

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS



**CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN:**  
ECOEFICIENCIA DE LOS PROCESOS INDUSTRIALES

**ESTUDIO DE LA CALIDAD DE AGUAS DENTRO DEL PROCESO  
DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR EN UN INGENIO AZUCARERO**

PRESENTADO POR:  
RODRIGO ALEJANDRO SANDOVAL PEÑATE

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
**INGENIERO QUÍMICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE 2023

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR:**

M.Sc. JUAN ROSA QUINTANILLA QUINTANILLA

**SECRETARIO GENERAL:**

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO:**

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

**SECRETARIO:**

ARQ. RAUL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**

**DIRECTORA INTERINA:**

Inga. Eugenia Salvadora Gamero de Ayala

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN: ECOEFICIENCIA DE LOS PROCESOS INDUSTRIALES

**ESTUDIO DE LA CALIDAD DE AGUAS DENTRO DEL PROCESO  
DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR EN UN INGENIO AZUCARERO**

Para optar al título de:

**INGENIERO QUÍMICO**

Presentado por:

**RODRIGO ALEJANDRO SANDOVAL PEÑATE**

Docente asesor:

**ING. NELSON MAURICIO VAQUERO ANDRADE**

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE 2023

Trabajo de Grado aprobado por

DOCENTE ASESOR:

**ING. NELSON MAURICIO VAQUERO ANDRADE**

## RESUMEN

El estudio de la calidad del agua en el proceso de producción de azúcar de caña en ingenios azucareros es de vital importancia tanto desde una perspectiva ambiental como económica. La industria azucarera es conocida por su alto consumo de agua, lo que la coloca en el centro de la atención en términos de sostenibilidad y gestión de recursos hídricos.

Este trabajo de investigación se enfoca en analizar y evaluar la calidad del agua luego de ser utilizada en las diferentes etapas del proceso de producción de azúcar de caña en ingenios azucareros. Se abordan aspectos como la disponibilidad de fuentes de agua y su tratamiento.

El estudio se basa en la recopilación de datos, análisis químicos y físicos del agua utilizada antes y después de su tratamiento, basándose en datos obtenidos por parte del Ingenio directamente. Se evalúan parámetros como la presencia de impurezas, microorganismos, sólidos en suspensión y la posible generación de subproductos contaminantes, además de parámetros fisicoquímicos fundamentales para su caracterización como la demanda química y bioquímica de oxígeno para la obtención del porcentaje de remoción de carga orgánica.

Además, se examinan las tecnologías y prácticas disponibles para mejorar la gestión del agua en los ingenios azucareros, reduciendo así el impacto ambiental y optimizando los recursos hídricos. También se consideran las regulaciones y normativas pertinentes que rigen la calidad del agua en la industria azucarera.

El resultado de este estudio proporcionará información valiosa para la industria azucarera en la toma de decisiones relacionadas con la gestión sostenible del agua, la reducción de costos operativos y el cumplimiento de las regulaciones ambientales.

Este trabajo busca promover la conciencia sobre la importancia de mantener altos estándares de calidad del agua en los ingenios azucareros, con el fin de garantizar un proceso de producción de azúcar de caña eficiente y sostenible desde el punto de vista ambiental, económico y social.

## AGRADECIMIENTOS

*Primero agradecer a Dios por permitirme llegar hasta aquí y culminar mi carrera, a Margarita González Brito Vda. De Peñate, quien me cuida desde el cielo, por formarme como persona y por todos sus consejos durante toda mi vida, de verdad muchas gracias Mamay. A mi madre Flor de María Peñate González, por sacrificarse toda su vida para que a mí no me falte nada. A mi hermano Joaquín Oswaldo Sandoval Peñate, por ser un ejemplo para mi vida en lo personal y profesional. A Gabriela Alejandra Hernández Rubio y a toda su familia por acompañarme durante toda mi vida universitaria y en mi crecimiento tanto personal como profesional. A mis amigos Gustavo Carranza y Andrea Flores por permitirme conocerlos y motivarme a seguir mis estudios en mis peores momentos. A mis amigos Fernanda Judith Henríquez Villatoro y Raúl Edgardo Ávalos Caballero por todo su apoyo y ánimos durante la elaboración de la tesina, y por último a mis docentes que me formaron y prepararon para mi vida profesional, especialmente a mi docente asesor Ing. Nelson Vaquero, por toda la paciencia y apoyo que me brindó durante la elaboración de esta tesina. De verdad muchas gracias a todos, sin ustedes esto no hubiese sido posible.*

*Rodrigo Alejandro Sandoval Peñate.*

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
1.1 CONTEXTO.....	3
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	4
1.3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	5
1.4 OBJETIVOS.....	6
OBJETIVO GENERAL .....	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	6
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	7
1.6 BENEFICIOS ESPERADOS .....	8
1.7 LIMITACIONES.....	9
CAPÍTULO II.....	10
MARCO TEÓRICO .....	10
2.1 CALIDAD DEL AGUA Y SU IMPORTANCIA EN LA INDUSTRIA AZUCARERA.....	11
2.1.1 AGUA Y SUS USOS INDUSTRIALES .....	11
2.1.2 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA.....	11
2.1.2.1 DUREZA DEL AGUA .....	12
2.1.2.2 TEMPERATURA.....	13
2.1.2.3 VELOCIDAD .....	13
2.1.2.4 POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH).....	13
2.1.3 USOS INDUSTRIALES.....	13
2.1.3.1 TRANSFERENCIA DE CALOR .....	14
2.1.4 APLICACIÓN A PROCESOS.....	15
2.1.4.1 TRANSPORTE .....	15
2.1.4.2 AGUA PARA LAVADOS .....	15
2.1.4.3 GENERACIÓN DE ENERGÍA.....	15
2.1.4.4 AGUA PARA USOS GENERALES .....	16
2.1.5 CONTAMINACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS .....	16

2.1.5.1	CONTAMINACIÓN ORGÁNICA .....	16
2.1.5.2	CONTAMINACIÓN INORGÁNICA.....	16
2.1.5.3	CONTAMINACIÓN DE ORIGEN INDUSTRIAL .....	17
2.1.5.4	CONTAMINANTES QUÍMICOS.....	17
2.2	IMPACTO AMBIENTAL DE LA INDUSTRIA AZUCARERA.....	18
2.2.1	IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR LOS INGENIOS AZUCAREROS .....	18
2.2.1.1	EFFECTOS SOBRE EL AGUA.....	18
2.2.1.2	EFFECTOS SOBRE EL AIRE.....	19
2.2.1.3	EFFECTOS SOBRE EL SUELO .....	20
2.3	LEGISLACIÓN Y REGULACIONES AMBIENTALES .....	21
2.3.1	MARCO REGULATORIO DEL AGUA EN EL SALVADOR .....	23
2.4	TECNOLOGÍAS Y MEJORES PRÁCTICAS EN LA INDUSTRIA AZUCARERA.....	25
2.4.1	MÉTODOS BIOLÓGICOS.....	25
2.4.2	TRATAMIENTO ELECTROQUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES .....	27
2.4.3	MÉTODOS FÍSICOS PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA .....	28
2.5	GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA Y EJEMPLOS DE REÚSO EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES ALREDEDOR DEL MUNDO .....	29
2.5.1	ANTOFAGASTA.....	30
2.5.1.1	MOTIVADORES PARA EL REÚSO DEL AGUA TRATADA .....	30
2.5.1.2	TIPOS DE REÚSO .....	30
2.5.2	ATOTONILCO.....	31
2.5.2.1	MOTIVADORES PARA EL REÚSO DEL AGUA TRATADA .....	31
2.5.2.2	TIPOS DE REÚSO .....	32
2.5.3	SACABA.....	32
2.5.3.1	MOTIVADORES PARA EL REÚSO DEL AGUA TRATADA .....	33
2.5.3.2	TIPOS DE REÚSO .....	34
2.5.4	TENORIO.....	34
2.5.4.1	MOTIVADORES PARA EL REÚSO DEL AGUA TRATADA .....	34
2.5.4.2	TIPOS DE REÚSO .....	35
2.5.5	TECNOLOGÍAS USADAS.....	36
2.6	METODOLOGÍA DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA EN LA INDUSTRIA AZUCARERA .....	36
2.6.1	CONCEPTO DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA .....	36



2.6.2 ¿CÓMO IMPLEMENTAR LA PRODUCCIÓN MAS LIMPIA EN LA INDUSTRIA? .....	37
CAPÍTULO III.....	39
METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....	39
3.1 ENFOQUE METODOLÓGICO.....	40
3.2 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	41
3.3 MODELAMIENTO, EXPERIMENTOS Y APLICACIONES .....	41
3.3.1 DISEÑO DEL MÉTODO DE MUESTREO.....	41
3.3.1.2 FRECUENCIA DE MUESTREO .....	43
3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS RECOPIADOS .....	43
3.4.1 RESULTADO DE PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL DEL INGENIO DE ZAFRAS ANTIGUAS COMPARADOS CON EL RTS 13.49.01:09.....	44
3.4.2 RESULTADO DE PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL DEL INGENIO DE LA ZAFRA 2021-2022, COMPARADOS CON LA RTS 13.05.01:18.....	46
3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	48
3.5.1 PARÁMETROS DEL EFLUENTE TOTAL PRETRATAMIENTO.....	49
3.5.2 PARÁMETROS DEL EFLUENTE TOTAL LUEGO DEL TRATAMIENTO .....	51
3.5.3 PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA.....	53
3.5.3.1 PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE DBO.....	53
3.5.3.2 PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE DQO .....	54
3.6 IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS Y DESAFÍOS .....	54
3.6.1 ALTO NIVEL DE DQO Y DBO .....	55
3.6.2 INCONSISTENCIA EN LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS .....	55
3.6.3 GESTIÓN DE NUTRIENTES .....	55
3.6.4 TEMPERATURA ELEVADA.....	55
3.6.5 PROPUESTAS DE ACCIÓN.....	55
3.6.5.1 OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS AERÓBICOS .....	55
3.6.5.2 CONTROL DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS .....	56
3.6.5.3 GESTIÓN INTEGRAL DE NUTRIENTES.....	56
3.6.5.4 MANEJO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA .....	56
3.7 REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES .....	56
3.7.1 RIEGO AGRÍCOLA .....	56
3.7.2 RECARGA DE ACUÍFEROS.....	57

3.7.3 PROCESOS INDUSTRIALES .....	57
3.7.4 LAVADO DE VEHÍCULOS O LIMPIEZA DE ÁREAS PÚBLICAS .....	57
3.8 MEJORAS EN EL TRATAMIENTO .....	57
3.9 ACCIONES DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA PARA IMPLEMENTAR EN LA INDUSTRIA AZUCARERA .....	59
3.9.1 CAMPO / CAÑA .....	59
3.9.2 ÁREA DE BASCULADOR .....	60
3.9.3 ÁREA DE MOLINO .....	60
3.9.4 ÁREA DE FABRICACIÓN .....	60
3.9.4.1 PURIFICACIÓN .....	60
3.9.4.2 EVAPORACIÓN.....	60
3.9.4.3 CRISTALIZACIÓN .....	60
3.9.5 ACCIONES GENERALES DE PRODUCCION MAS LIMPIA .....	61
3.9.5.1 CONSUMO DE AGUA .....	61
3.9.5.2 TRAMPAS DE GRASAS.....	61
3.9.5.3 RESIDUALES LÍQUIDOS Y SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUALES .....	61
3.9.5.4 EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	61
3.10 VIABILIDAD .....	62
4.0 CONCLUSIONES .....	63
5.0 RECOMENDACIONES.....	65
5.1 RECOMENDACIONES PARA EL INGENIO.....	65
5.2 RECOMENDACIONES PARA LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.....	66
BIBLIOGRAFÍA.....	67

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b> Clasificación de la dureza del agua. ....	12
<b>Tabla 2.2.</b> Límites permisibles de parámetros básicos de calidad de aguas residuales de tipo especial (10. Fábricas y refinerías de azúcar) vertidas a medio receptor. (RTS 13.05.01:18) .....	22
<b>Tabla 2.3.</b> Frecuencia mínima de muestreo de parámetros básicos de aguas residuales de tipo especial.....	22
<b>Tabla 2.4.</b> Marco regulatorio del agua .....	23
<b>Tabla 2.5.</b> Tratamientos de las PTAR de Sacaba.....	33
<b>Tabla 2.6.</b> Tecnologías usadas en las PTAR de los casos de estudio .....	36
<b>Tabla 3.1.</b> Resultados obtenidos de los parámetros evaluados por el Ingenio de las zafras 2004 hasta 2010 comparados con el reglamento técnico vigente de esos años. ....	44
<b>Tabla 3.2.</b> Resultados obtenidos de los parámetros evaluados por el Ingenio de la zafra 2021-2022 comparados con el reglamento técnico vigente .....	46
<b>Tabla 3.3.</b> Resultados obtenidos de los parámetros evaluados por el Ingenio de la zafra 2022-2023 pretratamiento.....	49
<b>Tabla 3.4.</b> Resultados obtenidos de los parámetros evaluados por el Ingenio de la zafra 2022-2023 post tratamiento. ....	51
<b>Tabla 3.5.</b> Porcentaje de remoción de DBO .....	53
<b>Tabla 3.6.</b> Porcentaje de remoción de DQO.....	54

## LISTA DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 3.1.</b> Comparación de la calidad del agua residual del Ingenio, parámetros de DBO y DQO. ....	46
--	----

## INTRODUCCIÓN

El consumo excesivo del agua en los últimos años ha presentado un importante aumento debido al incremento en la demanda alimenticia por parte de la población salvadoreña. El uso desmedido del recurso hídrico supone un deterioro ambiental y agotamiento de fuentes naturales, a lo cual se suma la contaminación a causa de las aguas residuales sin previo tratamiento, descargadas en los cuerpos receptores.

Los efluentes líquidos o aguas residuales son aquellas cuyas características han sido modificadas como consecuencias del uso domiciliar o industrial, de modo que su calidad se ha degradado. Estas modificaciones suponen la presencia de contaminantes de distintos estados fisicoquímicos y que representan potenciales daños medioambientales; Dichos contaminantes pueden ser orgánicos, químicos y biológicos, por ende, requieren de un adecuado tratamiento antes de ser vertidos en cuerpos receptores destinados.

El objetivo principal de esta investigación es realizar un análisis de los impactos hídrico-ambientales provocados por la falta de gestión de efluentes líquidos contaminantes como productos no deseados obtenidos en la elaboración del azúcar de caña. Siendo primordial la caracterización de los agentes contaminantes para una gestión eficiente, determinando así un tratamiento adecuado para las aguas residuales de la agroindustria. Esto favorece el aprovechamiento del recurso para su reutilización en el proceso de producción.

Un aspecto notorio de mucha preocupación es el deterioro de las condiciones hídricas, tanto en la disminución de los niveles estáticos como en la calidad de las aguas para el abastecimiento de las plantas procesadoras. A partir de esto, se desea contribuir con el uso efectivo del agua en la industria del azúcar y la gestión de efluentes residuales, tratamientos y monitoreo de zonas de descarga, ayudando a reducir el impacto de la contaminación medio ambiental y la preservación de los recursos no sustentables y limitados.

## **CAPÍTULO I**

### **ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

## 1.1 CONTEXTO

Situación de la industria azucarera: El Salvador cuenta con una industria azucarera significativa que desempeña un papel importante en la economía del país. La producción de azúcar de caña es una de las principales actividades agrícolas e industriales, con numerosos ingenios azucareros distribuidos en diferentes regiones del país. Esto convierte a la industria azucarera en un sector relevante en términos de empleo, ingresos y exportaciones.

Recursos hídricos: El Salvador se enfrenta a desafíos significativos en la gestión de recursos hídricos debido a la escasez de agua y la degradación de fuentes de agua dulce. La disponibilidad y calidad del agua son aspectos críticos en un país con un alto estrés hídrico, y la industria azucarera es una de las que más agua consume en sus procesos.

Contaminación del agua: La contaminación del agua es un problema ambiental en El Salvador, y las actividades industriales, incluida la producción de azúcar, pueden contribuir a la degradación de la calidad del agua. Los residuos de los ingenios azucareros, como los subproductos y los compuestos químicos utilizados en el proceso, pueden tener un impacto negativo en las fuentes de agua y los ecosistemas circundantes.

Regulaciones ambientales: El gobierno de El Salvador ha implementado regulaciones ambientales destinadas a controlar y reducir la contaminación del agua y a garantizar la gestión sostenible de los recursos hídricos. Estas regulaciones pueden afectar a los ingenios azucareros y su responsabilidad ambiental en la gestión del agua.

Sostenibilidad y responsabilidad social: En los últimos años, ha habido un creciente interés por la sostenibilidad y la responsabilidad social en la industria azucarera de El Salvador. Esto incluye la adopción de prácticas más respetuosas con el medio ambiente y la mejora de la gestión de recursos hídricos como parte de un enfoque más amplio de responsabilidad corporativa.

En este contexto, el estudio de la calidad del agua en el proceso de producción de azúcar de caña en los ingenios azucareros de El Salvador adquiere una relevancia especial, ya que se relaciona con los desafíos ambientales y económicos del país, así como con la sostenibilidad y la responsabilidad corporativa en la industria azucarera. Además, contribuye al esfuerzo por mantener y mejorar la calidad de los recursos hídricos en una nación que se enfrenta a limitaciones en su disponibilidad.

## 1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los ingenios azucareros en El Salvador utilizan una gran cantidad de agua para la producción de azúcar. El proceso necesita agua desde el lavado y preparación de la caña de azúcar para la extracción del jugo de caña, alimentación a las calderas, limpieza y desinfección de equipos, calentamiento de jugos y dilución de mieles. La mayor parte del agua utilizada se obtiene de fuentes subterráneas.

Las aguas residuales producidas contienen principalmente azúcares no fermentados, proteínas, sustancias nitrogenadas, ácidos orgánicos y otras sustancias derivadas ligadas directamente al producto principal del ingenio azucarero. Estas sustancias orgánicas representan un contaminante para los cuerpos naturales de agua sobre los cuales son dispuestas debido a la demanda bioquímica de oxígeno necesaria para su degradación. Como resultado de las actividades de limpieza, uso de sustancias químicas para el funcionamiento del proceso y mantenimiento de los equipos, las aguas residuales contienen cantidades significativas de sulfatos de fósforo, potasio, calcio, sales entre distintos productos derivadas de la combustión del bagazo y otros combustibles utilizados en el proceso. Por otra parte, hay que tomar en consideración la alta temperatura de salida de estas aguas residuales, aumentando su impacto ambiental.

Estos efluentes contaminantes son vertidos en las cuencas hídricas cercanas al ingenio azucarero, contribuyendo al grave problema de contaminación de los recursos hídricos de nuestro país. La forma en que se gestionan estos efluentes en la industria azucarera es un tema de mucha importancia y preocupación, reducir el impacto ambiental causado por los vertidos mal gestionados en el rubro azucarero se ha vuelto un tema de primera instancia a resolver, buscando una reducción significativa en el impacto negativo que sufren el medio ambiente y los recursos naturales utilizados en la industria.

### 1.3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Cómo podemos reutilizar de forma eficiente el agua proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales del ingenio luego de su tratamiento?
2. ¿Cuál es el efecto de la descarga de efluentes de los ingenios azucareros en las aguas superficiales y subterráneas?
3. ¿Cómo se comparan los niveles de contaminantes en las fuentes de agua utilizadas por los ingenios azucareros con los estándares de calidad del agua establecidos por la legislación salvadoreña?
4. ¿Cuáles son las prácticas y tecnologías actuales utilizadas por los ingenios azucareros para el tratamiento y la gestión del agua en su proceso de producción?
5. ¿Cuáles son los desafíos que enfrenta la industria azucarera en El Salvador en términos de cumplimiento de las regulaciones ambientales relacionadas con el agua?
6. ¿Qué medidas y prácticas podrían implementarse para mejorar la gestión sostenible del agua en la producción de azúcar de caña en El Salvador?



## **1.4 OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la calidad del agua luego del proceso de producción de azúcar de caña en los ingenios azucareros de El Salvador y proponer recomendaciones para una gestión sostenible del recurso hídrico en la industria azucarera.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Realizar la caracterización fisicoquímica de los diferentes efluentes en los ingenios azucareros de El Salvador que permita desarrollar métodos de tratamiento para el cumplimiento de los parámetros de descarga.
- b) Comparar los niveles de contaminantes en las fuentes de agua utilizadas por los ingenios azucareros con los estándares de calidad del agua establecidos por la legislación salvadoreña.
- c) Analizar las prácticas y tecnologías actuales utilizadas por plantas de tratamiento de agua residual para el tratamiento y la gestión del agua luego de su proceso industrial respectivo.
- d) Identificar los desafíos que enfrenta la industria azucarera en El Salvador en términos de cumplimiento de las regulaciones ambientales relacionadas con el agua.
- e) Proponer medidas y prácticas que podrían implementarse para mejorar la gestión sostenible del agua residual proveniente de la producción de azúcar de caña en El Salvador.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

Relevancia para la industria azucarera en El Salvador: La industria azucarera es un pilar importante de la economía salvadoreña. La producción de azúcar de caña y sus derivados generan empleo y contribuyen de manera significativa a los ingresos nacionales. Sin embargo, la sostenibilidad de esta industria depende en gran medida de la gestión adecuada del agua, ya que es un recurso esencial en todo el proceso de producción.

Impacto en la disponibilidad de agua: La producción de azúcar de caña conlleva un alto consumo de agua, lo que puede afectar la disponibilidad de agua en una región ya afectada por la escasez de recursos hídricos. Evaluar y mejorar la gestión del agua en esta industria es esencial para asegurar el acceso sostenible a este recurso tanto para la industria como para las comunidades circundantes.

Riesgos para la salud pública y el medio ambiente: La calidad del agua utilizada en el proceso de producción y la liberación de efluentes pueden tener un impacto directo en la salud de la población y en la calidad de los ecosistemas acuáticos y terrestres. Abordar la calidad del agua es fundamental para proteger la salud pública y el entorno natural.

Cumplimiento de regulaciones ambientales: El Salvador tiene regulaciones ambientales que establecen estándares de calidad del agua y medidas para prevenir la contaminación. La industria azucarera debe cumplir con estas regulaciones para operar de manera legal y sostenible. Evaluar el grado de cumplimiento y proponer soluciones contribuirá a un cumplimiento más efectivo.

Cambio climático y resiliencia: En un contexto de cambio climático, donde se esperan eventos climáticos extremos, la gestión adecuada del agua se vuelve aún más crítica para la resiliencia de la industria azucarera. La adaptación a las variaciones climáticas es un factor clave para la sostenibilidad a largo plazo.

Contribución a la sostenibilidad: Mejorar la gestión del agua en la industria azucarera puede aumentar su sostenibilidad económica, ambiental y social.

En resumen, este estudio de investigación es fundamental para abordar los desafíos relacionados con la calidad del agua en la industria azucarera de El Salvador, promover la sostenibilidad de la industria y contribuir a la protección del medio ambiente y la salud pública.

## 1.6 BENEFICIOS ESPERADOS

La investigación proporcionará información valiosa sobre la calidad del agua y las prácticas actuales en la industria azucarera. Esto puede llevar a una mejora significativa en la gestión del agua en los ingenios azucareros, lo que beneficiará tanto a la industria como al medio ambiente.

Al identificar áreas donde la industria azucarera puede no estar cumpliendo plenamente con las regulaciones ambientales, la investigación puede ayudar a las empresas a ajustar sus prácticas y operaciones para cumplir con las normativas legales, evitando posibles sanciones y mejorando su reputación.

La implementación de medidas recomendadas a partir de la investigación puede reducir la contaminación de las fuentes de agua y disminuir el impacto ambiental de la industria azucarera. Esto contribuirá a la preservación de ecosistemas acuáticos y terrestres.

La gestión sostenible del agua puede ayudar a la industria azucarera a largo plazo al garantizar la disponibilidad continua de este recurso vital para su producción. Esto puede aumentar la competitividad de la industria en los mercados nacionales e internacionales.

La investigación puede aumentar la conciencia pública sobre los desafíos y la importancia de la gestión del agua en la industria azucarera. También puede servir como recurso educativo para estudiantes, académicos y profesionales interesados en la gestión del agua y la sostenibilidad.

En resumen, este trabajo de investigación tiene el potencial de generar beneficios tanto a nivel local como a nivel más amplio, al abordar los desafíos relacionados con la calidad del agua en la industria azucarera y promover prácticas más sostenibles y responsables.

## 1.7 LIMITACIONES

Uno de los principales obstáculos enfrentados durante el desarrollo de este estudio fue la limitada accesibilidad a información detallada y específica proporcionada por el Ingenio en el cual realizaríamos la investigación, al cual haremos referencia como “El Ingenio” en la misma; debido a que no se tiene autorización por parte de “El Ingenio” para difundir la información proporcionada. Esta restricción tuvo un impacto significativo en la investigación ya que la información obtenida por parte del ingenio fue muy limitada y no se tuvo acceso a datos detallados sobre los procesos internos del tratamiento de aguas en el ingenio, esto limitando también el desarrollo de propuestas de mejora más específicas y soluciones personalizadas que aborden de manera efectiva los desafíos y necesidades únicas del ingenio.

**CAPÍTULO II**  
**MARCO TEÓRICO**

## **2.1 CALIDAD DEL AGUA Y SU IMPORTANCIA EN LA INDUSTRIA AZUCARERA**

Para poder abordar la problemática planteada es necesario explorar la importancia crítica del agua en la industria azucarera. Aquí, los parámetros fisicoquímicos del agua, como su dureza, temperatura, velocidad de flujo y pH se revelan como elementos clave que influyen en numerosos procesos industriales, desde la transferencia de calor hasta la generación de energía y las operaciones de limpieza. Esta investigación no solo resalta la versatilidad del agua como recurso, sino que también subraya su papel indispensable en la eficiencia y sostenibilidad de la industria.

En este capítulo nos sumergiremos en la problemática de la contaminación de los recursos hídricos. Aquí, se detallan los distintos tipos de contaminantes -orgánicos, inorgánicos e industriales- y se discuten sus impactos tanto en el medio ambiente como en la salud pública. Esta sección es crucial para entender cómo las actividades de la industria azucarera pueden afectar a los ecosistemas acuáticos y terrestres, así como las implicaciones para la comunidad y la legislación ambiental.

### **2.1.1 AGUA Y SUS USOS INDUSTRIALES**

El agua es el compuesto químico inorgánico más versátil y de mayor uso en el planeta. El volumen contabilizado de este recurso asciende a los 1,400 millones de kilómetros cúbicos, de los cuales solo el 2.5% es agua dulce, pero no toda esta cantidad está a disponibilidad del consumo humano debido que un gran porcentaje del agua dulce se encuentra congelada en los polos o glaciares, otra parte se encuentra enterrada bajo la superficie de mantos acuíferos, y otro pequeño porcentaje se obtiene de ríos y lagos. (UICN, 1999).

### **2.1.2 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA**

Estos parámetros permiten conocer las propiedades que presenta un cuerpo de agua respecto de su naturaleza. Sirven para delimitar el uso del agua, entre los más importantes para el estudio del recurso tenemos: dureza, temperatura, pH, sólidos suspendidos totales o salinidad, metales pesados, velocidad de la corriente, oxígeno disuelto. Por otra parte, las características organolépticas del agua

son un factor muy importante para su análisis, entre ellas tenemos: olor, sabor, color. Estas permiten describir de forma general el estado de la calidad del agua en estudio. (Páez, 2008).

### 2.1.2.1 DUREZA DEL AGUA

La dureza del agua se determina por la presencia de carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ), otorga propiedades al agua y puede ser alterada en aguas superficiales como en ríos debido a factores como: lechos de ríos, descarga de aguas residuales, tipos de contaminación al que se somete el ecosistema, presiones antropogénicas. De acuerdo con estas condiciones las aguas que presenten altos índices de este parámetro son sospechosas de poseer factores contaminantes.

Para las aguas de corrientes, si la dureza es inferior a 17 mg/l de  $CaCO_3$  el agua se considera blanda, si la dureza es mayor a 180 mg/l se considera agua muy dura (Harrys, 1999).

Medidas de dureza en el agua empleadas:

- i. mg/L de carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ).
- ii. El Grado hidrotimétrico.
- iii. El Grado alemán.
- iv. El Grado francés (con un equivalente a mg/L de carbonato de calcio en agua).

Para el conocimiento del estado del agua respecto a la dureza que posee; de acuerdo con Harrys (1999), se muestra su clasificación en la Tabla 2.1:

**Tabla 2.1. Clasificación de la dureza del agua (Harrys 1999).**

Tipo de agua	Contenido ( $CaCO_3$ )
Agua blanda	Menos de 17 mg/L
Agua levemente dura	Desde 17 hasta 60 mg/L
Agua moderadamente dura	Desde 60 hasta 120 mg/L
Agua dura	Desde 120 hasta 180 mg/L
Agua muy dura	Más de 180 mg/L

### **2.1.2.2 TEMPERATURA**

Este factor desempeña un papel crucial al considerar la dilución de sustancias. Cuanto más alta sea la temperatura, mayor será la concentración de contaminantes y más amplio será el rango de descomposición, lo que a su vez aumentará la demanda bioquímica de oxígeno (DBO). La temperatura tiene el poder de restringir diversos usos del agua y afectar a los organismos que se desarrollan en su entorno. (Anaya, A; Lozano, J. 2007).

### **2.1.2.3 VELOCIDAD**

La velocidad está delimitada por la naturaleza física del ecosistema, en ríos es conocidos que las formaciones rocosas pueden incrementar la velocidad del agua. Este factor influye mucho en la autodepuración de las aguas superficiales, así como en la oxigenación natural por difusión atmosférica. (Páez, 2008).

### **2.1.2.4 POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)**

El pH es una forma logarítmica de expresar la concentración molar de iones de hidrógeno. Este parámetro indica el grado de acidez o de alcalinidad de una sustancia y lo hace mediante la determinación o identificación de protones que están libres. La importancia de este parámetro radica en que el pH es una variable fundamental para la mayoría de las reacciones químicas. Además, los contaminantes tienen rangos óptimos de pH que cambian sus estados y sus toxicidades. (Valera, 2016)

### **2.1.3 USOS INDUSTRIALES**

La industria utiliza el agua para la elaboración de productos, materia prima, transmisión de calor o enfriamiento, generación de vapor, lavado, clasificación y transporte de materiales, etc. Los alimentos elaborados en la industria requieren agua de calidad, aunque también se utiliza agua para el aprovechamiento de desechos. Los usos industriales del agua son muy diversos y están condicionados en gran medida a lo que producen.



En los procesos industriales el agua realiza importantes funciones, entre las que se destaca el uso como materia prima, para transporte de materiales y en procedimientos de lavado. El agua también se emplea para la generación de energía, ya sea en una planta industrial o en una estación generadora. así mismo, el agua se usa en otras aplicaciones que pueden ser exclusivas de un solo tipo de industria o incluso de una sola planta. (Valera, 2016)

### **2.1.3.1 TRANSFERENCIA DE CALOR**

La industria capitaliza la gran capacidad calorífica del agua para aprovecharla en unidades de procesos económicos para calentamiento o enfriamiento.

El método más común para suministrar calor a las diversas áreas de un complejo industrial es la generación de vapor. El vapor se produce mediante un combustible en una estación generadora central y se distribuye a toda la planta a presión y velocidad relativamente altas. La temperatura en cada unidad se controla regulando el flujo a la presión.

Durante muchos años se han utilizado la circulación del agua en equipos de enfriamiento. El volumen de líquido que debe extraerse de una fuente de agua dulce para abastecer un sistema de enfriamiento puede reducirse considerablemente si se utiliza una torre de enfriamiento.

La temperatura a la que se puede enfriar el agua recirculada está limitada por la temperatura de bulbo húmedo del aire que se utiliza para inducir la evaporación. La temperatura del agua recirculada casi siempre será mayor que la de la fuente original. Puesto que todas las plantas de fabricación de productos alimenticios son tan diferentes entre sí, es más sencillo examinar los requerimientos de agua y vapor para las operaciones unitarias, que tratar de determinar las necesidades de agua y vapor para diferentes clasificaciones de plantas de procesos. (Páez, 2008)

## **2.1.4 APLICACIÓN A PROCESOS**

En los procesos industriales el agua realiza importantes funciones, entre las que se destaca el uso como materia prima, para transportar materiales y en procedimientos de lavado; asimismo, en muchas otras aplicaciones que pueden ser exclusivas de un solo tipo de industria e incluso de una sola planta. (Páez, 2008)

### **2.1.4.1 TRANSPORTE**

Así, como las corrientes naturales de agua llevan sólidos en suspensión, las corrientes que circulan dentro de tuberías o de canaletas en una fábrica pueden transportar materiales de un área a otra dentro de la misma planta. (Páez, 2008)

### **2.1.4.2 AGUA PARA LAVADOS**

El agua es un medio adecuado para el lavado general de equipos industriales. Lavar el equipo industrial es importante por razones prácticas, tales como: seguridad para el personal; para resguardar la calidad del producto y para evitar contratiempos al ritmo de producción. (Páez, 2008)

### **2.1.4.3 GENERACIÓN DE ENERGÍA**

El agua también se emplea para generar energía, ya sea en una planta industrial o en una estación generadora. La planta industrial que produce vapor para transformarlo en energía tiene pérdidas de agua mayores que una estación generadora, por lo que requiere una mayor cantidad de agua de reemplazo; así mismo, el grado de contaminación del condensado y la temperatura del condensado que recircula es diferente en ambas instalaciones. (Páez, 2008)

#### **2.1.4.4 AGUA PARA USOS GENERALES**

El agua es un material tan económico y conveniente, que la industria lo ha aplicado a innumerables trabajos de la más diversa índole.

#### **2.1.5 CONTAMINACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS**

Se conoce como contaminación al cambio que se da en la configuración original de un ambiente natural. Estos cambios pueden ocurrir debido al incremento o disminución de alguna sustancia o elemento, esto mismo sucede cuando se incorporan otros organismos que no son propios del ambiente en sus condiciones originales. Finalmente, estos cambios pueden darse debido a la destrucción de la estructural natural del recurso.

El agua pura es un recurso renovable, sin embargo, esta puede llegar a ser contaminada por las actividades humanas, hasta el grado en el que no sea posible utilizarla para ningún fin, sino más bien pueda tornarse dañina para la salud de los seres vivos. Entre los tipos de contaminación que se pueden dar tenemos: contaminación orgánica y contaminación inorgánica (Walker et, 2001).

##### **2.1.5.1 CONTAMINACIÓN ORGÁNICA**

Esta ocurre cuando agentes patógenos como virus, bacterias, protozoarios y parásitos entran al recurso hídrico proveniente de corrientes sin previo tratamiento, como resultado del contacto se pierde la utilidad de este.

Los desechos orgánicos pueden ser descompuestos por bacterias que usan oxígeno para biodegradarlos. Cuando existen poblaciones extensas de estas bacterias, se agota el oxígeno presente en el agua eliminando las formas de vida marítima. (Páez, 2008)

##### **2.1.5.2 CONTAMINACIÓN INORGÁNICA**

Esta sucede cuando sustancias químicas como ácidos o metales pesados (plomo, mercurio), están presentes en el agua en altas concentraciones, por lo que no es apta para el consumo de los seres

vivos, ya que estas concentraciones de químicos resultan nocivas e inclusive mortales. Este tipo de contaminación al igual que la orgánica, disminuye la biodiversidad de organismos acuáticos los cuales no son tolerantes a estos cambios.

Las fuentes contaminantes de naturaleza inorgánica más representativa son las de origen agrícola, mientras que las fuentes de naturaleza orgánica más representativa es la de origen doméstico, conocida por aguas residuales. La contaminación de origen industrial posee a ambas naturalezas de contaminación por lo que se considera la fuente de contaminación más representativa. (Páez, 2008)

### **2.1.5.3 CONTAMINACIÓN DE ORIGEN INDUSTRIAL**

Se entiende por contaminación industrial a la emisión de sustancias nocivas, tóxicas o peligrosas, provenientes de forma directa o indirecta de las instalaciones y procesos industriales al ambiente natural.

Los contaminantes contenidos en aguas de origen industrial son inmensurables ya que están ligados al tipo de producción. En general la contaminación de origen industrial puede ser causada por materia inorgánica que se encuentra en suspensión y en solución. Puede darse también debido a la acumulación de sustancia orgánica como desechos fenólicos, orgánicos fermentables y tóxicos. Por otra parte, tenemos una gran cantidad de desperdicios como producto del proceso productivo. Alrededor del mundo los efectos de la producción industrial son más notorios, dejando en evidencia casos como: detergentes contenidos en aguas naturales, así como una gran variedad de desechos sólidos provenientes en su mayoría de descargas industriales. (Páez, 2008)

### **2.1.5.4 CONTAMINANTES QUÍMICOS**

La contaminación química puede ocurrir en cualquier paso del proceso de producción de alimentos. Los químicos pueden ser de mucha utilidad y son utilizados de forma intencional en muchos alimentos, tal como el caso de los pesticidas en las frutas y vegetales. Los químicos no representan un riesgo si son utilizados bajo un adecuado control.

El riesgo potencial para el consumidor incrementa cuando los químicos no se controlan o se exceden los niveles de tratamientos recomendados. Las cantidades que aplicar de un químico determinan si es

peligroso o no, algunos requieren una exposición prolongada para tener un efecto nocivo, por lo cual existen límites y regulaciones en la legislación medioambiental para el correcto uso de estos químicos contaminantes. (Páez, 2008)

## **2.2 IMPACTO AMBIENTAL DE LA INDUSTRIA AZUCARERA**

El impacto ambiental, son las consecuencias provocadas por cualquier acción humana que modifique las condiciones de supervivencia de los ecosistemas. El impacto ambiental es “la alteración de la calidad del medioambiente producido por una actividad humana”; por lo tanto, es el resultado de aquellas acciones humanas que provocan la modificación del ambiente. (Garmendia, Salvador, Crespo, Garmendia, 2005)

Los diferentes procesos de producción generan diferentes desechos y emisiones causados por actividades, procesos y acciones humanas, económicas, sociales, culturales, políticas y de otro tipo. Cualquier cosa que cambie el medio ambiente y tenga un impacto negativo en el medio ambiente, la economía o la sociedad. Es importante comprender su impacto ambiental para minimizarlo tanto como sea posible. El uso irrazonable de los recursos naturales renovables y no renovables, como las actividades industriales, mineras y agrícolas, afecta el medio ambiente y tiene consecuencias ecológicas negativas no sólo para el ecosistema natural sino también para los seres humanos y sus aspectos socioculturales. Los impactos más graves y dañinos para los seres humanos provienen de recursos naturales como el aire, el agua y el suelo, y pueden afectar no sólo las actividades económicas de las empresas sino también el bienestar de las comunidades locales.

### **2.2.1 IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR LOS INGENIOS AZUCAREROS**

#### **2.2.1.1 EFECTOS SOBRE EL AGUA**

Las aguas residuales generadas en las fábricas de azúcar provienen principalmente del proceso de limpieza, Del sistema de caldera (agua para el lavado de sólidos producidos por la combustión de la caldera), Emisiones de estaciones de evaporación y cocción (exceso de condensado y agua de lavado), Derivado de la depuración (intercambio iónico de agua reciclada), Terrazas y apartamentos.

El ordenamiento de la gestión del agua en un proceso azucarero debe tener como objetivo minimizar la cantidad de agua residual generada, que requiera el mínimo tratamiento y se pueda reutilizar dentro del proceso de producción. Los tratamientos de aguas residuales que se pueden utilizar dentro del proceso dependen en gran medida de las características locales. Esto incluye la construcción de lagunas de oxidación, plantas de tratamiento de aguas residuales y sistemas de retorno o reciclaje de aguas residuales.

Corrientes de agua que se originan durante el proceso productivo de la azúcar:

- i. Aguas procedentes de los molinos: que trasladan residuos de lubricación, con un alto contenido de grasas lubricantes y cantidades pequeñas de sacarosa, que depende del cuidado con que se realicen las operaciones.
- ii. Aguas derivadas de la limpieza de los equipos: estas se originan en los evaporadores y clarificadores, las mismas presentan turbidez y poca materia sedimentable.
- iii. Aguas de lavados y limpiezas de los filtros de cachaza: normalmente contienen impurezas adicionales de los procesos de fabricación, son aguas acidas con un nivel considerable de turbidez, contenido de sólidos y materia orgánica.
- iv. Aguas de enfriamiento de equipos tecnológicos: estas aguas son utilizadas en los puntos de apoyo de los tándems, bombas de vacío, enfriamiento de cristalizadores, entre otros; y contienen residuos de lubricación.
- v. Otras aguas residuales: estas se producen ocasionalmente como reboso en los tanques de agua, limpieza de los pisos, extracciones de calderas, entre otras. (Ofarrill, Jiménez, Rivero, 2013)

#### **2.2.1.2 EFECTOS SOBRE EL AIRE**

Las emisiones atmosféricas de las calderas incluyen vapores, humo de procesos industriales y sustancias volátiles como hollín y cenizas. Además, durante la purificación del zumo y su concentración se produce amoniaco. Durante las reacciones bioquímicas de los componentes orgánicos de las aguas residuales estratificadas de los estanques se liberan amoníaco y ácido sulfúrico. En cuanto a las emisiones a la atmósfera, el sector azucarero posee en las calderas filtros de alta tecnología, cuya función es depurar los gases producidos por la combustión de la biomasa,

minimizar el impacto y cumplir con los parámetros marcados por la normativa medioambiental. De igual forma se debe realizar un mantenimiento preventivo de la caldera para reducir la cantidad total de sólidos en suspensión y monitorear los gases emitidos.

Las emisiones a la atmósfera durante la molienda corresponden a humo, gases de combustión en las calderas, partículas de carbón y partículas de bagazo.

Los gases de combustión contienen dióxido de carbono y otros gases que contribuyen al efecto invernadero, y del mismo modo al calentamiento global y otros fenómenos como la lluvia ácida. Las partículas de carbón y ceniza también producen daños como la contaminación del agua, del suelo e intoxicación de flora y fauna; así como también produce enfermedades de carácter respiratorio y ocular. Del mismo modo las partículas de bagazo tienen un impacto negativo en la salud humana produciendo neumonitis por hipersensibilidad llamada también bagazosis, que pertenece al grupo de enfermedades respiratorias. (Morales, 2011)

### **2.2.1.3 EFECTOS SOBRE EL SUELO**

Los residuos sólidos generados durante el procesamiento de la caña de azúcar incluyen, entre otros, suelo, residuos vegetales, bagazo, cachaza, cenizas de filtros depuradores y lodos de filtros. La industria azucarera reutiliza los residuos sólidos generados en sus procesos, lo que puede reducir su impacto en el medio ambiente. La cachaza y la ceniza se incorporan a los campos como abono orgánico, la melaza se vende y el bagazo es la principal materia prima para la producción de energía. Además, los residuos sólidos domésticos (papel, cartón, restos de envases, plástico, etc.) se acumulan en oficinas y cafeterías.

El suelo es un medio contaminado por la industria azucarera y entre los desechos que propician esta contaminación se pueden mencionar:

Vinazas: Este desecho tiene un gran impacto ambiental en el suelo afectado tanto directa como indirectamente a la flora y la fauna, las vinazas contienen un gran contenido de materias orgánicas y nutrientes como nitrógeno, azufre, fósforo y una gran cantidad de potasio, del mismo modo contiene compuestos orgánicos como alcoholes, ácidos orgánicos y aldehídos. A pesar de los nutrientes que las vinazas poseen no es buena opción para utilizarlo como abono debido a su acidez ya que ésta

provoca que se forme una especie de placa de cal en el campo ocasionando que este pierda su fertilidad.

Cachazas: Durante la decantación del jugo se produce lodo, luego del proceso de recuperación del jugo contenido en los lodos se genera la cachaza; la descomposición de esta contribuye con la emisión de dióxido de carbono y metano, aparte de tener un olor muy desagradable; para poder utilizarla como nutriente para el suelo debe ser tratada de lo contrario ocasiona retraso en el crecimiento de los cultivos. (Morales, 2011)

### **2.3 LEGISLACIÓN Y REGULACIONES AMBIENTALES**

En El Salvador, recientemente se aprobaron legislaciones con respecto al uso del agua en el territorio nacional. Por lo cual, el Ingenio azucarero se ve en la obligación de cumplir con las normativas establecidas en la Ley General de Recursos Hídricos, que establece la obligación de las industrias salvadoreñas a tramitar el permiso de uso de agua con la Autoridad Salvadoreña del Agua, organismo encargado de velar por el uso sostenible y responsable de los recursos hídricos del país. También en el Reglamento Técnico Salvadoreño de aguas residuales RTS 13.05.01:18 se establecen los parámetros técnicos de las aguas residuales de descarga que deben cumplir las industrias salvadoreñas. Estas normativas tienen como principal objetivo la prevención de la contaminación hídrica y la conservación de su calidad para ser utilizadas en diversos fines.

El ingenio reconoce la necesidad de optimizar este sistema para cumplir con los parámetros de la RTS 13.05.01:18 para fábricas y refinerías de azúcar, los cuales son:



**Tabla 2.2. Límites permisibles de parámetros básicos de calidad de aguas residuales de tipo especial (10. Fábricas y refinerías de azúcar) vertidas a medio receptor. (RTS 13.05.01:18)**

	DQO	$DBO_{5,20}$	Aceites y grasas	Sólidos suspendidos totales	Potencial de Hidrógeno pH	Temperatura
Industria Azucarera	500 mg/L	300 mg/L	30 mg/L	150 mg/L	6.0-9.0	20-35 °C

Su aplicación se extiende a todo el país para la descarga de aguas residuales vertidas a un cuerpo receptor permitiendo observar el cumplimiento de los valores permisibles establecidos en esta norma de forma que no causen efectos negativos en el cuerpo receptor tales como olor, color, turbidez, entre otros. (RTS 13.05.01:18)

La frecuencia mínima de muestreo y análisis de las aguas residuales de tipo especial se realizará a la entrada y salida del sistema de tratamiento, según se establece de este Reglamento. (RTS 13.05.01:18):

**Tabla 2.3. Frecuencia mínima de muestreo de parámetros básicos de aguas residuales de tipo especial. (RTS 13.05.01:18)**

Parámetro	Entrada	Salida	Caudal del efluente m <sup>3</sup> /día	
			≤ 20	> 20
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	X	X	Semestral	Trimestral
Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ )	X	X	Semestral	Trimestral
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	X	X	Semestral	Trimestral
Sólidos Sedimentables (SS)		X	Diario	Diario
Aceites y Grasas	X	X	Semestral	Trimestral
Potencial de Hidrogeno (pH)		X	Diario	Diario
Temperatura (°C)		X	Diario	Diario
Caudal (Q)		X	Diario	Diario

### 2.3.1 MARCO REGULATORIO DEL AGUA EN EL SALVADOR

Tabla 2.4. Marco regulatorio del agua (Adaptado del marco legal de la ASA 2023).

Instrumento	Objetivo	Campo de Aplicación	Publicación en el Diario Oficial
<b>Ley General de Recursos Hídricos</b>	Regular la gestión integral de las aguas, su sostenibilidad, garantizar el derecho humano al agua, la seguridad hídrica para una mejor calidad de vida de todos los habitantes del país; y promover el desarrollo humano, social y económico mediante la utilización sustentable de los recursos hídricos.	Todas las aguas continentales, insulares, estuarinas, marinas, subterráneas y atmosféricas, cualquiera que sea su ubicación dentro del territorio nacional, independientemente de su estado físico, calidad o condición natural	21 de diciembre de 2021
<b>Ley de Medio Ambiente</b>	Desarrollar las disposiciones de la Constitución de la República, que se refiere a la protección, conservación y recuperación del medio ambiente; el uso sostenible de los recursos naturales que permitan mejorar la calidad de vida de las presentes y futuras generaciones; así como también, normar la gestión ambiental, pública y privada	Gestión ambiental, incluyendo el agua de todo el territorio salvadoreño.	4 de octubre de 2021 (Original: 08 de febrero de 2007 D.O. N°47, Tomo N°374)

Continúa...

**Tabla 2.4. Marco regulatorio del agua (continuación)**

<b>Instrumento</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Campo de Aplicación</b>	<b>Publicación en el Diario Oficial</b>
<b>Lineamientos Generales para Descarga de Aguas Residuales del Subsector de Agua con Fines Industriales, Agroindustriales, Recreativos y Otros</b>	Establecer los límites máximos permisibles para los parámetros de calidad de las aguas residuales generadas por personas naturales o jurídicas que hacen uso de agua con fines industriales, agroindustriales, recreativos y otros.	Estos lineamientos serán de obligatorio cumplimiento para las entidades públicas o privadas que realizan de forma directa o indirecta vertidos al medio receptor, originados por el uso del agua en actividades industriales, agroindustriales, recreativas y otros.	18 de noviembre de 2022 (N°232, Tomo N°437)
<b>Reglamento Especial Para la Determinación de Cánones por Uso y Aprovechamiento de Recursos Hídricos.</b>	El desarrollo de los procedimientos necesarios para el cumplimiento de los dispuesto en la Ley General de Recursos Hídricos sobre el régimen económico a aplicar asociado al canon por uso y aprovechamiento de recursos hídricos ya sea consuntivo o no consuntivo	Todo el territorio nacional.	1 de diciembre de 2022 (N°234, Tomo 437)

Continúa...

**Tabla 2.4. Marco regulatorio del agua (continuación)**

Instrumento	Objetivo	Campo de Aplicación	Publicación en el Diario Oficial
<b>Disposiciones Transitorias del Tribunal Sancionador ASA</b>	Regular las actividades y procedimientos que realizará el Tribunal Sancionador-en adelante "el Tribunal o TSA"-, de acuerdo con las normas contenidas en la Ley General de Recursos Hídricos.	Están sujetos a esta regulación todas aquellas personas presuntas infractoras de lo dispuesto en la Ley General de Recursos Hídricos, sus reglamentos o normativa anexa,	7 de diciembre de 2022

## **2.4 TECNOLOGÍAS Y MEJORES PRÁCTICAS EN LA INDUSTRIA AZUCARERA**

Siguiendo la exploración de los impactos ambientales de la industria azucarera y la legislación correspondiente al agua en el país, avanzamos hacia la discusión sobre las soluciones y estrategias para mitigar estos efectos, destacando los métodos biológicos de tratamiento de aguas residuales. Aquí, analizamos cómo estas tecnologías no solo mejoran la eficiencia en el uso del agua, sino que también promueven prácticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, un paso crucial hacia una industria más verde y responsable.

Existen tres métodos que son muy importantes para el tratamiento de las aguas residuales de la industria azucarera:

### **2.4.1 MÉTODOS BIOLÓGICOS**

Las aguas residuales de la industria azucarera generalmente contienen ácidos grasos volátiles y azúcar que es biodegradable, por lo que se emplean métodos de tratamientos anaeróbicos y aeróbicos. (Kushwaha, 2015)

- I. **Tratamiento aeróbico:** El tratamiento aeróbico se utiliza para degradar la materia orgánica en presencia de oxígeno. En los métodos aeróbicos tradicionales, el efluente industrial azucarero se trata mediante el uso de filtros percoladores, lodos activados, pantanos aireados o su combinación. Los efluentes de la industria azucarera pueden biodegradarse fácilmente, excepto los aceites y grasas que no se degradan aeróbicamente debido a la generación de metano durante la hidrólisis. Muchos investigadores han llevado a cabo una serie de experimentos con registradores de lotes para verificar la validez de los métodos aeróbicos en el tratamiento de aguas residuales de la industria azucarera. Se concluyó a partir de los resultados que el tratamiento aeróbico de aguas residuales presenta una reducción prometedora de los contaminantes. (Kushwaha, Srivastava, Mall 2011).
  
- II. **Tratamiento anaeróbico:** El proceso de tratamiento anaeróbico se utiliza para la eliminación de contaminantes industriales. Es una técnica incluso más importante que el tratamiento aeróbico. En el método anaeróbico para el tratamiento de residuos industriales se necesita menos energía debido a la degradación de la materia orgánica y la producción de gas metano. Como consecuencia, también se reduce la disminución de la formación de lodos y del coste de su eliminación.

El método de tratamiento anaeróbico tiene muchas ventajas sobre el tratamiento de residuos aeróbico. Porque se requiere menos energía debido a la producción de gas metano. El reactor anaeróbico discontinuo, el reactor anaeróbico de lecho fijo y el reactor anaeróbico fijo de flujo ascendente, son reactores que se utilizan comúnmente en el tratamiento de aguas residuales durante el proceso de tratamiento anaeróbico. (Wang, Ma, Han, Li, Hao 2017)

### III. **Remoción Microbiológica de Nitrógeno, Fosfato y Sulfato de Aguas Residuales de la Industria Azucarera**

- i. **Eliminación de Nitrógeno de Aguas Residuales de la Industria Azucarera:** El nitrógeno se elimina de las aguas residuales de una forma sencilla y habitual. Para ello se utilizan bacterias para la nitrificación y desnitrificación para la eliminación del nitrógeno de las aguas residuales. El proceso de eliminación de nitrógeno se completa

mediante dos pasos (1) conversión de amoníaco (NH) en nitrato a través de nitrosomonas y (2) Oxidación de nitrato por Nitrobacter. La desnitrificación es llevada a cabo por bacterias heterótrofas, que transforman el nitrato en gas nitrógeno inofensivo. Hay muchas otras bacterias que se utilizan en el proceso de eliminación. Hay varias otras bacterias que se utilizan en procesos de liberación de nitrógeno, como *Aerobacter*, *Micrococcus*, *Staphylococcus*, *Lactobacillus*, *Xanthomonas*, *Staphylococcus*, *Lactobacillus* y *Achrompbacter*. Algunas microalgas también son responsables de eliminar el nitrógeno de las aguas residuales. (Jia, Yuan, Rein, 2016)

- ii. **Eliminación de fosfatos de aguas residuales de la industria azucarera:** El fósforo de las aguas residuales se elimina mediante la técnica mejorada de eliminación biológica de fósforo, uno de los métodos más frecuentes debido a su rentabilidad y respeto al medio ambiente. Este método de tratamiento es motivo de preocupación para una clase de microorganismos conocidos como organismos acumuladores de polifosfato que tienen un gran potencial para la eliminación de fósforo. (Carvalho, Oehmen, Carvalho, Reis, 2014)
  
- iii. **Eliminación de sulfato de aguas residuales de la industria azucarera:** Los iones sulfato están frecuentemente presentes en el agua natural. La contaminación de iones sulfato en el agua provoca diarrea, alteración y deshidratación en los niveles de metahemoglobina y sulfhemoglobina en animales y humanos al consumir grandes cantidades. También afecta las consecuencias adversas para las especies de agua dulce. La contaminación por sulfato puede reducirse a sulfuro de hidrógeno mediante bacterias bajo bacterias anaeróbicas. (Runtti, Tolonen, Tuomikoski, Luukkonen, Lassi, 2018)

#### 2.4.2 TRATAMIENTO ELECTROQUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de aguas residuales orgánicas mediante técnicas aeróbicas y anaeróbicas es un proceso aceptable debido a su eficiencia para la disminución de DQO y DBO. Sin embargo, todos los

métodos biológicos clásicos disponibles para el tratamiento de aguas residuales de la industria azucarera a veces no son posibles debido a la gran superficie y al alto capital de los costos operativos requeridos. Se ha observado que el tratamiento electroquímico (ECT) de las aguas residuales de la industria azucarera es un método alternativo económico a los métodos convencionales cuando estos no logran reducir la contaminación debido a las limitaciones económicas o espaciales. Un método ECT tiene muchos beneficios ya que es eficiente para eliminar contaminantes en un reactor compacto con un controlador simple para controlar la operación del proceso. Este método de tratamiento no es específico, pero sí aplicable a diversos contaminantes sin generar productos secundarios no deseados. (Sahu, Chaudhari, 2015)

### **2.4.3 MÉTODOS FÍSICOS PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA**

#### **a) Coagulación y floculación**

La coagulación es una técnica fisicoquímica muy importante para el tratamiento de aguas residuales. Tanto la coagulación como la floculación tienen lugar en pasos sucesivos utilizados para romper las fuerzas entre las partículas sólidas suspendidas (Amjad, Hussain, Javed, Khan, Shahjahan, 2020). La coagulación se puede definir como el uso de sales de iones metálicos cargadas positivamente que provocan la desestabilización de las partículas y la neutralización de la carga. La coagulación actúa sobre partículas coloides desde 1 micrómetro de diámetro en adelante. Los procesos de coagulación se utilizan para tratar partículas sólidas en suspensión del agua. La floculación se debe a la colisión exitosa que tiene lugar cuando las partículas desestabilizadas se unen entre sí mediante la fuerza de corte hidráulico en una mezcla rápida. La coagulación y floculación generalmente se llevan a cabo mediante sedimentación, filtración y desinfección en la etapa primaria y se completan con cloración. Esta técnica para el tratamiento del agua se utiliza en todo el mundo. En los procesos particulares de tratamiento de agua se emplean diferentes tipos de coagulantes para hacer que el agua sea utilizable para los consumidores. Los coagulantes se pueden clasificar en coagulantes biológicos, coagulantes inorgánicos y polímeros sintéticos. (Sahu, Chaudhari, 2013)

## **b) Método de precipitación química**

Generalmente se sigue el método de precipitación química para la eliminación de metales pesados de efluentes industriales inorgánicos. Estas son técnicas convencionales que producen precipitación insoluble de metales pesados en formas de hidróxido, fosfato, sulfuro y carbonato. Esta técnica se puede mejorar cambiando parámetros críticos como el pH, la temperatura, las concentraciones iniciales y las cargas iónicas. La solubilidad de varios metales se puede reducir a un pH de 8,0 a 11,0. En los métodos de precipitación química, los iones de metales pesados reaccionan con agentes precipitantes químicos y se forman partículas sólidas insolubles. La fase sólida se puede separar fácilmente de la solución mediante filtración o sedimentación. (Minas, Chandravanshi, Leta, 2017)

En los procesos de precipitación química, los agentes precipitantes químicos reaccionan con iones de metales pesados y los transforman en partículas sólidas insolubles.

## **2.5 GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA Y EJEMPLOS DE REÚSO EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES ALREDEDOR DEL MUNDO**

América Latina y el Caribe contienen un tercio de los recursos hídricos del mundo. Sin embargo, debido a la distribución desigual de los recursos hídricos, las ciudades y áreas de producción de la región enfrentan altos niveles de estrés hídrico. Según datos del Instituto de Recursos Mundiales (WRI), más de la mitad de la población vive en zonas que experimentan escasez de agua moderada, alta o extrema, agravada por los efectos del cambio climático (BID, 2019). Para afrontar esta situación, la reutilización del agua tratada es una alternativa, especialmente en zonas donde el agua es escasa y es necesaria la búsqueda de fuentes hídricas complementarias.

La Agenda 2030 adoptada por las Naciones Unidas tiene como objetivo mejorar la calidad de vida de la población mundial a través de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En el contexto de los ODS, el sexto objetivo trata sobre proporcionar agua, saneamiento y gestión sostenible para todos.

Sin embargo, a pesar de esta situación, la región tiene experiencia como caso de éxito en la reutilización de aguas residuales tratadas, gestión de lodos y otros aspectos de mejora de recursos. Por ello, a continuación, se presentan algunos casos importantes de América Latina y el Caribe para resaltar la motivación para la reutilización del agua y su práctica en diferentes contextos.



## **2.5.1 ANTOFAGASTA**

La actual PTAR de Antofagasta, construida en 1971 y renovada en 1994, cuenta con un sistema de lodos activados y desinfección por cloro, con una capacidad de pretratamiento de 86 400 m<sup>3</sup>/día —la totalidad de las aguas servidas recolectadas de Antofagasta— y de 10 368 m<sup>3</sup>/día para tratamiento completo. El caudal que no es tratado de forma secundaria es vertido al mar a través de un emisario submarino. (De la Peña, M. Larrea, C. Sasaki, K. Smith, D, 2022)

### **2.5.1.1 MOTIVADORES PARA EL REÚSO DEL AGUA TRATADA**

De acuerdo con Econssa (2013), el reúso de agua tratada en la región de Antofagasta se encuentra motivado por los siguientes factores:

- i. Hacer frente a la escasez de recursos hídricos y al aumento en la demanda de agua industrial y consumo humano, evitando potenciales conflictos por derechos del agua entre la sociedad civil y las industrias.
- ii. Mejorar la calidad de agua de mar y reducir la explotación de aguas subterráneas. Este aspecto se verá mejorado, aún más, gracias a la nueva planta prevista, disminuyendo las descargas del emisario submarino de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) existente y aumentando el caudal de agua tratada para reúso.
- iii. Ofrecer una alternativa más económica a la desalación, la cual presenta un coste energético muy elevado. Además, la alternativa de reúso es atractiva a largo plazo, ya que disminuye los costos de inversión de disposición y abastecimiento. (CPI, 2018; Econssa, 2013).

### **2.5.1.2 TIPOS DE REÚSO**

Las aguas servidas tratadas actualmente, son reusadas en la zona industrial de La Negra, donde tienen sede empresas de fabricación de productos de cobre y zinc, como SQM y Xtrata, principales consumidores del agua de reúso. Con la nueva PTAR, también se prevé abastecer a la industria lanera de Mantos Blancos y el riego de zonas verdes urbanas. (De la Peña, M. Larrea, C. Sasaki, K. Smith, D, 2022)

## **2.5.2 ATOTONILCO**

Hacia fines de los 2000, el Valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo, México, constituía el área más grande en utilizar aguas residuales no tratadas para fines agrícolas en América Latina. Aproximadamente, 65 000 agricultores de la zona regaban sus cultivos con aguas residuales contaminadas con organismos patógenos, productos químicos tóxicos y metales pesados, situación que suponía un riesgo de salud, tanto para los agricultores como los consumidores de los productos derivados. (World Bank Group, 2018)

### **2.5.2.1 MOTIVADORES PARA EL REÚSO DEL AGUA TRATADA**

Frente a la situación crítica del Valle del Mezquital, el gobierno mexicano promovió la construcción de la planta de Atotonilco con el objetivo de:

- i. Mejorar las condiciones de calidad del agua generada en la zona metropolitana del Valle de México y distritos aledaños, para su posterior reúso en la industria agrícola, buscando cumplir con la calidad requerida por la normativa vigente y permitir el cultivo de productos restringidos por ser regados con agua residual tratada, beneficiando a más de 700 000 personas.
- ii. Disminuir la sobreexplotación de los acuíferos del valle, mediante la sustitución del consumo de agua de pozo por agua reutilizada en los sectores industriales y agrícolas.
- iii. Disminuir el deterioro paisajístico y la contaminación de los cauces del río Tula, así como contribuir a la restauración ecológica de la presa.
- iv. Reducir el riesgo sanitario de la población y los costos secundarios asociados como, por ejemplo, para el tratamiento de enfermedades ocasionadas por la ingesta directa de agua sin tratamiento o el consumo de productos regados con aguas residuales sin tratar, y la pérdida de jornadas laborales, entre otros (Yitani et al., 2019).

### **2.5.2.2 TIPOS DE REÚSO**

Previo al momento de la construcción, las aguas residuales eran utilizadas directamente por los agricultores del Valle del Mezquital para regar 80 000 hectáreas de cultivos; siendo los principales productos regados maíz y alfalfa. Con la construcción de la planta, los agricultores accedieron al beneficio del riego no restringido de otros productos agrícolas como, por ejemplo, hortalizas, permitiendo diversificar los cultivos (BID, 2019). Por otro lado, los biosólidos generados en la PTAR son reutilizados para la fertilización de cultivos agrícolas.

### **2.5.3 SACABA**

Sacaba se encuentra en una zona árida de Bolivia, con escasa vegetación y un gran déficit hídrico. En la actualidad, el 90 % de las aguas consumidas provienen de pozos, muchos de los cuales están en riesgo de sobreexplotación. Este municipio es, además, la cabecera del río Rocha, también conocido como río Maylanco, el cual presentaba problemas de mala calidad por el vertido de aguas sin tratar en su cauce. Por tanto, en el año 2008, comenzó un proyecto de recuperación del río, enmarcado en el Plan Maestro de Saneamiento Básico para el municipio de Sacaba, diseñado por la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Sacaba (EMAPAS). Este plan establece la construcción de colectores y emisarios de alcantarillado sanitario, así como la construcción de siete plantas de tratamiento de aguas residuales, con la intención de reutilización de las aguas tratadas en agricultura. Hasta el momento, tres de las PTAR se encuentran en funcionamiento: la planta Curubamba, diseñada para zonas rurales; y la planta El Abra, para la zona urbana del municipio. Por otro lado, el agua tratada de la PTAR Pacata, la tercera en ser construida, actualmente se utiliza solo para el riego de zonas verdes aledañas a la planta. (De la Peña, M. Larrea, C. Sasaki, K. Smith, D, 2022)

**Tabla 2.5. Tratamientos de las PTAR de Sacaba (De la Peña, M. Larrea, C. Sasaki, K. Smith, D. 2022).**

<b>PTAR</b>	<b>Curubamba</b>	<b>El Abra</b>	<b>Pacata</b>
<b>Tipo de tratamiento</b>	Anaerobio mediante biorreactor	Aerobio, mediante filtros percoladores	Mixto, mediante filtros aireados sumergidos
<b>Caudal tratado</b>	Promedio de 34.56 m <sup>3</sup> /día	Entre 3888 m <sup>3</sup> /día y 4320 m <sup>3</sup> /día. Capacidad de 11232 m <sup>3</sup> /día en dos líneas	Entre 69 m <sup>3</sup> /día a 86.4 m <sup>3</sup> /día. Capacidad de 180 m <sup>3</sup> /día en una sola línea
<b>Pretratamiento</b>	Desbaste y desengrasador	Rejas gruesas, rejas finas y desarenadores	Reja gruesa y desarenador
<b>Tratamiento primario</b>	Biorreactor	Sedimentador primario	Tanque séptico y de ecualización
<b>Tratamiento secundario</b>	Dos biolechos percoladores	Biolecho percolador y sedimentador secundario	Filtro aireado sumergido
<b>Cloración</b>	Mediante pastillas de tricloro	Gas cloro	

### **2.5.3.1 MOTIVADORES PARA EL REÚSO DEL AGUA TRATADA**

De acuerdo con el Gobierno Autónomo Departamental de Cochabamba, las plantas de tratamiento destinadas a reúso fueron motivadas por los siguientes factores:

- i. Reutilizar las aguas tratadas en la agricultura, respetando los parámetros de calidad de agua necesarios para garantizar su seguridad en el uso para la agricultura.
- ii. Recuperar la calidad del río Maylanco que presentaba una alta contaminación por aguas residuales no tratadas.
- iii. Buscar soluciones para el déficit hídrico de la región.

- iv. Incrementar progresivamente la cobertura de tratamiento, hasta alcanzar el 100 % de cobertura de tratamiento de Sacaba. (De la Peña, M. Larrea, C. Sasaki, K. Smith, D, 2022)

### **2.5.3.2 TIPOS DE REÚSO**

- i. PTAR Curubamba: El agua tratada se reutiliza para riego de áreas verdes del municipio y para riego interno de la planta.
- ii. PTAR El Abra: El agua tratada es reusada para riego por inundación de hortalizas. También, para riego y recuperación de terrenos considerados zonas de riesgo, donde a través de la disposición de lodos, y la posterior siembra y riego, se han habilitado espacios verdes con una dimensión de 1 hectárea. Las aguas también se utilizan en la misma PTAR, para el riego de las áreas verdes de la planta.
- iii. PTAR Pacata: El agua tratada, por ahora, solo se usa para riego interno de la planta y árboles frutales linderos. (De la Peña, M. Larrea, C. Sasaki, K. Smith, D, 2022)

### **2.5.4 TENORIO**

La región metropolitana de San Luis Potosí cuenta con más de 2,7 millones de habitantes, siendo una zona de gran desarrollo industrial y económico. Sin embargo, la región cuenta con gran escasez de agua, recibiendo solo 400 mm de lluvia al año, Entre las PTAR construidas, la planta Tenorio es un referente a nivel internacional por su eficiencia y sustentabilidad ambiental, social y económica. La iniciativa público-privada que comenzó su operación en 2006 es la planta más grande en la región metropolitana, teniendo la capacidad de tratar el 45 % de las aguas residuales urbanas generadas en la ciudad. Los usos finales del agua residual tratada son de tipo industrial y agrícola, teniendo la planta un proceso diferente para cada uso, siendo así, la primera PTAR en México en producir diferentes calidades de agua de reúso (World Bank, 2018).

#### **2.5.4.1 MOTIVADORES PARA EL REÚSO DEL AGUA TRATADA**

La construcción de la PTAR Tenorio, y el reúso del agua tratada, fue motivada por los siguientes factores:

- i. Incrementar la cobertura de tratamiento de aguas residuales en la región metropolitana de San Luís Potosí en un 40 %
- ii. Reutilizar las aguas tratadas para el riego de zonas agrícolas que, anteriormente, utilizaban aguas negras, contrarrestando problemas de salud de la población.
- iii. Evitar el uso del agua proveniente de acuífero para la refrigeración de la central termoeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en Villa de Reyes, reemplazando este recurso con aguas residuales tratadas, reduciendo la sobreexplotación del acuífero.
- iv. Reducir la contaminación del medio ambiente generado por las infiltraciones de aguas residuales domésticas, descargas industriales y lixiviados de tiraderos clandestinos, cumpliendo con la legislación vigente, en materia de descarga de aguas residuales urbanas. (De la Peña, M. Larrea, C. Sasaki, K. Smith, D, 2022)

#### **2.5.4.2 TIPOS DE REÚSO**

Del tratamiento primario, se derivan 51 840 m<sup>3</sup>/día para el riego de 500 hectáreas en cultivos de alfalfa y para riego de pasto para el forraje de ganado.

Del tratamiento secundario, se derivan 38 880 m<sup>3</sup>/día para su uso en la Central Termoeléctrica Villa de Reyes y zonas industriales. (De la Peña, M. Larrea, C. Sasaki, K. Smith, D, 2022)

Incorporar la reutilización a los sistemas de saneamiento no es un proceso sencillo ya que depende de una variedad de variables propias de cada situación. Sin embargo, no sólo indican el potencial para el uso de aguas residuales tratadas en la región, sino también el éxito y aplicabilidad en diferentes contextos, destinos de reúso y formas de gestión.

## 2.5.5 TECNOLOGÍAS USADAS

Tabla 2.6. Tecnologías usadas en las PTAR de los casos de estudio (De la Peña, M. Larrea, C. Sasaki, K. Smith, D. 2022).

Tecnología	Tipo de reúso	Caso de estudio
<b>Tratamiento primario o secundario</b>		
Lodos activados	Industrial, urbano, agrícola, ambiental	Antofagasta, Atotonilco, Tenorio
Lechos percoladores	Industrial	Sacaba
<b>Tratamiento terciario</b>		
Tratamiento terciario por filtración con arenas	Industrial	Tenorio
Tratamiento terciario por biofiltros en humedales	Industrial	Sacaba

## 2.6 METODOLOGÍA DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA EN LA INDUSTRIA AZUCARERA

Tras explorar la gestión sostenible del agua y los ejemplos de reúso en distintas plantas de tratamiento de aguas residuales alrededor del mundo nos enfocamos en la metodología de producción más limpia en la industria azucarera. Este salto conceptual es natural, ya que las prácticas sostenibles en la gestión del agua son un componente crítico de una estrategia de producción más limpia y sostenible. Se profundiza en cómo la metodología de producción más limpia puede ser integrada en la industria azucarera. Mientras que el tema anterior se centraba en ejemplos prácticos y específicos de reúso del agua, este apartado aborda cómo estas prácticas se insertan dentro de la producción para minimizar el impacto ambiental.

### 2.6.1 CONCEPTO DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA

Producción más Limpia es una metodología que identifica las oportunidades de optimización de los procesos a partir del enfoque preventivo de la contaminación, generando beneficios ambientales y económicos, los cuales se convierten en una ventaja competitiva. Es la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva, integrada a los procesos, producciones y servicios, para incrementar

la eficiencia, reducir los riesgos para los seres humanos y el ambiente y lograr la sostenibilidad del desarrollo. (Laureiro, J. Vera, M. 2009)

Las herramientas de Producción Más Limpia (PML) describen un acercamiento preventivo a la gestión ambiental, no es ni una definición legal ni científica que se pueda diseccionar, analizar o someter a disputas teóricas, es un amplio término que abarca lo que algunos países e instituciones llaman: ecoeficiencia, minimización de residuos, prevención de la contaminación, o productividad verde. La PML se refiere a la mentalidad de cómo los bienes y servicios deben ser producidos bajo los actuales límites tecnológicos y económicos, tampoco se debe considerar solamente como una estrategia ambiental, ya que está relacionada con las consideraciones económicas. La diferencia clave entre el "control de la contaminación" y la "Producción Más Limpia" es que el control de la contaminación es un acercamiento después del evento, "reaccione y trate" y la Producción Más Limpia es una filosofía de mirar hacia delante, "anticipe y prevenga" teniendo en cuenta no solo los aspectos ambientales, sino los aspectos económicos, de calidad de las producciones de los servicios y el entorno. (Bell, S. Acosta, Y. 2017)

## **2.6.2 ¿CÓMO IMPLEMENTAR LA PRODUCCIÓN MAS LIMPIA EN LA INDUSTRIA?**

**Diagnóstico:** Constituye una etapa previa a partir de la cual se dispondrá de información suficiente para decidir programas y ejecutar proyectos de prevención de la contaminación para cada alternativa seleccionada.

**Alternativas:** Una vez realizado el diagnóstico cabe analizar en detalle la viabilidad técnica y económica de las alternativas seleccionadas, analizando las tecnologías disponibles, los cambios necesarios en la etapa de proceso y las necesidades de formación.

**Proyecto:** La fase de implementación de las alternativas escogidas puede ser tan simple como la compra de un equipo o cambiar determinados hábitos de trabajo, o tan compleja como la ejecución de un proyecto multidisciplinario, o el rediseño de un producto.

**Evaluación y seguimiento:** Se mide por el grado de reducción de la cantidad de residuos generados, pero por la posible disminución de su toxicidad, la disminución del costo de su gestión, los ahorros, la mejora en la calidad y en la productividad, la satisfacción de los empleados y clientes.



Alternativas de manejo de residuos: En relación con el manejo de residuos existen tres grandes alternativas de gestión ambiental para la industria azucarera:

- i. Reducción de residuos en el origen: generalmente es la más simple de aplicar, es posible mejorar algunos sistemas y procedimientos que permiten reducir los volúmenes de desechos en la industria azucarera, con lo cual se disminuye en forma sostenible la necesidad de reutilizar o reciclar, y se reduce o elimina la necesidad de un sistema de tratamiento y disposición final. Adicionalmente a las ventajas directas o indirectas en términos ambientales de la reducción de residuos en el origen, éstas normalmente redundan en una reducción de costos de producción a través de un mejor manejo de materiales y una mayor eficiencia del proceso.
- ii. Reciclaje (reúso de materiales o residuos): El reciclaje o reutilización, todavía puede generar beneficios tangibles, aunque en menor grado que aplicando la reducción en el origen.
- iii. Tecnología de control: Se aplica al final del proceso (end of pipe) y comprende el tratamiento de los residuos y su disposición final. Sólo al final del proceso, cuando ya no es posible la reducción en el origen, ni el reciclaje o reutilización de materiales y se tienen problemas de descargas o emisiones que superan las normas aplicables, se debe considerar la opción de tratamiento y disposición de los residuos.

Se pueden implementar en la industria azucarera estos pasos de sistema de gestión de producción más limpia. Durante el proceso se obtienen subproductos de gran valor económico, que cuando no son aprovechados en todas sus potencialidades constituyen una considerable carga contaminante dispuesta al medio ambiente como residual o desechos. Estos subproductos pueden ser utilizados por la propia industria azucarera y derivados o en la producción agropecuaria como principales receptores, aunque otras ramas de la economía como las industrias básica, farmacéutica y alimenticia también los emplean en sus producciones. (Laureiro, J. Vera, M. 2009).

**CAPÍTULO III**  
**METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**

### 3.1 ENFOQUE METODOLÓGICO

Este capítulo se dedica a realizar el análisis técnico de los datos recopilados del Ingenio. Centrándonos en los principios de ecoeficiencia, este análisis busca comprender en profundidad la gestión del agua en el contexto de la producción azucarera, evaluando su alineación con los estándares establecidos por la normativa RTS 13.05.01:18.

El enfoque de la investigación se orienta hacia una evaluación de las métricas relacionadas con el uso y tratamiento del agua en el ingenio. Esto incluye el análisis de indicadores como la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales, y la carga contaminante de los efluentes. Al hacerlo, no solo se apunta a identificar las deficiencias en la gestión actual del agua, sino también a destacar las oportunidades para mejorar la eficiencia de recursos y reducir el impacto ambiental.

Este análisis se basa en una aproximación cuantitativa, utilizando datos recogidos directamente del ingenio, así como información secundaria de la literatura existente. Al combinar estos datos con los principios de ecoeficiencia, nuestro objetivo es ofrecer una visión comprensiva de cómo las operaciones del ingenio pueden ser optimizadas para una mayor sostenibilidad.

La gestión del agua en la industria azucarera es un reto complejo que implica equilibrar las demandas de producción con la responsabilidad ambiental. En este contexto, el análisis de los datos del Ingenio proporciona no solo conocimiento sobre las prácticas actuales, sino también una base para la formulación de estrategias mejoradas que puedan servir como referencia para otros ingenios. Al final de este capítulo, se busca establecer un conjunto de recomendaciones basadas en evidencia para mejorar la ecoeficiencia en la gestión del agua, contribuyendo así a un futuro más sostenible y responsable en la industria azucarera.

El enfoque metodológico será meramente bibliográfico basándonos en la teoría del capítulo anterior para elaborar propuestas sobre la gestión de aguas residuales en el Ingenio.

### **3.2 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.**

El trabajo de investigación se realizó enfocándonos en un Ingenio, del tipo agroindustrial. Ubicado en San Salvador, El Salvador. Su capacidad de procesamiento es de alrededor de 1,7 millones de toneladas métricas de caña de azúcar, produciendo con ella 426,534.61 toneladas métricas de azúcar.

### **3.3 MODELAMIENTO, EXPERIMENTOS Y APLICACIONES**

En esta sección se detalla la forma en la que los ingenieros toman las muestras, los momentos en que se miden, y los parámetros fisicoquímicos de importancia. Luego de esto se procede a detallar la descripción de los datos recopilados de las diferentes bibliografías referentes a un ingenio de San Salvador, analizando cada uno de los parámetros, comparándolos con la normativa vigente para el año en el que los datos fueron recopilados, obteniendo una idea de cómo el Ingenio ha trabajado desde las fechas en cuestión. Luego se presentan los datos obtenidos del Ingenio directamente en los meses de la zafra y se discute cada uno de los parámetros, observando tendencias y analizando cada valor obtenido para cada mes en el pre y post tratamiento. Se calcula el porcentaje de remoción de carga orgánica a través de la DBO y DQO para tener la idea de cuanto es el porcentaje necesario de remoción para que el agua residual cumpla con la normativa vigente y que tanto se está removiendo actualmente. Se identifican los problemas y desafíos del ingenio en el tema del tratamiento de sus aguas; Además se propondrán formas de reúso del agua en su estado actual, mejoras al tratamiento y acciones de producción más limpia para implementar en la industria azucarera, todo esto para reducir el impacto ambiental que genera dicho ingenio.

#### **3.3.1 DISEÑO DEL MÉTODO DE MUESTREO**

El diseño de muestreo propuesto que se utiliza en el ingenio implica la recopilación de datos técnicos relacionados con el agua residual antes y después de ser sometida a un proceso de tratamiento, específicamente durante la temporada de zafra. Los ingenieros llevan a cabo muestreos mensuales para evaluar varios parámetros de interés. Estos parámetros se miden en el siguiente orden: pH (potencial de hidrógeno), temperatura, turbidez, DQO (Demanda Química de Oxígeno), DBO (Demanda Biológica de Oxígeno), sólidos sedimentables, aceites y grasas, y nitrógeno disuelto.

A continuación, se detalla el procedimiento de muestreo de cada parámetro:

- i. **pH (Potencial de Hidrógeno):** El muestreo se realiza mensualmente antes y después del tratamiento del agua residual durante la temporada de zafra. Se toman muestras representativas de las aguas residuales en los puntos de interés. Cada muestra se analiza utilizando un electrodo de pH calibrado para medir el nivel de acidez o alcalinidad en una escala de 0 a 14.
- ii. **Temperatura:** Se mide la temperatura de las muestras de agua antes y después del tratamiento. Para ello, se utilizan termómetros calibrados y se registrarán los valores en grados Celsius. Esto proporciona información sobre las condiciones térmicas del agua en el proceso de tratamiento.
- iii. **Turbidez:** Se evalúa la turbidez de las muestras de agua utilizando un medidor de turbidez, como un nefelómetro o un turbidímetro. Esto permite cuantificar la cantidad de partículas suspendidas en el agua, lo que es indicativo de su claridad.
- iv. **DQO (Demanda Química de Oxígeno):** Se determina la DQO de las muestras de agua antes y después del tratamiento. Este análisis se realiza mediante métodos químicos que implican la oxidación de la materia orgánica presente en el agua y la medición de la cantidad de oxígeno consumido durante este proceso.
- v. **DBO (Demanda Biológica de Oxígeno):** Se mide la DBO de las muestras de agua, antes y después del tratamiento, para evaluar la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para descomponer la materia orgánica presente. Esto se realiza a través de un ensayo que implica el seguimiento de la disminución del oxígeno disuelto en el agua.
- vi. **Sólidos Sedimentables:** Se determina la cantidad de sólidos sedimentables presentes en las muestras de agua. Esto se logra permitiendo que las partículas sólidas sedimenten durante un período de tiempo definido y midiendo el volumen de sólidos acumulados en el fondo del recipiente de sedimentación.
- vii. **Aceites y grasas:** Implica la extracción de aceites y grasas del agua utilizando un solvente orgánico, como hexano, triclorotrifluoroetano o éter de petróleo. Después de la separación de fases, el solvente (que contiene los aceites y grasas) se recoge y se evapora. La cantidad de

aceites y grasas se determina pesando el residuo que queda después de la evaporación del solvente.

- viii. **Nitrógeno disuelto:** Se mide específicamente el nitrógeno en formas como nitritos ( $NO_2^-$ ) y nitratos ( $NO_3^-$ ). La muestra se trata con reactivos que reaccionan con los nitritos y nitratos para producir un color que puede ser medido espectrofotométricamente. La intensidad del color está directamente relacionada con la concentración de nitrógeno.

El diseño de muestreo propuesto permite obtener datos técnicos relevantes que ayudarán a evaluar la calidad del agua residual antes y después del tratamiento durante la temporada de zafra. Estos datos son esenciales para monitorear la eficacia del proceso de tratamiento y garantizar el cumplimiento de los estándares ambientales y de calidad del agua.

### 3.3.1.2 FRECUENCIA DE MUESTREO

Los ingenieros toman muestras mensualmente del agua, antes y después de ser tratada para poder comparar los valores de sus parámetros, distribuido adecuadamente en el periodo de zafra, de inicio a fin. Esto sirve para poder obtener una curva de valores estable, para ellos las medidas deberán ser acertadas en base a parámetros analizados.

### 3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS RECOPIADOS

En este apartado se detallan todos los datos recopilados de las diferentes bibliografías referentes al Ingenio, comparándolos además con la normativa vigente para su fecha respectiva. Además, analizamos cada parámetro fisicoquímico y observamos su tendencia; Todo esto con el objetivo de poder observar el comportamiento de la calidad del agua tratada por el ingenio a lo largo de los años, para tener una idea de cómo el Ingenio ha venido trabajando y si ha estado cumpliendo con la normativa y de qué forma. Todo esto es una recopilación bibliográfica y solamente servirá para marcar la tendencia de los resultados obtenidos, para luego poder contrastarlos con los datos obtenidos del ingenio directamente.

### 3.4.1 RESULTADO DE PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL DEL INGENIO DE ZAFRAS ANTIGUAS COMPARADOS CON EL RTS 13.49.01:09

Tabla 3.1. Resultados obtenidos de los parámetros evaluados por el Ingenio de las zafras 2004 hasta 2010 comparados con el reglamento técnico vigente de esos años (Castañeda, W. Monroy, E. 2010)

Parámetro	Zafra						NSO 13.49.01:09
	2004- 2005	2005- 2006	2006- 2007	2007- 2008	2008- 2009	2009- 2010	
Aceites y grasas (mg/L)	5.37	4.6	6.3	-	8.75	8.1	30
Sólidos suspendidos (mg/L)	314	22	55	43	34	27	150
Demanda química de oxígeno, (mg/L) (DQO)	12503	441	370	565	382	417	600
Demanda bioquímica de oxígeno, (mg/L) (DBO <sub>5</sub> )	6050	145	133	346	146	225	400
pH	6.29	8.23	8.24	7.67	6.75	7.69	9
Sólidos sedimentables (mg/L)	1.45	0.3	1.2	0.04	-	-	30
Azúcar lb/ton caña	10.25	0.55	0.6	0.93	0.78	0.73	1

Se procede al análisis de cada parámetro fisicoquímico:

**i. Aceites y grasas (mg/L):**

La norma establece un límite de 30 mg/L.

En todas las zafras, los valores están por debajo del límite, lo que indica cumplimiento.

**ii. Sólidos suspendidos (mg/L):**

El límite de la norma es de 150 mg/L.

Todos los valores están por debajo del límite, indicando cumplimiento.

**iii. Demanda química de oxígeno (DQO) (mg/L):**

El límite de la norma es de 600 mg/L.

Solo la zafra de 2004-2005 excede el límite por un margen significativo. Todas las demás zafas cumplen con la norma.

**iv. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) (mg/L):**

El límite de la norma es de 400 mg/L.

Todas las zafas están por debajo del límite, indicando cumplimiento.

**v. Potencial de Hidrógeno:**

La norma establece un límite de 9 unidades de pH.

Todas las zafas están dentro de este rango, lo que indica cumplimiento.

**vi. Sólidos sedimentables (mg/L):**

El límite de la norma es de 30 mg/L.

Los valores reportados están significativamente por debajo del límite, lo que indica cumplimiento.

Basándonos en esta comparación, parece que el Ingenio ha estado en cumplimiento con la normativa NSO 13.49.01:09 desde al menos la zafra de 2005-2006 para la mayoría de los parámetros medidos, con la excepción notable de la DQO durante la zafra de 2004-2005. Este análisis permite identificar tendencias en el tratamiento de aguas residuales y la eficacia con la que se han implementado las medidas para cumplir con las regulaciones ambientales. Los datos también pueden indicar la efectividad de las mejoras realizadas en el proceso de tratamiento de agua y la gestión ambiental a lo largo del tiempo.



Ilustración 3.1. Comparación de la calidad del agua residual del Ingenio, parámetros de DBO y DQO (Castañeda, W. Monroy, E. 2010).

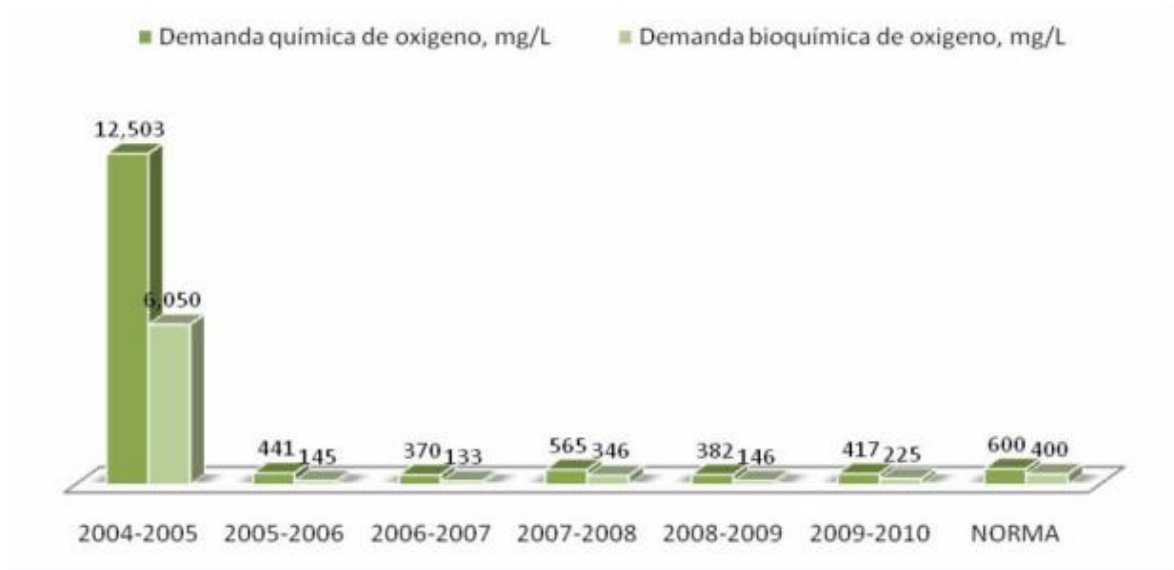


Ilustración 3.1 Comparación de la calidad del agua residual del Ingenio, parámetros de DBO y DQO

### 3.4.2 RESULTADO DE PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL DEL INGENIO DE LA ZAFRA 2021-2022, COMPARADOS CON LA RTS 13.05.01:18.

Tabla 3.2. Resultados obtenidos de los parámetros evaluados por el Ingenio de la zafra 2021-2022 comparados con el reglamento técnico vigente (Adaptado de Memoria de labores 2022).

Parámetro	Zafra	RTS 13.05.01:18
	2021-2022	
Aceites y grasas (mg/L)	13	30
Sólidos suspendidos (mg/L)	67	150
Demanda química de oxígeno, (mg/L) (DQO)	412	500
Demanda bioquímica de oxígeno, (mg/L) (DBO <sub>5</sub> )	269	300
Nitrógeno	5.5	50
Agua por día tratada durante la zafra (m <sup>3</sup> /día)	1400	

Para realizar una comparación de los valores obtenidos por el Ingenio en la zafra 2021-2022 con los parámetros establecidos por la norma técnica RTS 13.05.01:18, se sigue el mismo proceso de comparación que se hizo anteriormente:

**i. Aceites y grasas (mg/L):**

La norma permite un máximo de 30 mg/L.

Los valores obtenidos son de 13 mg/L, lo cual está por debajo del límite.

**ii. Sólidos suspendidos (mg/L):**

El límite establecido por la norma es de 150 mg/L.

Con un valor de 67 mg/L, el ingenio cumple con este parámetro.

**iii. Demanda química de oxígeno (DQO) (mg/L):**

La norma establece un límite de 500 mg/L.

Los 412 mg/L reportados indican que el ingenio está dentro del límite.

**iv. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) (mg/L):**

La norma establece un límite de 300 mg/L.

Con 269 mg/L, el ingenio cumple con el límite de DBO5.

**v. Nitrógeno (mg/L):**

La norma establece un límite de 50 mg/L.

Con un valor de 5.5 mg/L, el ingenio está muy por debajo del límite, indicando un buen manejo del nitrógeno en sus efluentes.

El análisis indica que para la zafra 2021-2022, el Ingenio ha logrado mantener sus niveles de contaminantes dentro de los límites establecidos por la normativa RTS 13.05.01:18 para todos los parámetros presentados. Esto sugiere que el ingenio ha implementado prácticas efectivas de gestión y tratamiento de sus aguas residuales. Además, el control del nitrógeno es notablemente efectivo, lo que es importante para prevenir la eutrofización de los cuerpos de agua receptores.

El cumplimiento continuo con la normativa no solo indica la responsabilidad ambiental del ingenio, sino que también puede reflejar la implementación de tecnologías de tratamiento de agua funcionales y eficientes, así como la adopción de prácticas operativas que minimizan el impacto ambiental de sus procesos. Esto es fundamental para la operación sostenible a largo plazo y para la reducción de riesgos legales y ambientales.

### **3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En esta sección se muestran los datos obtenidos por parte del Ingenio para los parámetros de interés para la caracterización de sus aguas residuales. Se analiza cada uno de estos parámetros para cada mes en el que se midió, antes y después del tratamiento, y además se compara con la normativa vigente. Así mismo, se calcula el porcentaje de remoción de carga orgánica, basándonos en la DBO y DQO, y se compara con el porcentaje de remoción mínimo para que el agua tratada se encuentre dentro de los parámetros establecidos por la norma. Luego se analizan los problemas y desafíos encontrados a partir de estos datos y por último se proponen diferentes acciones a realizar para reducir el impacto ambiental generado por esta.

El ingenio azucarero reportó los valores promedio de los parámetros del efluente total de aguas residuales, antes del sistema de tratamiento. Las mediciones promedio por mes corresponden al periodo noviembre 2022 a abril 2023.

### 3.5.1 PARÁMETROS DEL EFLUENTE TOTAL PRETRATAMIENTO

Tabla 3.3. Resultados obtenidos de los parámetros evaluados por el Ingenio de la zafra 2022-2023 pretratamiento (Adaptado de los datos obtenidos por parte del ingenio).

Mes	pH	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	Sólidos suspendidos (mg/L)	Aceites y grasas (mg/L)	Temperatura (°C)	Nitrógen o (mg/L)
Noviembre	6.9	8416	2689	3866	48.4	32.4	0.2
Diciembre	6.7	8452	2972	4861	59.6	33.0	0.3
Enero	6.8	8632	2648	4132	37.3	32.6	0.4
Febrero	7.2	7423	2651	4599	49.7	34.9	0.2
Marzo	6.7	7597	3034	4785	44.1	36.6	0.2
Abril	7.1	7715	2894	4421	46.5	35.1	0.3
RTS 13.05.01:18	6-9	500	300	150	30	20-35	50

Los datos pretratamiento presentados en la tabla para el Ingenio muestran que, en comparación con los límites establecidos por la norma RTS 13.05.01:18, hay varias áreas de no cumplimiento:

**pH:** Todos los valores mensuales están dentro del rango permitido de 6-9, lo que indica cumplimiento en términos de acidez o alcalinidad.

**Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Todos los valores superan significativamente el límite de 500 mg/L, indicando una alta presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos oxidables en el agua.

**Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Los valores también exceden el límite de 300 mg/L, reflejando una alta concentración de materia orgánica biológicamente descomponible.

**Sólidos Suspendidos:** Todos los valores están muy por encima del límite de 150 mg/L, lo que sugiere una elevada cantidad de partículas suspendidas que pueden afectar la vida acuática y la calidad del agua.

**Aceites y Grasas:** Cada uno de los valores mensuales excede el límite de 30 mg/L, lo cual es indicativo de contaminación por sustancias oleosas que pueden obstaculizar los procesos de tratamiento biológico y deteriorar la calidad del agua.

**Temperatura:** Los valores se encuentran dentro del rango típico de 20-35 °C que puede estar establecido en la normativa para procesos biológicos en plantas de tratamiento, aunque el valor de marzo y abril están en el límite superior.

**Nitrógeno:** Los valores están por debajo del límite de 50 mg/L, indicando un cumplimiento en este aspecto.

En resumen, mientras que el pH y el nitrógeno están dentro de los límites normativos, los valores de DQO, DBO, sólidos suspendidos, y aceites y grasas están significativamente por encima de los límites permitidos por la norma RTS 13.05.01:18. Esto implica que el agua residual pretratamiento del ingenio requiere procesos de tratamiento considerables para reducir estos parámetros a niveles aceptables antes de su descarga al ambiente.

### 3.5.2 PARÁMETROS DEL EFLUENTE TOTAL LUEGO DEL TRATAMIENTO

Tabla 3.4. Resultados obtenidos de los parámetros evaluados por el Ingenio de la zafra 2022-2023 post tratamiento (Adaptado de los datos obtenidos por parte del ingenio).

Mes	pH	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	Sólidos suspendidos (mg/L)	Aceites y grasas (mg/L)	Temperatura (°C)	Nitrógeno (mg/L)
Noviembre	6.9	581	344	134	9.2	28.6	4.5
Diciembre	6.8	578	335	136	10.2	29	6.7
Enero	6.8	575	318	145	15.4	29.2	5.2
Febrero	7.4	513	299	151	14.3	30.1	7.0
Marzo	7.2	497	292	150	14.1	31.3	4.4
Abril	6.6	505	273	149	13.3	31.5	5.8
RTS 13.05.01:18	6-9	500	300	150	30	20-35	50

Analizaremos los valores para cada parámetro, mes a mes, con respecto a la norma RTS 13.05.01:18

**a) pH:**

La norma RTS permite un rango de pH de 6-9.

Todos los meses están en cumplimiento, con valores que oscilan entre 6.6 y 7.4.

**b) DBO (mg/L):**

El límite de la norma RTS es 300 mg/L.

Los meses de noviembre a enero exceden los límites de la norma, mientras que desde febrero hasta abril se nota claramente una tendencia a la baja de este parámetro, probablemente se

tomaron acciones correctivas para que los valores de los últimos meses bajaran considerablemente, los valores de DBO oscilan entre 273 y 344 mg/L.

**c) DQO (mg/L):**

El límite de la norma RTS es 500 mg/L.

La mayoría de los meses exceden el límite, siendo marzo y abril los meses que están justo en el límite de la norma notándose de nuevo una baja desde los meses anteriores; Con valores que van desde 497 a 581 mg/L.

**d) Sólidos Suspendidos (mg/L):**

El límite de la norma RTS es 150 mg/L.

Febrero, marzo y abril están justo en el límite o ligeramente por encima de él, mientras que los otros meses están por debajo del límite. Este parámetro necesitará monitoreo y control constante para verificar que este siga en tendencia a la baja y no exceda los parámetros permitidos por la normativa.

**e) Aceites y Grasas (mg/L):**

El límite de la norma RTS es 30 mg/L.

Todos los meses están en cumplimiento, con valores que van desde 9.2 a 15.4 mg/L.

**f) Temperatura (°C):**

La norma RTS establece un rango de temperatura de 20-35 °C.

Todos los meses están en cumplimiento, manteniendo las temperaturas entre 28.6 y 31.5 °C.

**g) Nitrógeno (mg/L):**

El límite de la norma RTS es 50 mg/L.

Todos los meses están en cumplimiento, con valores que varían entre 4.4 y 7.0 mg/L.

Existe un cumplimiento constante con la normativa para los parámetros de pH, aceites y grasas, temperatura y nitrógeno.

La DQO y la DBO presentan los mayores desafíos, superando el límite en la mayoría de los meses, sin embargo, presentando una tendencia a la baja, las medidas que probablemente se implementaron en el ingenio en estos últimos meses han demostrado eficacia y han logrado introducir los parámetros, aunque en sus límites superiores, a los establecidos por la norma.

Los sólidos suspendidos están en su mayoría bajo control, pero requieren monitoreo cuidadoso, especialmente en los meses de febrero, marzo y abril

Para mejorar el cumplimiento de la norma, sería esencial enfocarse en reducir la DQO y la DBO, probablemente mediante la optimización o actualización de los procesos de tratamiento aeróbico actualmente en uso.

### 3.5.3 PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA

Para calcular el porcentaje de remoción de la carga orgánica, necesitamos los valores específicos de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) tanto de la entrada como de la salida de la planta.

El cálculo del porcentaje de remoción se realiza con la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left( \frac{\text{Concentración de entrada} - \text{Concentración de salida}}{\text{Concentración de entrada}} \right) \times 100$$

#### 3.5.3.1 PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE DBO

Tabla 3.5. Porcentaje de remoción de DBO

Mes	DBO Pretratamiento (mg/L)	DBO Postratamiento(mg/L)	% de remoción
Noviembre	2689	344	87.21
Diciembre	2972	335	88.73
Enero	2648	318	87.99
Febrero	2651	299	88.72
Marzo	3034	292	90.38
Abril	2894	273	90.57
RTS 13.05.01:18	300	300	N/A



Se puede observar que, a pesar de tener un porcentaje de remoción relativamente alto, no se logra cumplir con la norma a partir de aproximadamente un 88.7% de remoción. No se omite mencionar que este valor no es estático ya que depende de los valores de entrada y de salida de DBO y esto demuestra que a pesar de los esfuerzos del Ingenio es necesario el tratamiento adicional o de una propuesta para la mejora del proceso aeróbico para lograr la conformidad con la norma.

### 3.5.3.2 PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE DQO

**Tabla 3.6. Porcentaje de remoción de DQO**

Mes	DQO Pretratamiento (mg/L)	DQO Postratamiento (mg/L)	% de remoción
Noviembre	8416	581	93.10
Diciembre	8452	578	93.16
Enero	8632	575	93.34
Febrero	7423	513	93.09
Marzo	7597	497	93.46
Abril	7715	505	93.45
RTS 13.05.01:18	500	500	N/A

Al analizar los datos se puede observar que, a pesar de tener un porcentaje de remoción relativamente alto, no se logra cumplir con la norma a partir de aproximadamente un 93.4% de remoción. No se omite mencionar que este valor no es estático ya que depende de los valores de entrada y de salida de DQO y esto demuestra que a pesar de los esfuerzos del Ingenio es necesario el tratamiento adicional o de una propuesta para la mejora del proceso aeróbico para lograr la conformidad con la norma.

### 3.6 IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS Y DESAFÍOS

Basándose en los datos proporcionados y la normativa RTS 13.05.01:18, se identifican los siguientes problemas y desafíos principales en la planta de tratamiento de aguas residuales del Ingenio:

### **3.6.1 ALTO NIVEL DE DQO Y DBO**

**Problema:** La Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) están consistentemente por encima de los límites de la normativa, lo que indica que hay una cantidad significativa de materia orgánica en el agua que no se está tratando de manera adecuada.

**Desafío:** Mejorar la eficiencia del proceso de tratamiento para descomponer o eliminar más material orgánico.

### **3.6.2 INCONSISTENCIA EN LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS**

**Problema:** Aunque en su mayoría los valores están por debajo del límite, hay meses (como febrero y marzo) en los que se acercan o exceden el límite de sólidos suspendidos.

**Desafío:** Asegurar que el proceso de tratamiento sea consistente en la remoción de partículas suspendidas para evitar la variabilidad mensual y garantizar el cumplimiento durante todo el año.

### **3.6.3 GESTIÓN DE NUTRIENTES**

**Problema:** Aunque los valores de nitrógeno están dentro de los límites, la gestión de nutrientes es crítica para prevenir la eutrofización en cuerpos de agua receptores.

**Desafío:** Mantener la remoción de nitrógeno y otros nutrientes en niveles que eviten impactos ambientales adversos.

### **3.6.4 TEMPERATURA ELEVADA**

**Problema:** Las temperaturas están en el límite superior del rango permitido por la normativa, lo que podría afectar los procesos biológicos de tratamiento y la salud de los ecosistemas acuáticos.

**Desafío:** Controlar y gestionar la temperatura del agua tratada para evitar efectos negativos en los cuerpos de agua receptores.

### **3.6.5 PROPUESTAS DE ACCIÓN**

#### **3.6.5.1 OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS AERÓBICOS**

Evaluar y ajustar los parámetros operativos de los reactores biológicos aeróbicos para mejorar la descomposición de la materia orgánica.

Considerar la implementación de fases de tratamiento adicionales si es necesario, como sistemas de lodos activados o reactores de membrana biológica.

### **3.6.5.2 CONTROL DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS**

Realizar un diagnóstico de los procesos de sedimentación y flotación para identificar y corregir las deficiencias que puedan estar causando los altos niveles de sólidos suspendidos.

### **3.6.5.3 GESTIÓN INTEGRAL DE NUTRIENTES**

Implementar o mejorar los procesos de nitrificación y desnitrificación para una mejor remoción de nitrógeno y otros nutrientes.

### **3.6.5.4 MANEJO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA**

Instalar sistemas de control de temperatura o realizar descargas en momentos del día en que la temperatura ambiental contribuya a mantener la temperatura del agua dentro de los rangos aceptables.

Estos pasos deberían ser evaluados en detalle para determinar su viabilidad técnica y económica, asegurando que las soluciones propuestas sean sostenibles y efectivas a largo plazo.

## **3.7 REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES**

Teniendo en cuenta los datos proporcionados y la normativa RTS 13.05.01:18, se pueden considerar las siguientes alternativas para el reúso de las aguas residuales tratadas del Ingenio, junto con las mejoras necesarias para cumplir con los estándares de reúso:

### **3.7.1 RIEGO AGRÍCOLA**

**Propuesta:** Utilizar el agua tratada para el riego de cultivos no alimentarios o cultivos que serán procesados antes del consumo humano.

**Mejoras Necesarias:** Asegurarse de que la DQO y la DBO sean reducidas a niveles que no afecten negativamente la salud del suelo y las plantas. Además, los niveles de sólidos suspendidos deben ser lo suficientemente bajos para no obstruir los sistemas de riego.

### **3.7.2 RECARGA DE ACUÍFEROS**

**Propuesta:** Emplear el agua tratada para la recarga de acuíferos mediante la infiltración controlada.

**Mejoras Necesarias:** Requeriría una reducción adicional en la DQO, la DBO y los sólidos suspendidos para evitar la contaminación de las aguas subterráneas.

### **3.7.3 PROCESOS INDUSTRIALES**

**Propuesta:** Reutilizar el agua en procesos industriales que no requieran calidad de agua potable, como el enfriamiento, la limpieza de equipos o la generación de vapor.

**Mejoras Necesarias:** Garantizar que la temperatura del agua esté en el rango adecuado para los sistemas industriales y que los niveles de contaminantes no causen corrosión o acumulación en los equipos.

### **3.7.4 LAVADO DE VEHÍCULOS O LIMPIEZA DE ÁREAS PÚBLICAS**

**Propuesta:** Emplear agua tratada para lavar vehículos de la empresa o limpiar calles y áreas públicas, también su utilización como descarga en inodoros.

**Mejoras Necesarias:** Controlar los niveles de aceites y grasas para evitar la contaminación de superficies y aguas pluviales.

## **3.8 MEJORAS EN EL TRATAMIENTO**

Para mejorar el tratamiento de aguas residuales en el sistema aerobio de la PTAR del Ingenio y asegurar el cumplimiento con la norma RTS 13.05.01:18, se pueden considerar las siguientes mejoras y optimizaciones:

#### **i. Optimización del Proceso de Aireación:**

Aumentar la eficiencia de la transferencia de oxígeno ajustando los sistemas de aireación.

Implementar controles de oxígeno disuelto en tiempo real para ajustar la aireación según la carga orgánica presente.

#### **ii. Mejoras en la Biomasa Activa:**

Seleccionar o desarrollar cultivos microbianos que sean más eficientes en la degradación de la materia orgánica.

Mejorar el mantenimiento y control de los lodos activados para asegurar una biomasa activa y saludable.

**iii. Implementación de Reactores de Membrana Biológica (MBR):**

Combinar la filtración por membrana con el proceso biológico para mejorar la calidad del efluente.

Los MBR pueden aumentar la remoción de DQO y DBO y mejorar la clarificación del agua tratada.

**iv. Integración de Procesos de Tratamiento Secundario y Terciario:**

Añadir procesos como la filtración de arena, carbón activado o filtros de membrana para eliminar partículas finas y compuestos disueltos.

Implementar la desinfección avanzada, como la ozonización o la irradiación UV, para eliminar patógenos y reducir la DBO adicionalmente.

**v. Control de la Edad del Lodo (SRT):**

Ajustar la edad del lodo (sludge retention time) para mejorar la descomposición de la materia orgánica sin acumular exceso de biomasa.

**vi. Monitoreo y Análisis Avanzado:**

Utilizar sensores y sistemas de monitoreo en línea para realizar ajustes operativos en tiempo real.

Analizar regularmente las características del influente para anticipar y ajustar la carga al sistema de tratamiento.

**vii. Educación y Capacitación del Personal:**

Asegurar que el personal de operaciones esté bien capacitado y tenga conocimientos sobre las últimas tecnologías y prácticas de tratamiento de aguas residuales.

#### **viii. Gestión de Nutrientes:**

Añadir etapas de nitrificación y desnitrificación para la remoción de nitrógeno y fósforo si es necesario.

#### **ix. Auditoría Energética y Optimización:**

Realizar una auditoría energética de los procesos de tratamiento y optimizar el uso de la energía para reducir los costos operativos.

Asimismo, basándonos en los porcentajes de remoción obtenidos para DBO y DQO siendo 88.93% y 91.6% en promedio respectivamente, podemos asegurar que el tratamiento de las aguas es relativamente eficiente sin embargo aún no se encuentra en su totalidad dentro de la norma, especialmente para el DQO, en promedio el Ingenio necesita al menos 93.4% de remoción de DQO por lo que sería importante considerar la introducción o mejora de tratamiento anaerobio. Para aguas residuales con alta carga orgánica, los procesos anaerobios pueden ser eficaces. Estos sistemas pueden pretratar el efluente antes del tratamiento aeróbico, reduciendo así la carga sobre el sistema aeróbico y generando biogás como un subproducto aprovechable.

Estas mejoras deben ser evaluadas en términos de costos de capital, costos operativos, complejidad de implementación y beneficios esperados. Además, cualquier cambio o mejora en el sistema de tratamiento debe planificarse y ejecutarse de manera que no interrumpa las operaciones actuales. Es vital llevar a cabo un análisis de viabilidad técnica y económica antes de implementar nuevas tecnologías o hacer cambios significativos en los procesos de tratamiento existentes.

### **3.9 ACCIONES DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA PARA IMPLEMENTAR EN LA INDUSTRIA AZUCARERA**

#### **3.9.1 CAMPO / CAÑA**

- i. Utilizar tecnologías de fertilización orgánica (nitrógeno con Azospirillum, P y K con compost de cachaza, cenizas y residuales líquidos de la industria), así como el empleo de fitoestimulantes, fitomas y otros.
- ii. Aplicar "control de maleza" mediante cobertura de paja y aplicación de bioestimulantes de crecimiento para disminuir el tiempo del control.
- iii. Incrementar el uso de la siembra en contorno como medida de conservación del suelo.

- iv. Aplicar compost y/o biofertilizantes a la caña a partir de los residuos biodegradables que la empresa genera

### **3.9.2 ÁREA DE BASCULADOR**

- i. Realizar un "beneficio" eficiente a la caña en los centros de limpieza, y de esta manera llegar al basculador con un mínimo de materias extrañas.
- ii. Ejecutar las limpiezas periódicas de las fosas para evitar contaminación.

### **3.9.3 ÁREA DE MOLINO**

- i. El bagacillo contaminado generado en los molinos y las calderas se debe recolectar en seco y transportará con la cachaza al área de compostaje.
- ii. Utilizar el condensado contaminado como agua de imbibición.
- iii. Tomar medidas para evitar el derrame de jugo al suelo por las bombas de maceración.

### **3.9.4 ÁREA DE FABRICACIÓN**

#### **3.9.4.1 PURIFICACIÓN**

- i. Evitar los vertimientos de bagacillo, cachaza y otros al piso, para impedir la limpieza en húmedo evitando la incorporación a la zanja de aguas residuales. En caso de ocurrir estos derrames, barrer en seco como primera acción y quemarlos en caldera.
- ii. No utilizar agua cruda para la preparación de floculantes y otros productos químicos como decolorantes, etc.
- iii. Trabajar en circuito cerrado para reducir el consumo de agua. Controlar que el circuito cerrado trabaje eficientemente.

#### **3.9.4.2 EVAPORACIÓN**

- i. Utilizar trampas de vapor, siempre que sea a presión la recuperación del condensado, para un mejor aprovechamiento del vapor y el agua.
- ii. Garantizar capacidad de almacenaje de agua de condensados puros y contaminados.
- iii. Controlar periódicamente el funcionamiento eficiente de los separadores de arrastre de los evaporadores.

#### **3.9.4.3 CRISTALIZACIÓN**

- i. Emplear los condensados del tacho directamente en la caldera, previo análisis químico de que no contiene trazas de azúcar mayor que 10 ppm

- ii. Utilizar los condensados contaminados para la dilución de las mieles.
- iii. Mantener en circuito cerrado los condensadores del tachó.

### **3.9.5 ACCIONES GENERALES DE PRODUCCION MAS LIMPIA**

#### **3.9.5.1 CONSUMO DE AGUA**

- i. Capacitar al personal involucrado, como mínimo una vez al año
- ii. Reparar salideros, válvulas y conductoras de abasto de agua en mal estado.
- iii. Centralizar, presurizar y automatizar los sistemas de condensados.
- iv. Recuperar las extracciones discontinuas para utilizarlas en la dilución de los químicos agotados y segregados para finalmente incorporar dosificadamente al medio.

#### **3.9.5.2 TRAMPAS DE GRASAS**

- i. Recolectar los sólidos y las grasas de las trampas para incinerar en caldera junto con el bagazo.
- ii. Realizar operaciones de mantenimiento de las trampas de grasas periódicamente.

#### **3.9.5.3 RESIDUALES LÍQUIDOS Y SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUALES**

- i. Identificar, captar, almacenar y reutilizar dentro de la industria todas las corrientes de aguas generadas en el proceso como son los pluviales, los condensados, las aguas biodegradables y otras.
- ii. Segregar corrientes de residuales. Gestionar separadamente los residuales de las limpiezas químicas, así como las aguas negras de los comedores, de los residuales principales de la industria.
- iii. Caracterizar y registrar diariamente los efluentes de cada área según los parámetros fundamentales (pH, T y flujo).
- iv. Reutilizar los efluentes de la planta de tratamiento de agua (agua de contra lavado de los filtros mecánicos y parte del enjuague de los filtros catiónicos) como agua de limpieza.

#### **3.9.5.4 EFICIENCIA ENERGÉTICA**

- i. Disminuir el uso de carbón para la cocción de los alimentos en comedores obreros, lo que disminuye el  $CO_2$  emitido a la atmósfera.
- ii. Reducir las pérdidas de vapor vivo a la atmósfera.
- iii. Generar el vapor a la mayor temperatura posible.



### 3.10 VIABILIDAD

Para cada una de estas alternativas, es crucial realizar un análisis de riesgo y viabilidad técnica, considerando los siguientes aspectos:

**Tratamientos Adicionales:** Si se requieren pasos adicionales de tratamiento, como filtración avanzada, desinfección ultravioleta o procesos de oxidación avanzada, para cumplir con los estándares de reúso.

**Costos Asociados:** Inversiones necesarias para la implementación de tratamientos adicionales, infraestructura de distribución y monitoreo de calidad.

**Beneficios Ambientales:** Reducción en la extracción de aguas subterráneas, conservación de cuerpos de agua superficiales y mejora de la huella hídrica de la región.

Antes de implementar cualquier programa de reúso de agua, es fundamental obtener las aprobaciones y permisos de las autoridades reguladoras locales y asegurarse de que se cumpla con todas las normativas ambientales y de salud aplicables.

## 4.0 CONCLUSIONES

La evaluación de la calidad del agua en el proceso de producción de azúcar de caña en el Ingenio reveló que, aunque se han logrado avances significativos, aún existen desafíos en el cumplimiento de los parámetros de descarga establecidos por la normativa nacional, la caracterización fisicoquímica mostró variabilidad en los efluentes entre diferentes períodos de zafra y los resultados indicaron la necesidad de ajustar los métodos de tratamiento a las condiciones específicas que este se encuentra para cumplir con las regulaciones ambientales. Al comparar los niveles de contaminantes con los estándares de calidad del agua, se observó que ciertos parámetros, como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), superan regularmente los límites permitidos, subrayando la importancia de mejorar los procesos de tratamiento. La revisión de las prácticas y tecnologías de tratamiento de aguas residuales actuales identificó áreas de mejora, particularmente en la gestión de la carga orgánica, manifestada por los valores elevados de DQO y DBO, aunque se tienen valores de remoción que reflejan la eficiencia del proceso de tratamiento de agua, estos aún no son suficientes para que las condiciones del agua cumplan con la normativa vigente actual y se reconoce la necesidad de optimizar los procesos de aireación y considerar la implementación de etapas adicionales de tratamiento, como los sistemas de filtración avanzada y la desinfección, para mejorar la calidad del efluente; asimismo la implementación de acciones generales de producción más limpia para la optimización de los recursos. Los desafíos identificados en el cumplimiento de las regulaciones ambientales incluyen la gestión de la alta carga orgánica presente en los efluentes y la variabilidad en la eficacia del tratamiento de los sólidos suspendidos y los nutrientes, a raíz de esto se propone medidas para mejorar la gestión sostenible del agua residual, incluyendo la optimización de los procesos de aireación como se mencionaba antes, la implementación de sistemas de tratamiento terciario como los Reactores de Membrana Biológica, y la mejora en la gestión de nutrientes; además se exploraron alternativas para el reúso de aguas residuales tratadas, considerando sus beneficios ambientales y los parámetros obtenidos en su caracterización fisicoquímica. Estas incluyen el riego agrícola, la recarga de acuíferos, el uso en procesos industriales y la limpieza de áreas públicas y aunque la presente investigación no incluyó un análisis de viabilidad económica para las mejoras sugeridas debido a limitaciones de capacidad y recursos, se recomienda enfáticamente que antes de la implementación de cualquier mejora propuesta, se realicen estudios detallados para evaluar su factibilidad. Estos estudios deben considerar los aspectos técnicos,

económicos y operativos para asegurar que las soluciones propuestas sean efectivas y sostenibles a largo plazo.

La investigación confirma que, aunque el Ingenio ha realizado esfuerzos significativos para tratar sus aguas residuales, aún es necesario mejorar este proceso enfocándolo de forma sostenible para que la gestión del agua garantice el cumplimiento de las normativas ambientales y promueva la ecoeficiencia en la industria azucarera de El Salvador.

## **5.0 RECOMENDACIONES**

### **5.1 RECOMENDACIONES PARA EL INGENIO**

#### **Optimización de Procesos de Tratamiento:**

Continuar mejorando y optimizando los procesos de tratamiento de aguas residuales, con especial atención en la reducción de la DQO y la DBO para cumplir consistentemente con la normativa RTS 13.05.01:18.

Además, es recomendable seccionar las etapas del proceso de tratamiento de las aguas, y calcular el porcentaje de remoción de carga orgánica de cada etapa, así se podría enfocar los recursos y el enfoque de optimización en las etapas que no estén removiendo la cantidad de carga orgánica esperada.

#### **Monitoreo Continuo:**

Implementar un monitoreo continuo y riguroso de los parámetros fisicoquímicos de los efluentes para asegurar el cumplimiento con los estándares de calidad y detectar rápidamente cualquier desviación.

#### **Desarrollo de Métodos de Tratamiento Específicos:**

Investigar y desarrollar métodos de tratamiento específicos que se adapten a la variabilidad de las características fisicoquímicas de los efluentes en diferentes períodos de zafra.

#### **Capacitación del Personal:**

Invertir en la formación y capacitación del personal en las últimas tecnologías y prácticas de tratamiento de aguas residuales para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los procesos.

#### **Gestión de Recursos Hídricos:**

Explorar y evaluar alternativas para el reúso del agua tratada en actividades como el riego agrícola y la recarga de acuíferos, contribuyendo a una gestión más sostenible del recurso hídrico.

## **5.2 RECOMENDACIONES PARA LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

### **Apoyo en Investigación Aplicada:**

Fomentar proyectos de investigación que permitan el desarrollo de tecnologías y métodos de tratamiento de aguas residuales específicos para la industria azucarera, contribuyendo así a la solución de problemas reales de la industria.

### **Colaboración con la Industria:**

Establecer colaboraciones con ingenios azucareros para facilitar el intercambio de conocimientos y experiencias que beneficien tanto a la academia como al sector industrial.

### **Fortalecimiento Curricular:**

Incorporar en el currículo de ingeniería química materias sobre procesos industriales específicos como lo es el de un ingenio azucarero enfocado en ecoeficiencia y sostenibilidad.

### **Oportunidades de Prácticas Profesionales:**

Crear oportunidades para que los estudiantes realicen prácticas profesionales en ingenios azucareros, promoviendo así una experiencia directa en la gestión de aguas y tratamiento de efluentes.

### **Publicación de Estudios:**

Publicar los resultados de las investigaciones relacionadas con la gestión y tratamiento de aguas en la industria azucarera, para compartir conocimientos y promover mejores prácticas en el sector.

## BIBLIOGRAFÍA

APHA, (1986). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association. 16TH ed., Washington, United States of America.

Bell, S. Acosta, Y. (2017). “Acciones de producción más limpia para implementar en la industria azucarera cubana”. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. Cuba.

Carvalho M, Oehmen A, Carvalho G, Reis MAM (2014) “The effect of substrate competition on the metabolism of polyphosphate accumulating organisms PAOs. Water research”  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135414004965>. Portugal.

Castañeda, W. Monroy, E. (2010). “Experiencias de monitoreo continuo de aguas residuales y determinación de pérdidas de azúcar en efluentes por cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC) en Ingenio el Ángel, El Salvador.” Grupo El Ángel. El Salvador.

CPI. (2018). Reúso de agua servida transformaría a Antofagasta en un gran parque. Consejo de Políticas de Infraestructura. Disponible en: <https://acortar.link/r6ixsL>. Chile.

De la Peña, M. Larrea, C. Sasaki, K. Smith, D. (2022) “El reúso de agua residual tratada en América Latina y el Caribe: 10 estudios de caso.” Banco Interamericano de Desarrollo. España.

Econssa Chile S.A. (2013). Sistema de Disposición Final de las Aguas Servidas de Antofagasta. Disponible en: [http://www.econssachile.cl/pdf/docs/estudios/GHD\\_WEB.pdf](http://www.econssachile.cl/pdf/docs/estudios/GHD_WEB.pdf). Chile.

Fuentes, G. y Mariño, M., (2007). "Estudio de calidad del agua del río Jalponga departamento de La Paz, El Salvador". Universidad de El Salvador. El Salvador.

Garmendia A, Salvador A, Crespo C y Garmendia L. (2005). Evaluación del Impacto Ambiental. Editorial McGraw-Hill. Madrid. España.

Jia H, Yuan Q, Rein A (2016) "Removal of nitrogen from wastewater using microalgae and microalgae bacteria consortia." Cogent Environmental Science Vol. 2(1) DOI: 1275089. Disponible en: <https://acortar.link/n9k13X>. United Kingdom.

Kushwaha JP, Srivastava VC, Mall ID (2011) "An overview of various technologies for the treatment of dairy wastewaters." Critical reviews in food science and nutrition.

Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21491269/>. United States of America.

Kushwaha, JP, (2015) "A review on sugar industry wastewater sources treatment technologies and reuse." Desalination and Water Treatment Vol. 53(2): 309-318.

Disponible en: <https://acortar.link/6aJ1uy>. United States of America.

Laureiro, J. Vera, M. (2009). "Metodología de producción más limpia en la industria azucarera". Revista Centro azúcar Vol. 36(2): 50-54. Cuba.

MARN. (2002). Reglamento de Aguas Residuales. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales San Salvador, El Salvador.

MSPAS. (2006). Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07.01.04. Agua. Agua Potable. (anexo 19). Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social. San Salvador, El Salvador.

Minas F, Chandravanshi BS, Leta S (2017) "Chemical precipitation method for chromium removal and its recovery from tannery wastewater in Ethiopia". Chemistry International Vol. 3(4): 291-305. Ethiopia.

Morales. J. (2011). "Impacto ambiental de la actividad azucarera y estrategias de mitigación". Universidad Veracruzana. México.

Ofarrill L; Jiménez M y Rivero F. (2013). "Impacto medioambiental provocado por los centrales azucareros". Disponible en: <https://acortar.link/aOuwIW>. Perú.

Páez, H., (2008). "Evaluación de la calidad del agua de proceso, en un ingenio azucarero." Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Pérez, N. M y I. Aguilera., F. C. (2004). Caracterización de las aguas residuales de la refinera. Revista Cubana de Química. Vol. XVI (0258-5995). Cuba.

Runtti H, Tolonen ET, Tuomikoski S, Luukkonen T, Lassi U (2018) How to tackle the stringent sulfate removal requirements in mine water treatment A review of potential methods. Environmental research Vol. 167: 207- 222. Finland.

RTS 13.05.01:18 (2018), "Agua. Aguas residuales. Parámetros de calidad de aguas residuales para descarga y manejo de lodos residuales." Organismo Salvadoreño de Reglamentación Técnica. El Salvador.

Sahu OP, Chaudhari PK (2013) "Review on chemical treatment of industrial waste water." Journal of Applied Sciences and Environmental Management Vol. 17(2): 241- 257. India.



Sahu OP, Chaudhari PK (2015) "Electrochemical treatment of sugar industry wastewater COD and color removal". Journal of Electroanalytical Chemistry Vol. 739: 122-129. India.

Shi X, Leong KY, Ng HY (2017) "Anaerobic treatment of pharmaceutical wastewater A critical review." Bioresource Technology. Vol.245: 1238-1244. Singapore.

Sitio web de la ASA para el marco regulatorio del agua en El Salvador Disponible en: <https://www.asa.gob.sv/>. El Salvador.

Valera, K., (2016). "Caracterización de las aguas residuales de la industria azucarera Tres Valles, en Honduras." Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

Wang D, Ma W, Han HJ, Li K, Hao X (2017) "Enhanced treatment of Fischer Tropsch FT wastewater by novel anaerobic biofilm system with scrap zero valent iron SZVI assisted." Biochemical engineering journal. Vol. 117(15): 66-76. China.

World Bank Group (2018). "Wastewater: From Waste to Resource. The Case of Atotonilco de Tula, México. Disponible en: <https://acortar.link/uUL3QX>. México.

Yitani, J. et al. (2019). "Casos de estudio en asociaciones público-privadas en América Latina y el Caribe". Centro Administrativo Tlajomulco. México.