; metales, patógenos y huevos de helmintos en lodos) como condición previa a la implementación a escala.

Considerando el marco regulatorio local aplicable a la descarga en la cuenca del Río Santa Lucía (Decreto 253/79 y RM 966/2013), la PTAR de Fray Marcos opera con metas explícitas de reducción de nutrientes; el reúso propuesto se alinea con estos objetivos al reducir vertidos y aprovechar recursos (agua y biosólidos) bajo control sanitario.

En conclusión, los datos disponibles apoyan la factibilidad del reúso del efluente y la valorización de los lodos de la PTAR de Fray Marcos en esquemas de riego y de aplicación a suelos, respectivamente, condicionado a la instrumentación de un plan de aseguramiento de calidad (muestreo post-UV, turbiedad, huevos de helmintos) y a la formalización de rutas de uso coherentes con las exigencias del destino final.

### *9.2. Sobre los objetivos de esta tesis*

Al comienzo de esta tesis se plantearon dos propósitos a revisar, uno de ellos era analizar si dentro de las aguas residuales se encuentra parte de la solución a los problemas de escasez hídrica y el otro era analizar alternativas para la reutilización de los lodos de las PTAR. Teniendo en consideración las alternativas e investigaciones presentadas en este trabajo, es posible asegurar que la reutilización de efluentes y lodos de las PTAR, aplicadas de manera correcta, podrían ser parte de la respuesta para llegar a una economía circular a nivel mundial.

En particular, en Uruguay, considerando que la PTAR de Fray Marcos corresponde a un máximo de 3000 habitantes, y que OSE proyecta en el corto plazo ampliar la cobertura de saneamiento del 48 % al 68 % en el interior, y este incremento implicará mayor disponibilidad de efluentes y lodos con potencial de reúso y valorización. Bajo condiciones de calidad y operación similares a las del caso de estudio, el escalamiento modular permitiría sumar superficies regadas y suelos mejorados en forma proporcional, favoreciendo la integración del reúso en la planificación hídrica local y la economía circular del sector.

### *9.3. Líneas de trabajo a futuro*

De cara al desarrollo de futuras investigaciones y proyectos, resulta necesario avanzar en un análisis de costo-beneficio o de ciclo de vida que permita justificar económicamente las propuestas de reúso, incorporando no solo los aspectos financieros, sino también las dimensiones ambientales y sociales asociadas al largo plazo.

En relación con las normativas aplicables al aprovechamiento de lodos como mejoradores de suelos, cabe señalar que, además de las características intrínsecas de los biosólidos, éstas exigen considerar las propiedades de los suelos receptores. Por lo tanto, se vuelve imprescindible llevar a cabo estudios de suelos específicos que permitan determinar la factibilidad de aplicar biosólidos en diferentes contextos edáficos.

Finalmente, se plantea la necesidad de implementar un proyecto piloto a escala nacional que contemple tanto los lodos como el agua tratada, con el fin de dimensionar de manera precisa qué superficies agrícolas podrían ser fertilizadas y qué áreas de cultivo podrían irrigarse. Dicho proyecto debería también evaluar el ahorro potencial de agua potable para consumo humano que esta práctica liberaría, y, en articulación con un análisis económico, valorar la viabilidad real de la implementación de este tipo de proyectos en Uruguay.

Para finalizar, es importante destacar, que más allá de la viabilidad técnica demostrada, la implementación sostenida del reúso exige involucramiento activo del Estado para crear condiciones habilitantes y confiabilidad social. Esto implica definir lineamientos y estándares específicos de reúso, clarificar permisos y responsabilidades, y habilitar instrumentos de financiación e incentivos para la infraestructura de tratamiento, almacenamiento y distribución. Asimismo, la planificación hídrica y urbana debe integrar el reúso como fuente regular, promoviendo proyectos piloto con evaluación independiente, monitoreo transparente y publicación periódica de resultados. La aceptación social se fortalece mediante comunicación temprana y continua, educación sanitaria, participación de actores locales y auditorías externas que respalden la percepción de seguridad. En conjunto, estas medidas reducen barreras de adopción y favorecen la masificación del reúso en condiciones de equidad, trazabilidad y protección ambiental.

## 10. Referencias bibliográficas

Aguas Andinas. (2025, 13 de marzo). Biofactoría La Farfana [presentación ante la Cámara de Diputados, Comisión de Recursos Hídricos]

Amador-Díaz, A. (2015). «Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones». *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 46.

ARQ Brasil. (2021, 13 de diciembre). *Fertilizante Tera produzido com resíduos orgânicos*. Recuperado el 14 de agosto de 2025 de <https://arqbrasil.com.br/15641/fertilizante-tera-produzido-com-residuos-organicos/>

Banco Mundial. (2022, 18 de marzo). *Los desafíos en materia de agua inspiran enfoques innovadores y una economía circular, desde Senegal hasta India y Ecuador*. Recuperado el 14 de agosto de 2025 de <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2022/03/18/water-challenges-inspire-innovation-and-a-circular-economy-from-senegal-to-india-and-ecuador>

Bassi, N., Gupta, S., & Chaturvedi, K. (2023). *Reuse of treated wastewater in India: Market potential and recommendations for strengthening governance*. Council on Energy, Environment and Water (CEEW).

Beavis, L. (2015, April 30). *GENeco builds UK's first enriched biomethane supply for national grid*. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2015/apr/30/geneco-builds-uks-first-enriched-biomethane-supply-for-national-grid>

Benavente Aguilar, J., & Castro Ramos, R. (2023). *Análisis de opciones para el aprovechamiento de lodos generados por la PTAR de la ciudad de La Paz utilizando principios de economía circular por medio del modelo REVAMP*. Universidad Mayor de San Andrés.

Bezerra da Silva, L., Bezerra Moreira, C. C., Pinheiro da Silva Lima, A. G., Sampaio, A. E., Filgueira de Oliveira, J., Sena Nery de Oliveira, A. R., Paulino Pereira, J., & Salgado Pifano, D. (2022). Reúso das águas de lavagens dos filtros da estação de tratamento de água – ETA no distrito de Iara – Barro – CE. *Revista Foco*, 15(6), e597, 01–13.

Bijl, D. L., Bogaart, P. W., Kram, T., de Vries, B. J. M., & van Vuuren, D. P. (2016). Long-term water demand for electricity, industry and households. *Environmental Science & Policy*, 55, 75–86.

Boretti, A., & Rosa, L. (2019). Reassessing the projections of the *World Water Development Report*. *npj Clean Water*, 2, 15

Burris, D. L. (2025, junio 23). *2024 GWRS Annual Report*. Prepared for the California Regional Water Quality Control Board, Santa Ana Region, Order No. R8-2022-0050.

Cámara de Diputadas y Diputados de Chile. (2025, 13 de marzo). *Documento de comisión (ID 342486)*. Recuperado de [https://camara.cl/verDoc.aspx?prmID=342486&prmTipo=DOCUMENTO\\_COMISION](https://camara.cl/verDoc.aspx?prmID=342486&prmTipo=DOCUMENTO_COMISION)

Carver, S. (2015). Avonmouth biomethane project: GENeco gas to grid scheme at Bristol STW. UK Water Projects 2015, 1–6. Recuperado de <https://www.waterprojectsonline.com>

Chapple, P. C. (2009, noviembre). La Farfana: Nada se pierde. *Revista BIT*, 69, 24–26.

Chrispim, M. C., Scholz, M., & Nolasco, M. A. (2021). Biogas recovery for sustainable cities: A critical review of enhancement techniques and key local conditions for implementation. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103033.

Christou, A., Beretsou, V. G., Iakovides, I. C., Karaolia, P., Michael, C., Benmarhnia, T., ... Fatta-Kassinos, D. (2024). *Sustainable wastewater reuse for agriculture*. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5, 504–521.

CIEMSA. (s. f.). *Planta tratamiento Fray Marcos*. Recuperado el 14 de agosto de 2025 de <https://ciemsa.com.uy/project/ose-planta-tratamiento-fray-marcos/>

Clark, J. H., Neemann, J., Patel, M., & Thompson, R. (2025). Final expansion of California's celebrated groundwater replenishment project. *Journal AWWA*, 117(4), 42–52.

Comisión Técnica Asesora de Medio Ambiente (COTAMA), Grupo de Estandarización de Agua (GESTA Agua). (2025, agosto 15). *Propuesta técnica para la modificación del Decreto 253/79 [Versión final para consulta pública]*. Ministerio de Ambiente.

Consejo de la Unión Europea; Parlamento Europeo. (2019, 5 de junio). *Reglamento (UE) 2019/1010 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de junio de 2019, relativo a la adaptación de las obligaciones de información en el ámbito de la legislación relativa al medio ambiente y por el que se modifican los Reglamentos (CE) n.º 166/2006 y (UE) n.º 995/2010, las Directivas 2002/49/CE, 2004/35/CE, 2007/2/CE, 2009/147/CE y 2010/63/UE, los Reglamentos (CE) n.º 338/97 y (CE) n.º 2173/2005, y la Directiva 86/278/CEE*. Diario Oficial de la Unión Europea, L 170, 115–127.

Consejo de las Comunidades Europeas. (1986, 12 de junio). *Directiva 86/278/CEE relativa a la protección del medio ambiente, y en particular de los suelos, en la utilización de los lodos de depuración en la agricultura*. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, L181, 6–12

Conselho Nacional de Recursos Hídricos. (2005). *Resolução CNRH nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água, e dá outras providências*. Diário Oficial da União, 9 de março de 2006.



Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). (2006, 29 de agosto). *Resolução n.º 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências*. Diário Oficial da União, 30 de Agosto de 2006

Conselho Nacional do Meio Ambiente. (2005). *Resolução CONAMA n.º 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água y diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes*. Diário Oficial da União, 18 de Marzo de 2005.

Cortes Latorre, D. R. (2022, febrero 4). *Nuevas tendencias en el aprovechamiento de aguas servidas: Una revisión* [Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada].

Costa Rica. Ministro de Ambiente y Energía; Ministerio de Salud. (2006, 9 de agosto). *Decreto Ejecutivo N.º 33601-MINAE-S: Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales*. La Gaceta N.º 55, 19 de marzo de 2007

De la Peña, M. E., Larrea, C., Sasaki, K., & Smith, D. (2022, septiembre). *El reúso de agua residual tratada en América Latina y el Caribe: 10 estudios de caso* (Nota técnica del BID; IDB-TN-2567). Banco Interamericano de Desarrollo.

Dirección Nacional de Agua Potable y Saneamiento (DNAPyS) (2023, julio). *Tratamiento de aguas residuales en Argentina: Diagnóstico y prospectiva*. Ministerio de Obras Públicas.

Du Pisani, P., & Menge, J. G. (2013). Direct potable reclamation in Windhoek: A critical review of the design philosophy of New Goreangab drinking water reclamation plant. *Water Science & Technology: Water Supply*, 13(2).

España. Ministerio de la Presidencia. (2007, 2 de febrero). Real Decreto 162/2007, por el que se regula la reutilización de las aguas depuradas. Boletín Oficial del Estado, n.º 41, 28 de febrero de 2007, pp. 8434–8441.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2019, 20 marzo). *Water Scarcity – One of the greatest challenges of our time*.  
<https://www.fao.org/newsroom/story/Water-Scarcity-One-of-the-greatest-challenges-of-our-time/en>

Fuentes Molina, N., Isenia León, S. A., & Ascencio Mendoza, J. G. (2019). «Adición de lodos residuales en la elaboración de matrices de cerámicas». *Revista EIA*, 16(32), 13-25.

GENeco. (s. f.). *Biomethane*. Recuperado el 14 de agosto de 2025 de  
<https://www.geneco.uk.com/our-services/biomethane>

GENeco. (s. f.). *Case study: Bio-Bus*. Recuperado el 14 de agosto de 2025 de  
<https://www.geneco.uk.com/case-studies/bio-bus>

GENeco. (s. f.). *Green gas power for Bristol homes*. Recuperado el 14 de agosto de 2025 de <https://www.geneco.uk.com/news/green-gas-power-for-bristol-homes>.

Gilsanz, J. C., Leoni, C., Aranda, S., Schelotto, F., & Acuña, A. (2012, julio). Uso agrícola de los lodos urbanos. *Revista INIA*, (29), 51–55

Hettiarachchi, H., & Ardakanian, R. (Eds.). (2017). *Uso seguro de aguas residuales en la agricultura: Ejemplos de buenas prácticas*. UNU-FLORES

Iglesias Gordillo, M. (2024). *Contribución a la valorización de lodo de plantas de tratamiento de agua bruta en materiales de construcción cerámicos*. (Tesis de Maestría, Universidad de la República, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo). Montevideo, Uruguay.

Instituto Nacional de Estadística. (2024). *Población en localidades censales (definiciones y codificación). Censo 2023*.

<https://www5.ine.gub.uy/documents/CENSO%202023/Cartografia/Definiciones.pdf>  
[Instituto Nacional de Estadística](#)

Instituto Nacional de Estadística. (2025). *Infografía departamental – Florida (Censo 2023)*.

<https://www5.ine.gub.uy/documents/CENSO%202023/Infograf%C3%ADas/Florida.pdf>  
[Instituto Nacional de Estadística](#)

Instituto Nacional de Normalización. (1978/1987). *Norma Chilena Oficial NCh1333.Of78 Modificada en 1987. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos*. Instituto Nacional de Normalización (INN).

International Organization for Standardization. (2020). *ISO 16075-2:2020. Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects – Part 2: Development of the project*. ISO. <https://www.iso.org/standard/73512.html>

Irvine, K. N., Chua, L. H. C., & Eikass, H. S. (2014). The Four National Taps of Singapore: A holistic approach to water resources management from drainage to drinking water. *Journal of Water Management Modeling*, C375.

Israel Ministry of Health & Ministry of Environmental Protection. (2010). *Public Health Regulations (Effluent Quality Standards and Rules for Sewage Treatment)*, 2010. Kovetz Hatakanot, No. 6886, 25 April 2010.

Jaramillo, M. F. (2020, marzo). *Reutilización de las aguas residuales municipales como estrategia de prevención y control de la contaminación hídrica: Caso de estudio: Cuencas de los ríos Bolo y Frayle, Colombia*.

Kokkinos, P. (2022). *Wastewater and sludge reuse: Selected case studies across the globe*. School of Science and Technology, Hellenic Open University.

Kumar, A., & Goyal, K. (2020). *Water reuse in India: Current perspective and future potential*. In *Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection* (Vol. 6, pp. 33–63).

Liao, Z., Chen, Z., Xu, A., Gao, Q., Song, K., Liu, J., & Hu, H.-Y. (2021). *Wastewater treatment and reuse situations and influential factors in major Asian countries*. *Journal of Environmental Management*, 282, 111976

Mahlknecht, J., González-Bravo, R., & Loge, F. J. (2020). Water-energy-food security: A Nexus perspective of the current situation in Latin America and the Caribbean. *Energy*, 194, 116824.

Mapani, B. S., Shikangalah, R. N., & Mwetulundila, A. L. (2023). A review on water security and management under climate change conditions, Windhoek, Namibia. *Journal of African Earth Sciences*, 197, 104749.

Maquet, C. (2020). Wastewater reuse: a solution with a future. *Field Actions Science Reports*, (Special Issue 22), 64–69. Recuperado el 14 de agosto de 2025 de <http://journals.openedition.org/factsreports/6341>

Martin, T., & Fay, S. (2020). *Potable water reuse survey analysis report*. The Taproot Agency.

Mendoza-Retana, S. S., Cervantes-Vázquez, M. G., Valenzuela-García, A. A., Guzmán-Silos, T. L., Orona-Castillo, I., & Cervantes-Vázquez, T. J. Á. (2021). Uso potencial de las aguas residuales en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(1), 115–126.

Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. L. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Miller, K., Kiparsky, M., Milman, A., & Blomquist, B. (2019, septiembre 3). *Case study #9 – Groundwater Replenishment System: Incentivizing groundwater recharge* (Working Draft). UC Berkeley School of Law, Center for Law, Energy, and the Environment

Ministerio de Ambiente (Uruguay). (2025). *Proceso de elaboración de la propuesta técnica para la modificación del Decreto 253/79: Normas reglamentarias para prevenir la contaminación ambiental mediante el control de las aguas*. Comisión Técnica Asesora de Medio Ambiente (COTAMA) – GESTA Agua.

Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente. (2001, 22 de noviembre). *Resolución 97/2001. Reglamento para el Manejo Sustentable de Barros Generados en Plantas de Tratamiento de Efluentes Líquidos*. Boletín Oficial, 28 de noviembre de 2001

Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia (MMAyA), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Agencia Mexicana de Cooperación Internacional al Desarrollo (AMEXCID), & Deutsche Gesellschaft für

Internationale Zusammenarbeit (GIZ). (2018). *Guía técnica para el reúso de aguas residuales en la agricultura* (2ª ed.). La Paz, Bolivia / Jiutepec, México / Eschborn, Alemania.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador. (2020, noviembre). *Lineamientos técnicos para la evaluación de actividades, obras o proyectos que comprendan el manejo y reúso de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales*. Gobierno de El Salvador.

Ministerio de Medio Ambiente, & Dirección General del Agua. (s. f.). *Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas: Manual de interpretación y elaboración de informes*. Ministerio de Medio Ambiente.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2017). *Normativa sobre el reaprovechamiento de lodos en Perú* [Documento legal complementario]. Diario Oficial El Peruano

Ministerio del Ambiente (Perú). (s. f.). *Municipios ecoeficientes. Parte 2: Tratamiento y reúso de aguas residuales*. Autor

Minnesota Pollution Control Agency (MPCA). (2018). *Biological nutrient removal manual* (wq-wwtp8-21). <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/wq-wwtp8-21.pdf>  
[pca.state.mn.us](https://www.pca.state.mn.us)

Miralles-Wilhelm, F., & Muñoz-Castillo, R. (2018). *Energy-Water-Land Nexus in Latin America and the Caribbean: A Perspective from the Paris Agreement Climate Mitigation Pledges*. Inter-American Development Bank. <https://publications.iadb.org>

Morató, J., Subirana, A., Gris, A., Carneiro, A., & Pastor, R. (2006). Tecnologías sostenibles para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 3(1), 19–29.

Naciones Unidas. (s. f.). *Agua y saneamiento*. Desarrollo Sostenible. Recuperado el 1 de septiembre de 2025, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

Nanyang Technological University. (2025, March 12). *Solar-powered tech turns sewage sludge into green hydrogen and animal feed*. <https://www.ntu.edu.sg/news/detail/solar-powered-tech-turns-sewage-sludge-into-green-hydrogen-and-animal-feed>

Natural Resource Management Ministerial Council, Environment Protection and Heritage Council, & Australian Health Ministers' Conference. (2006). *Australian guidelines for water recycling: Managing health and environmental risks (Phase 1)*. National Water Quality Management Strategy. ISBN 1 921173 07 6.

Naves Arnaldos, A., van den Broeke, J., Guleria, T., Bruni, C., Fantone, F., Touloupi, M., Iossifidis, D., Giménez Lorang, A., Sabbah, I., Farah, K., Baransi-Karkaby, K., Pidou, M., Reguer, A., Kleyböcker, A., Jählig, J., Vredenburg, L., & Thisgaard, P. (2023). ULTIMATE

D1.9: Start-up and intermediate results of plant operation from all case studies. European Union Horizon 2020 Project (Grant Agreement No. 869318)

Neighbour, D. (2019, 9 de enero). *Wastewater can save China's cities – and the environment*. CHINA US Focus. Recuperado de <https://www.chinausfocus.com/energy-environment/wastewater-can-save-chinas-cities---and-the-environment>

NEIWPCC. (2005). *Pathogen Reduction and Vector Attraction Reduction (Appendix C)*. [https://www.neiwpcc.org/neiwpcc\\_docs/biosampleguide/Appendix%20C.pdf](https://www.neiwpcc.org/neiwpcc_docs/biosampleguide/Appendix%20C.pdf) NEIWPCC

Norma OS.090 Plantas de tratamiento de efluentes. (s.f.). Gobierno de Perú.

Obras Sanitarias del Estado (OSE). (s. f.). *Ubicación y tipos de plantas de tratamiento*. Recuperado el 14 de agosto de 2025 de <http://www.ose.com.uy/saneamiento/ubicacion-y-tipos-de-plantas-de-tratamiento>. [ose.com.uy](http://www.ose.com.uy)

Orange County Water District. (s. f.). GWRS. Recuperado el 14 de agosto de 2025 de <https://www.ocwd.com/gwrs/>.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2025). *The circular water economy in Latin America*. OECD Urban Studies. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/a0508572-en>

Oropeza García, N. (2006). *Lodos residuales: estabilización y manejo*. Revista académica *Caos Conciencia*, 1, 51–58. Universidad de Quintana Roo.

Ospina López, F. A. (2017, junio). Comparación de la reglamentación para el manejo de lodos provenientes de agua residual en Argentina, Chile y Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1).

Padmanabhan, D. (2023, 23 de junio). *India's potential to address water scarcity through wastewater treatment and reuse*. Mongabay India. Recuperado de <https://india.mongabay.com/2023/06/indias-potential-to-address-water-scarcity-through-wastewater-treatment-and-reuse/>

Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea. (2020). *Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de mayo de 2020, relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua*. Diario Oficial de la Unión Europea, L 177, 32–55.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2024). *Directiva (UE) 2024/3019 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de noviembre de 2024, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas (versión refundida)*. Diario Oficial de la Unión Europea, L 3019, 12.12.2024. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/3019/oj>

Passarini, K. C., Gamarra, F. M. C., Vanalle, R. M., & Santana, J. C. C. (2012). Reutilización de las aguas residuales en la irrigación de plantas y en la recuperación de los suelos. *Información Tecnológica*, 23(1), 57–64.

Pérez Rocamora, E., Larrañaga, G., & Caro, S. (2017, setiembre 14–15). *Lodos generados en plantas de tratamiento de efluentes domésticos operadas por OSE: Caracterización y cuantificación* [Ponencia en congreso]. IX Congreso Nacional de AIDIS: Integrando Cuencas para el Desarrollo Sostenible, Hotel Escuela Kolping, Montevideo, Uruguay.

Perú. (s.f.). *Tratamiento de aguas residuales*. Gobierno de Perú.

Poder Ejecutivo & Ministerio de Salud. (2015, 10 de agosto). *Reglamento para el manejo y disposición final de lodos y biosólidos (Decreto Ejecutivo N.º 39316-S)*. Costa Rica

Presidencia de la República de Colombia. (2014, 10 de julio). *Decreto 1287 de 2014, por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales*. Diario Oficial N.º 49.208

Presidencia de la República de Guatemala. (2006, 5 de mayo). *Acuerdo Gubernativo No. 236-2006: Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos*.

Presidencia de la República del Perú. (2017, 22 de junio). *Decreto Supremo N°015-2017-VIVIENDA, que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Diario Oficial El Peruano

Presidencia de la República. (2019, 12 de septiembre). *Fray Marcos cuenta con nueva planta de saneamiento tras inversión de 6,5 millones de dólares* [Galería]. <https://www.gub.uy/presidencia/comunicacion/fotos/fray-marcos-cuenta-nueva-planta-saneamiento-tras-inversion-65-millones-dolares> Gub.uy

Presidencia de la República. (2019, 12 de septiembre). *OSE inauguró nueva planta de saneamiento en Fray Marcos con una inversión de 6,5 millones de dólares* [Audio]. <https://www.gub.uy/presidencia/comunicacion/audios/breves/ose-inauguro-nueva-planta-saneamiento-fray-marcos-inversion-65-millones> Gub.uy

Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México (EnRes). (2018, septiembre). *Proyectos de aprovechamiento energético a partir de residuos urbanos en México: Plantas de producción de energía en hornos cementeros, biodigestores, rellenos sanitarios y plantas de tratamiento de aguas residuales*. GIZ México; SEMARNAT; SENER

PROSAP. (2014, mayo). *Estudio de ampliación del potencial de irrigación en Argentina: Estudio del potencial del uso alternativo de fuentes de agua: las aguas residuales (PROSAP-UTF/ARG/017/ARG)*.

PUB, Singapore's National Water Agency. (2024, 2 de octubre). *NEWater*. Recuperado el 14 de agosto de 2025 de <https://www.pub.gov.sg/Public/WaterLoop/OurWaterStory/NEWater>.



República de Chile. (2009, 30 de enero). *Decreto Supremo N.º 004: Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas*. Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Diario Oficial de la República de Chile.

Riffi Temsamani, D. (2021). *Eaux usées pour l'arrosage urbain: retour sur un partenariat innovant entre la ville de Tanger et Amendis (Veolia) [Entrevista]*. La Revue de l'Institut Veolia – FACTS Reports, (22), 64–69.

Rodríguez, D. J., Serrano, H. A., Delgado, A., Nolasco, D., & Saltiel, G. (2020). De residuo a recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial.

Rojas Remis, R., & Mendoza Espinosa, L. G. (2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Producción + Limpia*, 7(2), 74–94.

Sala-Garrido, R. (2020). Reutilización de agua: estado actual y perspectivas.

Sanz, J., Suescun, J., Molist, J., Rubio, F., Mujeriego, R., & Salgado, B. (2015). Reclaimed water for the Tarragona petrochemical park. *Water Science & Technology: Water Supply*, 15(2), 308–315.

Saravia Matus, S., Gil Sevilla, M., Fernández, D., Montañez, A., Blanco, E., Naranjo, L., Llavona, A., & Sarmanto, N. (2022). *Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe* (Serie Recursos Naturales y Desarrollo, N.º 213; LC/TS.2022/193). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)

Seah, H., Leslie, G., Poon, J., & Law, I. (2003). Singapore's NEWater demonstration project: Another milestone in indirect potable reuse. *Water*, June 2003. (Artículo técnico).

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2003, 15 de agosto). *Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*. Diario Oficial de la Federación

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1997). *Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público*. Diario Oficial de la Federación, 21 de septiembre de 1998.

Standardization Administration of China (SAC) & State Administration for Market Regulation (SAMR). (2021). *GB/T 41018—2021: Water reuse guidelines—Reclaimed water classification*. Beijing: SAMR/SAC. (Promulgada el 31/12/2021; vigente desde el 01/07/2022).

SUEZ. (s. f.). La Farfana wastewater treatment plant (Chile) [Caso de estudio]. En SUEZ Water Handbook. Recuperado de [https://www.suezwaterhandbook.com/content/download/5674/90890/version/3/file/La%20Farfana\\_EN\\_A4.pdf](https://www.suezwaterhandbook.com/content/download/5674/90890/version/3/file/La%20Farfana_EN_A4.pdf)

Tello Espinoza, P., Mijailova, P., & Chamy, R. (Eds.). (2016). *Uso seguro del agua para el reúso*. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS).

U.S. Environmental Protection Agency (EPA) & U.S. Agency for International Development (USAID). (2004). *Guidelines for water reuse* (EPA/625/R-04/108). USEPA, Office of Water, Office of Research and Development.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA) & U.S. Agency for International Development (USAID). (2012). *2012 Guidelines for water reuse* (EPA/600/R-12/618). USEPA, Office of Water, Office of Research and Development.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA), & U.S. Agency for International Development (USAID). (2004). *Guidelines for water reuse* (EPA/625/R-04/108). USEPA, Office of Water; Office of Research and Development

U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water. (2003, June). *Biosolids technology fact sheet: Use of incineration for biosolids management* (EPA 832-F-03-013). <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-11/documents/use-incineration-biosolids-management-factsheet.pdf>

U.S. Environmental Protection Agency. (1993). *Standards for the use or disposal of sewage sludge (40 CFR Part 503)*. U.S. Government Printing Office.

U.S. Environmental Protection Agency. (1994). *A plain English guide to the EPA Part 503 biosolids rule* (EPA/832/R-93/003). Office of Wastewater Management

U.S. Environmental Protection Agency. (1999). *Wastewater Technology Fact Sheet: Ultraviolet Disinfection* (EPA 832-F-99-064). <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/uv.pdf>

U.S. Environmental Protection Agency. (1999). *Wastewater Technology Fact Sheet: Chlorine Disinfection* (EPA 832-F-99-062). <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=200044E0.TXT>

U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Biosolids Technology Fact Sheet: Centrifuge Thickening and Dewatering* (EPA 832-F-00-053). <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-11/documents/centrifuge-thickening-dewatering-factsheet.pdf>

U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Biosolids Technology Fact Sheet: Belt Filter Press* (EPA 832-F-00-057). <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-11/documents/belt-filter-press-factsheet.pdf>



U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Wastewater Technology Fact Sheet: Trickling Filters* (EPA 832-F-00-014).

<https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-10/trickling-filters-factsheet.pdf>

U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Wastewater Technology Fact Sheet: Dechlorination* (EPA 832-F-00-022). (versión archivada)

<https://web.archive.org/web/20041117173900/http://www.epa.gov/npdes/pubs/dechlorination.pdf>

U.S. Environmental Protection Agency. (2003). *Wastewater Technology Fact Sheet: Screening and Grit Removal* (EPA 832-F-03-011).

<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=P1000S7N.TXT>

U.S. Environmental Protection Agency. (2006). *Ultraviolet disinfection guidance manual for the final Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule* (EPA 815-R-06-007). Office of Water.

U.S. Environmental Protection Agency. (2006/2025). *Biosolids Technology Fact Sheet: Heat Drying* (EPA 832-F-06-029). <https://www.epa.gov/biosolids/fact-sheet-heat-drying>

U.S. Environmental Protection Agency. (2010). *Nutrient Control Design Manual* (EPA/600/R-10/100).

[https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-08/documents/nutrient\\_control\\_design\\_manual.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-08/documents/nutrient_control_design_manual.pdf)

U.S. Environmental Protection Agency. (2017). *NPDES Compliance Inspection Manual – Chapter 13 (SSOs/I&I)*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-03/documents/npdesinspect-chapter-13.pdf>

U.S. Environmental Protection Agency. (2019). *Wastewater Management Fact Sheet: Membrane Bioreactors*. [https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/membrane\\_bioreactor\\_fact\\_sheet\\_p100il7g.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/membrane_bioreactor_fact_sheet_p100il7g.pdf)

U.S. Environmental Protection Agency. (2025). *Combined sewer overflow basics*. <https://www.epa.gov/npdes/combined-sewer-overflow-basics>

U.S. Environmental Protection Agency. (2025). *Combined sewer overflow control policy*. <https://www.epa.gov/npdes/combined-sewer-overflow-control-policy>

U.S. Environmental Protection Agency. (2025). *40 CFR Part 133 – Secondary Treatment Regulation* (eCFR). <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-D/part-133>

U.S. Environmental Protection Agency. (2025). *40 CFR Part 503 – Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge* (eCFR). <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-O/part-503>

U.S. Environmental Protection Agency. (s. f.). *40 CFR Part 503, Subpart D — Pathogens and Vector Attraction Reduction*. eCFR. <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-O/part-503/subpart-D>

U.S. Environmental Protection Agency. (s.f.). *Summary of Singapore's water reuse guideline or regulation for industry* (REUSExplorer). Recuperado de EPA <https://epa.gov/waterreuse/maps-states-water-reuse-regulationsorguidelines>

UN-Habitat. (2021). *Valuing Water*.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2019). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision* (ST/ESA/SER.A/420). United Nations. (ver p. 46: Asia tendrá el 52 % de la población urbana mundial en 2050).

Vasilyev, S., & Domashenko, Y. (2018). Agroecological substantiation for the use of treated wastewater for irrigation of agricultural land. *Journal of Ecological Engineering*, 19(1), 48–54.

Veolia. (s. f.). *Reciclaje de aguas residuales: el ciclo cerrado* (Relato 6). Pionniers – Veolia. Recuperado en agosto de 2025 de <https://www.pionniers.veolia.com/es/recit-6/>

Water Environment Federation. (2011). *National Manual of Good Practice for Biosolids*. <https://www.wef.org/contentassets/d06e8efba3d14274ade7dfd3258188ed/manual-of-good-practice-for-biosolids-v2011.pdf>

Water Environment Federation. (2017). *Anaerobic digestion fundamentals* (Fact Sheet). <https://www.wef.org/globalassets/assets-wef/direct-download-library/public/03---resources/wsec-2017-fs-002-mrrdc-anaerobic-digestion-fundamentals-fact-sheet.pdf>

Water Environment Federation. (2018). *What every operator should know about primary treatment*. [https://www.wef.org/globalassets/assets-wef/2-pubs--news/magazines/wet/wet-august-2018/wet\\_p60\\_p63\\_operator\\_essentials.pdf](https://www.wef.org/globalassets/assets-wef/2-pubs--news/magazines/wet/wet-august-2018/wet_p60_p63_operator_essentials.pdf)

Weinzettel, J., & Pfister, S. (2019). International trade of global scarce water use in agriculture: Modeling on watershed level with monthly resolution. *Ecological Economics*, 159, 301–311.

World Bank. (2018). *Wastewater: From Waste to Resource: The Case of Atotonilco de Tula, Mexico*. World Bank.

World Bank. (2019). *Wastewater: From waste to resource: The case of Santiago, Chile*. World Bank.

World Bank. (2020). *Water in circular economy and resilience (WICER): The case of Chennai, India*. Washington, DC: World Bank.

World Bank. (s. f.). Renewable internal freshwater resources per capita (ER.H2O.INTR.PC) [Base de datos]. Recuperado de World Development Indicators. [https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.INTR.PC?utm\\_source=chatgpt.com](https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.INTR.PC?utm_source=chatgpt.com)

World Bank. (s. f.). *Wastewater: From waste to resource – The case of Santiago, Chile*. Water Global Practice

World Health Organization (WHO). (2006). *WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 2: Wastewater use in agriculture*. WHO. ISBN 92 4 154683 2.

World Health Organization. (2006). *WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 1: Policy and regulatory aspects* (3rd ed.). World Health Organization. ISBN 92 4 154682 4

Ybarra Moreno, J., & Chinga Dolarea, P. (2020, 17 de junio). *Un día en las Biofactorías del Gran Santiago de Chile* [presentación de webinar]. ALADYR. Recuperado de <https://cdn.franticape.network/media/aladyr/webinars/2020/06/PRESENTACIÓN%20WEBINAR%2017%20DE%20JUNIO%20-%20Un%20día%20en%20las%20Biofactorías%20del%20Gran%20Santiago%20de%20Chile.pdf>

Zhao, H., Sun, Z., Li, C., Wu, D., Lee, L. Q., Lu, D., Lv, Y., Chu, X., Li, Y., Tu, W., Ding, O. L., Zhou, J., Zou, Z., Zhou, Y., ... Li, H. (2024). Solar-driven sewage sludge electroreforming coupled with biological funnelling to cogenerate green food and hydrogen. *Nature Water*, 2, 1102–1115.

## 11. Anexo – Información proporcionada por OSE

### Expediente

458 / 2025-4

#### Intervención de GERENCIA GESTION AMBIENTAL

Referencia	SIP N°3467 - Rebeca Suárez- Solicita información relativa a calidad de agua y lodos de la PTA de Fray Bentos, según detalle de solicitud.-
Tema	SOLICITUD DE INFORMACIÓN PÚBLICA

#### Extractado

SIP N°3467 - Rebeca Suárez- Solicita información relativa a calidad de agua y lodos de la PTA de Fray Bentos, según detalle de solicitud.-

#### Decreto

Montevideo, 25 de abril de 2025.-

PASE a la Gerencia de Saneamiento, según lo solicitado en el paso electrónico precedente.

De acuerdo a lo establecido por GG en paso precedente, se informa todo aquello solicitado que se encuentra disponible en la Gerencia de Gestión Ambiental.

Se adjunta:

1) Planilla con caracterización de efluentes de la PTAR para el período Nov 19- Feb 25. Se hace notar que de los parámetros solicitados OSE no realiza:

Turbidez, Coliformes Termotolerantes, Nematodos (huevos de helmintos) y Legionella spp.

2) Informes de resultados de caracterización de lodos deshidratados de la PTAR Fray Marcos disponibles (del año 2021), parámetros: fisicoquímicos (test de lixiviación y fracción total), ecotoxicidad y patógenos.

Gerencia de Gestión Ambiental

 Firmado digitalmente por Maria Natalia Batista el 25/04/2025 17:27:47 ZW3

Nombre Archivo	Tamaño
- Caracterización de aguas residuales PTAR Fray Marcos.xlsx	13 KB
- FQ y ET Lodo Fray Marcos 2021.pdf	341 KB
- MB Lodo Fray Marcos 2021.pdf	564 KB
- PS Lodo Fray Marcos 2021.pdf	217 KB

Pase a GERENCIA DE SANEAMIENTO.-

Fecha de salida del canal: 25/04/2025 17:28:26 ZW3

## 11.1. Caracterización de aguas residuales

N° Muestra	Región	Departamento	Localidad	Punto Extracción	F.Extracción	PH Unid de pH	DBO5 mg/l	DQO mg/l	SST mg/l	Amonio mg/l	Nitrato mg/l	E.Coli NMP/100 ml	Ac y Gr mg/l	N K mg/l	Fosforo Tot mg/l	Muestreador	Obs.Muestra	Obs.Análisis
190048860	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	6/11/2019 11:40	7	29	204	45	<1			14	5,55	0,37	Sergio y Walter Pérez		No se recibieron muestras para análisis bacteriológico.
200007030	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	12/2/2020 9:45	5,9	29	57	30	<1	127	53000	<10	3,4	14,8	Walter Pérez - Sergio Pérez		
200024099	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	4/6/2020 12:00	6,8	20	39	15	<1	103	12000	<10		19,4	Walter Pérez - Sergio Pérez		
200043475	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	30/9/2020 11:30	7,5	9	56	28	<1	77	42000	<10	4,23	10,4	Sergio Perez - Walter Perez	Muestra perteneciente al plan de recuperación	
200055867	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	10/12/2020 10:00	7,6	5	48	30	<1	108	6200	11	4,75	10,1	Sergio Perez - Walter Perez		
210010644	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	11/3/2021 11:00	8,1	4	33	11	<1	91	1000	<10	1,12	0,17	S. Pérez - W. Pérez		
210024594	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	16/6/2021 10:00	7,2	8	27	16	6,8	59	44000	<10	12	2,23	Walter Perez - Sergio Perez		
210039069	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	21/9/2021 11:10	6,8	9	36	10	13	70	8500	<10	14,6	2,4	W. Pérez - S. Pérez		
210051129	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	1/12/2021 10:45	6,8	4	19	10	<1	58	960	<10	1,04	0,62			
220010412	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	9/3/2022 12:00	4,1	2	3	15	<1	69	2800	<10	1,13	0,33			
220023592	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	2/6/2022 11:40	7,5	6	26	14	13	19	100	<10	17,1	0,38	W. Pérez/S. Pérez		
220036641	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	23/8/2022 11:45	7,3	5	19	31	<1	58	100	<10	2,45	0,37	W. Pérez/S. Pérez		
220055071	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	14/12/2022 10:30	8,4	2	33	10	<1	69	200	<10	2,12	1,39	S. Pérez/W. Pérez		
230009063	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	23/2/2023 11:47	8,3	2	19	10	<1	88	100	<10	2,77	1,7	W. Pérez		
230028635	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	14/6/2023 11:20	7,1	2	19	10	<1	76	100	<10	0,96	0,16	W. Pérez		
230047639	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	28/9/2023 11:40	7,2	7	37	11	2	60	100		4,4	0,21	W. Pérez		
230055504	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	16/11/2023 10:30	6,8	5	93	10	3,2	72	24000	<10	4,57	0,94	S. Pérez/W. Pérez		
240009730	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	29/2/2024 11:15	5,9	4	29	10	<1	57	5300	<10	1,52	0,27	S. Pérez/P. Casco	Muestra recepcionada dentro de las 3 horas luego de su extracción	
240037869	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	29/8/2024 10:40	7,1	9	18	12	3,5	45	5100	<10	4,78				
240047636	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	30/10/2024 11:40	7,7	10	74	12	85	1	240000	<10	17,1		W. Pérez/S. Pérez	Muestra recepcionada dentro de las 3 horas luego de su extracción	
240051034	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	20/11/2024 11:00	7,2	46	46	15	<1	40		<10	2,9		Walter Perez		No se informan los resultados de Coliformes totales ni Escherichia coli, debido a que no fue posible ingresar al laboratorio los días 21 y 22 de Noviembre por ocupación gremial.
250009295	Centro	Florida	Fray Marcos	Efluente antes de UV - PTAR	27/2/2025 11:10	7	6	23	10	<1		2000	15	3,2			Muestra recepcionada por el Laboratorio Ambiental de Ciudad de la Costa dentro de las 3 horas luego de su extracción.	No se informa el resultado de Nitrato debido a problemas técnicos internos del laboratorio.

## 11.2.FQ y ET Lodo Fray Marcos 2021



**INFORME DE ENSAYO Nro:** 65950

**A la atención de:** Gabriel Carrasco

**Nombre del Solicitante:** OSE- N° 14642

**Fecha de emisión:** 14/10/2021

Página 1 de 3

**Dirección:** Carlos Roxlo 1275

**Teléfono:** 19521922

**Ciudad:** Montevideo (Montevideo)

**CÓDIGO INTERNO:** 65950-1

**Fecha recepción de la muestra:** 01/10/2021

**Fecha de Muestreo:** 01/10/2021

**Identificación:**

**Muestreo realizado por:** OSE- N° 14642

Lodo deshidratado PTAR Fray Marcos- Compra N°16640 FQ347

**Condición de recepción de la muestra:** Bolsa plástica

**Fechas de realización de los ensayos:** Entre el día 01/10/2021 Y el 14/10/2021

Identificación de muestra por: Cliente

Lugar de muestreo:

Detalle significativo del muestreo:

Traslado al Laboratorio realizado por: Cliente

Parámetro	Resultado	Unidades	Técnica de Referencia	LD	LC	Valor según Decreto
Análisis en fracción total EPA 3051 A (*)	----			----	----	
Arsénico	6.9	mg As/Kg	EPA 3051 A / EPA 8010 D	0.05	0.3	
Cadmio	0.5	mg Cd/Kg	EPA 3051 A / EPA 8010 D	0.05	0.3	
Cobre	220	mg Cu/Kg	EPA 3051 A / EPA 8010 D	0.2	1.0	
Cromo total	20	mg Cr/Kg	EPA 3051 A / EPA 8010 D	0.1	0.5	
Mercurio (*)	<0.05	mg Hg/Kg	EPA 3051 A / EPA 8010 D	----	----	
Níquel	11	mg Ni/Kg	EPA 3051 A / EPA 8010 D	0.2	1.0	
Plomo	27	mg Pb/Kg	EPA 3051 A / EPA 8010 D	0.2	1.0	
Zinc	1191	mg Zn/Kg	EPA 3051 A / EPA 8010 D	1.0	5.0	
Análisis en lixiviado EPA 1311 (*)	----			----	----	
Arsénico Lixiviado	0.03	mg As/L	EPA 1311 / EPA 8010 D	0.01	0.05	
Cadmio Lixiviado	<0.005	mg Cd/L	EPA 1311 / EPA 8010 D	0.005	0.025	
Cobre Lixiviado	0.07	mg Cu/L	EPA 1311 / EPA 8010 D	0.05	0.2	
Cromo Lixiviado	<0.01	mg Cr/L	EPA 1311 / EPA 8010 D	0.01	0.05	
Cromo Hexavalente Lixiviado (*)	<0.03	mg Cr/L	EPA 1311 / SM 3500 Cr B	0.03	----	
Mercurio Lixiviado	<0.01	mg Hg/L	EPA 1311 / EPA 8010 D	0.01	0.05	
Níquel Lixiviado	0.02	mg Ni/L	EPA 1311 / EPA 8010 D	0.01	0.05	
Plomo Lixiviado	0.03	mg Pb/L	EPA 1311 / EPA 8010 D	0.02	0.1	
Bario Lixiviado	0.3	mg Ba/L	EPA 1311 / EPA 8010 D	0.02	0.1	
Molibdeno Lixiviado	<0.02	mg Mo/L	EPA 1311 / EPA 8010 D	0.02	0.1	



Cerro Largo 1890 Teléfonos: 24019342 - 24032130 ecotech@ecotech.uy www.ecotech.uy





Soluciones ConCiencia

**INFORME DE ENSAYO Nro:** 65950

**A la atención de:** Gabriel Carrasco

**Fecha de emisión:** 14/10/2021

Página 2 de 3

**CÓDIGO INTERNO:** 65950-1

**Fecha recepción de la muestra:** 01/10/2021

**Fecha de Muestreo:** 01/10/2021

**Identificación:**

**Muestreo realizado por:** OSE- N° 14642

Lodo deshidratado PTAR Fray Marcos- Compra N°16640 EQ347

**Condición de recepción de la muestra:** Bolsa plástica

**Fechas de realización de los ensayos:** Entre el día 01/10/2021 Y el 14/10/2021

Identificación de muestra por: Cliente

Lugar de muestreo:

Detalle significativo del muestreo:

Traslado al Laboratorio realizado por: Cliente

Parámetro	Resultado	Unidades	Técnica de Referencia	LD	LC	Valor según Decreto
Antimonio Lixiviado	<0.02	mgSb/L	EPA 1311 / EPA 8010 D	0.02	0.1	
Selenio Lixiviado	<0.02	mgSe/L	EPA 1311 / EPA 8010 D	0.02	0.1	
Plata Lixiviado	<0.1	mgAg/L	EPA 1311 / EPA 8010 D	0.1	0.5	
Análisis fracción total método de extracción adecuado (*)	----			----	----	
pH (*)	6.2	upH	EPA 9045 D	----	----	
Conductividad (*)	434	µS/cm	UNE 77308	----	----	
Materia orgánica oxidable (*)	53.8	%	Walkley & Black	----	----	
Fosforo Total (Base húmeda) (*)	13343	mg/Kg	EPA 3051 A/ SM 4500 P E	----	----	
Nitrogeno Total Kjeldahl (*)	24400	mgN/Kg	SM 4500 Norg C	----	----	
Nitratos (*)	140	mgNO <sub>3</sub> /kg	Extracac/UNE-EN ISO 10304-1	----	----	
Amonio (*)	133	mg/kg	Basado en UNE EN ISO 14911	----	----	
Sólidos Totales (*)	63.6	%	SM 2540 G	----	----	
Sólidos Totales Volátiles (*)	34.2	%	Basado en SM 2540 G	----	----	
Toxicidad Aguda con Vibrio Fischeri (*)	>100 No tóxico	%	Environment Canada EPS 1/RM/24	----	----	
Toxicidad Aguda Daphnia Magna (EC50, 48hs) (*)	>100 No tóxico	%	UNE - ISO 6341:2012	----	----	



Cerro Largo 1890 Teléfonos: 24019342 - 24032130 ecotech@ecotech.uy www.ecotech.uy



Soluciones ConCiencia

INFORME DE ENSAYO Nro: 65950

(\*) Método fuera del alcance de acreditación de acuerdo a la Norma UNIT-ISO/IEC 17025:2017, emitido por el Organismo Uruguayo de Acreditación

2. Apartamiento de los métodos No existió apartamiento en la aplicación de los métodos informados.

3. Comentarios : ----

4. Referencias :
- SM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Edición 23
  - EPA: United States Environmental Protection Agency
  - ASTM Book of Standards
  - HRMPA Petroleum Hydrocarbons .Rev 03, June 1, 2001. Handbook of Reference Methods for Plant Analysis- Soil and Plant Analysis Council- CRC-EEUU
  - AOAC Official Methods of Analysis of AOAC International, 21st Edition (2019)
  - UNIT Instituto Uruguayo de Normas Técnicas
  - HTP- TNRC Texas Natural Resource Conservation Commission (TNRCC) Total
  - ISO- International Organization for standardization
  - UNE- Normas Técnicas Españolas
  - USP: United States Pharmacopeia
  - AWWA: American Water Works Association
  - TMECC: Test Methods for Examination of Composting and compost, N.Y. USA
  - A.P.H.A 5ta edición Compendium of Methods for the microbiological examination of foods, Fifth Edition

- LD Límite de detección - LC Límite de cuantificación

- Los datos originales controlados, así como las fechas de realización de los ensayos quedan registrados en las planillas de seguimiento de ensayo del laboratorio con el mismo número que el informe de ensayo.
- Los análisis se realizan conforme al Compendio de Metodologías Analíticas de Referencia y Preservación de Parámetros Ambientales – División Laboratorio Ambiental en su versión vigente.
- Si la responsabilidad de muestreo corresponde a ECOTECH, el procedimiento corresponde al descrito en instructivo y/o procedimiento interno vigente correspondiente.
- Si la responsabilidad de muestreo no corresponde a ECOTECH, los resultados se aplican a la muestra recibida.
- Los resultados del ensayo se refieren únicamente a las muestras ensayadas.
- EL presente informe no puede ser reproducido total o parcialmente sin la autorización expresa de Ecotech.

por ECOTECH  
IQ Gualberto Trelles  
Director





### 11.3. MB Lodo Fray Marcos 2021

Sitio Grande 1311 • C.P. 11.800  
Telefax (+5982) 200 01 72 • (+5982) 201 21 35  
limsa@netgate.com.uy • Montevideo - Uruguay

Habilitaciones:  
I.M.M. N°1  
I.M.C. N°4  
M.G.A.P. RNL N° 14  
M.S.P.



Sistema de Gestión certificado  
según ISO 9001:2008

• UNIT - CS 235  
• AENOR - ER-1850/2005  
• IQNet

Ensayos Acreditados según  
ISO - 17025:2017



#### CERTIFICADO DE ANALISIS

Ver alcance en  
[www.organismouruguayoacreditacion.com](http://www.organismouruguayoacreditacion.com)

1. SOLICITUD N°: 40845
2. CLIENTE: CIEMSA, Soriano 1180, Montevideo
3. MUESTRA: Residuo sólido
- 3.1 IDENTIFICACION DEL CLIENTE: Lodo deshidratado
- 3.2 IDENTIFICACION DEL LABORATORIO: 40845
4. FECHA DE RECEPCION: 01/10/2021
5. FECHA DE INICIO DEL ANALISIS: 01/10/2021

#### RESULTADOS:

DETERMINACIONES	UNIDADES	RESULTADOS	METODOS
Humedad	%	38.4	APHA 2540 B
Coliformes fecales NMP (base seca)	/g	390	APHA 9221 E
Salmonella spp. * (base seca)	25 g	No detectado	ISO 6579:2017

APHA: Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods. 5th Ed. 2015.  
USP: United States Pharmacopeia. 35th Ed. 2012.  
APHA: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Ed.

#### OBSERVACIONES:

Los resultados contenidos en este certificado se relacionan únicamente con las muestras ensayadas.  
Las Muestras fueron presentadas por el Cliente.  
Está prohibida la reproducción total o parcial del presente certificado sin la autorización por escrito del laboratorio.  
La no inclusión del \* en el parámetro indica que el ensayo no está acreditado según la Norma ISO 17025.

Montevideo, 6 de Octubre de 2021.

  
HORACIO GIUDIC  
QUIMICO FARMACEUTICO

TIMBRE POR DECLARACIÓN JURADA

SOLICITUD N°: 40845 - Página 1 de 1

#### 11.4. PS Lodo Fray Marcos 2021



### DEPARTAMENTO DE PARASITOLOGÍA Y MICOLOGÍA

Instituto de Higiene "Prof. Dr. Arnoldo Berta"  
Facultad de Medicina- Universidad de la República -UDELAR



#### Profesora Directora

Montevideo, 09 de noviembre de 2021

Dra. Yester Basmadjian

#### Profesores Agregados

#### Solicitud de determinación de huevos de helmintos en muestras de suelo

Ph D. María E. Francia  
Dr. Daniel Da Rosa  
Dra. Nora Fernández

(muestra recibida el 01/10/2021):

#### Profesores Adjuntos

Dra. Patricia Perera  
Dr. Mauricio Carbia  
Dra. Anaydé Lena

SOLICITANTE: OSE, Gerencia de Gestión Ambiental

N°COMPRA: 14642

Solicitud: PS 054

Localidad: FRAY MARCOS PTAR

Muestra: LODOS DESHIDRATADOS

Fecha de extracción: 01/10/2021

#### Asistentes de Clase

Dra. Elisa Cabeza  
Dra. Annie Arrillaga  
Dra. Lucía Dalcín  
Dr. Steven Tapia  
Mag. Ramiro Tomasina

#### Resultado:

**Se observan huevos de helmintos de la superfamilia *Ascarididea***

#### Ayudantes de Clase

Br. Telma González  
Dr. Michel Rosas  
Dra. Camila Santos  
Br. Paola Froster  
Br. Agustina Amorim

Dra. Anaydé Lena  
Depto Parasitología y Micología  
Fac. Medicina - Udelar

#### Colaboradores

Prof. Dr. Luis Yarzabal  
Prof. Dr. Luis Calegari  
Ph.D. Sabrina Clavijo  
Mag. Andrés Cabrera  
Br. Alejandra Valentin

**Ref: 71/2021**

Av. Dr. Alfredo Navarro 3051, Piso 3. 11600 Montevideo, Uruguay  
Teléfono: (598-2) 487 12 88 int 1320 [parasito@higiene.edu.uy](mailto:parasito@higiene.edu.uy)