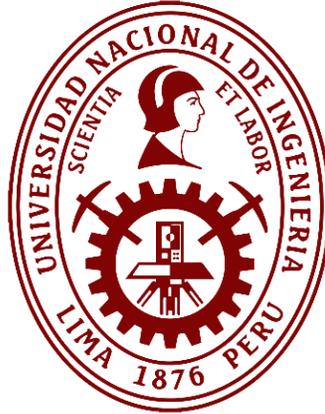


# Universidad Nacional de Ingeniería

## Facultad de Ingeniería Química y Textil



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

### **Tratamiento de aguas residuales domésticas**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Químico

Elaborado por

Miguel Ángel Egusquiza Córdova

 [0009-0007-0244-4392](https://orcid.org/0009-0007-0244-4392)

Asesor

Dr. Ing. Cesar Javier Osorio Carrera

 [0000-0002-2850-6420](https://orcid.org/0000-0002-2850-6420)

LIMA – PERÚ

2023

---

Citar/How to cite	Egusquiza Cordova [1]
Referencia/Reference	[1] M. Egusquiza Cordova, “ <i>Tratamiento de aguas residuales domésticas</i> ” [Trabajo de suficiencia profesional]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2023.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

---



---

Citar/How to cite	(Egusquiza, 2023)
Referencia/Reference	Egusquiza, M. (2023). <i>Tratamiento de aguas residuales domésticas</i> . [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

---

## **Dedicatoria**

*Este trabajo va dedicado a mis padres Juana y David, quienes con lo poco que tenían priorizaron siempre mi educación y bienestar. Es a ellos a quienes les debo todo lo que soy, y no me alcanzará la vida para agradecer todo lo que hicieron por mí y por todo el amor que me han brindado y me siguen brindando, por supuesto no puedo dejar de agradecer también a mis hermanos, quienes siempre con su profundo cariño han guiado e iluminado mi sendero.*

## **Agradecimientos**

A mis padres Juana y David, y a mis hermanos Lucy, Richarth, César y Ronal, por ser el eje de mi crecimiento y bienestar, y por creer siempre en mí.

A mi asesor Dr. César Osorio, por la atención brindada durante la elaboración del presente Trabajo.

## Resumen

En numerosas ciudades, se carece de sistemas apropiados para el procesamiento de aguas residuales provenientes de los hogares e industrias. Esto implica que a menudo, las aguas residuales que contienen sustancias nocivas y contaminantes son vertidas directamente en cuerpos de agua, como océanos y ríos, sin someterse a un tratamiento adecuado o, en algunos casos, sin recibir tratamiento alguno.

El presente Informe está orientado a la descripción de la experiencia profesional en la empresa SEDAPAL, en trabajos relacionados al análisis y control operacional de los procesos y unidades de tratamiento de la PTAR “Santa Clara”, como también, sobre el cumplimiento normativo para el efluente de la PTAR. A su vez, se describe la evaluación de la reutilización de los lodos generados en dicha PTAR y otras plantas de SEDAPAL.

Los principales parámetros que se evalúan para el control del proceso de tratamiento de aguas residuales de tecnología de lodos activados, son el Oxígeno Disuelto, pH e Índice Volumétrico de Lodos.

Se evaluó también la reutilización de lodos a través de una planta piloto de tratamiento por secado térmico, en el que se concluyó que los lodos generados en la PTAR “Santa Clara”, y otras plantas de SEDAPAL, que sean secados térmicamente, pueden emplearse como biosólidos de clase B de acuerdo al D.S. N°015-2017-VIVIENDA, a su vez, de acuerdo a los valores de Poder Calorífico Inferior, tienen un gran potencial para su reúso en hornos de diversas industrias, considerando que su poder calorífico superan al del carbón mineral.

Palabras clave – Tratamiento de aguas residuales, tratamiento biológico, reutilización de lodos, secado térmico.

## **Abstract**

In many cities, there is a lack of appropriate systems for processing wastewater from homes and industries. This means that wastewater containing harmful substances and pollutants is often discharged directly into bodies of water, such as oceans and rivers, without undergoing adequate treatment or, in some cases, without receiving any treatment at all.

This Report is aimed at describing the professional experience in the SEDAPAL company, in work related to the analysis and operational control of the processes and treatment units of the “Santa Clara” WWTP, as well as, regulatory compliance for the effluent of the WWTP. At the same time, the evaluation of the reuse of the sludge generated in said WWTP and other SEDAPAL plants is described.

The main parameters that are evaluated to control the activated sludge technology wastewater treatment process are Dissolved Oxygen, pH and Sludge Volumetric Index.

The reuse of sludge was also evaluated through a pilot thermal drying treatment plant, in which it was concluded that the sludge generated at the “Santa Clara” WWTP and other SEDAPAL plants, which are thermally dried, can be used as waste biosolids. class B according to D.S. N°015-2017-VIVIENDA, in turn, according to the values of Lower Calorific Power, have great potential for reuse in furnaces in various industries, considering that their calorific value exceeds that of mineral coal.

Keywords – Wastewater treatment, biological treatment, sludge reuse, thermal drying.

## Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen .....	v
Abstract .....	vi
Capítulo I: Datos generales de la empresa .....	1
1.1. Actividad Principal .....	1
1.2. Sector industrial al que pertenece.....	1
1.3. Línea de productos .....	1
1.4. Filosofía Administrativa.....	2
1.4.1. Visión .....	2
1.4.2. Misión.....	2
1.4.3. Valores.....	2
1.4.4. Políticas .....	2
1.5. Cultura Organizacional .....	2
1.6. Estructura Funcional.....	3
1.7. Normatividad empresarial.....	5
1.7.1. Reglamento Interno de Trabajo .....	5
1.7.2. Código de Ética y Conducta .....	5
1.7.3. Código de Buen Gobierno Corporativo.....	6
1.7.4. Plan estratégico institucional .....	6
1.8. Principios de Calidad .....	6
1.9. Sistema de seguridad industrial.....	6

1.10.	Gestión de impactos ambientales.....	7
Capítulo II: Cargos y funciones desarrolladas como bachiller .....		8
2.1.	Contexto Laboral .....	8
2.2.	Descripción de Cargos y Funciones .....	8
2.2.1.	Practicante Profesional de Investigación e Innovación .....	8
2.2.2.	Consultor en Investigación, Innovación e Ingeniería de Materiales .....	8
2.2.3.	Analista de Normalización e Innovación .....	8
2.3.	Responsabilidades señaladas en el Manual de organización y funciones .....	8
2.3.1.	Practicante Profesional de Investigación e Innovación .....	8
2.3.2.	Consultor en Investigación, Innovación e Ingeniería de Materiales .....	9
2.3.3.	Analista de Normalización e Innovación .....	9
2.4.	Personal a cargo y sus responsabilidades .....	10
2.4.1.	Técnico de Innovación.....	10
2.4.2.	Operario especializado de tratamiento y disposición final.....	10
2.4.3.	Operario especializado de evaluación de calidad .....	10
2.4.4.	Practicante profesional .....	11
2.5.	Función ejecutiva y/o administrativa .....	11
2.6.	Cronograma de actividades realizadas como bachiller .....	11
Capítulo III: Desarrollo de la actividad técnica y aplicación profesional.....		13
3.1.	Contexto Laboral en el Área de Trabajo .....	13
3.1.1.	Labores y tareas sobre el tema específico a desarrollar.....	13

3.1.2. Conocimientos técnicos de la carrera requeridos para el cumplimiento de las funciones .....	23
3.1.3. Participación en actividades complementarias .....	24
3.2. Hechos relevantes de la Actividad Técnica.....	24
3.2.1. Descripción de la realidad problemática .....	24
3.2.2. Definición del problema general y secundarios .....	25
3.2.3. Justificación e importancia .....	25
3.2.4. Antecedentes nacionales e internacionales.....	26
3.2.5. Objetivo general y específicos.....	27
3.3. Marco Conceptual y Teórico de los conocimientos técnicos requeridos.....	27
3.3.1. Tratamiento de aguas residuales .....	27
3.3.2. Caracterización de las aguas residuales .....	28
3.3.3. Esquema general de una PTAR biológica .....	34
3.3.4. Pretratamiento.....	34
3.3.5. Tratamiento secundario.....	37
3.3.6. Tratamiento de lodos.....	48
3.3.7. Desinfección.....	54
3.4. Propuesta y Contribuciones durante la Formación Profesional .....	57
3.4.1. Objetivos y justificación del uso de las técnicas propuestas .....	57
3.4.2. Cálculos y determinaciones de indicadores de gestión para evaluar y monitorear la propuesta .....	57

3.4.3. Análisis e interpretación de resultados y aportes técnicos de la propuesta de solución.....	62
3.4.4. Evaluaciones y decisiones tomadas.....	71
3.4.5. Informes, reportes, instructivos, fichas técnicas y formatos presentados como resultado de la actividad realizada .....	72
Capítulo IV: Discusión de resultados e implicancias .....	73
4.1. Contribuciones al desarrollo de la empresa .....	73
4.2. Impacto de la propuesta .....	73
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones .....	74
5.1. Conclusiones.....	74
5.2. Recomendaciones.....	76
Capítulo VI: Referencias bibliográficas .....	77
Anexos .....	78

## Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Cronograma de realización de actividades.....	12
Tabla 2 Parámetros de calidad de cumplimiento del efluente de la PTAR “Santa Clara” .....	60
Tabla 3 Parámetros de calidad microbiológico de cumplimiento del efluente de la PTAR “Santa Clara” .....	60
Tabla 4 Ensayos realizados al lodo antes y después del secado térmico. ....	61
Tabla 5 Valores de parámetros de calidad para control operacional de la PTAR “Santa Clara” en el reactor A. ....	63
Tabla 6 Valores de parámetros de calidad para control operacional de la PTAR “Santa Clara” en el reactor B. ....	64
Tabla 7 Valores de parámetros de calidad para cumplimiento normativo de la PTAR “Santa Clara” .....	66
Tabla 8 Ensayos realizados al lodo antes y después del secado térmico de la PTAR “Santa Clara”, y del lodo seco de otras PTAR de SEDAPAL. ....	68
Tabla 9 Costos de secado térmico de lodos. ....	69
Tabla 10 Resumen de reportes del Proyecto. ....	72

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Organigrama general. ....	3
Figura 2 Organigrama específico. ....	4
Figura 3 Diagrama de flujo de operación de la PTAR “Santa Clara”. ....	19
Figura 4 Diagrama de flujo del equipo piloto deshidratadora de lodos orgánicos. ....	20
Figura 5 Operación de planta piloto de deshidratación de lodos orgánicos. ....	21
Figura 6 Medición de humedad relativa del lodo deshidratado. ....	22
Figura 7 Esquema de un proceso biológico. ....	42
Figura 8 Esquema de funcionamiento del metabolismo. ....	43
Figura 9 Formas en las que está presente el agua en los lodos. ....	52

## **Capítulo I: Datos generales de la empresa**

El presente capítulo comprende los datos generales de la empresa de servicios SEDAPAL, cuya Información fue recopilada de fuentes propias de la empresa y de la página web del mismo.

### **1.1. Actividad Principal**

“Brindar el servicio de agua potable y alcantarillado, el cual contempla, el almacenamiento de agua cruda, su conducción y captación, potabilización, y distribución del agua potable, como también, la recolección de las aguas residuales su tratamiento y la disposición final” (Portal web de SEDAPAL, 2023)

### **1.2. Sector industrial al que pertenece**

SEDAPAL es una empresa estatal de derecho privado de propiedad del Estado, constituida como Sociedad Anónima, que pertenece al sector Saneamiento.

“Se rige por lo establecido en su Estatuto, en la Ley General de Sociedades, y en las disposiciones aplicables a las empresas de la Actividad Empresarial del Estado y Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento” (SEDAPAL, 2001).

### **1.3. Línea de productos**

La línea de productos o servicios de SEDAPAL son los siguientes (SEDAPAL, 2001):

- i. “Servicio de agua: producción y distribución” (SEDAPAL, 2023).
- ii. “Servicio de alcantarillado: recolección, tratamiento y disposición final” (SEDAPAL, 2023).
- iii. “Servicio de disposición sanitaria de excretas, sistema de letrinas y fosas sépticas” (SEDAPAL, 2023).

## **1.4. Filosofía Administrativa**

### **1.4.1. Visión**

“En el año 2,030, el ámbito jurisdiccional de SEDAPAL tiene una población superior a los 13 millones de habitantes, con una cobertura al 98% y continuidad de servicio las 24 horas de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales” (SEDAPAL, 2023).

### **1.4.2. Misión**

“Brindar servicios de agua potable, alcantarillado, tratamiento y reúso de aguas residuales con altos estándares de calidad para satisfacer las necesidades de la población atendida por SEDAPAL” (SEDAPAL, 2023)

### **1.4.3. Valores**

Los valores corporativos de SEDAPAL son (SEDAPAL, 2023):

- Excelencia en el servicio
- Compromiso
- Integridad
- Innovación

### **1.4.4. Políticas**

“La política de SEDAPAL es la de contribuir al desarrollo sostenible de las ciudades de Lima y Callao, brindando servicios eficientes de agua potable y alcantarillado, gestionando considerando la protección del medio ambiente, la integridad y la calidad del servicio” (SEDAPAL, 2023).

## **1.5. Cultura Organizacional**

La cultura organizacional de SEDAPAL está enfocada a la prestación de servicio de saneamiento de calidad, como muestra de ello, SEDAPAL tiene certificación ISO trinorma. Ha ganado diversos premios de excelencia y calidad, y ello debido a la filosofía que tiene cada

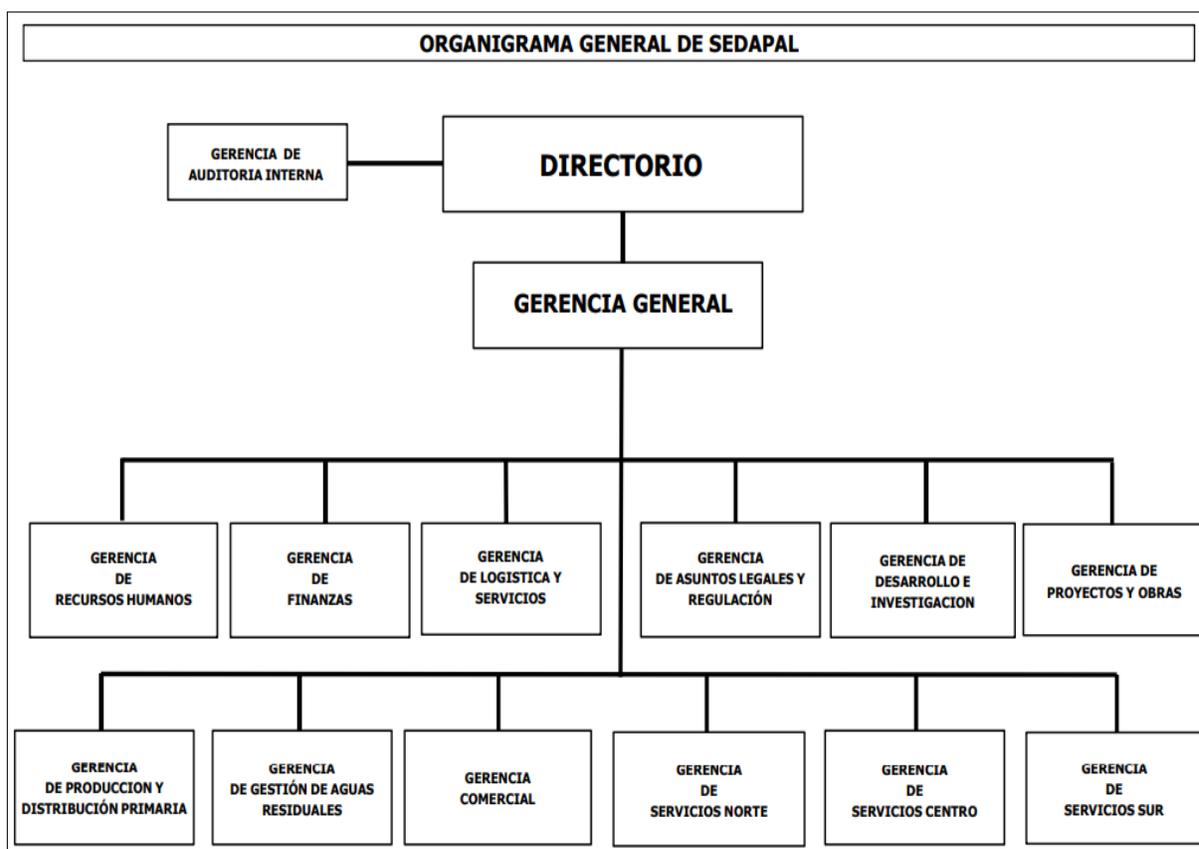
uno de los trabajadores de empresa, siento estos capacitados constantemente y motivados a través de diversas acciones internas en la Empresa.

## 1.6. Estructura Funcional

SEDAPAL cuenta con un organigrama general y uno específico:

**Figura 1**

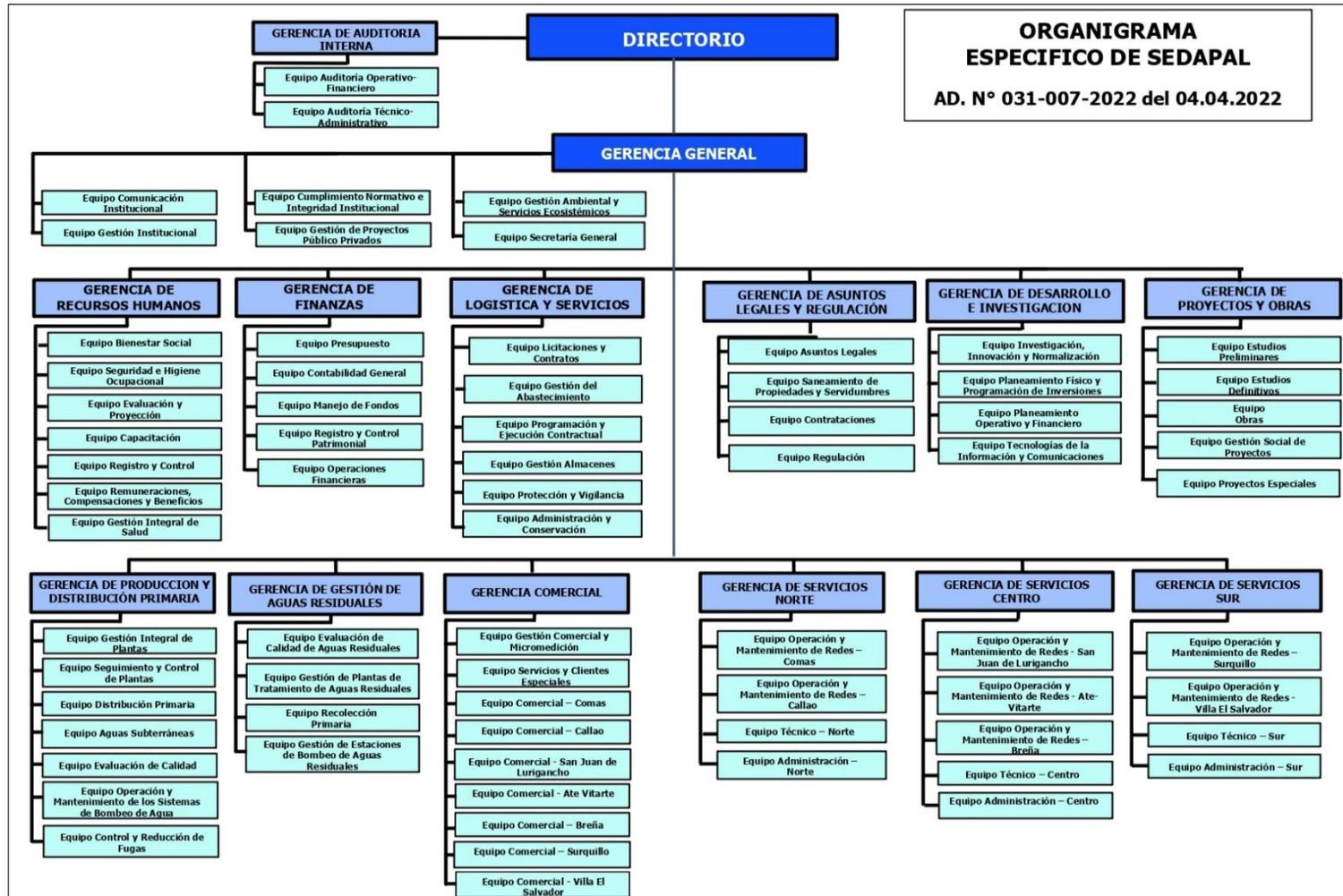
*Organigrama general.*



Nota: fuente <https://lc.cx/K3hK8m> (Organigrama de SEDAPAL).

Figura 2

Organigrama específico.



Nota: fuente <https://lc.cx/K3hK8m> (Organigrama de SEDAPAL).

## **1.7. Normatividad empresarial**

### **1.7.1. Reglamento Interno de Trabajo**

Documento desarrollado de acuerdo al Decreto Supremo N°039-91-TR.

“Dicho reglamento establece normas o disposiciones en las que se enmarca la Empresa y sus respectivos trabajadores en el fiel cumplimiento de sus prestaciones de carácter laboral y las relaciones laborales internas” (Portal web de SEDAPAL, 2023).

“Por lo expuesto, el Reglamento Interno de Trabajo tiene el propósito de contribuir a fomentar y mantener la armonía en las relaciones laborales, a renovar los valores más importantes en el desarrollo de las actividades de cada trabajador y ello lleve a la obtención de la excelencia en la calidad de los servicios que la Empresa brinda a la ciudadanía” (Portal web de SEDAPAL, 2023).

“El Reglamento es entregado a cada trabajador al ingresar a la empresa, por lo que no se puede alegar el desconocimiento de su contenido, a su vez, se efectúa la difusión por otros medios que la Empresa cree pertinente del documento y de todas las normas complementarias correspondientes y se realiza el control de su cumplimiento” (Portal web de SEDAPAL, 2023).

### **1.7.2. Código de Ética y Conducta**

“Este documento expresa los valores y principios en el actuar necesario por parte del personal de la Empresa” (Portal web de SEDAPAL, 2023).

“En concreto, tiene el objetivo de definir los deberes y prohibiciones éticas contenidas en el “Lineamiento de ética de conducta de las empresas del estado bajo el ámbito de FONAFE” (Portal web de SEDAPAL, 2023).

“Los principales deberes éticos que dispone el documento son la neutralidad, transparencia, reserva o confidencialidad de la información, uso adecuado de los bienes de la empresa; comunidad, responsabilidad social y medio ambiente; ejercicio adecuado del cargo, responsabilidad y denuncia” (Portal web de SEDAPAL, 2023).

### **1.7.3. Código de Buen Gobierno Corporativo**

“Este documento tiene por objetivo establecer las mejoras prácticas o principios que especifican la distribución de los derechos y responsabilidades entre los diferentes actores de la Empresa, tales como, el directorio, los gerentes, y otros agentes que mantengan un interés en la empresa” (Portal web de SEDAPAL, 2023).

“Dicho documento se basa en los criterios sobre Buen Gobierno Corporativo de Organizaciones Internacionales y Nacionales, como los establecidos por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), la Corporación Andina de Fomento (CAF), el Banco Mundial (BM); entre otros, a su vez, se contó con la colaboración del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) para la elaboración del mismo” (Portal web de SEDAPAL, 2023).

“El código consta de treinta y cuatro principios, y su respectiva implementación es de responsabilidad del Directorio de la Empresa” (Portal web de SEDAPAL, 2023).

### **1.7.4. Plan estratégico institucional**

“El Plan estratégico institucional está orientado al logro de la cobertura universal de los servicios de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, con continuidad de 24 horas” (Portal web de SEDAPAL, 2023).

## **1.8. Principios de Calidad**

“SEDAPAL tiene certificación ISO 9001:2015, por lo que, se rige por los principios de dicha norma” (Portal web de SEDAPAL, 2023).

## **1.9. Sistema de seguridad industrial**

“SEDAPAL dentro de su Política de Calidad, Medio Ambiente, Seguridad y Salud en el Trabajo, Gestión Anti soborno y Seguridad de la Información, establece la gestión de la seguridad y salud en el trabajo, proporcionando condiciones de trabajo seguras y saludables para la protección de todos los trabajadores, contratistas, proveedores y visitantes y, considerando la eliminación de los peligros, reducción de riesgos, prevención de lesiones,

dolencias, enfermedades e incidentes, garantizando la participación y consulta respecto a los elementos de seguridad y salud en el trabajo a todos los colaboradores y sus representantes” (SEDAPAL, 2023).

“Dentro de dicho marco, SEDAPAL ha elaborado su Reglamento Interno de Seguridad y Salud en el Trabajo, cuyos objetivos son” (SEDAPAL, 2021):

- “Incentivar la prevención como cultura para la mitigación de riesgos laborales de todo el personal”.
- “Fijar los lineamientos de seguridad y salud, y velar por su cumplimiento, incentivando la mejora continua”.
- “Promover el trabajo en equipo, liderazgo, participación y compromiso en lo que respecta a SST”.

#### **1.10. Gestión de impactos ambientales**

“SEDAPAL cuenta con un Sistema de Gestión Ambiental certificada bajo la norma ISO 14001:2015, por lo que se conduce por los principios de la citada norma” (Portal web de SEDAPAL, 2023).

“En ese marco, el desempeño ambiental de SEDAPAL en el año 2021 fue exitoso. Respecto a la generación de ruido se tuvo que la generación de la cámara CR-192 fue de 52.6 dBA, lo cual es menor a lo establecido por la legislación vigente cuyo valor es de 60 dB para el horario diurno” (Portal web de SEDAPAL, 2023).

“A su vez, en el 2021, en la COP La Atarjea se reciclaron 6 toneladas de papel bond, 13 toneladas de cartón, 0.8 toneladas de plástico y 45 kg de vidrio. Asimismo, el 100 % de los residuos sólidos no reciclables se dispusieron en el relleno de seguridad, así como los sólidos peligrosos no aprovechables” (Portal web de SEDAPAL, 2023).

“En cuanto al consumo de energía eléctrica, durante el 2021 se ha ahorrado alrededor de 100 mil soles a través del ahorro en el consumo de energía reactiva” (Portal web de SEDAPAL, 2023).

## **Capítulo II: Cargos y funciones desarrolladas como bachiller**

### **2.1. Contexto Laboral**

Las labores se desarrollaron en la sede Principal de SEDAPAL “COP LA ATARJEA”, en el “Equipo de Investigación, Innovación y Normalización” (EIIN en adelante), ubicado en el distrito El Agustino, como también en la PTAR “Santa Clara”.

### **2.2. Descripción de Cargos y Funciones**

Los cargos desempeñados dentro de SEDAPAL desde la obtención del bachiller fueron los siguientes:

#### ***2.2.1. Practicante Profesional de Investigación e Innovación***

Desde la obtención del bachiller que fue en diciembre de 2017, dicho cargo fue desempeñado en SEDAPAL desde enero de 2018 hasta septiembre del mismo año.

#### ***2.2.2. Consultor en Investigación, Innovación e Ingeniería de Materiales***

Dicho cargo fue desempeñado desde octubre de 2018 hasta febrero de 2022, en SEDAPAL.

#### ***2.2.3. Analista de Normalización e Innovación***

Dicho cargo viene siendo desempeñado desde abril de 2022 hasta la fecha, en SEDAPAL.

### **2.3. Responsabilidades señaladas en el Manual de organización y funciones**

#### ***2.3.1. Practicante Profesional de Investigación e Innovación***

Las responsabilidades ejecutadas en dicho cargo fueron los siguientes:

- Apoyar en la elaboración del diagnóstico preliminar de proyectos de investigación y/o innovación en temas relacionados al Agua Potable y Saneamiento en SEDAPAL.
- Asistir técnicamente en la supervisión del estudio especializado en materia de vulnerabilidad de la calidad de acuíferos.

- Revisar alcances de innovaciones.
- Apoyar y participar en los diferentes proyectos de investigación e innovación adscritos al equipo.

### **2.3.2. Consultor en Investigación, Innovación e Ingeniería de Materiales**

Las responsabilidades ejecutadas en dicho cargo fueron las siguientes:

- Desarrollar el proyecto de investigación de secado térmico de lodos orgánicos centrifugados de PTARs de SEDAPAL, con la finalidad de estimar los costos del tratamiento térmico, y el análisis del poder calorífico, análisis físico químico (análisis metales pesados y nutrientes), y análisis biológico de los lodos deshidratados para determinar la idoneidad de su utilización como acondicionador de suelos y como combustible alternativo en la industria ladrillera, considerando la reducción de carga ambiental y su comparación de costos con la disposición final en rellenos sanitarios.
- Desarrollar un modelo predictivo basado en algoritmos de redes neuronales para el cálculo de dosis óptima de sulfato de aluminio, cloruro férrico y polímero aniónico en la PTAP la Atarjea.
- Evaluar nuevas tecnologías de materiales, insumos químicos.
- Estandarizar materiales y nuevas tecnologías.

### **2.3.3. Analista de Normalización e Innovación**

Las responsabilidades ejecutadas en dicho cargo fueron las siguientes:

- Evaluar nuevas tecnologías de materiales, insumos químicos, y procesos de tratamiento.
- Participar en el desarrollo de Investigaciones conjuntamente con entidades cooperantes.
- Supervisar estudios especializados.
- Estandarizar materiales y nuevas tecnologías.

## **2.4. Personal a cargo y sus responsabilidades**

### **2.4.1. Técnico de Innovación**

- Apoyar en la elaboración de informes técnicos-económicos de estudios y/o proyectos innovación.
- Apoyar y coordinar en la supervisión de los estudios de innovación.
- Apoyar en el análisis de capacidades de adaptación a modernas tecnologías a los procesos existentes.

### **2.4.2. Operario especializado de tratamiento y disposición final**

- Realizar el mantenimiento menor y operación correcta de los equipos electromagnéticos, de las unidades de pretratamiento y cloración en las PTAR.
- Ejecutar el recojo de los residuos sólidos, arenas y flotantes programadas por el encargado de la operación retenidos en las unidades de pretratamiento, evitando la generación de vectores y malos olores de las PTAR, asimismo realizar las regulaciones de caudales de ingreso y salida de la planta.
- Reportar parámetros operacionales y condiciones operativos de la planta a través de formatos y/o reportes y en caso de incidencias comunicar directamente al responsable de la operación.
- Verificar y comunicar al responsable de la operación de las PTAR sobre los servicios de terceros de apoyo en la operación de las plantas.

### **2.4.3. Operario especializado de evaluación de calidad**

- Apoyar en la inspección, muestreo y medición de parámetros de campo de las aguas residuales no domésticos de los establecimientos comerciales, industriales, colectores primarios, PTAR y cuerpos receptores.
- Efectuar diferentes actividades operativas relacionadas al tratamiento de muestras, como el lavado de materiales.

- Efectuar el control y la adecuada eliminación de los residuos sólidos del laboratorio, así como realizar y controlar el mantenimiento de los recipientes que almacena temporalmente tales residuos.

#### **2.4.4. *Practicante profesional***

- Apoyar en la elaboración del diagnóstico preliminar de proyectos de investigación y/o innovación en temas relacionados al Agua Potable y Saneamiento en SEDAPAL.
- Apoyar y participar en los diferentes proyectos de investigación e innovación adscritos al equipo.

#### **2.5. Función ejecutiva y/o administrativa**

- Desarrollar las actividades conducentes a la actualización de la información técnica que tiene el Centro de Información Especializada de SEDAPAL.
- Cumplir con las disposiciones del Sistema de Gestión Integrada de SEDAPAL.
- Cumplir con las acciones del Sistema de Control Interno y Gestión de Riesgos del Equipo.
- Apoyo en la gestión de aprobación de normatividad técnica desarrollada por el Comité Técnico Permanente de SEDAPAL.
- Gestión de pagos de consultores.
- Participación de comités de innovación.
- Dar respuesta a diversas solicitudes de entidades externas públicas y privadas de índole técnico.

#### **2.6. Cronograma de actividades realizadas como bachiller**

**Tabla 1**

*Cronograma de realización de actividades.*

Actividad	2018		2019		2020		2021		2022	
Asistir técnicamente en la evaluación de sistemas no convencionales.										
Asistir técnicamente en la supervisión del estudio especializado en materia de vulnerabilidad de la calidad de acuíferos.										
Análisis y Control operacional de la planta y Desarrollo del proyecto de investigación de secado térmico de lodos orgánicos centrifugados de PTARs de SEDAPAL, con la finalidad de estimar los costos del tratamiento térmico, y el análisis del poder calorífico, análisis físico químico (análisis metales pesados y nutrientes), y análisis biológico de los lodos deshidratados para determinar la idoneidad de su utilización como acondicionador de suelos y como combustible alternativo en la industria ladrillera, considerando la reducción de carga ambiental y su comparación de costos con la disposición final en rellenos sanitarios.										
Desarrollar un modelo predictivo basado en algoritmos de redes neuronales para el cálculo de dosis óptima de sulfato de aluminio, cloruro férrico y polímero aniónico.										
Evaluar nuevas tecnologías de materiales, insumos químicos, procesos de tratamiento.										
Estandarizar materiales y nuevas tecnologías.										
Participar en el desarrollo de Investigaciones conjuntamente con entidades cooperantes.										

*Nota:* Elaboración propia.

## Capítulo III: Desarrollo de la actividad técnica y aplicación profesional

### 3.1. Contexto Laboral en el Área de Trabajo

#### 3.1.1. Labores y tareas sobre el tema específico a desarrollar

Las labores realizadas propias de especialidad desarrolladas como bachiller, están basadas en el análisis y control operacional de la PTAR “Santa Clara” y el desarrollo del Proyecto de secado térmico de lodos orgánicos para su reúso como acondicionador de suelos o como combustible alternativo en la industria ladrillera. Las principales actividades realizadas fueron los siguientes:

**3.1.1.1. Análisis y control operacional.** Se desarrolló el análisis y control operacional de la PTAR “Santa Clara”.

La PTAR “Santa Clara” se diseñó para tratar en su periodo de diseño final un caudal promedio de 437 l/s.

La PTAR “Santa Clara”, cuenta con los siguientes componentes:

**i. *Obra de llegada.*** Dicha estructura cuenta con los siguientes equipos:

a) Cuchara bivalva:

El cual cuenta con capacidad de 300 l, para remoción de sólidos de gran tamaño.

b) Reja estática gruesa:

Consiste en una reja manual de paso 60 mm, que sirve como primer filtro antes del ingreso a los canales de pretratamiento.

**ii. *Pretratamiento.*** Está constituida por dos canales, cada uno con la capacidad de la mitad del caudal máximo horario, en dichos canales se hallan los equipos que se describen a continuación:

a) Rejas mecánicas medianas y tornillo transportador:

En dicho sistema se realiza la extracción de los sólidos medianos con tamaños mayores a 10 mm.

b) Rejas mecánicas finas y tornillo transportador:

En dicho sistema se realiza la extracción de sólidos finos con tamaños mayores a 3 mm.

c) Desarenadores vortex:

Existen dos desarenadores tipo vortex, cuya capacidad de cada uno es la de un caudal máximo horario, cada uno de ellos consta de un agitador sumergible que genera el vórtice y un compresor air lift que genera el vacío para realizar la extracción de las arenas. Dichas arenas extraídas se dirigen a un clasificador de arena común para ambos sistemas, y finalmente de este último se van a disposición.

d) Medidor de caudal tipo Parshall:

Para medición el flujo en el canal de pretratamiento, dicho medidor se encuentra situado aguas arriba del sistema de desarenado.

e) Canal de bypass:

Dicho canal deriva el agua desde el punto posterior a la cámara de rejas gruesas hasta la entrada de los desarenadores. Este canal solo es empleado en situaciones especiales o para mantenimiento de los canales de pretratamiento.

f) Bypass general de planta:

Previo a la entrada al cárcamo de bombeo, en la parte final de los canales de pretratamiento, se encuentra dicho bypass, con capacidad de conducir el agua residual pretratado hasta el río Rímac, y solamente será empleado en situaciones excepcionales como el caso de caudales mayores al caudal máximo horario.

**iii. Cárcamo de bombeo.** Unidad donde se almacena y bombea el agua que llega del pretratamiento hacia el tratamiento secundario. Los equipos que se encuentran en dicha unidad son los descritos a continuación:

a) Bombas sumergibles:

Consta de 5 bombas sumergibles con 256 l/s de capacidad cada una, en cuya operación normal al final del periodo de diseño solo trabajarán 2 bombas, pero en caso de entrada del pico horario de diseño (1024 l/s), trabajarían las 4 bombas y uno quedaría en standby.

b) Desengrasadores:

Consta de dos discos Desengrasadores que renueven las grasas del sistema, dicha grasa retirada es almacenada en un depósito situado en el mismo equipo, los cuales se evacúan mediante dos bombas neumáticas alimentados por un compresor, y finalmente dicha grasa es almacenada en 2 tanques de 25 m<sup>3</sup> de capacidad.

**iv. Reactores biológicos.** En dicho sistema se realiza la reducción de carga orgánica, medida como DBO<sub>5</sub>. Consta de dos cámaras, una aerobia que consta de dos reactores (A y B), y otra cámara anóxica.

Este sistema consta de los siguientes equipos y/o componentes:

a) Sopladores:

Consta de 7 equipos en total para ambos reactores, dos sopladores de 250 HP de potencia cada uno con variador de frecuencia, y 5 sopladores de 200 HP con arrancador de estado sólido.

Cada reactor trabaja con 3 sopladores, quedando un soplador de reserva. A su vez, cada reactor presenta una distribución uniforme de 3360 difusores de burbuja fina que distribuye uniformemente el aire que es suministrado por los 3 sopladores.

b) Agitadores sumergibles:

Tienen el propósito de mantener una mezcla uniforme en los reactores, y consta de 2 agitadores por cada cámara; es decir, 4 en total.

c) Instrumentación:

En el sistema de reactores biológicos se tienen los siguientes instrumentos para el control del proceso: i) medidor de sólidos del licor de mezcla, ii) medidor de oxígeno disuelto y iii) medidor de potencial redox.

**v. Clarificadores secundarios.** Sistema que cuenta con puentes clarificadores de succión, y bombas de recirculación y purga, los mismos que se detallan a continuación:

a) Puentes clarificadores de succión:

Estos tienen la función de clarificar el agua a través de la decantación física como también el lodo decantado succionarlo y conducirlo por gravedad a una cámara de recirculación de lodos, de los cuales, una parte se recircula y otra se purga.

b) Bombas de recirculación y purga:

Consta de 4 bombas que recirculan el lodo hacia los reactores biológicos, a su vez, a través del juego de válvulas se lleva una parte del lodo a la purga, que es conducido al sistema de tratamiento de lodos.

**vi. Sistema de filtración.** Son 6 filtros de arena, los que tienen por función la remoción de huevos de helmintos presentes. Dicho sistema está compuesto por los siguientes componentes y/o equipos:

a) Juego de válvulas:

Cada filtro de arena, tiene 5 válvulas automáticas, los cuales son:

- Válvula de entrada a filtros ON/OFF
- Válvula de ingreso de agua de retrolavado
- Válvula de salida de agua de retrolavado ON/OFF
- Válvula de entrada de aire ON/OFF
- Válvula de salida de agua de proceso

b) Instrumentación:

Para el control del sistema de filtros de arena se tienen medidores de nivel ultrasónico, uno para cada filtro, a través de los cuales se controla el sistema por medio de los niveles de agua de funcionamiento y lavado.

c) Equipos de retrolavado de filtros de arena:

El proceso de retrolavado de filtros de arena se realiza mediante agua y aire, usando bombas centrífugas, que emplean el efluente de la PTAR, tomada de la salida del sistema, y compresores o sopladores lobulares que aportan el aire.

d) Cárcamo de drenaje interno:

El agua procedente del retrolavado es llevado a un cárcamo, a partir del cual son llevados a la cabecera de planta mediante bombas sumergibles.

**vii. Sistema de desinfección.** El agua procedente de los filtros de arena es llevada a un sistema de desinfección que emplea gas cloro para la eliminación de patógenos. Dicho sistema comprende los siguientes componentes:

a) Tanque de contacto:

Consiste en un serpentín de concreto, cuya finalidad es la de dar el tiempo de contacto mínimo necesario del cloro con el agua, siendo el cloro inyectado a la entrada de dicha estructura.

b) Sala de cloración:

Dicha sala comprende dos zonas: i) sala de cilindros de gas cloro, en las que se encuentran 4 cilindros, un intercambiador automático por diferencia de presiones, balanzas para la revisión del consumo del gas cloro, ii) zona de dosificación, que comprende a los dosificadores de cloro, las bombas y eyectores de cloro.

**viii. Sistema de deshidratación de lodos.** Los lodos purgados del sistema son llevados a un sistema de deshidratación de lodos, el cual comprende los siguientes componentes:

a) Espesadores de lodos:

Son equipos que se encargan de concentrar el lodo hasta concentraciones del 2 a 3%.

b) Bombas de cavidad progresiva:

Comprende una totalidad de 3 bombas de cavidad progresiva empleadas para llevar el lodo espesado a las unidades centrífugas.

c) Centrífugas y sistema de preparación de polímeros:

Este sistema consiste en un equipo de rotación con el propósito de separar las fases sólida y líquida en función de la densidad. El propósito de esta unidad es la de eliminar el exceso de lodo del proceso con determinadas características de humedad de manera que su manejo y disposición final sea más sencillo.

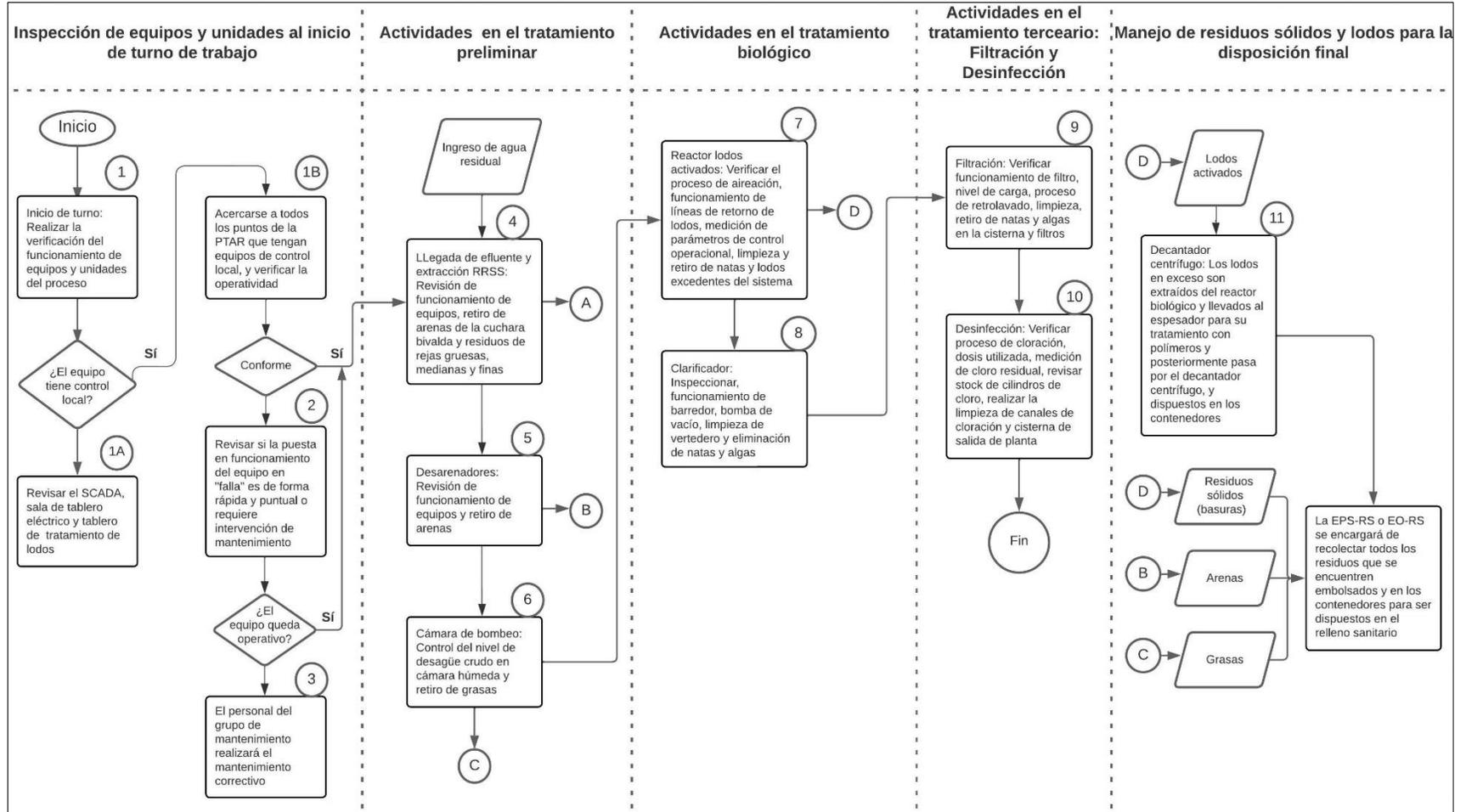
A su vez, con el propósito de coadyuvar el proceso de sedimentación se emplea un agente floculante, que en específico viene a ser un polímero catiónico de alta carga y alto peso molecular. La determinación de la dosis del polímero catiónico se define mediante análisis de laboratorio conocido como prueba de jarras y luego son evaluados y ajustados en campo.

La para preparación y dosificación del floculante se cuenta con depósito tricámara, en cuyas dos primeras se prepara el polímero y en la tercera se genera la maduración y almacenamiento del producto diluido. Con una capacidad de dosificación de 1000 l/h y una capacidad de almacenamiento de 333 litros. Luego se tiene una bomba helicoidal excéntrica con la que se dosifica el polímero de manera automática con respecto al caudal del agua de dilución, cálculo que es realizado por el equipo con la consigna de concentración deseada.

El control operacional de la PTAR "Santa Clara" se desarrolla como sigue:

**Figura 3**

*Diagrama de flujo de operación de la PTAR “Santa Clara”.*



Nota: Elaboración propia.

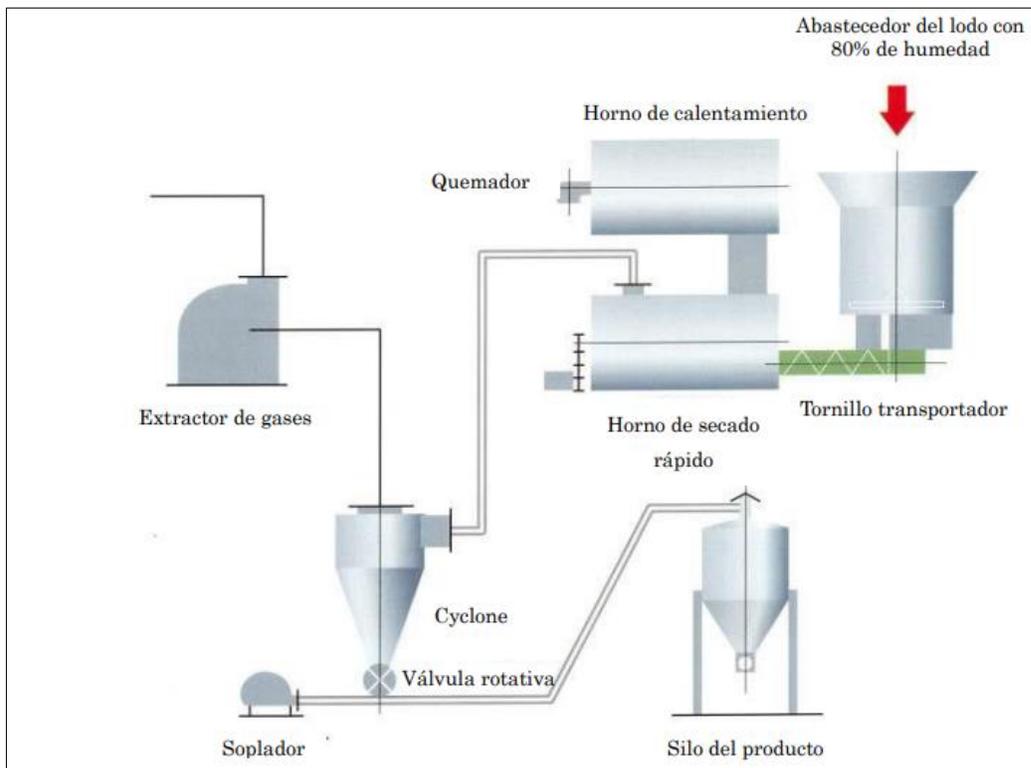
**3.1.1.2. Instalación de planta de secado de lodos a escala piloto.** Los Equipos de origen japonés, se transportaron a Perú por vía marítima y terrestre hasta la PTAR “Santa Clara” de SEDAPAL.

Se procedió a realizar los trabajos previos para el montaje de la planta piloto, tales como: construcción de loza de concreto, instalación cerco perimétrico, instalación de techo de lona e instalación de tanque de GLP.

Luego se procedió a realizar el montaje de la planta piloto de acuerdo a las especificaciones del fabricante, el cual tiene los componentes que se describen en el siguiente diagrama:

**Figura 4**

*Diagrama de flujo del equipo piloto deshidratadora de lodos orgánicos.*



*Nota: fuente (JICA, 2020).*

**3.1.1.3. Operación de la planta piloto deshidratadora de lodos orgánicos.** Se puso en funcionamiento la planta de deshidratadora y se trataron diversos tipos de lodos, entre ellos lodos centrifugados de la PTAR “Santa Clara”.

Entre las actividades de operación realizados están los siguientes:

- Manejo manual de la planta.
- Detección y manejo de anomalías en los equipos.
- En caso de aumento de temperatura de la caldera, se realizó succión de gases con la máquina extractora hasta bajar la temperatura del caldero.
- Limpieza y verificación del sensor de nivel y sensor de temperatura.

### Figura 5

*Operación de planta piloto de deshidratación de lodos orgánicos.*



*Nota:* Elaboración propia.

**3.1.1.4. Análisis de laboratorio de lodos orgánicos deshidratados.** Conjuntamente con la UNALM se realizó las mediciones del poder calorífico de los lodos deshidratados, a su vez, en los laboratorios de SEDAPAL y también a través del laboratorio CERTIMIN se realizaron la medición del contenido de humedad, contenido de cenizas, elementos orgánicos (carbono, hidrógeno, nitrógeno), sustancias nocivas (elementos metálicos), número de parásitos, número de Escherichia Coli, y otros parámetros microbiológicos, para la determinación de la idoneidad del reuso de dichos lodos deshidratados como acondicionador de suelos o como combustible alternativo en la industria ladrillera.

**Figura 6**

*Medición de humedad relativa del lodo deshidratado.*



*Nota:* Elaboración propia.

### **3.1.2. Conocimientos técnicos de la carrera requeridos para el cumplimiento de las funciones**

Los conocimientos técnicos han sido proporcionados en distintos cursos de la especialidad, los mismos que se listan a continuación:

**3.1.2.1. Tratamiento de efluentes industriales.** Proporciona conocimientos el tratamiento de efluentes y minimización de residuos, así como también, brinda conocimientos respecto a técnicas de tratamiento tales como desarenado, sedimentación, tamizado, precipitación química, ósmosis inversa, procesos biológicos tales como digestión aerobia y anaerobia, filtros percoladores, lodos activados, y otros como desnitrificación, remoción de compuestos orgánicos solubles, etc.

**3.1.2.2. Industria de procesos químicos.** Proporciona conocimientos sobre los principales procesos químicos en la industria moderna, en consecuencia y dada su importancia, aborda el tema de la industria del tratamiento y/o purificación del agua.

**3.1.2.3. Laboratorio de operaciones unitarias I.** Proporciona conocimientos prácticos a través de la experimentación en plantas pilotos, relacionados a temas de agitación, sistemas de bombeo, transferencia de calor, evaporación y flujo de tuberías.

**3.1.2.4. Laboratorio de operaciones unitarias II.** Proporciona conocimientos prácticos a través de la experimentación en plantas pilotos, relacionados a temas de secado por aspersión, destilación, desorción de gas, etc.

**3.1.2.5. Instrumentos de control.** Proporciona conocimientos sobre el funcionamiento de los sensores y actuadores dentro de los procesos de una planta industrial, abordando el dimensionamiento y selección adecuada de los mismos a través de herramientas tecnológicas.

**3.1.2.6. Economía de procesos químicos.** Proporciona conocimientos de análisis de factibilidad de proyectos de inversión en la industria, permite comprender diferentes criterios

de determinación y comparación de viabilidad financiera de proyectos, estimación de costos fijos y variables, entre otros.

### **3.1.3. Participación en actividades complementarias**

Como bachiller se ha participado en diversas actividades complementarias referidas a Investigación, Innovación y Seguridad; los mismos que se detallan a continuación:

- Proyecto de investigación de desarrollo de un modelo predictivo basado en algoritmos de redes neuronales para el cálculo de dosis óptima de sulfato de aluminio, cloruro férrico y polímero aniónico.
- Estudio especializado en materia de vulnerabilidad de la calidad de acuíferos.
- Comité Técnico Permanente de SEDAPAL, donde se abordan temas relacionados a estandarización de materiales, equipos, insumos químicos y procedimientos constructivos.
- Comité de Seguridad, como brigadista de primeros auxilios.

## **3.2. Hechos relevantes de la Actividad Técnica**

### **3.2.1. Descripción de la realidad problemática**

En muchas ciudades en todo el mundo las aguas residuales que contienen sustancias tóxicas y contaminantes muchas veces se vierten directamente en cuerpos de agua como el mar, ríos y otros, sin ser previamente tratadas de manera adecuada o inclusive sin ningún nivel de tratamiento, lo que genera un impacto negativo.

Inclusive en lugares donde existen sistemas de tratamiento, a menudo carecen de infraestructura, cuentan con tecnologías obsoletas, lo que dificulta la eliminación efectiva de contaminantes.

En el caso particular de Lima y Callao, SEDAPAL cuenta con 17 plantas de tratamiento de aguas residuales, y 2 plantas de tratamiento de concesión privada.

En comparación con algunos otros países, SEDAPAL se enfrenta a un reto adicional, y es que en el sistema de alcantarillado en Lima y Callao, no solo se vierten aguas residuales domésticas sino también aguas residuales industriales, este último para ser vertido al alcantarillado deben por ley ser previamente tratados hasta cumplir los estándares pertinentes, sin embargo, en muchos casos, las empresas, negocios, etc., incumplen con dicho mandato, generando que el agua residual tenga mayores contaminantes difíciles de remover, o que dificultan o disminuyen la eficacia y eficiencia de los actuales sistemas existentes.

### **3.2.2. Definición del problema general y secundarios**

#### **Problema general**

¿Cómo se desarrolla el control operacional de los procesos en la PTAR “Santa Clara” de SEDAPAL y cómo se puede reutilizar los lodos generados?

#### **Problemas secundarios**

- ¿Cómo Controlar la operación de la PTAR “Santa Clara” de SEDAPAL?
- ¿Se cumple con la normatividad vigente para el efluente de la PTAR “Santa Clara”?
- ¿Cómo y en qué se puede reutilizar los lodos generados en la PTAR “Santa Clara” y otros, como materia prima para producción de fertilizantes o para su aprovechamiento energético, luego de un proceso de secado térmico?

### **3.2.3. Justificación e importancia**

La falta de conciencia sobre el valor del tratamiento de las aguas residuales repercute en el correcto desarrollo del mismo. Muchas personas y empresas todavía no entienden cómo sus acciones afectan a su entorno y a la salud pública, y siguen vertiendo productos químicos y otros contaminantes en los sistemas de alcantarillado sin considerar las consecuencias. Por lo que es fundamental implementar políticas y tecnologías adecuadas para garantizar el tratamiento seguro y efectivo de las aguas residuales.

Por otro lado, en el tratamiento de aguas residuales, se generan productos y subproductos, tal es el caso de los lodos generados en el proceso de tratamiento. Los lodos son sólidos compuestos por nutrientes, impurezas, materia orgánica, entre otros, los cuales se generan en gran cantidad en el proceso de tratamiento de aguas residuales.

La disposición de estos lodos implica grandes costos anualmente para SEDAPAL, a su vez, existe poca disponibilidad, por lo que es fundamental evaluar su reutilización para promover una economía circular y dejar atrás la economía lineal.

#### **3.2.4. Antecedentes nacionales e internacionales**

Según (Vargas, et al., 2020) en Colombia, hay varias opciones de tratamiento biológico disponibles, sin embargo, entre las más comúnmente utilizadas se encuentran los lodos activados. Los sistemas biológicos muestran una buena eficiencia de depuración del agua. A su vez, resaltan la importancia de un sistema de pretratamiento ya que la ausencia del mismo puede causar deficiencias en la eliminación de contaminantes. Por lo tanto, es esencial instalar sistemas de pretratamiento que eliminen los materiales flotantes de gran tamaño y usen trampas de grasas para evitar cambios de pH.

De acuerdo a (Larico, et al., 2021) el sistema de tratamiento de aguas residuales basado en un tratamiento biológico por lodos activados mostraron un porcentaje de remoción de demanda bioquímica de oxígeno superior a sistemas como filtros percoladores y lagunas facultativas, de igual manera para el porcentaje de remoción de coliformes fecales, concluyendo que los sistemas de lodos activados presentan gran eficiencia para la depuración de las aguas residuales.

Según (Espinoza, 2022) el tratamiento de lodos tiene potenciales como oportunidad de negocio, ya que se pueden emplear como materia prima para la producción de fertilizantes o para la generación de energía. De acuerdo a este estudio el poder calorífico de los lodos analizados tuvieron un valor igual a la de la turmalina, combustible empleado en centrales eléctricas.

### **3.2.5. Objetivo general y específicos**

#### **Objetivo general**

Realizar el control operacional de la PTAR “Santa Clara” de SEDAPAL y evaluar el reuso de los lodos generados.

#### **Objetivos específicos**

- Controlar la operación de la PTAR “Santa Clara” de SEDAPAL.
- Cumplir con la normatividad vigente para el efluente de la PTAR “Santa Clara”.
- Evaluar la reutilización de los lodos generados en la PTAR “Santa Clara” y otros, como materia prima para producción de fertilizantes o para su aprovechamiento energético, luego de un proceso de secado térmico.

### **3.3. Marco Conceptual y Teórico de los conocimientos técnicos requeridos**

#### **3.3.1. Tratamiento de aguas residuales**

“El tratamiento de aguas residuales implica una serie de procedimientos destinados a disminuir o eliminar los elementos contaminantes que se encuentran en el agua residual. En una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), se busca acelerar o intensificar los procesos de autodepuración de los cuerpos receptores mediante la aplicación de técnicas que reduzcan el tiempo y el espacio necesarios para ello. De esta manera, se busca obtener un efluente que sea seguro para descargar al medio ambiente sin generar impactos negativos significativos” (Trapote, 2016).

Una PTAR se compone de una serie de infraestructuras, equipos y procesos que llevan a cabo el tratamiento de aguas residuales, con el fin de asegurar que los efluentes depurados no afecten significativamente la calidad de las aguas receptoras. Las depuradoras no pueden ser vistas como entidades separadas del ciclo natural, sino como parte de él (Trapote, 2016).

“En general, desde aproximadamente 1900 hasta principios de la década de 1970, los objetivos del tratamiento se relacionaban con la eliminación de material suspendido y flotante,

el tratamiento de compuestos orgánicos biodegradables y la eliminación de organismos patógenos, hoy en día el grado de tratamiento requerido ha aumentado significativamente y se han agregado objetivos y metas de tratamiento adicionales. Por lo tanto, el diseño del proceso de tratamiento debe ir de la mano con los objetivos o estándares de calidad del agua establecidas por las autoridades reguladoras” (Metcalf & Eddy, 2014).

“Conforme la investigación de las características de las aguas residuales se ha expandido y las técnicas para analizar sus componentes y sus posibles efectos en la salud y el medio ambiente se han vuelto más integrales, el conocimiento científico ha crecido significativamente” (Metcalf & Eddy, 2014). Muchos de los nuevos métodos de tratamiento desarrollados están enfocados en solucionar problemas ambientales y de salud relacionados con los compuestos detectados gracias a técnicas de detección avanzadas. Sin embargo, el avance en la eficacia de la tecnología de tratamiento no ha seguido el mismo ritmo de la capacidad mejorada de detección de compuestos: los compuestos pueden ser detectados en concentraciones más bajas de las que se pueden eliminar con la tecnología de tratamiento disponible. Por lo tanto, una evaluación cuidadosa de los efectos en la salud y el medio ambiente, y las preocupaciones de la comunidad, se ha vuelto cada vez más importante en la gestión de aguas residuales (Metcalf & Eddy, 2014).

“En la actualidad, la correcta gestión de las plantas de tratamiento de aguas residuales se ha vuelto de suma importancia” (Metcalf & Eddy, 2014). Esto incluye el balance general de energía, las emisiones de GEI relacionadas con el proceso, el uso total de productos químicos y la huella de carbono asociada con ellos, y el destino de los compuestos presentes en los efluentes y subproductos del proceso (Metcalf & Eddy, 2014).

### **3.3.2. Caracterización de las aguas residuales**

“Se pueden identificar varios elementos principales en las aguas residuales procedentes de procesos domésticos, municipales e industriales, incluyendo excrementos humanos (tales como heces y orina), agua de baño y ducha, restos de alimentos, productos

de limpieza y mantenimiento del hogar, así como una amplia variedad de otros compuestos inorgánicos y orgánicos presentes en pequeñas cantidades. Debido a la gran variedad de estos elementos, es común caracterizar las aguas residuales en términos de sus propiedades físicas y químicas, así como de sus constituyentes biológicos” (Metcalf & Eddy, 2014).

Los parámetros específicos principales utilizados para evaluar la eficiencia de los procesos que conforman una PTAR son (Trapote, 2016):

- Temperatura
- pH
- Sólidos en suspensión (fijos y volátiles)
- Materia orgánica Nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3$  o  $\text{NH}_4^+$ )
- Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)

A su vez, en la PTAR “Santa Clara” de SEDAPAL se miden adicionalmente, otros parámetros para el control operacional como también para el cumplimiento de la actual legislación, tales parámetros son: Oxígeno disuelto, cloro residual, aceites y grasas, coliformes termotolerantes y huevos de helmintos.

**3.3.2.1. Temperatura.** “Las aguas residuales suelen tener una temperatura más alta que el suministro de agua potable debido a la incorporación de agua caliente proveniente de hogares y actividades industriales. La temperatura del agua es un parámetro crítico debido a su impacto en las reacciones químicas y las velocidades de reacción, la vida acuática y la aptitud del agua para usos beneficiosos. Un aumento en la temperatura, por ejemplo, puede cambiar la población de especies de peces presentes en un cuerpo de agua receptor. Los establecimientos industriales que utilizan aguas superficiales para refrigeración están particularmente preocupados por la temperatura del agua de entrada” (Metcalf & Eddy, 2014).

“Además, el oxígeno es menos soluble en agua caliente que en agua fría. El aumento de la velocidad de las reacciones bioquímicas que se produce con el aumento de la

temperatura, combinado con la disminución de la cantidad de oxígeno presente en las aguas superficiales, a menudo resulta en disminuciones significativas de las concentraciones de oxígeno disuelto durante los meses de verano. Estos efectos se magnifican cuando se descargan cantidades significativas de agua caliente a cuerpos de agua naturales. También se debe tener en cuenta que un cambio repentino de temperatura puede causar una alta tasa de mortalidad de la vida acuática. Asimismo, las temperaturas anormalmente altas pueden fomentar el crecimiento de plantas acuáticas indeseables y hongos de aguas residuales” (Metcalf & Eddy, 2014).

“Respecto a las temperaturas ideales para la actividad biológica mencionan que las bacterias son más activas en un rango de temperatura de 25 a 35°C. La digestión aeróbica y la nitrificación se detienen cuando la temperatura supera los 50°C. Cuando la temperatura desciende a alrededor de 15°C, las bacterias productoras de metano se vuelven significativamente menos activas, mientras que, a unos 5°C, las bacterias nitrificantes autótrofas prácticamente dejan de funcionar. A 2°C, incluso las bacterias quimio heterótrofas que degradan el material carbonoso se vuelven esencialmente inactivas” (Metcalf & Eddy, 2014).

**3.3.2.2. pH.** “La concentración de iones de hidrógeno en solución es crucial para la mayoría de los componentes químicos y es un parámetro importante en la calidad del agua natural y residual, que se expresa comúnmente como pH, definido como el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno. La mayoría de la vida biológica requiere un rango estrecho y crítico de pH de 6 a 9, por lo que las aguas residuales con una concentración extrema de iones de hidrógeno son difíciles de tratar. Para los efluentes tratados descargados al medio ambiente, el rango de pH permisible generalmente varía de 6,5 a 8,5” (Metcalf & Eddy, 2014).

“La concentración de iones de hidrógeno se relaciona con la disociación de las moléculas de agua. El pH de los sistemas acuosos se mide comúnmente con un medidor de

pH, papeles de pH y soluciones indicadoras que cambian de color a valores de pH conocidos” (Metcalf & Eddy, 2014).

Cuando el valor del pH está fuera del rango recomendado, se generan problemas en los procesos de tratamiento biológico, por lo que es imprescindible la medición y control del pH en una PTAR (Trapote, 2016).

**3.3.2.3. Sólidos en suspensión.** “Las aguas residuales contienen una variedad de materiales sólidos que van desde trapos hasta material coloidal” (Metcalf & Eddy, 2014). En la caracterización de las aguas residuales, los materiales gruesos generalmente se eliminan antes de que la muestra se analice en busca de sólidos (Metcalf & Eddy, 2014).

El parámetro de sólidos suspendidos nos define qué cantidad de lodos será necesario eliminar en la PTAR (Trapote, 2016). Los sólidos en suspensión se pueden clasificar en volátiles y fijos.

“El material que puede volatilizarse y quemarse cuando es incinerado a  $500 \pm 50^{\circ}\text{C}$  se clasifica como volátil. En general, se supone que los sólidos volátiles (SV) son materia orgánica, aunque alguna materia orgánica no se quemará y algunos sólidos inorgánicos se descomponen a altas temperaturas. Los sólidos fijos (FS) comprenden el residuo que queda después de que se haya incinerado una muestra” (Metcalf & Eddy, 2014).

“Los resultados de las pruebas de sólidos suspendidos totales (SST) se utilizan de forma rutinaria para evaluar el rendimiento de los procesos de tratamiento convencionales y la necesidad de filtración de efluentes en aplicaciones de reutilización. La prueba de TSS es uno de los dos estándares de efluentes utilizados universalmente (junto con la DBO) mediante los cuales se juzga el desempeño de las plantas de tratamiento” (Metcalf & Eddy, 2014).

**3.3.2.4. DBO.** “La DBO a 5 días es el parámetro de contaminación orgánica más utilizado en aguas residuales y superficiales. Se determina midiendo el oxígeno disuelto que los microorganismos utilizan en la oxidación bioquímica de la materia orgánica” (Metcalf & Eddy, 2014).

“Para realizar este ensayo, se coloca una muestra de agua residual en una botella DBO de 300 ml, que se llena con agua de dilución saturada de oxígeno y nutrientes para el crecimiento biológico. La muestra se diluye adecuadamente y se preparan varias diluciones para cubrir todo el rango de valores posibles. Antes de tapar la botella, se mide la concentración de oxígeno en ella. La incubación se lleva a cabo durante cinco días a 20°C, y después se mide nuevamente la concentración de oxígeno disuelto” (Metcalf & Eddy, 2014).

“ $DBO_5$  se calcula dividiendo la diferencia de los valores de concentración de oxígeno disuelto en miligramos por litro por la fracción decimal de muestra utilizada. Este valor es conocido como la demanda bioquímica de oxígeno a 20°C en 5 días, y se utiliza para determinar la contaminación orgánica en aguas residuales” (Metcalf & Eddy, 2014).

“Entonces, la Demanda Bioquímica de Oxígeno indica la presencia de materia orgánica en el agua residual que puede ser biodegradable. Numéricamente refleja la cantidad de oxígeno que se necesita para proporcionar a los microorganismos aerobios y las reacciones químicas correspondientes del metabolismo microbiano” (Trapote, 2016).

**3.3.2.5. Demanda química de oxígeno.** “La DQO se refiere a la cantidad de oxígeno que es consumido por los compuestos reductores presentes en el agua residual, sin la intervención de organismos vivos. Se utilizan sustancias oxidantes como el dicromato o el permanganato potásico para llevar a cabo esta medición” (Trapote, 2016).

Es importante destacar que la DQO de un agua residual suele ser mayor que su  $DBO_5$ , debido a que hay una mayor cantidad de compuestos que pueden ser oxidados vía química que mediante procesos biológicos (Trapote, 2016).

Es importante destacar que la  $DBO_5$  no resulta ser un parámetro muy práctico para la gestión cotidiana de una PTAR por el tiempo que demora el ensayo. Por ello, resulta conveniente conocer la relación DQO/ $DBO_5$  y enfocarse en los valores de la DQO para el trabajo diario. Además, la relación entre la  $DBO_5$  y la DQO permitirá evaluar la magnitud de vertidos industriales presentes en el agua residual (Trapote, 2016).

**3.3.2.6. Oxígeno disuelto.** “La presencia de oxígeno disuelto (OD) es esencial para la respiración de los microorganismos aeróbicos y para todas las formas de vida aeróbica. No obstante, el oxígeno tiene una baja solubilidad en agua. La cantidad de oxígeno (y otros gases) que pueden disolverse en una solución está determinada por la solubilidad del gas, la presión parcial del gas en la atmósfera, la temperatura y la concentración de impurezas en el agua, como la salinidad y los sólidos en suspensión” (Metcalf & Eddy, 2014).

“Los niveles de oxígeno disuelto son más críticos en los meses de verano debido al aumento de la tasa de reacciones bioquímicas que utilizan oxígeno en respuesta al aumento de temperatura. Es deseable que las aguas residuales contengan OD, ya que esto previene la formación de olores nocivos” (Metcalf & Eddy, 2014).

**3.3.2.7. Cloro residual.** “El cloro residual es la cantidad de cloro en forma de HOCl y OCl<sup>-</sup>, que queda en el agua luego del proceso de desinfección” (Metcalf & Eddy, 2014).

**3.3.2.8. Aceites y grasas.** “Tanto el aceite como la grasa son químicamente muy similares, ya que ambos son compuestos llamados ésteres, formados por la combinación de alcohol o glicerol (glicerina) con ácidos grasos. Los glicéridos de ácidos grasos que son líquidos a temperatura ambiente se llaman aceites, mientras que los que son sólidos se conocen como grasas” (Metcalf & Eddy, 2014).

En caso de no eliminar la grasa previamente a la descarga de las aguas residuales tratadas, ésta puede ocasionar interferencias en la vida biológica presente en las aguas superficiales, además de crear capas antiestéticas (Metcalf & Eddy, 2014).

Las partículas de los aceites interfieren en la acción biológica y generan problemas de mantenimiento de las unidades de tratamiento (Metcalf & Eddy, 2014).

**3.3.2.9. Coliformes termotolerantes.** “Los coliformes termotolerantes son un subgrupo de los coliformes totales que incluyen a aquellos que son capaces de crecer a temperaturas más altas. La presencia de coliformes termotolerantes en el agua es un indicador

más específico de la contaminación fecal y, por lo tanto, es un indicador más confiable de la posible presencia de patógenos intestinales en el agua” (Trapote, 2016).

**3.3.2.10. Huevos de helmintos.** “Un grupo de gusanos parásitos; en todo el mundo, los helmintos son uno de los principales agentes causantes de enfermedades humanas. Los helmintos y los huevos de helmintos (huevos) se encuentran cada vez más en las aguas residuales municipales no tratadas” (Metcalf & Eddy, 2014).

### **3.3.3. Esquema general de una PTAR biológica**

Una PTAR está compuesta por una serie de operaciones y procesos unitarios diseñados para reducir los contaminantes presentes en el agua residual a niveles aceptables, los cuales conforman la línea de agua (Trapote, 2016).

“Además, en una PTAR también es necesario tratar y acondicionar los lodos generados durante el proceso de depuración del agua residual. El conjunto de procesos utilizados para tratar los lodos se conoce como la línea de lodos” (Trapote, 2016).

### **3.3.4. Pretratamiento**

Antes de someterse al tratamiento adecuado, las aguas residuales deben pasar por un proceso previo de tratamiento (también conocido como tratamiento preliminar) que implica una serie de operaciones físicas y mecánicas para separar la mayor cantidad posible de materiales que podrían perturbar los tratamientos posteriores o causar problemas en el funcionamiento de los equipos e instalaciones de la PTAR (Trapote, 2016).

“A través del pretratamiento se eliminan los elementos más visibles y molestos de la contaminación (tales como sólidos de grandes y medianas dimensiones, arenas, grasas, aceites, detergentes, etc.), dejando residuos de volumen moderado que pueden ser almacenados y manipulados sin problemas. Dependiendo de la calidad y la importancia del agua bruta a tratar, así como del sistema de tratamiento de lodos utilizado, una PTAR puede incluir una o varias operaciones de pretratamiento” (Trapote, 2016):

**3.3.4.1. Desbaste.** “Para proteger la PTAR de obstrucciones en las conducciones y unidades posteriores de la instalación, se utiliza el desbaste, el cual implica el uso de rejas, mallas o cribas. El objetivo es evitar que objetos grandes lleguen a la instalación y causen problemas. Es importante contar con rejas de desbaste en plantas de tratamiento, ya que permiten retirar las impurezas del agua y disponer de ellas mediante eliminación directa, compactación o incineración en vertederos de residuos sólidos” (Trapote, 2016).

Los tipos de desbaste se pueden clasificar de diferentes maneras (Trapote, 2016):

- “Según la separación entre los barrotes de la reja: desbaste fino, medio y grueso” (Trapote, 2016).
- “Según la inclinación de la reja rejas horizontales, verticales e inclinadas” (Trapote, 2016).
- Según el método de limpieza de las rejas (Trapote, 2016):
  - “Rejas de limpieza manual: se utilizan en pequeñas instalaciones o como protección de elevaciones (bombas o tornillos) cuando se realiza un predesbaste. Una de sus principales desventajas es que pueden provocar problemas de atascamiento. Las rejas manuales están compuestas por barrotes rectos normalmente inclinados con ángulos de 60-80° respecto a la horizontal. La limpieza se realiza periódicamente mediante rastrillos que depositan los objetos rastrillados sobre una placa perforada situada sobre el canal para su escurrido. La longitud de la reja no debe exceder de lo que pueda rastrillarse fácilmente a mano” (Trapote, 2016).
  - “Las rejas de limpieza mecánica son una solución eficaz para prevenir obstrucciones y reducir el tiempo de mantenimiento. El mecanismo más comúnmente empleado es un peine móvil que barre periódicamente la reja, extrayendo los sólidos retenidos para su evacuación. Dependiendo de su construcción, la limpieza puede realizarse por la cara anterior (en sentido de la

corriente) o por la posterior (a contra-corriente), aunque estas últimas se utilizan menos. En cuanto a su diseño, existen dos tipos de rejillas mecánicas: rectas y curvas. Las rejillas rectas, tanto de limpieza frontal como de limpieza posterior, presentan numerosas variantes en su construcción y diseño debido principalmente al sistema de limpieza utilizado, como cables con rastrillo, cables con garfio, cadenas de cremallera, tornillos, entre otros. Estas se utilizan generalmente en instalaciones importantes y para grandes profundidades, habiendo incluso rejillas que pueden trabajar en canales de hasta 10 m de profundidad. Por otro lado, las rejillas curvas son de limpieza frontal y consisten en uno o dos peines montados en el extremo de un brazo que gira alrededor de un eje horizontal. Son apropiadas para instalarse en canales poco profundos, entre 0,4 y 2 m aproximadamente” (Trapote, 2016).

**3.3.4.2. Desarenado.** “El objetivo del proceso de desarenado es separar las materias pesadas en suspensión con una granulometría superior a 200  $\mu\text{m}$  (como arenas, arcillas y limos), y una densidad media de 2,65 t/m<sup>3</sup>, que se encuentran en el agua residual y que pueden afectar negativamente el tratamiento posterior. Estos sólidos pueden causar sobrecargas en los lodos, sedimentos en canales y tuberías, abrasión en rodetes de bombas y otros equipos, y disminución de la capacidad hidráulica” (Trapote, 2016).

“Aunque el proceso está diseñado específicamente para eliminar las arenas (que incluyen las gravas y partículas minerales), también se pueden eliminar otros elementos orgánicos no putrescibles, como granos de café, semillas, huesos, cáscaras de frutas y huevos, entre otros. Para una mayor eficacia, es conveniente situar los desarenadores aguas arriba de los equipos mecánicos” (Trapote, 2016).

**3.3.4.3. Desengrasado.** “La operación de desengrasado tiene por objeto eliminar las grasas, aceites, espumas y demás materias flotantes más ligeras que el agua, cuya presencia en el agua residual podría distorsionar” (Trapote, 2016).

“El objetivo de los procesos de tratamiento posteriores es eliminar las grasas presentes en las aguas residuales, cuyas cantidades pueden variar considerablemente, pero que para aguas urbanas se sitúan alrededor de 24 g/hab/día, o el 28% de los sólidos en suspensión. Para ello, se realiza un proceso de desengrasado que consiste en insuflar aire para desemulsionar las grasas y conseguir que floten mejor. Aunque teóricamente el desengrasado podría realizarse en los decantadores primarios, estos no suelen ser suficientes cuando el volumen de grasas es importante” (Trapote, 2016).

“En aguas urbanas de origen doméstico, el desengrasado es conveniente e indispensable cuando no existe decantación primaria, y puede efectuarse en combinación con el desarenado o de forma separada. En medianas y grandes depuradoras, lo más habitual es realizar el desengrasado de forma combinada con el desarenado en el mismo recinto aireado, donde se crea una zona de flotación de grasas para acumularlas en la superficie y evacuarlas por vertedero, barrido superficial o medios mecánicos” (Trapote, 2016).

“Los desengrasadores separados son aconsejables cuando se requiere una mayor calidad del agua. También se utilizan en el pretratamiento de aguas residuales de algunas industrias (mataderos, industrias cárnicas, etc.) antes de verterlas al alcantarillado. Las grasas y espumas son en su mayoría residuos orgánicos, pero no se recomienda tratarlas junto con los lodos en la digestión anaerobia, ya que esto puede favorecer la formación de costras en el digestor” (Trapote, 2016).

### **3.3.5. Tratamiento secundario**

Las sustancias orgánicas presentes en los vertidos consisten en combinaciones de carbono con otros elementos. Sin embargo, en el agua residual, estas sustancias no suelen ser combinaciones químicamente puras, sino residuos complejos derivados de los procesos metabólicos de humanos y mamíferos en general. Entre estas sustancias, la urea ( $\text{CO}(\text{NH})_2$ ) y la albúmina (una proteína soluble en agua) son especialmente relevantes, ya que además

del carbono contienen nitrógeno, hidrógeno y oxígeno. La albúmina también contiene azufre, que puede causar corrosión (Trapote, 2016).

“La mayoría de las sustancias presentes en el agua residual son muy inestables y se descomponen rápidamente” (Trapote, 2016). Solo una pequeña parte de las transformaciones de estas sustancias son puramente químicas, como las reacciones de ácidos y bases que forman sales. Sin embargo, en el proceso de depuración, los procesos químicos son importantes. Como se explicó en el tema anterior, al agregar un coagulante al agua, se pueden capturar las partículas finas en suspensión (coloides) y decantarlas junto con las sustancias sedimentables.

Además de estos procesos químicos, la mayoría de los procesos en la depuración del agua residual están relacionados con procesos biológicos. La clave fundamental para una buena depuración biológica radica en el control adecuado del desarrollo y la actividad de los microorganismos, como plantas, animales, hongos y bacterias, que participan en el proceso, ya sean microorganismos aeróbicos, anaeróbicos o facultativos (Trapote, 2016).

“Los hongos y bacterias son responsables de la descomposición de la materia orgánica y son elementos esenciales para garantizar la continuidad de la vida al mantener los ciclos vitales del carbono y el nitrógeno” (Trapote, 2016).

“Los procesos biológicos que ocurren debido a la actividad de los microorganismos se conocen como metabolismo. Según su metabolismo, los microorganismos pueden ser clasificados como aerobios, anaerobios y facultativos” (Trapote, 2016).

Los microorganismos aerobios se caracterizan por captar directamente el oxígeno disuelto en el agua residual. El oxígeno molecular actúa como el aceptor final de electrones en su metabolismo. Estos microorganismos tienen una eficiencia más alta en la transferencia de materia orgánica a biomasa, lo que resulta en una velocidad de crecimiento más rápida. Constituyen aproximadamente entre el 60% y el 66% de los microorganismos presentes en el agua residual (Trapote, 2016).

Los microorganismos anaerobios obtienen el oxígeno a través de la descomposición de la materia orgánica compuesta por tres o más elementos (C, H, O, N, S, P, K). Utilizan compuestos inorgánicos como aceptores de electrones en su metabolismo. Su metabolismo es fermentativo, lo que significa que es menos eficiente energéticamente y tienen una tasa de reproducción más baja. Representan alrededor del 10% al 25% de los microorganismos en el agua residual (Trapote, 2016).

“Los microorganismos facultativos pueden adaptarse a condiciones tanto aerobias como anaerobias, dependiendo de la presencia o ausencia de oxígeno disuelto en el agua. Pueden ser facultativos puros, cambiando su metabolismo de fermentativo a respiratorio según la disponibilidad de oxígeno, o aerotolerantes, que siguen siendo fermentativos, pero no se ven afectados por la presencia de oxígeno. Representan aproximadamente entre el 9% y el 30% de los microorganismos en el agua residual” (Metcalf & Eddy, 2014).

**3.3.5.1. Conceptos entorno al tratamiento secundario.** A continuación, se describen conceptos importantes entorno al tratamiento secundario (Trapote, 2016):

“Procesos aerobios: Son los procesos de tratamiento biológico que ocurren en presencia de oxígeno. Las bacterias que solo pueden sobrevivir en presencia de oxígeno disuelto se denominan aerobias” (Trapote, 2016).

“Procesos anaerobios: Son los procesos de tratamiento biológico que ocurren en ausencia de oxígeno. Las bacterias que pueden sobrevivir únicamente en ausencia de oxígeno disuelto se llaman anaerobias” (Trapote, 2016).

“Procesos facultativos: Son los procesos de tratamiento biológico en los cuales los organismos responsables pueden adaptarse tanto a la presencia como a la ausencia de oxígeno disuelto. A estos microorganismos se les conoce como facultativos” (Trapote, 2016).

“Desnitrificación anóxica o anaerobia: Es el proceso mediante el cual el nitrógeno presente en los nitratos se transforma biológicamente en nitrógeno gaseoso en ausencia de oxígeno” (Trapote, 2016).

“Microaerófilos: Son un grupo de microorganismos que crecen mejor en presencia de bajas concentraciones de oxígeno” (Trapote, 2016).

“Eliminación de la DBO carbonosa: Es la conversión biológica de la materia orgánica carbonosa presente en el agua residual en tejido celular y diversos productos gaseosos. Durante esta conversión, se supone que el nitrógeno presente en los diferentes compuestos se convierte en amoníaco” (Trapote, 2016).

“Nitrificación: Es el proceso biológico de dos etapas mediante el cual el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) o el ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) se transforma primero en nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y luego en nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )” (Trapote, 2016).

“Desnitrificación: Es el proceso biológico mediante el cual el nitrato se convierte en gas nitrógeno y otros productos gaseosos” (Trapote, 2016).

“Estabilización: Es el proceso biológico mediante el cual la materia orgánica presente en los lodos producidos en la decantación primaria y en el tratamiento biológico del agua residual se estabiliza, generalmente a través de la conversión en gases y tejido celular. Dependiendo de si la estabilización se lleva a cabo en condiciones aerobias o anaerobias, el proceso se conoce como digestión aerobia o anaerobia” (Trapote, 2016).

“Sustrato: Es el término utilizado para referirse a la materia orgánica o a los nutrientes que experimentan una conversión o que pueden ser un factor limitante en el tratamiento biológico. Por ejemplo, la materia orgánica carbonosa presente en el agua residual es el sustrato que se somete a conversión en el tratamiento biológico” (Trapote, 2016).

“Procesos de cultivo en suspensión: Son procesos de tratamiento biológico en los cuales los microorganismos responsables de la conversión de la materia orgánica u otros componentes del agua residual en gases y tejido celular se mantienen en suspensión dentro del líquido” (Trapote, 2016).

“Procesos de cultivo fijo: Son procesos de tratamiento biológico en los cuales los microorganismos responsables de la conversión de la materia orgánica u otros componentes

del agua residual en gases y tejido celular se adhieren a un medio inerte (como piedras, escorias o materiales cerámicos y plásticos especialmente diseñados). Estos procesos también se conocen como procesos de bio-película o procesos de película fija” (Trapote, 2016).

**3.3.5.2. Objetivos del tratamiento secundario.** Los objetivos del tratamiento secundario de las aguas residuales son los siguientes (Trapote, 2016):

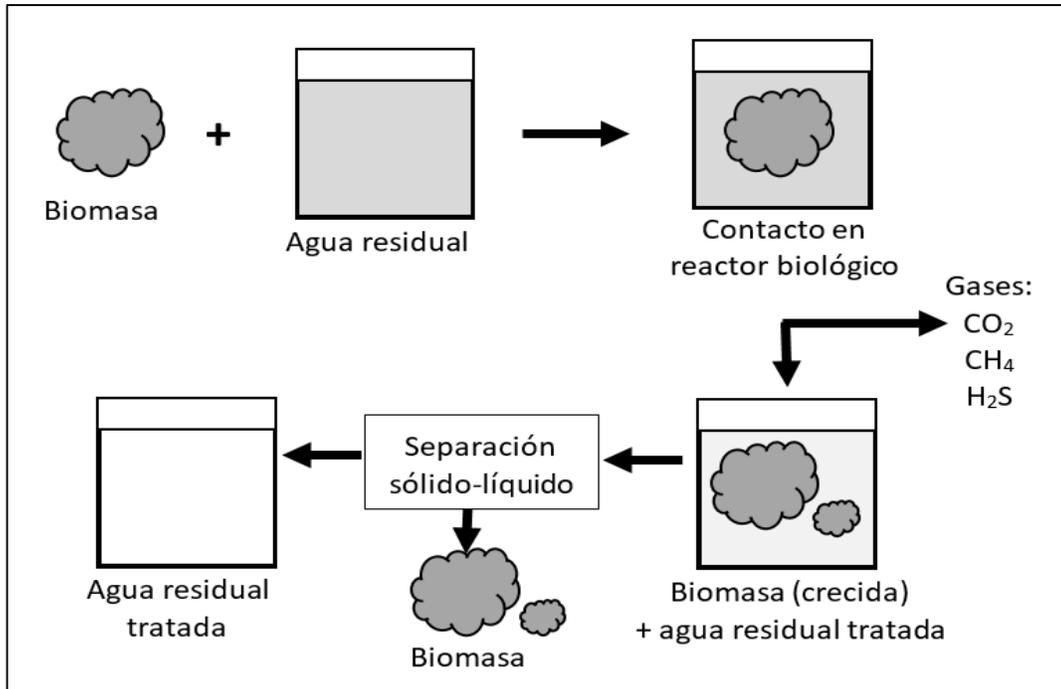
Transformación o estabilización de la materia orgánica: El tratamiento secundario busca descomponer y estabilizar la materia orgánica presente en el agua residual. Mediante procesos biológicos, se promueve la degradación de los compuestos orgánicos para convertirlos en formas más estables, como gases y tejido celular. Esto contribuye a reducir la carga orgánica y disminuir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) (Trapote, 2016).

“Coagulación y eliminación de sólidos coloidales no sedimentables: Durante el tratamiento secundario, también se busca la eliminación de sólidos coloidales que no sedimentan fácilmente. Estos sólidos, como partículas finas y coloides, pueden mantenerse en suspensión en el agua residual. El proceso de coagulación ayuda a aglutinar estas partículas en formas más grandes, permitiendo su posterior eliminación mediante sedimentación o filtración” (Metcalf & Eddy, 2014).

Debido a que estos procesos se basan principalmente en mecanismos biológicos, el tratamiento secundario es comúnmente conocido como tratamiento biológico o depuración biológica. En el caso específico del agua residual urbana, el objetivo principal es reducir la carga orgánica y, en muchos casos, también eliminar los nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, que pueden causar problemas ambientales si se liberan en exceso en cuerpos de agua receptores (Metcalf & Eddy, 2014).

**Figura 7**

*Esquema de un proceso biológico.*

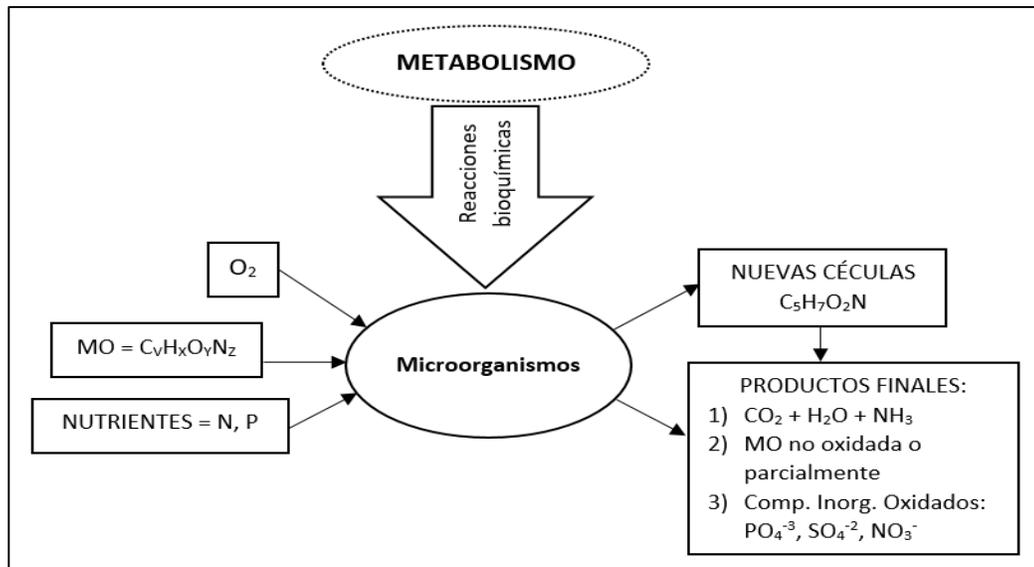


*Nota:* Fuente (Trapote, 2016, pág. 199).

**3.3.5.3. Mecanismo de la depuración biológica aerobia.** “La conversión de materia orgánica en productos gaseosos finales y tejido celular puede ocurrir a través de diferentes vías metabólicas, como la aerobia, anaerobia o facultativa, utilizando sistemas de cultivo en suspensión o sistemas de cultivo fijo. En la depuración biológica aerobia, también conocida como oxidación biológica, esta conversión de la materia orgánica se lleva a cabo en presencia de oxígeno y nutrientes, siguiendo el esquema representado en la siguiente figura” (Trapote, 2016).

**Figura 8**

*Esquema de funcionamiento del metabolismo.*



Nota: Fuente (Trapote, 2016, pág. 200).

“En este proceso, una fracción de la materia orgánica se oxida a través del metabolismo, que son las actividades bioquímicas realizadas por las células de los microorganismos. Esta oxidación genera productos finales y proporciona la energía necesaria para la síntesis de nuevo tejido celular. En ausencia de materia orgánica, el tejido celular existente se utiliza internamente, es decir, los microorganismos se oxidan a sí mismos, utilizando moléculas del interior de la célula para obtener la energía necesaria para su mantenimiento. Esto da lugar a la producción de productos gaseosos finales y materia residual” (Trapote, 2016).

“Como resultado de esta endogénesis, o respiración endógena, el metabolismo se ralentiza y, por lo tanto, se reduce el consumo de oxígeno” (Trapote, 2016).

El metabolismo se puede dividir en dos fases principales: anabolismo y catabolismo.

“El anabolismo se refiere al conjunto de procesos metabólicos que resultan en la síntesis de componentes orgánicos celulares necesarios para el crecimiento y la reproducción.

Durante esta fase, se forman polímeros simples a partir de sustratos y se requiere energía para llevar a cabo estas síntesis” (Trapote, 2016).

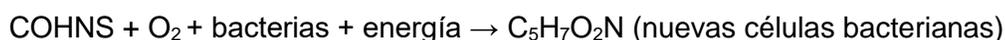
“Por otro lado, el catabolismo se refiere a una serie de reacciones bioquímicas que transforman la materia viva en desechos o residuos. En primer lugar, la materia orgánica debe ingresar a la célula a través de la membrana citoplasmática. Si la materia orgánica se encuentra en forma disuelta, puede ingresar directamente; sin embargo, si está en forma de partículas o grandes moléculas en suspensión o coloidal, estas deben reducirse de tamaño y ser hidrolizadas por exoenzimas producidas por la propia célula. Una vez que el sustrato, o materia orgánica asimilable, ingresa al interior de la célula, puede ser oxidado y utilizado para obtener energía” (Trapote, 2016).

En resumen, el anabolismo se encarga de la síntesis de componentes celulares necesarios para el crecimiento y la reproducción, mientras que el catabolismo transforma la materia orgánica en desechos y libera energía en el proceso (Trapote, 2016).

Las principales reacciones bioquímicas que ocurren en el proceso metabólico son (Trapote, 2016):

- Reacciones de síntesis (asimilación).

Se refiere a la conversión de la materia orgánica presente en las aguas residuales (COHNS) en nuevos componentes celulares ( $C_5H_7O_2N$ ), lo que resulta en un aumento de la masa de microorganismos o biomasa (Trapote, 2016).



“Durante este proceso, una parte de la materia orgánica presente en forma disuelta puede atravesar directamente la membrana celular de los microorganismos, mientras que otra fracción más compleja requiere un tratamiento previo de hidrólisis. En este tratamiento, las bacterias segregan exoenzimas que ayudan a descomponer las moléculas orgánicas complejas en componentes más simples y fácilmente utilizables. De esta manera, la materia

orgánica se descompone y se convierte en nutrientes que los microorganismos pueden utilizar para su crecimiento y reproducción” (Trapote, 2016).

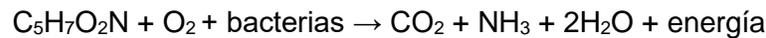
- Reacciones de oxidación (desasimilación).

“En estas reacciones, una fracción de la materia orgánica es oxidada, lo que resulta en la producción de productos finales, liberando la energía necesaria para la síntesis de nuevo tejido celular. El proceso puede representarse de la siguiente manera” (Trapote, 2016):



- Respiración endógena (auto-oxidación).

“Cuando no hay disponibilidad de materia orgánica externa, las células utilizan su propio tejido celular como fuente de energía, lo que da como resultado la producción de compuestos gaseosos finales y la generación de energía para el mantenimiento celular. La reacción se representa de la siguiente manera” (Trapote, 2016):



A través de fórmulas químicas es posible representar las reacciones bioquímicas que se dan en las aguas. Se tiene que el agua residual es representada por la fórmula:  $\text{C}_{10}\text{H}_{19}\text{O}_3\text{N}$  o de forma más simple:  $\text{CH}_2\text{O}$  (agua residual doméstica) y la biomasa por la siguiente fórmula:  $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$  (si se incluye el fósforo, que representa un 2% de la biomasa, la fórmula pasa a:  $\text{C}_{66}\text{H}_{124}\text{O}_{26}\text{N}_{13}\text{P}$ ), se tiene que (Trapote, 2016):

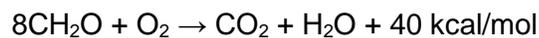
La síntesis de heterótrofos se representa:



Sustrato

Biomasa

La reacción de producción de energía, consumiendo el sustrato, se representa:



La reacción de degradación de la biomasa se representa:



La temperatura y la presión son factores que pueden influir en las reacciones bioquímicas que ocurren en el metabolismo y, por ende, en las células vivas. Estas reacciones son posibles gracias a la presencia de enzimas, que actúan como catalizadores orgánicos. Las enzimas juegan un papel fundamental al permitir y facilitar estas reacciones bioquímicas que forman parte de los procesos metabólicos. “En el contexto de la depuración biológica, el correcto funcionamiento y actividad de las enzimas son esenciales para el desarrollo normal de los procesos metabólicos en las células. En resumen, se puede afirmar que el adecuado desempeño de las enzimas en el metabolismo celular es crucial para un funcionamiento óptimo de la depuración biológica y otros procesos metabólicos” (Trapote, 2016).

“La depuración biológica aerobia de las aguas residuales se lleva a cabo en varias etapas. En la primera fase, se fomenta el crecimiento de bacterias que forman una biomasa que puede reunirse en flóculos o películas, dependiendo del sistema utilizado. Estas bacterias retienen la contaminación orgánica a través de procesos físicos o físico-químicos y se alimentan de ella mediante procesos químicos y biológicos. En una segunda fase, conocida como decantación o clarificación secundaria, los lodos producidos se separan por sedimentación. Este proceso se basa principalmente en mecanismos físicos, donde los lodos más pesados se asientan en el fondo del tanque o reactor, mientras que el agua clarificada se recoge en la parte superior” (Trapote, 2016).

**3.3.5.4. Proceso de lodos activados.** “El sistema de lodos activados se basa en el principio de que el agua residual, una vez desprovista de sus sólidos sedimentables y sometida a la inyección o mezcla de aire finamente dividido durante un período de tiempo, tiene la capacidad de coagular las partículas en suspensión que, por sí solas, no pueden sedimentar. Esta coagulación es lo que permite su posterior sedimentación” (Trapote, 2016).

“El proceso implica inducir el crecimiento de una comunidad bacteriana llamada lodos activados, que se dispersa en forma de flóculos en un tanque de aireación o biorreactor agitado y aireado. Este tanque se alimenta con el agua a depurar, también conocida como

afluente. Dentro del tanque de aireación, los microorganismos presentes en los flóculos de lodos activados se encargan de degradar la materia orgánica y los contaminantes presentes en el agua residual, utilizando el oxígeno disuelto suministrado por la inyección de aire” (Trapote, 2016). Esta actividad bacteriana conduce a la formación de flóculos más grandes y densos, que son capaces de retener las partículas en suspensión y los contaminantes en el agua (Trapote, 2016).

“Posteriormente, el agua tratada pasa a través de un proceso de decantación secundaria, donde los flóculos de lodos activados y las partículas atrapadas se sedimentan, y el agua clarificada se separa y se retira para su posterior tratamiento o descarga. Los lodos sedimentados se recirculan al tanque de aireación para mantener la población bacteriana activa y continuar con el proceso de depuración” (Trapote, 2016).

“Fundamentalmente, el proceso de lodos activados se compone de dos operaciones distintas” (Trapote, 2016):

- Oxidación biológica:

“La oxidación biológica ocurre en el reactor biológico, donde se fomenta el desarrollo de un cultivo microbiano formado por una gran cantidad de microorganismos agrupados en flóculos. La población bacteriana se mantiene en un nivel o concentración específica de sólidos en suspensión en el licor mezcla (SSLM o MLSS) para lograr un equilibrio entre la carga orgánica a eliminar y la cantidad de microorganismos presentes en el reactor. El agua residual a depurar se introduce en el reactor biológico” (Trapote, 2016).

El proceso de lodos activados requiere de un sistema de aireación y agitación que cumple las siguientes funciones (Trapote, 2016):

- “Proporciona el oxígeno necesario para el metabolismo de las bacterias aeróbicas encargadas de la depuración” (Trapote, 2016).
- “Evita la sedimentación de los flóculos en el reactor, manteniéndolos en suspensión” (Trapote, 2016).

➤ “Permite la homogeneización de los lodos activados, asegurando una distribución uniforme de los microorganismos y la materia orgánica en el reactor” (Trapote, 2016).

- Separación sólido-líquido:

“Una vez que la materia orgánica ha sido suficientemente oxidada, lo cual requiere un tiempo de contacto adecuado, el licor mezcla se dirige hacia el decantador o clarificador secundario. En este paso, se produce la separación entre el agua depurada y los lodos floculados” (Trapote, 2016).

“Un porcentaje de los lodos floculados se recirculan (Return Activated Sludge, RAS) de vuelta al reactor biológico para mantener una concentración adecuada de bacterias. El exceso de lodos activados (Waste Activated Sludge, WAS) se extrae del sistema y se envía al tratamiento de lodos” (Trapote, 2016).

“En resumen, el proceso de lodos activados se basa en la oxidación biológica llevada a cabo por una población bacteriana en el reactor biológico, donde se suministra aire y se agita para mantener los microorganismos en suspensión” (Trapote, 2016). Después de la oxidación, el agua tratada se separa de los lodos en el clarificador secundario, y los lodos recirculan para mantener la actividad bacteriana en el reactor. El exceso de lodos se retira y se gestiona en el tratamiento de lodos.

### **3.3.6. Tratamiento de lodos**

“En el tratamiento de aguas residuales se generan subproductos conocidos como lodos, los cuales contienen la contaminación eliminada durante las diferentes etapas del proceso. El tratamiento y disposición de estos lodos pueden presentar desafíos en algunas ocasiones” (Trapote, 2016).

“Los lodos son residuos líquidos de escaso o nulo valor. Algunos de ellos son químicamente inertes, mientras que los provenientes de tratamientos biológicos son

fermentables o putrescibles. Estos últimos pueden ser reutilizados en determinadas aplicaciones” (Trapote, 2016).

Tanto para su reutilización como para su disposición final, todos los lodos requieren de un tratamiento que reduzca su capacidad de fermentación, disminuya su volumen y les proporcione una textura adecuada para su manipulación. “Este tratamiento se compone de uno o varios procesos combinados, formando lo que se conoce como línea de lodos de la PTAR” (Trapote, 2016).

En las PTAR de tipo biológico, la generación de lodos ocurre en dos procesos distintos (Trapote, 2016):

- “Lodos primarios: Las partículas sólidas más grandes presentes en el agua residual se depositan en el fondo del decantador primario, formando los lodos primarios. Estas partículas son de mayor tamaño y se sedimentan debido a su peso” (Trapote, 2016).
- “Lodos secundarios o biológicos: Las partículas más finas y disueltas en el agua residual se adhieren y son metabolizadas por las bacterias presentes en el sistema durante la etapa de aireación. Estas bacterias se multiplican en presencia de oxígeno y forman una biomasa bacteriana. En el decantador secundario, esta biomasa se separa como lodos secundarios o biológicos. En los sistemas de lodos activados, parte de los lodos secundarios se recircula al tanque de aireación (recirculación de lodos o return activated sludge, RAS) para mantener la concentración adecuada de bacterias en el proceso. El exceso de lodos secundarios que no se recircula, se extrae del decantador secundario como lodos en exceso (waste activated sludge, WAS)” (Metcalf & Eddy, 2014).

En el caso de los sistemas de lechos bacterianos, el lodo recolectado en el decantador secundario se denomina humus. Por otro lado, los lodos primarios y secundarios se pueden mezclar, dando lugar a los lodos mixtos (Trapote, 2016).

Estos lodos generados en las PTAR requieren de tratamientos adicionales para su estabilización, reducción de volumen y disposición adecuada, como parte de la gestión integral de los residuos generados durante el proceso de tratamiento de aguas residuales (Trapote, 2016).

Los lodos generados durante el tratamiento primario y secundario contienen una elevada proporción de agua, aproximadamente entre el 95% y el 97%, lo cual resulta en una ocupación significativa de espacio. Además, estos lodos son susceptibles de descomponerse y pueden contener agentes patógenos, por lo que es necesario someterlos a un tratamiento previo antes de su vertido o eliminación definitiva (Trapote, 2016).

El tratamiento de los lodos tiene los siguientes objetivos (Trapote, 2016):

- “Reducción de volumen, con el fin de disminuir el tamaño de las instalaciones y unidades de proceso” (Trapote, 2016).
- “Estabilización, para prevenir problemas de fermentación y descomposición” (Trapote, 2016).
- “Obtener una textura adecuada para que puedan ser manipulados y transportados fácilmente” (Trapote, 2016).

**3.3.6.1. Espesamiento.** “Antes de proceder a la eliminación o estabilización de los lodos separados del agua residual, resulta conveniente y rentable realizar un proceso de espesamiento de los lodos extraídos de los decantadores. El espesamiento de los lodos tiene múltiples beneficios” (Trapote, 2016):

Concentración de los lodos antes de su transporte o digestión: Al espesar los lodos, se reduce significativamente el volumen que debe ser transportado o tratado, lo cual conlleva ahorros en términos de equipos y digestores. Por ejemplo, los lodos activados en exceso, que normalmente contienen un 0,8% de sólidos, pueden espesarse hasta alcanzar un contenido de sólidos del 4%, lo que reduce el volumen de lodos a una quinta parte del volumen original (Trapote, 2016).

Mezcla y homogeneización de los lodos de diferentes decantadores: Esto es especialmente importante en plantas con más de un decantador primario, ya que el espesamiento permite combinar y homogeneizar los lodos provenientes de distintos decantadores (Trapote, 2016).

Mejora en el rendimiento de los dispositivos de deshidratación: Al espesar los lodos, se facilita el proceso de deshidratación posterior, mejorando la eficiencia de los equipos utilizados para este fin (Trapote, 2016).

“En las plantas de tratamiento de aguas residuales con tratamiento secundario y recirculación de lodos, es posible enviar directamente el exceso de lodos sedimentados en la decantación secundaria a los espesadores o a los decantadores primarios. En ambos casos, se logra obtener una mezcla con los lodos extraídos de la decantación primaria, lo que proporciona un caudal homogéneo y con la concentración adecuada para su posterior digestión” (Trapote, 2016).

Un inconveniente del espesamiento, particularmente en el caso de lodos orgánicos, es que puede generar malos olores o tener un aspecto poco agradable. Sin embargo, estos olores pueden ser controlados fácilmente mediante el uso de cal durante la puesta en marcha de los digestores anaeróbicos, o mediante la cobertura de los tanques y la implementación de sistemas de tratamiento del aire viciado, como la creación de depresiones en el área y su posterior tratamiento (Trapote, 2016).

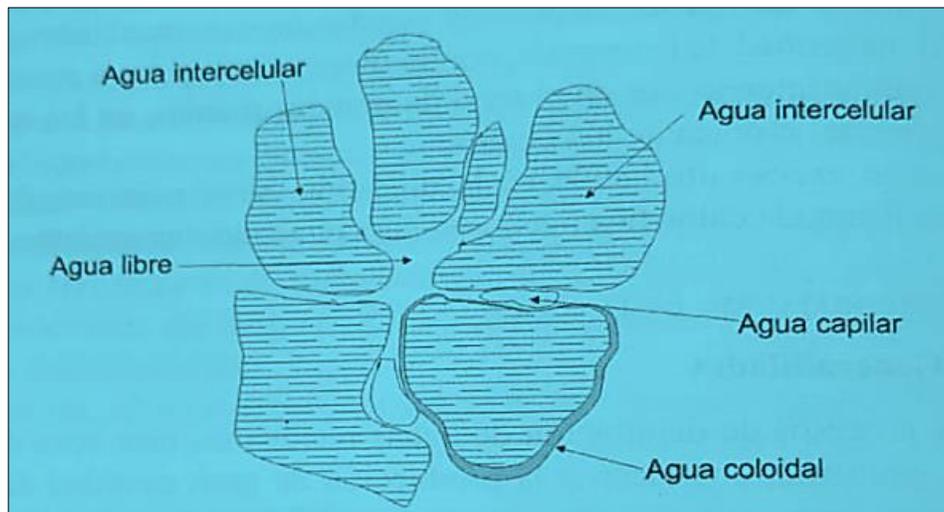
**3.3.6.2. Deshidratación.** La deshidratación es una operación física que se emplea para reducir el contenido de agua de los lodos y, por ende, disminuir su volumen, por una o varias de las siguientes razones (Trapote, 2016).

- “La deshidratación reduce el volumen de los lodos, lo que disminuye significativamente los costos de transporte hasta su lugar final de disposición” (Trapote, 2016).

- “Los lodos deshidratados son más fáciles de manejar en comparación con los lodos espesados o líquidos, lo que facilita su manipulación y almacenamiento” (Trapote, 2016).
- “La deshidratación es generalmente necesaria antes de la incineración de los lodos para aumentar su poder calorífico, lo que mejora la eficiencia del proceso de incineración” (Trapote, 2016).
- “En el caso de lodos estabilizados mediante procesos que generan líquidos residuales para recirculación, es necesario eliminar el exceso de humedad para que los lodos sean inodoros y no se descompongan” (Trapote, 2016).
- “La deshidratación del lodo es esencial antes de su disposición en vertederos controlados para reducir la producción de lixiviados en el área del vertedero, minimizando así los impactos ambientales asociados” (Trapote, 2016).

### Figura 9

*Formas en las que está presente el agua en los lodos.*



*Nota: fuente (Trapote, 2016).*

La deshidratación implica separar el agua de los sólidos. Independientemente del diseño de la PTAR, es necesario concentrar los lodos mediante deshidratación para aumentar

al máximo el contenido de materia seca y reducir su volumen de manera significativa (Trapote, 2016).

“El agua libre presente en el lodo puede separarse por gravedad, ya que no está asociada a los sólidos. Sin embargo, para eliminar el agua coloidal y capilar, se requiere un acondicionamiento químico previo antes de utilizar métodos mecánicos. Para eliminar el agua intercelular, es necesario romper la estructura que la contiene mediante tratamientos térmicos” (Trapote, 2016).

**3.3.6.3. Secado térmico.** “El secado de lodos es un proceso en el cual se reduce el contenido de agua mediante la evaporación de esta hacia el aire. En los lechos de secado convencionales, la evaporación ocurre naturalmente debido a la diferencia en las presiones de vapor entre el lodo y la atmósfera. En los equipos de secado mecánico, se aplica calor adicional para aumentar la capacidad del aire ambiente para retener vapor y suministrar el calor necesario para la evaporación” (Metcalf & Eddy, 2014).

“El objetivo del secado térmico es eliminar la humedad del lodo líquido, permitiendo así su incineración eficiente o su procesamiento para su transformación en fertilizante. El secado es necesario en la fabricación de fertilizantes para poder triturar el lodo, reducir su peso y evitar la continuación de la actividad biológica. El contenido de humedad del lodo seco es inferior al 10%” (Metcalf & Eddy, 2014).

El secado térmico permite obtener un lodo deshidratado con un contenido de humedad reducido, lo cual facilita su manipulación, transporte y tratamiento posterior. Además, al reducir el contenido de agua, se disminuye el volumen del lodo, lo que resulta en ahorros en los costos de transporte y almacenamiento (Metcalf & Eddy, 2014).

Es importante tener en cuenta que el secado del lodo requiere un suministro de calor controlado y eficiente para evitar la degradación de los componentes orgánicos presentes y minimizar la emisión de olores. Asimismo, es necesario garantizar la gestión adecuada de los subproductos y gases generados durante el proceso de secado (Metcalf & Eddy, 2014).

En resumen, el secado del lodo es un paso fundamental para poder aprovechar de manera eficiente los residuos de aguas residuales, ya sea mediante su incineración o su transformación en fertilizantes. Este proceso permite reducir la humedad del lodo y prepararlo para su posterior tratamiento o disposición fina (Metcalf & Eddy, 2014).

### **3.3.7. Desinfección**

“La desinfección del agua residual tiene como objetivo inactivar o destruir de manera selectiva los microorganismos patógenos responsables de enfermedades transmitidas por el agua, como bacterias (tifus, cólera, disentería, entre otras), virus (poliomielitis y hepatitis) y quistes amebianos. Es importante destacar que la desinfección no es lo mismo que la esterilización, ya que esta última implica la destrucción total de los microorganismos, mientras que la desinfección elimina solo una parte de ellos” (Trapote, 2016).

“En general, existen diversos métodos de desinfección que se pueden agrupar en agentes químicos (como el cloro y sus compuestos, como el dióxido de cloro:  $\text{ClO}_2$ , ozono, bromo, yodo, fenol, alcoholes, agua oxigenada, entre otros), agentes físicos (como la luz ultravioleta, luz solar, calor, entre otros), medios mecánicos (tamices, filtros, entre otros) y radiación (electromagnética, acústica, entre otros). A continuación, analizaremos los métodos más utilizados en la desinfección de efluentes depurados” (Metcalf & Eddy, 2014):

- “Desinfección con cloro: Este método utiliza compuestos de cloro, como el hipoclorito de sodio o el cloro gaseoso, para desinfectar el agua residual. El cloro actúa como un oxidante y desactiva los microorganismos presentes en el agua. Sin embargo, es importante regular cuidadosamente la dosis de cloro, ya que un exceso puede generar subproductos químicos no deseados” (Metcalf & Eddy, 2014).
- “Desinfección con ozono: El ozono es un gas altamente reactivo que se utiliza como desinfectante. Se produce mediante la generación de descargas eléctricas en el oxígeno. El ozono es un poderoso oxidante y puede eliminar eficazmente los

microorganismos presentes en el agua residual. Es importante destacar que el ozono se descompone rápidamente, por lo que debe generarse in situ y utilizarse de inmediato” (Metcalf & Eddy, 2014).

- “Desinfección con radiación ultravioleta (UV): La radiación ultravioleta se utiliza para desinfectar el agua residual mediante la exposición a una fuente de luz UV de alta intensidad. La radiación UV daña el material genético de los microorganismos, lo que impide su reproducción y capacidad de causar enfermedades. Es un método efectivo para la desinfección, pero no proporciona una protección residual, es decir, el agua tratada puede volverse a contaminar si se expone nuevamente a microorganismos” (Metcalf & Eddy, 2014).

Estos son algunos de los métodos más utilizados en la desinfección de efluentes depurados, cada uno con sus ventajas y consideraciones específicas en términos de eficacia, costos y requerimientos operativos (Trapote, 2016).

La eficacia de los desinfectantes se ve influenciada por diversos factores, entre los cuales se destacan (Trapote, 2016):

- “Tiempo de contacto: El desinfectante necesita un tiempo suficiente de contacto con los microorganismos para lograr su acción. Un tiempo de contacto más prolongado generalmente mejora la eficacia de la desinfección” (Trapote, 2016).
- “Concentración del desinfectante químico: La concentración adecuada del desinfectante es crucial para lograr una desinfección efectiva. Una concentración más alta del desinfectante generalmente aumenta su capacidad para inactivar o destruir los microorganismos” (Trapote, 2016).
- “Temperatura: La temperatura puede influir en la eficacia del desinfectante. En general, las temperaturas más altas pueden aumentar la actividad del desinfectante y acelerar

la desinfección. Sin embargo, algunos desinfectantes pueden ser sensibles a temperaturas extremas y requerir condiciones específicas” (Trapote, 2016).

- “Intensidad y naturaleza del agente físico: En el caso de los desinfectantes físicos, como la radiación ultravioleta o el calor, la intensidad y la naturaleza de la energía aplicada son factores importantes. Una mayor intensidad o una energía específica puede mejorar la capacidad del desinfectante físico para inactivar los microorganismos” (Trapote, 2016).
- “Tipos de microorganismos: Los diferentes desinfectantes pueden tener variada eficacia contra distintos tipos de microorganismos. Algunos desinfectantes son más efectivos contra bacterias, mientras que otros pueden ser más eficaces contra virus u otros patógenos específicos. Es importante seleccionar el desinfectante adecuado en función de los microorganismos presentes” (Trapote, 2016).
- “Naturaleza del medio líquido: Las características del medio líquido en el que se encuentra el desinfectante y los microorganismos pueden afectar su acción. La presencia de sustancias orgánicas, pH, turbidez u otros factores del medio pueden interferir con la eficacia del desinfectante y requerir ajustes en su aplicación” (Trapote, 2016).

**3.3.7.1. Desinfección con cloro.** “El cloro es el desinfectante más ampliamente utilizado debido a su capacidad para cumplir con la mayoría de los requisitos mencionados anteriormente, así como a su alto poder oxidante residual, que facilita la eliminación de la materia orgánica. Su acción bactericida se debe a la destrucción de las enzimas, elementos esenciales para la vida de los agentes patógenos” (Trapote, 2016).

“Los compuestos de cloro más comúnmente utilizados incluyen el cloro gas ( $\text{Cl}_2$ ), el hipoclorito de sodio, el hipoclorito de calcio y el dióxido de cloro. En las instalaciones de tratamiento, la forma más extendida de utilizar el cloro es a través del  $\text{Cl}_2$ ” (Trapote, 2016).

“El cloro ha demostrado ser efectivo contra una amplia gama de microorganismos y es capaz de inactivar bacterias, virus y otros patógenos presentes en el agua residual. Además de su acción desinfectante, el cloro también puede ayudar a reducir los olores y mejorar la calidad del agua tratada” (Trapote, 2016).

### **3.4. Propuesta y Contribuciones durante la Formación Profesional**

#### ***3.4.1. Objetivos y justificación del uso de las técnicas propuestas***

Los objetivos de las técnicas empleadas se centran en la correcta operación de la PTAR “Santa Clara”, con la finalidad de cumplir con los parámetros establecidos en la normatividad vigente.

A su vez, otro objetivo de las técnicas realizadas es la de estudiar la posible reutilización de los lodos generados en la PTAR “Santa Clara” y otros, como materia prima para producción de fertilizantes o para su aprovechamiento energético.

La justificación del empleo del secado térmico de lodos es que dicha tecnología es económica y altamente efectiva para deshidratar los lodos, y es empleada en varios países de primer mundo.

#### ***3.4.2. Cálculos y determinaciones de indicadores de gestión para evaluar y monitorear la propuesta***

**3.4.2.1. Control operacional de la PTAR.** En la actividad de análisis y control operacional de la PTAR “Santa Clara” se realizaron los siguientes cálculos y/o determinaciones, los cuales se desarrollan al menos una vez por día.

##### ***a) Cálculo del índice volumétrico de lodos (IVL)***

- Realizar la prueba de velocidad de sedimentación como se describe a continuación:
  - Extraer una muestra del contenido del tanque de aireación a una profundidad de 1 m, en una zona de mezcla uniforme, mientras se encuentren operando los equipos de aireación.

- Mezclar la muestra manualmente con la vara de agitación.
  - Llenar el recipiente graduado (Probeta) hasta el volumen de 1 litro.
  - Mezclar la muestra nuevamente y empezar a cronometrar el tiempo usando el reloj.
  - Registrar el nivel del lodo sedimentado denominado: Volumen de Lodo Sedimentado, cada 5 minutos hasta los 30 y luego a los 60 minutos.
  - Registrar cualquier característica notable del sobrenadante y/o lodo sedimentado, falla de algún equipo de aireación si fuera el caso.
- Registrar el volumen de lodo sedimentado a los 30 min (ml/l).
  - Determinar la concentración de SST del licor mezcla (mg/l).
  - Calcular el IVL según la ecuación que se presenta a continuación:

$$IVL \left( \frac{ml}{g} \right) = \frac{\text{Volumen de lodo sedimentado en 30 min} \left( \frac{ml}{l} \right) * 1000 \left( \frac{mg}{g} \right)}{\text{Concentración de SST del licor mezcla} \left( \frac{mg}{l} \right)}$$

**b) Parámetros de operación: Oxígeno Disuelto, pH y SST**

En los reactores biológicos o tanques de aireación se mide el oxígeno disuelto (OD) a través de un sensor instalado en línea que va conectado a un controlador HACH SC200, mientras que el pH se mide a través de un Multímetro HACH y los SST se miden a través del método gravimétrico para mayor precisión, cuyo procedimiento y cálculo se detallan a continuación:

- Preparación de la muestra:
 

Inicialmente, se toma una muestra representativa de agua cuya concentración de SST que se desea determinar.
- Filtración y secado:

Se pesa un crisol (W1) limpio y seco. Luego, se filtra una cantidad conocida (V) de la muestra a través de un papel filtro. El papel filtro capturará los sólidos suspendidos en la muestra.

- Traslado del papel filtro con los sólidos al crisol y pesa el conjunto (W2).

Lleva el crisol con el papel filtro y los sólidos suspendidos al horno o mufla precalentados a una temperatura específica, alrededor de 105°C. El calentamiento continuará hasta que ya no haya una pérdida de peso en el crisol. Se debe asegurar de mantener una temperatura constante durante el proceso.

- Luego, se pesa nuevamente el crisol con el papel filtro y los sólidos secos (W3).
- Cálculo de SST:

$$SST \left( \frac{mg}{l} \right) = \frac{W3 - W1}{V}$$

**3.4.2.2. Cumplimiento de normativa para el efluente de la PTAR.** El nivel de tratamiento que quiere el efluente de la PTAR “Santa Clara”, es para reúso en riego, y como actualmente no existe una normativa nacional para reúso de aguas residuales tratadas, dentro de los instrumentos de gestión ambiental de dicho PTAR se ha contemplado el cumplimiento del D.S. N°003-2010-MINAM.

**Tabla 2***Parámetros de calidad de cumplimiento del efluente de la PTAR “Santa Clara”*

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de agua
Aceites y grasas	mg/l	20.00
DBO <sub>5</sub>	mg/l	100.00
DQO	mg/l	200.00
pH	Unidad	6.50-8.50
SST	mg/l	150.00
Temperatura	°C	<35.00

*Nota: fuente (MINAM, 2010).*

A su vez, en referencia a los parámetros microbiológicos, tales como coliformes termotolerantes y huevos de helmintos, se ha establecido el cumplimiento de las recomendaciones de la OMS, como sigue:

**Tabla 3***Parámetros de calidad microbiológico de cumplimiento del efluente de la PTAR “Santa Clara”*

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de agua
Coliformes termotolerantes (CTT)	NMP/100 ml	1000.00
Huevos de helmintos	Huevos/L	<1.00

*Nota: fuente (OMS, 1989).*

Dichos parámetros son ensayados por un laboratorio acreditado.

### **3.4.2.3. Evaluación de la reutilización de los lodos generados en la PTAR “Santa Clara”.**

En la actividad de desarrollo del Proyecto de secado térmico de lodos orgánicos provenientes del tratamiento de aguas residuales para su reúso como acondicionador de suelos o como combustible alternativo en la industria ladrillera, se realizaron las siguientes determinaciones:

**Tabla 4**

*Ensayos realizados al lodo antes y después del secado térmico.*

N°	Descripción			
	Analito	Denominación	Cod.Serv	(1) Norma o Referencia
1	S(t) *	Azufre Total	MA0335	ASTM 1915 . 2009. Standard Test Methods for Analysis of Metal Bearing Ores and Related Materials by Combustion Infrared Absorption Spectrometry.
2	Cl-	Cloruro	MA0738	NOM-021-RECNAT -2000- Especificaciones de Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreos y Análisis. Sección 7.2.7 Determinación de Aniones Solubles en el Extracto de Saturación.
3	F- *	Fluoruros	MA1378	Adaptado. NOM-021 RECNAT-2000 Sección 7.2.7
4	N(t) *	Nitrogeno Total	MA1367	Hanbook of Soil Analysis 2003 Nitrógeno Total Kjeldahl - Method 10.2.6
5	P(t) *	Fosforo Total	MA1274	Method 29.2.2 Total Soil Phosphorus. Wet Mineralization for total Analyses, 29.5.2 Spectrocolorimetry using Molybdenum blue Handbook of Soil Analysis. Mineral Organic and Inorganic Methods. Mar Pansu Jacques Gautheyrou. Editorial Springer 2003
6	Humedad *	Determinación de humedad.	MA0447	NOM-021-RECNAT-2000- Especificaciones de Fertilidad, Sanidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis, Sección 7.1.5 Determinación del contenido de Humedad del Suelo por Gavimetría
7	Huevos de Helmintos *	Huevos de Helmintos ( Cuantitativo )	MA1574	DCE-MA-470 Manual de procedimientos de Laboratorio para el diagnóstico de los parásitos intestinales del hombre - Serie de Normas Técnicas N° 37-Técnica de Faust
8	Cr(VI)	Cromo Hexavalente (VI)	MA1045	IC-MA-90 Rev. 02. 2017. (Validado). Determinación de Cromo Hexavalente En Muestras Sólidas Basado en EPA Method 3060A y 7196A.
9	K *	Potasio	MA1620	NOM-021-RECNAT-2000 Norma Oficial Mexicana, Que establece las especificaciones de fertilidad, Salinidad y clasificación de suelos. Estudios , Muestreo y Análisis
10	Coliformes Fecales *	Coliformes Fecales	MA1575	Method EPA 1680 Coliformes Fecales
11	DQO *	Demanda Química de Oxígeno	MA1637	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part. 5220 B , 23rd 2017 Chemical Oxygen Demand (COD). Open Reflux , Method
12	Carbono *	Carbono	MA1276	Method 10.3.2 Total Carbon by Simple Volatilización Dry Methods Handbook of Soil Analysis Mineral , Organic and Inorganic Methods. Mar Pansu Jacques Gautheyrou Editorial Springer 2003
13	Metales Por ICP MS/ICP OES	Metales Por ICP MS/ICP OES	MA1124	EPA Method 3050B Rev.2.1996/EPA Method 6010D Rev.4. 2014/EPA Method 6020 B Rev.2. 2014/Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils/Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry/Inductively coupled Plasma-Mass Spectrometry.
14	Mercurio	Mercurio	MA0370	EPA Method 7471 B. Rev 2. 2007. Mercury in Solid or Semisolid Waste ( Manual Cold Vapor Technique ).
15	Contenido Energético*	Contenido Energético	MA1553	ASTM D5865 Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke

*Nota: fuente (Laboratorio CERTIMIN).*

También con dichos ensayos se probó si el lodo seco era apto para ser empleado como biosólidos de clase A o clase B (MVCS, 2017):

- “Biosólido de clase A: biosólido destinado para su reaprovechamiento como acondicionador de suelos en agricultura y/o mejoramiento de suelos: Producción de almácigo y utilización en viveros, Acondicionamiento de suelos para agricultura, pastos

y forrajes, excepto la aplicación directa a los cultivos de vegetales y frutas rastreras de consumo crudo, Mejoramiento de suelos y áreas verdes urbanas con acceso restringido a la población en un periodo no menor a siete (7) días, Comercialización a empresas productoras de insumos de usos agrícolas, que se encarguen de producir compost, humus u otros productos con fines de acondicionamiento del suelo, Comercialización a empresas del sector privado que tengan como objeto social la producción, comercialización y/o disposición final de biosólidos” (MVCS, 2017).

- “Biosólido de clase B: destinado para su reaprovechamiento en suelos que excluyen el riesgo de contacto con la población y actividades ganaderas. Este biosólido puede ser reaprovechado únicamente en las siguientes actividades: Fines agrícolas y/o forestales para plantas de tallo alto y que son procesados para su comercialización (cultivo de café y cultivos para la producción de fibra y madera), Recuperación de áreas degradadas ubicadas a por lo menos 100 metros de distancia de pueblos y viviendas, etc.” (MVCS, 2017).

A su vez, se realizó el cálculo del costo de secado térmico por tonelada de lodo, considerando los gastos de remuneración del operario, combustible (Gas natural), costo de energía eléctrica, transporte y disposición final, sin considerar un reúso final del lodo seco.

Dichos cálculos se hacen considerando un costo de disposición final (sin secado térmico) de lodo de 13 USD/ Tn.

### ***3.4.3. Análisis e interpretación de resultados y aportes técnicos de la propuesta de solución***

**3.4.3.1. Control operacional de la PTAR “Santa Clara”.** En la Tabla 5 se presenta el resultado de un mes de las mediciones diarias de los parámetros operacionales en la PTAR “Santa Clara”.

**Tabla 5**

Valores de parámetros de calidad para control operacional de la PTAR “Santa Clara” en el reactor A.

Día	PARÁMETROS REACTOR A				
	Oxígeno Disuelto (mg/l)	pH	SST (mg/l)	Velocidad de sedimentación a 30 min (ml/l)	IVL (ml/g)
1/11/2018	1.46	7.12	3950.00	670.00	169.60
2/11/2018	1.45	7.20	3850.00	570.00	148.10
3/11/2018	1.50	7.12	3825.00	550.00	143.80
4/11/2018	1.54	7.17	3200.00	770.00	240.60
5/11/2018	1.47	7.15	4066.67	470.00	115.60
6/11/2018	1.46	7.21	4000.00	330.00	82.50
7/11/2018	1.27	7.84	4125.00	310.00	75.20
8/11/2018	1.39	7.13	4175.00	390.00	93.40
9/11/2018	1.44	7.66	4200.00	400.00	95.20
10/11/2018	1.43	7.45	4675.00	140.00	29.90
11/11/2018	1.34	7.61	4837.50	150.00	31.00
12/11/2018	1.04	7.23	5450.00	170.00	31.20
13/11/2018	0.88	7.08	5400.00	140.00	25.90
14/11/2018	0.58	7.16	5312.50	250.00	47.10
15/11/2018	0.43	7.10	5875.00	250.00	42.60
16/11/2018	0.41	7.06	5737.50	220.00	38.30
17/11/2018	0.62	7.12	6087.50	210.00	34.50
18/11/2018	1.37	7.08	6455.60	510.00	79.00
19/11/2018	1.46	6.69	5875.00	160.00	27.20
20/11/2018	1.49	6.61	5737.50	170.00	29.60
21/11/2018	1.62	6.66	5375.00	300.00	55.80
22/11/2018	1.56	6.61	5162.50	300.00	58.10
23/11/2018	1.57	7.20	5325.00	300.00	56.30
24/11/2018	1.53	6.93	5137.50	300.00	58.40
25/11/2018	1.51	7.02	4762.50	270.00	56.70
26/11/2018	1.50	6.80	5112.50	290.00	56.70
27/11/2018	1.48	6.95	5050.00	300.00	59.40
28/11/2018	1.46	7.80	5225.00	300.00	57.40
29/11/2018	1.47	7.52	4814.30	440.00	91.40
30/11/2018	1.82	6.73	5422.20	300.00	55.30

Nota: Elaboración propia.

**Tabla 6**

Valores de parámetros de calidad para control operacional de la PTAR “Santa Clara” en el reactor B.

Día	PARÁMETROS REACTOR B				
	Oxígeno Disuelto (mg/l)	pH	SST (mg/l)	Velocidad de sedimentación a 30 min (ml/l)	IVL (ml/g)
1/11/2018	1.50	6.60	2555.56	380.00	148.70
2/11/2018	1.52	6.48	2466.67	450.00	182.40
3/11/2018	1.65	6.75	2677.78	440.00	164.30
4/11/2018	1.79	6.90	2550.00	410.00	160.80
5/11/2018	1.46	7.02	3144.44	220.00	70.00
6/11/2018	1.18	6.75	3525.00	240.00	68.10
7/11/2018	1.17	6.62	3325.00	220.00	66.20
8/11/2018	1.35	6.87	3487.50	240.00	68.80
9/11/2018	1.42	6.83	3675.00	250.00	68.00
10/11/2018	1.49	6.80	3912.50	120.00	30.70
11/11/2018	1.50	6.59	4087.50	130.00	31.80
12/11/2018	1.58	6.52	4275.00	140.00	32.70
13/11/2018	1.55	6.54	4150.00	110.00	26.50
14/11/2018	1.51	6.60	4400.00	170.00	38.60
15/11/2018	1.46	6.32	4437.50	160.00	36.10
16/11/2018	1.55	6.44	4525.00	150.00	33.10
17/11/2018	1.32	6.61	4712.50	140.00	29.70
18/11/2018	1.55	6.53	4411.10	250.00	56.70
19/11/2018	1.38	6.51	3587.50	110.00	30.70
20/11/2018	1.52	6.56	4275.00	130.00	30.40
21/11/2018	1.50	6.50	3775.00	210.00	55.60
22/11/2018	1.49	6.81	4287.50	250.00	58.30
23/11/2018	1.54	6.57	4062.50	230.00	56.60
24/11/2018	1.46	6.89	4150.00	230.00	55.40
25/11/2018	1.29	6.52	4237.50	210.00	49.60
26/11/2018	1.48	6.52	3975.00	220.00	55.30
27/11/2018	1.57	6.89	4287.50	250.00	58.30
28/11/2018	1.58	6.54	4262.50	250.00	58.70
29/11/2018	1.50	6.52	4085.70	290.00	71.00
30/11/2018	1.37	6.98	4150.00	240.00	57.80

Nota: Elaboración propia.

En la fecha en el que se desarrolló dichos controles, el rango de operación normal de oxígeno disuelto de referencia era de 0.75 a 2 mg/l. En caso que el valor de OD esté por debajo de 0.75 mg/l, se procede a incrementar la velocidad de los sopladores, y en el caso en el que el valor de OD esté por encima de 2 mg/l se procede a reducir la velocidad de los sopladores.

De los valores observados en la Tabla 5 y Tabla 6, se puede ver que, los reactores A y B funcionaron en el rango recomendado de oxígeno disuelto, lo que denota un proceso biológico eficiente.

Es preciso indicar que a la fecha el rango recomendado de oxígeno disuelto con el que trabajan los reactores de la PTAR "Santa Clara", es de 1.5 a 3 mg/l, ello debido a que ha aumentado la cantidad de descarga industrial en el desagüe que llega a dicha PTAR, por lo que es necesario el aumento de oxígeno disuelto, ya que la mayor descarga industrial trae como consecuencia una mayor carga orgánica que requiere degradarse y también una mayor presencia de toxinas que inhiben la actividad de los microorganismos. A su vez, las descargas industriales traen consigo una mayor variabilidad de calidad del agua residual por lo que un rango mayor de oxígeno disuelto, ayuda a manejar dichas fluctuaciones.

En referencia al pH, el rango referencial del agua residual en los reactores es de 6.5 a 8.5, y como se puede observar en las Tablas 5 y 6, los reactores trabajan en el rango referencial, y en pocas ocasiones llega a bajar por debajo de 6.5, en cuyo caso se dosifica cal hidratada para aumentar el pH, y de esa manera evitar la inhibición bacteriana, corrosión de la infraestructura y el aumento de la solubilidad de metales pesados; que genera un agua residual ácido.

En referencia al IVL, el valor referencial óptimo de trabajo en los reactores es menor a 150 ml/g, y como podemos observar en las Tabla 5 y Tabla 6, el índice volumétrico de lodos normalmente está por debajo del valor referencial, y en el caso en el que el valor esté por

encima del 150 ml/g, se procede a reducir el caudal de recirculación y a realizar la puga del lodo.

**3.4.3.2. Cumplimiento de normativa para el efluente de la PTAR “Santa Clara”.** En la Tabla 7 se presentan los resultados del monitoreo de los parámetros de calidad de agua residual tratada.

**Tabla 7**

*Valores de parámetros de calidad para cumplimiento normativo de la PTAR “Santa Clara”.*

		Fecha de Monitoreo			
		02/02/2019	04/05/2019	03/08/2019	04/11/2019
pH	Afluente	7.37	7.68	7.65	7.89
	Efluente LMP: 6.5-8.5	6.89	7.05	6.91	6.70
T (°C)	Afluente	26.50	25.20	22.60	24.10
	Efluente LMP <35	28.90	27.10	24.50	26.20
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	Afluente	509.00	661.00	415.00	426.00
	Efluente LMP = 100	1.70	0.60	6.00	6.00
	Eficiencia	100.00%	100.00%	99.00%	99.00%
DQO (mg/L)	Afluente	1031.00	1216.00	889.00	878.00
	Efluente LMP = 200	16.00	8.00	23.00	14.00
	Eficiencia	98.00%	99.00%	97.00%	98.00%
SST (mg/L)	Afluente	398.00	544.00	390.00	392.00
	Efluente LMP = 150	7.00	3.00	7.00	3.00
	Eficiencia	98.00%	99.00%	98.00%	99.00%
Aceites y grasas (mg/L)	Afluente	125.00	41.00	36.00	105.00
	Efluente LMP = 20	1.00	2.00	4.00	2.00
	Eficiencia	99.00%	95.00%	89.00%	98.00%
Coliformes Termotolerantes (NMP/100mL)	Afluente	2.40E+06	2.20E+07	3.50E+07	5.40E+07
	Efluente OMS = 1000	4.50E+00	1.80E+00	4.50E+00	1.80E+00
	Eficiencia	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
Huevos de helmintos (Huevos/L)	Afluente	-	-	-	-
	Efluente OMS < 1	0.00	0.00	0.00	0.00

*Nota:* Elaboración propia.

De la Tabla 7, se observa que la PTAR “Santa Clara”, cumple con todos los parámetros de calidad exigidos en la normativa tomada como referencia de acuerdo a los instrumentos de gestión ambiental de dicha PTAR.

**3.4.3.3. Evaluación de la reutilización de los lodos generados en la PTAR “Santa Clara”.** Se realizaron ensayos de lodos secos de la PTAR “Santa Clara”, y también se hizo secar lodos de la PTAR “Manchay”, “Puente Piedra” y “San Antonio de Carapongo” y se realizó los mismos ensayos, los cuales se presentan a continuación:

**Tabla 8**

*Ensayos realizados al lodo antes y después del secado térmico de la PTAR “Santa Clara”, y del lodo seco de otras PTAR de SEDAPAL.*

Parámetros	Unidad de medida	Resultados					“D.S. N° 015-2017-VIVIENDA (Biosólidos clase A)”
		“PTAR Manchay”	“PTAR Puente Piedra”	“PTAR San Antonio de Carapongo”	“PTAR Santa Clara antes del secado térmico”	“PTAR Santa Clara después del secado térmico”	
Parámetros de toxicidad química							
Arsénico (As)	mg/kg PS	4.60	6.60	11.10	84.20	5.60	40.00
Cadmio (Cd)	mg/kg PS	1.40	59.70	2.50	3.00	2.70	40.00
Cromo (Cr)	mg/kg PS	17.40	187.40	31.40	402.70	306.60	1200.00
Cobre (Cu)	mg/kg PS	109.00	642.00	192.00	144.00	148.00	1500.00
Plomo (Pb)	mg/kg PS	19.10	334.00	41.60	44.80	37.70	400.00
Mercurio (Hg)	mg/kg PS	0.31	0.49	0.34	0.78	0.62	17.00
Níquel (Ni)	mg/kg PS	17.00	23.00	22.00	63.00	64.00	400.00
Zinc (Zn)	mg/kg PS	714.10	1686.80	747.80	741.10	728.30	2400.00
Parámetros de higienización							
Huevos de helmintos	Hv/4g	22.00	10.00	4.00	98.00	42.00	1.00
E. Coli	NMP/1g ST	–	350.00	1600.00	1700000.00	35000.00	1000.00
Parámetros de estabilización							
% Materia orgánica (SV)	%	–	51.38	43.69	50.80	52.28	“Materia orgánica (SV) ≤ 60.00% de Materia seca (ST)”
Otros							
Humedad	%	–	26.00	16.00	84.00	39.00	
Poder Calorífico Superior (PCS)	cal/g	–	4199.07	3383.30	3541.39	3604.42	
Poder Calorífico Inferior (PCI)	cal/g	–	3107.00	2842.00	566.62	2198.70	

Nota: Elaboración propia.

Determinación del costo de secado térmico de lodos:

Considerando el secado por día de 24 toneladas de lodo, generando un total de 6 toneladas por día de lodo seco.

**Tabla 9**

*Costos de secado térmico de lodos.*

ÍTEM	Costo (USD)
Operador	25.00
Combustible (Gas natural)	84.90
Electricidad	67.20
Transporte	20.00
Disposición final	60.00
TOTAL	177.10
COSTO UNITARIO (USD/Tn)	7.00

*Nota:* Elaboración propia.

El costo unitario de secado térmico de lodos es de 7 USD/ Tn, se debe tener presente que el promedio el costo a la fecha de la disposición de lodos sin secado térmico es de aproximadamente 13 USD/ Tn.

De los valores de la evaluación de calidad del lodo seco de la PTAR “Santa Clara” (ver Tabla 8) se puede observar que los parámetros de higienización han mejorado, sin embargo, no han logrado estar por debajo de lo establecido por el D.S. N° 015-2017-VIVIENDA, para el caso de biosólidos de clase A, y ninguno de los dos parámetros indicadores, como son el caso de huevos de helmintos y el E. Coli. Esto podría deberse a que estas especies tienen resistencia a altas temperaturas, y si no se alcanza una temperatura y tiempo suficiente muchos de ellos sobrevivirán, a su vez, en algunos casos la materia orgánica residual en los lodos puede proporcionar un refugio, con lo que pueden resistir al proceso de secado térmico. La misma situación se presentó en el caso del lodo de otras PTAR.

En relación al arsénico se puede observar en la Tabla 8 que la concentración disminuyó en gran medida después del secado térmico de lodos, de 84.2 a 5.6 mg/kg (peso seco), lo cual, se puede deber a que ciertas formas del arsénico son volátiles.

En general se puede observar en la Tabla 8, que los lodos secos de las PTAR de SEDAPAL incluyendo “Santa Clara”, pueden ser empleados como biosólidos de clase B (para aplicación en suelo con restricción), a excepción del lodo de la PTAR Puente Piedra que presentó altos valores de cadmio, pero dicho resultado podría ser fluctuante dependiendo del vertido industrial.

Respecto al poder calorífico, para el aprovechamiento energético de los lodos, se observa que el resultado del Poder Calorífico Inferior (PCI) de las PTAR Puente Piedra, San Antonio de Carapongo y “Santa Clara”, después del secado térmico, presentan un potencial importante para su valorización energética, siendo estos valores superiores al PCI del lignito (carbón mineral) (PCI=2177 cal/g), aunque inferior a la hulla y la antracita (PCI= 7550 cal/g y 6700 cal/g respectivamente).

Se debe tener en cuenta que el PCI (Poder calorífico Inferior) es el poder calorífico que se aprovechará realmente en la combustión, y la diferencia del valor con el PCS (Poder calorífico superior), es que el PCS, calcula también aquel calor que gana el agua contenida en la muestra, para poder evaporarse; es decir, a mayor humedad el PCI será menor, ya que a mayor agua, el calor de combustión (PCS) será absorbido por él mismo en su evaporación (es el calor que se le resta al PCS para hallar el PCI, el cual será el calor reaprovechado), por lo cual es importante que el lodo presente la menor humedad posible.

A su vez, se puede ver que el secado térmico logró una reducción de la humedad relativa en promedio en un 75%, con lo que se reduce también en gran medida el volumen del lodo generado.

Del análisis de costos (ver Tabla 9) se puede observar que la sola reducción de volumen total de lodos generados a través del secado térmico, puede representar un ahorro

significativo en la disposición final (50% aproximadamente), sin la obtención de un beneficio adicional por el reaprovechamiento del lodo secado térmicamente. Cabe indicar que el cálculo del costo se realizó con gas natural ya que el GLP que se empleó en el proyecto es más caro.

#### **3.4.4. Evaluaciones y decisiones tomadas**

En relación a las evaluaciones realizadas en el marco de las actividades desarrolladas, se pueden citar las principales:

- Las decisiones de operación, básicamente es en función del manual de operaciones el cual establece los rangos recomendados a las que deben trabajar las unidades de tratamiento, en especial, en los reactores biológicos (tratamiento secundario), como, por ejemplo, el purgado de lodos cuando el IVL supera el valor de 150 ml/g, o el aumento de velocidad de los sopladores cuando el OD está por debajo de los 7.5 mg/l, o la dosificación de cal hidratada cuando el pH está por debajo de 6.5.
- Otra decisión tomada fue la de aumentar el rango de oxígeno disuelto (OD), debido a que se constató una mayor presencia de vertido industrial, lo que generaba problemas operativos como la inhibición de las bacterias, y mayor presencia de MO, lo que requiere una mayor oxigenación de los microorganismos para que cumplan con sus procesos de “degradación de la materia orgánica” eficientemente.
- En referencia al secado térmico de lodos, en principio el proyecto concibió el análisis de los lodos solamente de la PTAR “Santa Clara”, pero se tomó la decisión de evaluar el lodo de otras PTAR.
- Se decidió también, probar un experimento de higienización adicional al lodo seco, que consistió en adicionar cal viva al 10% para poder eliminar aún más los patógenos y se analizaron los huevos de Helmintos y el E. Coli, cuyos resultados fueron satisfactorios, es decir, se redujo en gran medida la presencia de dichos patógenos.

### **3.4.5. Informes, reportes, instructivos, fichas técnicas y formatos presentados como resultado de la actividad realizada**

Durante el desarrollo del Proyecto de investigación de secado térmico de lodos orgánicos provenientes de una PTAR para su reúso como acondicionador de suelos o como combustible alternativo en la industria ladrillera, se desarrollaron ensayos de laboratorio, sobre los cuales se generaron reportes y observaciones a los valores arrojados en los mismos, dichos reportes fueron remitidos por correo electrónico, los cuales se describen en la siguiente tabla y a su vez.

**Tabla 10**

*Resumen de reportes del Proyecto.*

Nombre	Fecha	
Reporte – “Monitoreo de calidad de lodo de PTAR Manchay”	24.09.2019	Anexo 1
Reporte – “Monitoreo de calidad de lodo de PTAR Puente Piedra”	22.11.2019	Anexo 2
Reporte – “Monitoreo de calidad de lodo de PTAR San Antonio de Carapongo”	05.12.2019	Anexo 3
Reporte – “Monitoreo de calidad de lodo de PTAR Santa Clara”	09.12.2019	Anexo 4
Reporte 2 – “Monitoreo de calidad de lodo de PTAR Santa Clara”	19.12.2019	Anexo 5
Reporte – “Operación de planta piloto y tratamiento alternativo con cal al 10% en peso”	24.01.2020	Anexo 6

*Nota:* Elaboración propia.

## **Capítulo IV: Discusión de resultados e implicancias**

### **4.1. Contribuciones al desarrollo de la empresa**

Las principales contribuciones realizadas que coadyuvan al desarrollo de la empresa, son las siguientes:

- Aporte al correcto funcionamiento de procesos de tratamiento de aguas residuales y agua potable.
- Supervisión de estudios especializados.
- Propuesta y desarrollo de herramientas innovadoras para mejora de procesos, como el desarrollo del modelo predictivo para determinación de dosis óptima de coagulante y floculantes en la PTAP La Atarjea.
- Participación directa en las actividades de SST a través de la participación como brigadista de primeros auxilios.
- Desarrollo de selección de materiales en función de las distintas propiedades que determinan en el desarrollo de infraestructura sanitaria más resiliente y duradera, con lo que la empresa mejora a nivel económico y de imagen institucional.

### **4.2. Impacto de la propuesta**

La principal propuesta, acerca del secado térmico de lodos, impacta positivamente en la empresa, ya que genera ahorros significativos en la disposición final de los lodos, como también tiene un gran impacto ambiental, ya que la disposición en relleno sanitarios implican una degradación de dichos suelos y la emanación de gases de efecto invernadero en el proceso de putrefacción de dichos lodos, por lo que reutilizarlos e inclusive el solo disminuir el volumen significa una menor contaminación y degradación de suelos.

## Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

- Los principales parámetros que se evalúan para el control del proceso de tratamiento de aguas residuales, en especial el control del proceso secundario (tratamiento biológico), son el Oxígeno Disuelto, pH e Índice Volumétrico de Lodos.
- El suministro y control adecuado del oxígeno disuelto en los reactores biológicos, son de gran importancia debido a que son necesarios para que los microorganismos puedan desarrollar sus procesos metabólicos a través del cual se degrada la materia orgánica presente, y sus valores óptimos son dinámicos en función de las características, en el caso de que los valores de oxígeno disuelto estén por debajo del valor mínimo recomendado se debe aumentar la velocidad de los sopladores con la finalidad de dosificar mayor cantidad de oxígeno al sistema.
- Una mayor presencia de vertidos industriales en el desagüe, requiere en el tratamiento biológico, una mayor dosificación de oxígeno, debido a que los vertidos industriales tienen componentes orgánicos, que aumentan la carga del agua residual, como también tienen presencia de compuestos tóxicos que inhiben la actividad metabólica de los microorganismos, por lo que requerirán mayor cantidad de oxígeno para el desarrollo del proceso de depuración.
- El pH, es un parámetro crucial en la operación y control de una PTAR, debido a que los microorganismos trabajan bajo ciertas condiciones óptimas, por lo que si se tiene aguas de características muy ácidas o básicas, no trabajarán de manera adecuada o morirán, a su vez, un agua residual ácida, genera un mayor deterioro de la infraestructura de la planta, por lo que es importante, regular el pH cuando sus valores están fuera del rango recomendado, como es el caso de la PTAR “Santa Clara”, cuyo

rango óptimo se encuentra entre 6.5 a 8.5, y la regulación se realiza a través de la dosificación de cal hidratada (hidróxido de calcio).

- El Índice Volumétrico de Lodos, es otro parámetro importante, debido a que es un indicador que nos permite conocer información sobre la concentración y calidad de los lodos generados, y se emplea para evaluar la sedimentación y la densidad de los lodos, lo que finalmente nos da un indicador de la eficiencia del proceso. En el caso de que el valor esté por encima del recomendado para la planta, se procede a reducir la recirculación y a purgar el lodo del sistema.
- La PTAR “Santa Clara” tiene una alta eficiencia, debido a un correcto control y operación, por lo que el efluente cumple con todos los parámetros exigidos en normativa vigente tomada como referencia.
- El proceso de secado térmico de los lodos de la PTAR “Santa Clara”, “Manchay”, “Puente Piedra” y “San Antonio de Carapongo”, indican que es posible su reúso como biosólido de clase B de acuerdo al D.S. N° 015-2017-VIVIENDA (empleo en suelo con restricciones), a excepción del lodo de la PTAR Puente Piedra que mostró, niveles altos de cadmio, lo cual puede ser consecuencia de la alta presencia de vertidos industriales metalúrgicas y química, característico de la zona norte.
- Los valores de Poder Calorífico Inferior (PCI) del lodo seco (luego del secado térmico), muestran un gran potencial para su valorización energética, ya que dichos valores son incluso mayores al PCI del carbón mineral.
- El proceso de secado térmico de lodos en PTAR de SEDAPAL evaluadas, reduce la humedad relativa en promedio en un 75% con lo que el volumen se reduce aproximadamente en esa proporción, y de un análisis de costos, se determinó que dicha reducción de volumen a través del proceso de secado térmico, implica una disminución de costos en la disposición final de los biosólidos.

## **5.2. Recomendaciones**

- Evaluar la automatización del proceso variación de dosis de flocculantes en el proceso de centrifugación de los lodos, ya que a la fecha solo se viene realizando manualmente, porque no se cuenta con relaciones precisas que determinen la dosis en función de las características del lodo, sin embargo, se cuenta con información histórica que puede ser empleada para el desarrollo de un modelo predictivo a través de algoritmos de inteligencia artificial.
- Evaluar tecnologías de optimización de procesos biológicos como la dosificación de probióticos, los cuales son microorganismos que requieren menor cantidad de oxígeno por lo que podría reducirse costos en consumo energético.
- Probar los lodos secos en hornos de la industria cementera o ladrillera, con la finalidad de evaluar la eficacia de su valorización energética.

## Capítulo VI: Referencias bibliográficas

- Espinoza, J. (2022). Innovación en la gestión de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico en Lima-Perú. Lima, Perú.
- JICA. (2020). Manual de operación de secador de lodos. Japón.
- Larico, C., Diana Fernandez, José Cahua, & Romario Cabana. (2021). Remoción de Materia Orgánica y Bacterias Patógenas de las Aguas Residuales Domésticas en Filtro Percolador, Laguna Facultativa y Lodos Activados. *Revista Científica Investigación Andina*.
- Metcalf, & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery* (7ma ed.). McGraw-Hill Education.
- MINAM. (2010). Límites Máximos Permisibles. (D.S. N°003-2010-NIMAM).
- MVCS. (2017). Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA - Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Perú.
- OMS. (1989). *Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura*. Ginebra.
- SEDAPAL. (2001). *Estatuto Social del Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima*. Lima, Perú.
- SEDAPAL. (2021). Reglamento Interno de Seguridad y Salud en el Trabajo. (3ra ed.). Lima, Lima, Perú.
- SEDAPAL. (2023). *Portal web de SEDAPAL*. Obtenido de [www.sedapal.com.pe](http://www.sedapal.com.pe)
- Trapote, A. (2016). *Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas*. Universidad de Alicante.
- Vargas, A. (2020). Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia. *Revista chilena de ingeniería*.

## **Anexos**

- Anexo 1: Reporte – Monitoreo de calidad de lodo de PTAR Manchay.
- Anexo 2: Reporte – Monitoreo de calidad de lodo de PTAR Puente Piedra.
- Anexo 3: Reporte – Monitoreo de calidad de lodo de PTAR San Antonio de Carapongo.
- Anexo 4: Reporte – Monitoreo de calidad de lodo de PTAR “Santa Clara”.
- Anexo 5: Reporte 2 – Monitoreo de calidad de lodo de PTAR “Santa Clara”.
- Anexo 6: Reporte – Operación de planta piloto y tratamiento alternativo con cal al 10% en peso.



---

## RE: INFORME PRELIMINAR : PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL SANTA CLARA - Monitoreo Calidad de Lodo (SEP1082.R19) LODOS

---

Miguel Angel Egusquiza Cordova <megusquizac@uni.pe>

24 de septiembre de 2019, 16:38

Para: Yolanda Fernandez Matos <yfernand@sedapal.com.pe>

CC: Marco Pinchi Valdez <mpinchiv@sedapal.com.pe>, Esteban Higuchi <proyecto.lodos.jica@gmail.com>, Jorge Rucoba Tello <jrucobat@sedapal.com.pe>, Francisco Quezada Neciosup <fquezada@sedapal.com.pe>, Ivan Rodriguez Cabanillas <irodriguez@sedapal.com.pe>

Sr. Yolanda:

El Informe está acorde a lo establecido en la cotización. Por otro lado, se sugiere pedir al laboratorio una interpretación técnica sobre los resultados de los parámetros microbiológicos (Huevos de helmintos y Coliformes fecales), considerando que la muestra es el resultado de un proceso de secado térmico (contacto con aire caliente a temperaturas entre 110 a 150 °C, en una cámara giratoria), con un periodo de contacto (retención) de 10 minutos aproximadamente.

Alcanzo estudio sobre secado térmico de lodos, donde se evidencia que los Huevos de helmintos y Coliformes fecales, son eliminados a temperaturas superiores a 75 °C (Tabla 7 - pág. 4 del documento adjunto); sin embargo, el tiempo de contacto es mucho más prolongado (8 a 12 horas) en comparación al tiempo de contacto de la Planta Piloto en estudio.

Tomando en consideración dichas premisas, se sugiere realizar más análisis de laboratorio de los parámetros mencionados, y, de repetirse los resultados, se recomienda estudiar la prologación del tiempo de contacto en el proceso de secado térmico, no siendo aconsejable elevar la temperatura, porque podría generar la volatilización del nitrógeno (nutriente esencial para la aplicación del biosólido como compostaje).

[Texto citado oculto]

--

Atentamente,

**Miguel Ángel Egusquiza C.**

**Consultor**

**Comité Técnico Permanente de SEDAPAL**

**954636651**

[megusquizac@uni.pe](mailto:megusquizac@uni.pe)



**EFFECTO DEL SECADO TÉRMICO Y EL TRATAMIENTO ALCALINO EN LAS CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS Y QUÍMICAS DE BIOSÓLIDOS DE PTARs.pdf**

520K



## RV: INFORME PRELIMINAR : LODO - RESIDUALES SANTA CLARA - Monitoreo calidad de Lodo Producto de secado térmico (NOV1085.R19) Lodos secos obtenido después de un procesamiento de secado térmico

Miguel Angel Egusquiza Cordova <megusquizac@uni.pe>

22 de noviembre de 2019, 16:59

Para: Yolanda Fernandez Matos <yfernand@sedapal.com.pe>

CC: Marco Pinchi Valdez <mpinchiv@sedapal.com.pe>, Francisco Quezada Neciosup <fquezada@sedapal.com.pe>, Jorge Rucoba Tello <jrucobat@sedapal.com.pe>, Ivan Rodriguez Cabanillas <irodriguez@sedapal.com.pe>

Estimada Sra. Yolanda,

Respecto al informe preliminar, es concordante con los términos de referencia del servicio solicitado.

En referencia a los resultados presentados en dicho informe, comento lo siguiente:

1.- De la comparación (se adjunta el cuadro compartivo) de los resultados con los parámetros exigidos en el DS. 015-2017-VIVIENDA "Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales", se observa:

- En los parámetros de toxicidad química, el único valor que sobrepasa el valor permitido es la del Cadmio (Cd); asimismo, los demás parámetros de toxicidad, son más elevados al de los lodos de la PTAR Manchay, lo cual, era lo esperado, por el tipo de efluente recibido por dicha Planta (efluentes industriales). Por otro lado, se debe tener en cuenta que el cumplimiento de todos los parámetros de toxicidad química son obligatorios para el uso de los lodos como biosólido de clase A o B, por ende con ese resultado preliminar, dicho lodo no sería adecuado para su reaprovechamiento.

- En los parámetros de higienización, como en el caso de los lodos de Manchay, los huevos de helmintos sobrepasa al valor establecido en el Reglamento citado (para el caso de Biosólidos de clase A), lo cual, es explicado porque los huevos de helmintos son muy resistentes al estrés ambiental (deshidratación y calor), a pesar de las temperaturas a las que son llevadas, pueden verse protegidas por las características de la muestra (restos orgánicos y grasa); asimismo, los parásitos encontrados presentan en su morfología distintas capas (paredes externas) que los protegen de estos factores y los hacen resistentes a procesos como el secado térmico de lodos (según los comentarios de los especialistas del laboratorio CERTIMIN). Por otra parte, el lodo si cumple con los parámetros de higienización para el caso de biosólidos de clase B.

2.- Respecto al poder calorífico, para el aprovechamiento energético de los lodos, se observa que el resultado (PCI=3107 cal/g), con lo cual, presenta un potencial importante para su valorización energética, siendo este valor superior al PCI del lignito (carbón mineral) (PCI=2177 cal/g), aunque inferior a la hulla y la antracita (PCI= 7550 cal/g y 6700 cal/g respectivamente). Tener en cuenta que el PCI (Poder calorífico inferior) es el poder calorífico que se aprovechará realmente en la combustión, y la diferencia del valor con el PCS (Poder calorífico superior), es que el PCS, calcula también aquel calor que gana el agua contenida en la muestra, para poder evaporarse; es decir, a mayor humedad el PCI será menor, ya que a mayor agua, el calor de combustión (PCS) será absorbido por el mismo en su evaporación (es el calor que se le resta al PCS para hallar el PCI, el cual será el calor reaprovechado), por lo cual es importante que el lodo presente la menor humedad posible.

NOTA:

**Biosólido de clase A:** biosólido destinado para su reaprovechamiento como acondicionador de suelos en agricultura y/o mejoramiento de suelos: Producción de almácigo y utilización en viveros, Acondicionamiento de suelos para agricultura, pastos y forrajes, excepto la aplicación directa a los cultivos de vegetales y frutas rastreras de consumo crudo, Mejoramiento de suelos y áreas verdes urbanas con acceso restringido a la población en un periodo no menor a siete (7) días, Comercialización a empresas productoras de insumos de usos agrícolas, que se encarguen de producir compost, humus u otros productos con fines de acondicionamiento del suelo, Comercialización a empresas del sector privado que tengan como objeto social la producción, comercialización y/o disposición final de biosólidos.

**Biosólido de clase B:** destinado para su reaprovechamiento en suelos que excluyen el riesgo de contacto con la población y actividades ganaderas. Este biosólido puede ser reaprovechado únicamente en las siguientes actividades: Fines agrícolas y/o forestales para plantas de tallo alto y que son procesados para su comercialización (cultivo de café y cultivos para la producción de fibra y madera), Recuperación de áreas degradadas ubicadas a por lo menos 100 metros de distancia de pueblos y viviendas, etc. (DS 015-2019-VIVIENDA Artículo 18 y 19).

[Texto citado oculto]

--

Atentamente,

**Miguel Ángel Egusquiza C.**

**Consultor**

**Comité Técnico Permanente de SEDAPAL**

**954636651**

[megusquizac@uni.pe](mailto:megusquizac@uni.pe)





## RV: INFORME PRELIMINAR : LODO - SAN ANTONIO DE CARAPONGO - Monitoreo calidad de Lodo Producto de secado térmico (NOV1200.R19) Lodos secos obtenido después de un procesamiento de secado térmico

Miguel Angel Egusquiza Cordova <megusquizac@uni.pe>  
Para: Yolanda Fernandez Matos <yfernand@sedapal.com.pe>  
CC: Ivan Rodriguez Cabanillas <irodriguez@sedapal.com.pe>

5 de diciembre de 2019, 14:19

Sra. Yolanda,  
Respecto al informe preliminar, es concordante con los términos de referencia del servicio solicitado.

En referencia a los resultados presentados en dicho informe, comento lo siguiente:

1.- De la comparación (se adjunta el cuadro comparativo) de los resultados con los parámetros exigidos en el DS. 015-2017-VIVIENDA "Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales", se observa:

- En los parámetros de toxicidad química, los parámetros están dentro del límite establecido por el Reglamento citado.
- En los parámetros de higienización, los huevos de helmintos sobrepasa al valor establecido en el Reglamento citado (para el caso de Biosólidos de clase A), lo cual, es explicado porque los huevos de helmintos son muy resistentes al estrés ambiental (deshidratación y calor), a pesar de las temperaturas a las que son llevadas, pueden verse protegidas por las características de la muestra (restos orgánicos y grasa); asimismo, los parásitos encontrados presentan en su morfología distintas capas (paredes externas) que los protegen de estos factores y los hacen resistentes a procesos como el secado térmico de lodos (según los comentarios de los especialistas del laboratorio CERTIMIN). Por otra parte, el lodo si cumple con los parámetros de higienización para el caso de biosólidos de clase B.

2.- Respecto al poder calorífico, para el aprovechamiento energético de los lodos, se observa que el resultado (PCI=2842 cal/g), con lo cual, presenta un potencial importante para su valorización energética, siendo este valor superior al PCI del lignito (carbón mineral) (PCI=2177 cal/g), aunque inferior a la hulla y la antracita (PCI= 7550 cal/g y 6700 cal/g respectivamente). Tener en cuenta que el PCI (Poder calorífico inferior) es el poder calorífico que se aprovechará realmente en la combustión, y la diferencia del valor con el PCS (Poder calorífico superior), es que el PCS, calcula también aquel calor que gana el agua contenida en la muestra, para poder evaporarse; es decir, a mayor humedad el PCI será menor, ya que a mayor agua, el calor de combustión (PCS) será absorbido por el mismo en su evaporación (es el calor que se le resta al PCS para hallar el PCI, el cual será el calor reaprovechado), por lo cual es importante que el lodo presente la menor humedad posible.

NOTA:

**Biosólido de clase A:** biosólido destinado para su reaprovechamiento como acondicionador de suelos en agricultura y/o mejoramiento de suelos: Producción de almácigo y utilización en viveros, Acondicionamiento de suelos para agricultura, pastos y forrajes, excepto la aplicación directa a los cultivos de vegetales y frutas rastreras de consumo crudo, Mejoramiento de suelos y áreas verdes urbanas con acceso restringido a la población en un periodo no menor a siete (7) días, Comercialización a empresas productoras de insumos de usos agrícolas, que se encarguen de producir compost, humus u otros productos con fines de acondicionamiento del suelo, Comercialización a empresas del sector privado que tengan como objeto social la producción, comercialización y/o disposición final de biosólidos.

**Biosólido de clase B:** destinado para su reaprovechamiento en suelos que excluyen el riesgo de contacto con la población y actividades ganaderas. Este biosólido puede ser reaprovechado únicamente en las siguientes actividades: Fines agrícolas y/o forestales para plantas de tallo alto y que son procesados para su comercialización (cultivo de café y cultivos para la producción de fibra y madera), Recuperación de áreas degradadas ubicadas a por lo menos 100 metros de distancia de pueblos y viviendas, etc. (DS 015-2019-VIVIENDA Artículo 18 y 19).

[Texto citado oculto]

--

Atentamente,

**Miguel Ángel Egusquiza C.**  
**Consultor**  
**Comité Técnico Permanente de SEDAPAL**  
**954636651**  
[megusquizac@uni.pe](mailto:megusquizac@uni.pe)

 **Tabla Comparativa de resultados vs DS 015-2017-VIVIENDA.xlsm**  
25K



## Informe preliminar Iodos Santa Clara - antes y después de secado térmico

Miguel Angel Egusquiza Cordova <megusquizac@uni.pe>

9 de diciembre de 2019, 09:30

Para: Yolanda Fernandez Matos <yfernand@sedapal.com.pe>

CC: Ivan Rodriguez Cabanillas <irodriguez@sedapal.com.pe>, Marco Pinchi Valdez <mpinchiv@sedapal.com.pe>

Sra. Yolanda,

Se sugiere hacer las siguientes observaciones y consultas al laboratorio, respecto a ambos Informes:

1. Revisar los resultados del parámetro Arsénico (As), ya que se observa una gran diferencia en los resultados de la muestra antes del secado (84.2 mg/kg PS) vs la muestra después del secado (5.6 mg/kg PS), teniendo en cuenta que el secado térmico se lleva a cabo en un tambor rotatorio por contacto con aire caliente a 130 a 140 °C, con un tiempo de residencia de 10 a 15 minutos aproximadamente.
2. Revisar los resultados de la humedad de la muestra (después del secado térmico), ya que en dicho proceso de secado térmico, se ha verificado en campo que la humedad del producto está en un intervalo de 20 a 30%, siendo 39 un valor muy alto.
3. Los valores de PCI (Poder Calorífico Inferior) dados en el Informe, son simplemente la multiplicación del PCS (Poder Calorífico Superior) por (1 - humedad): ejemplo para la muestra (antes del secado),

$$PCI = PCS * (100 - Humedad) \text{ -----} \rightarrow PCI = 566.62 = 3541.39 * (1 - 0.84).$$

Lo cual, no es una determinación correcta; ya que, si bien es cierto, el PCI tiene una relación inversa con la humedad; es decir, a menor humedad mayor será el PCI, estos se determinan experimentalmente, o en su efecto, se determina un factor de reducción de emisiones térmicas (F), siendo la fórmula  $PCI = PCS * F$ ; donde F es diferente a (1 - humedad).

Atentamente,

**Miguel Ángel Egusquiza C.**

**Consultor**

**Comité Técnico Permanente de SEDAPAL**

**954636651**

[megusquizac@uni.pe](mailto:megusquizac@uni.pe)

---

 **Tabla Comparativa de resultados vs DS 015-2017-VIVIENDA.xlsm**  
25K

## Informe preliminar lodos Santa Clara - antes y después de secado térmico

Miguel Angel Egusquiza Cordova <megusquizac@uni.pe>  
Para: Yolanda Fernandez Matos <yfernand@sedapal.com.pe>  
CC: Ivan Rodriguez Cabanillas <irodriguez@sedapal.com.pe>

19 de diciembre de 2019, 15:42

Sra. Yolanda,  
Respecto a lo solicitado.

De la comparación (se adjunta el cuadro comparativo) de los resultados con los parámetros exigidos en el DS. 015-2017-VIVIENDA "Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales", se observa:

### a) Para la muestra de lodo antes del secado térmico:

a.1 - En los parámetros de toxicidad química, el parámetro Arsénico (As) está por encima del límite establecido por el Reglamento citado.

a.2 - En los parámetros de higienización, los huevos de helmintos y el E.Coli sobrepasan al valor establecido en el Reglamento citado (para el caso de Biosólidos de clase A).

a.3 - En los parámetros de estabilización, el % de materia orgánica (SV), está dentro de límite establecido por el Reglamento citado.

Finalmente, debido al punto a.1) este lodo no podría ser reaprovechado para ninguno de los dos casos (biosólido de clase A ni B)

- Respecto al poder calorífico, para el aprovechamiento energético de los lodos, se observa que el resultado (PCI=566.63 cal/g), el cual es un valor de PCI muy bajo, ello se debe que la muestra presenta un alto porcentaje de humedad (84%), por lo cual no presentaría un potencial importante para su valorización energética en esas condiciones de humedad.

### b) Para la muestra de lodo después del secado térmico:

b.1 - En los parámetros de toxicidad química, los parámetros están dentro del límite establecido por el Reglamento citado.

b.2 - En los parámetros de higienización, los huevos de helmintos se redujeron en un 57% en el proceso de secado térmico, y el E.Coli se redujo en un 97%, pero aún así ambos sobrepasan al valor establecido en el Reglamento citado (para el caso de Biosólidos de clase A).

b.3 - En los parámetros de estabilización, el % de materia orgánica (SV), está dentro de límite establecido por el Reglamento citado.

Finalmente, debido al punto a.2) este lodo sólo podría ser reaprovechado como biosólido de clase B.

- Respecto al poder calorífico, para el aprovechamiento energético de los lodos, se observa que el resultado (PCI=2198.67 cal/g), lo cual determina un potencial para un posible reuso o valorización energética, ya que este valor es superior al PCI del lignito (carbón mineral) (PCI=2177 cal/g), en ese sentido puede estudiarse su reutilización, haciendo las respectivas consultas y coordinaciones con las cementeras, quienes serían los posibles usuarios de dicho producto, para usarlos en sus hornos, como también al DGAA - Dirección General de Asuntos Ambientales, del ministerio de Vivienda, al no haber un marco legal de referencia para ese tipo de reaprovechamiento en el país.

#### NOTA:

**Biosólido de clase A:** biosólido destinado para su reaprovechamiento como acondicionador de suelos en agricultura y/o mejoramiento de suelos: Producción de almácigo y utilización en viveros, Acondicionamiento de suelos para agricultura, pastos y forrajes, excepto la aplicación directa a los cultivos de vegetales y frutas rastreras de consumo crudo, Mejoramiento de suelos y áreas verdes urbanas con acceso restringido a la población en un periodo no menor a siete (7) días, Comercialización a empresas productoras de insumos de usos agrícolas, que se encarguen de producir compost, humus u otros productos con fines de acondicionamiento del suelo, Comercialización a empresas del sector privado que tengan como objeto social la producción, comercialización y/o disposición final de biosólidos.

**Biosólido de clase B:** destinado para su reaprovechamiento en suelos que excluyen el riesgo de contacto con la población y actividades ganaderas. Este biosólido puede ser reaprovechado únicamente en las siguientes actividades: Fines agrícolas y/o forestales para plantas de tallo alto y que son procesados para su comercialización (cultivo de café y cultivos para la producción de fibra y madera), Recuperación de áreas degradadas ubicadas a por lo menos 100 metros de distancia de pueblos y viviendas, etc. (DS 015-2019-VIVIENDA Artículo 18 y 19).

[Texto citado oculto]

--

[Texto citado oculto]



---

## Operación de la planta piloto 22.01.2020

---

**Miguel Angel Egusquiza Cordova** <megusquizac@uni.pe>

24 de enero de 2020, 15:14

Para: Yolanda Fernandez Matos <yfernand@sedapal.com.pe>

CC: Esteban Higuchi <proyecto.lodos.jica@gmail.com>, Ivan Rodriguez Cabanillas <irodriguez@sedapal.com.pe>, Elmer Quinteros Hajar <equinterosh@sedapal.com.pe>

Estimada Sra. Yolanda,

El día 22.01.2020, de acuerdo a las coordinaciones realizadas con Esteban, se procedió a la operación de la planta piloto, secando una muestra de lodo de 215.85 kg de la PTAR Santa Clara, de una humedad inicial de 85% aprox, con los siguientes resultados:

- Una humedad final de 30% y variando los parámetros del equipo se llegó hasta 11%.
- El peso final del lodo seco fue de 42.95 kg, logrando así una reducción en peso en un 80%.
- Se utilizó 19.15 m3 de GLP en toda la operación.
- Un tiempo de operación total de 5 horas aproximados.

Finalmente, se mezcló una muestra del resultado con cal en una concentración del 10% en peso, y se mandó a analizar dicha muestra para los parámetros: Huevos de helmintos y E.Coli, en la Universidad Agraria.

Atentamente,

**Miguel Egusquiza Córdoba.**

**Consultor del Comité Técnico Permanente de SEDAPAL**

**954636651**

[megusquizac@uni.pe](mailto:megusquizac@uni.pe)