

**Tecnologías limpias en la industria azucarera para la protección de los
recursos hídricos en las zonas de ingenios**



Adriana Marcela Freire Cerón

Yhennifer del Mar Santiago Álvarez

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Popayán, Cauca

2022

**Tecnologías limpias en la industria azucarera para la protección de los
recursos hídricos en las zonas de ingenios**

Adriana Marcela Freire Cerón

Yhennifer del Mar Santiago Álvarez

Trabajo de investigación en la modalidad de monografía como requisito para optar
al título de Ingeniera Ambiental y Sanitaria

Director

Esp. Arnol Arias

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible

Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Popayán, Cauca

2022

Nota de aprobación

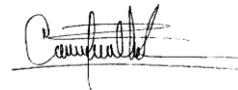
El director y los jurados del trabajo de grado, modalidad Monografía: **TECNOLOGÍAS LIMPIAS EN LA INDUSTRIA AZUCARERA PARA LA PROTECCIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LAS ZONAS DE INGENIOS**”, realizado por: **ADRIANA MARCELA FREIRE CERÓN** y **YHENNIFER DEL MAR SANTIAGO ÁLVAREZ**, una vez revisado el informe final y aprobado la sustentación, autorizan para que se realicen los trámites concernientes para optar el título profesional de **Ingeniera Ambiental y Sanitaria**.



Director: Arnol Arias Hoyos



Jurado 1. Diana Muñoz Solarte



Jurado 2. Carlos Felipe Uribe

Popayán, Cauca, noviembre de 2022

Dedicatoria

Con amor a:

Javier Freire y Martha Cerón, mis padres;

Jesús David y Javier Andrés, mis hermanos;

Martha, Bolívar y Edgar, mis abuelos

Adriana Marcela Freire Cerón

Con amor a:

Edgar Humberto Santiago y Ana María Álvarez, mis padres;

Magnolia Girley, mi hermana;

Diana Michelle y Pablo Esteban, mis hijos;

Uver Arley Zuñiga Perafan, mi esposo.

Yhenifer del Mar Santiago Álvarez

Agradecimientos

A DIOS y a MARIA SANTISIMA, quienes me han guiado en el transcurso de mi vida y mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida de aprendizaje y aventuras.

A mis padres, Javier Freire Caicedo y Martha Lucia Cerón Serna, por su apoyo, dedicación y el gran sacrificio por brindarme todo en mi vida a nivel personal y por apoyarme cada día en mis estudios en mis dos carreras y mi especialización, hoy con gran alegría les digo que valió la pena tanto sacrificio y amor que me han brindado y sobre todo la gran confianza que han depositado en su hija amada como siempre me lo dicen.

A mis hermanos Jesús David y Javier Andrés por ser parte importante en mi vida, por su apoyo en todos los momentos, por su cariño incondicional y por estar siempre para mí y sobre todo por siempre confiar en mis capacidades los quiero mucho.

A mis Abuelitos Martha, Bolívar, Edgar que están en el cielo, fueron el motor en mi vida, GRACIAS por su amor incondicional, los amo eternamente.

A toda mi familia gracias por su amor y compañía, con alegría le comparto este triunfo que también es de ustedes, gracias a mi primo Fabricio Alejandro Hurtado Cerón por apoyarme durante mi carrera con sus conocimientos en la ingeniería.

A mi Amiga Yhennifer Del Mar Santiago, quien apareció para enseñarme y fortalecerme, quien con su ejemplo, paciencia y comprensión demostró que realmente es una verdadera amiga.

A mis docentes por su comprensión y estímulo constante, además de su apoyo incondicional a lo largo de mis estudios.

A la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, por permitirme formarme a nivel profesional y brindarme la oportunidad de ser mejor persona.

Adriana Marcela Freire Cerón

Infinitamente me siento agradecida con DIOS por permitirme llegar al final de mi carrera, ya que gracias a su gran amor me dio la fortaleza y sabiduría para cumplir este hermoso sueño.

A mis padres Ana María Álvarez Bayona y Edgar Humberto Santiago por todo su apoyo, por creer en mí y mis sueños, por haber forjado en mis valores, principios que hoy hacen posible conseguir y lograr esta victoria en mi vida,

A mis hijos Pablo Esteban Santiago y Diana Michelle Santiago, por su comprensión e infinita paciencia cediendo su tiempo para que “mama estudie” gracias mis pequeños por motivarme a seguir adelante con este sueño.

A mi hermana Magnolia Hirley Santiago Álvarez, por estar siempre a mi lado apoyándome en las decisiones más difíciles y enseñándome día a día de sus experiencias vividas, brindándome siempre su mano para no caer cuando me daba por vencida.

A mi esposo por su amor constante, sus consejos y apoyo incondicional que hizo parte durante mi aprendizaje, a ti amor mío por preocuparte siempre por mi bienestar y desear lo mejor para mi porvenir, agradezco tantas ayudas y aportes no solo para el avance de mi tesis, sino para mi vida.

A mis amigos, que aportaron para que en equipo lográramos cumplir nuestro sueño. En especial agradezco a Adriana Freire quien apareció para enseñarme y fortalecerme, quien con su ejemplo, paciencia y comprensión demostró que realmente es una verdadera amiga.

A la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, en la que durante todos estos años conocí personas valiosas que sembraron en mi amor infinito por esta profesión, pues sus docentes y demás funcionarios compartieron su conocimiento y experiencias, que me ayudaron a crecer personal y profesionalmente, entre ese grupo de personas especiales están todos mis maestros que de alguna u otra forma ayudaron a moldearme, no solo enseñando teorías, si no grandes valores.

Yhenifer del Mar Santiago Álvarez

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción.....	17
1. Planteamiento del problema.....	20
1.1. Descripción del problema.....	20
1.2. Formulación del problema.....	22
1.3. Justificación.....	22
1.3.1. Social.....	22
1.3.2. Económica.....	23
1.3.3. Ambiental.....	23
1.3.4. Académica.....	23
1.4. Objetivos.....	24
1.4.1. Objetivo general.....	24
1.4.2. Objetivos específicos.....	24
2. Estado del arte y bases teóricas.....	25
2.1. Estado del arte.....	25
2.2. Bases teóricas.....	26
2.2.1. El desarrollo sostenible.....	27
2.2.2. La economía ecológica.....	27
3. Metodología.....	29
3.1. El enfoque mixto.....	29
3.2. Investigación descriptiva.....	29
3.3. Técnica de recolección de información.....	30

3.4. Procedimiento	30
3.4.1. Fase I. Identificación de impactos de la industria azucarera sobre los cuerpos de agua.	30
3.4.2. Fase II. Descripción de los procesos y beneficios de la implementación de las tecnologías limpias aplicadas en la industria azucarera.	
31	
3.4.3. Fase III. Discusión analítica de las tecnologías limpias frente a los recursos hídricos en los ingenios	32
4. Impactos negativos del proceso industrial azucarero sobre los cuerpos de agua de las zonas de influencia de los ingenios.	34
4.1. Usos del agua según procesos de producción de azúcar	36
4.1.1. Irrigación de cultivos	37
4.1.2. Lavado de la caña	37
4.1.3. Molienda de la caña de azúcar	38
4.1.4. Lavado de filtros	39
4.1.5. Condensación del vapor y cristalización	39
4.1.6. Eliminación de ceniza volante.....	40
4.1.7. Limpieza de superficies de la planta física	41
4.1.8. Mantenimiento y limpieza de maquinaria y equipo de transporte	41
4.2. Impactos negativos de los ingenios sobre los cuerpos de agua	42
4.2.1. Impactos físico-químicos	45
4.2.2. Impactos sobre las áreas de humedales	52
4.2.3. Impactos sobre la biodiversidad	54
4.3. Análisis	56
5. Tecnologías limpias aplicadas en la industria azucarera para la sostenibilidad ambiental de los recursos hídricos en zonas de ingenios	58

5.1. Procesos de producción más limpia	61
5.1.1. Tecnologías limpias en procesos generales	62
5.1.2. Procesos específicos	64
5.1.3. Tecnologías de biorremediación de aguas residuales	73
5.2. Beneficios de la implementación de tecnología limpias	83
5.2.1. Beneficios ambientales	84
5.2.1. Beneficios sociales	84
5.2.1. Beneficios económicos.....	85
6. Discusión de las tecnologías limpias del proceso industrial azucarero frente a los recursos hídricos en zonas de los ingenios	87
Conclusiones.....	91
Recomendaciones.....	94
Referencias bibliográficas	95
Anexos	111

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Preguntas orientadoras para el mapeo sistemático	34
Tabla 2. Criterios de inclusión y exclusión de publicaciones sobre usos del agua en los ingenios azucareros.....	34
Tabla 3. Palabras clave para determinar la relevancia de las publicaciones sobre usos del agua en la industria azucarera	35
Tabla 4. Preguntas orientadoras para la búsqueda de publicaciones sobre impactos negativos de los ingenios sobre los cuerpos de agua.....	42
Tabla 5. Criterios de inclusión y exclusión de publicaciones sobre impactos negativos de los ingenios azucareros	43
Tabla 6. Palabras clave para la identificación de estudios relevantes sobre impactos negativos de los ingenios azucareros en los cuerpos de agua	43
Tabla 7. Nivel de DBO5 en aguas residuales de actividades de producción de azúcar	46
Tabla 8. Clasificación del agua según niveles de DBO ₅	46
Tabla 9. Clasificación del agua según niveles de DQO.....	47
Tabla 10. Clasificación del agua según niveles de OD	48
Tabla 11. pH aceptable para la vida acuática.....	49
Tabla 12. pH según efluentes de ingenio azucarero	49
Tabla 13. Carga contaminante por fosfatos en ingenio	51
Tabla 14. Escala de niveles de sólidos totales disueltos	52
Tabla 15. Flora del valle del Cauca en zonas de cultivos de caña de azúcar	55
Tabla 16. Fauna del valle del Cauca en zonas de cultivos de caña de azúcar	55
Tabla 17. Preguntas orientadoras para el mapeo sistemático de tecnologías limpias en la industria azucarera	58
Tabla 18. Criterios de inclusión y exclusión de publicaciones sobre tecnologías de fabricación de azúcar con bajos impactos ambientales sobre cuerpos de agua ...	59
Tabla 19. Palabras clave para la identificación de estudios relevantes sobre tecnologías limpias para la remediación de cuerpos de agua afectados por los ingenios azucareros	59

Tabla 20. Preguntas orientadoras sobre tecnologías de biorremediación a partir de lodos activados, bacterias y hongos en zonas de ingenios azucareros.	74
Tabla 21. Términos de inclusión y exclusión sobre tecnologías de biorremediación basadas en lodos activados, bacterias y hongos de cuerpos de agua afectados por los ingenios azucareros.....	74
Tabla 22. Palabras clave para la búsqueda de publicaciones relevantes de tecnologías de biorremediación.....	75
Tabla 23. Publicaciones sobre biorremediación basada en lodos activados, hongos y bacterias de cuerpos de agua afectados por ingenios azucareros.....	76
Tabla 24. Uso de bacterias en tratamiento de efluentes de ingenio azucarero en India	79
Tabla 25. Uso de bacterias en tratamiento de fluentes	81

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Número de publicaciones encontradas según bases de datos	35
Figura 2. Distribución de estudios relevantes según año de publicación.	36
Figura 3. Distribución de estudios relevantes según países	36
Figura 4. Estudios sobre impactos negativos de los ingenios azucareros sobre cuerpos de agua.....	44
Figura 5. Distribución de publicaciones sobre impactos de los ingenios azucareros en cuerpos de agua por año.....	44
Figura 6. Distribución de las publicaciones relevantes por país	45
Figura 7. Distribución de publicaciones relevantes según el tipo de impacto negativo en los cuerpos de agua.....	45
Figura 8. Publicaciones sobre tecnologías en los procesos de fabricación de azúcar con bajos impactos sobre los cuerpos de agua.....	60
Figura 9. Distribución por año de las publicaciones sobre tecnologías de procesos de producción de azúcar con bajos impactos en cuerpos de agua	60
Figura 10. Distribución de publicaciones sobre tecnologías en procesos de producción de azúcar con bajos impactos negativos sobre cuerpos de agua.....	61
Figura 11. Distribución de publicaciones sobre tecnologías en producción de azúcar con bajos impactos sobre cuerpos de agua según tipo de procesos	61
Figura 12. Sistema de captación de aguas lluvias para uso en ingenios	62
Figura 13. Modelo de trampa de grasas de ingenio	63
Figura 14. Reutilización de agua en lavado de maquinaria	64
Figura 15. Uso de subproductos para fertilización de cultivos de caña	65
Figura 16. Arado de cincel en la preparación de suelos de cultivos de caña	66
Figura 17. Cobertura de paja para el control de plagas y ahorro de agua	67
Figura 18. Uso de aguas biodegradables de los ingenios sobre cultivos de caña	68
Figura 19. Uso de condensado contaminado como imbibición	69
Figura 20. Aprovechamiento de condensados en dilución de mieles.....	71

Figura 21. Dispositivos de electromagnetismo	72
Figura 22. Torres de enfriamiento de agua	73
Figura 23. Distribución anual de publicaciones sobre biorremediación basada en lodos activados, hongos y bacterias de cuerpos de agua afectados por ingenios azucareros.....	76
Figura 24. Distribución por país de publicaciones sobre biorremediación de cuerpos de agua basada en lodos activados, hongos y bacterias	77
Figura 25. Distribución de publicaciones según tipo de biotecnologías de remediación de cuerpos de agua afectados por los ingenios azucareros	77
Figura 26. Sistema de lodos activados para remediación de efluentes.....	78
Figura 27. Reactor SBR al inicio y al final del tiempo de tratamiento de vinaza	79
Figura 28. Consorcio de <i>Bacilo subtilis</i> , <i>Serratia marcescens</i> y <i>Enterobacter asburiae</i>	80
Figura 29. Consorcio de <i>Bacilo subtilis</i> y <i>pseudomonas</i>	80
Figura 30. Hongo <i>Aspergillus niger</i> para el tratamiento de efluentes	82
Figura 31. Hongo <i>Pleurotus ostreatus</i> para tratamiento de vinazas.....	83

Lista anexos

	Pág.
Anexo 1. Proceso de obtención de la azúcar de caña	112
Anexo 2. Biotecnología de lodos activados para biorremediación de vinazas	113
Anexo 3. Biotecnología de bacterias para biorremediación de aguas residuales	114
Anexo 4. Biotecnología de hongos para biorremediación de aguas residuales ..	115

Resumen

Este documento describe los resultados de un proceso de investigación cuyo objetivo es analizar el estado de la implementación de las tecnologías limpias en la industria azucarera que propician procesos ambientalmente sostenibles para la protección de los recursos hídricos en las zonas de influencia de los ingenios. Se apoya en elementos teóricos del desarrollo sostenible y la economía ecológica teniendo en cuenta que son tecnologías que pueden contribuir al desarrollo de una industria compatible con el medio ambiente. La metodología es de tipo mixto y descriptiva apoyada en la revisión documental de antecedentes investigativos sobre impactos ambientales negativos de los ingenios y de tecnologías que contribuyen a generar una producción de azúcar con menores efectos nocivos sobre los cuerpos de agua. Los resultados permiten comprender que los principales impactos negativos están representados en la reducción de áreas acuáticas y en algunos casos la desaparición, así como la contaminación por materia orgánica, cambios en el pH, presencia de elementos químicos en cantidades abundantes que han deteriorado las condiciones de vida de especies que habitan estos ecosistemas. Por otra parte, se han identificado tecnologías limpias que hacen parte de los mismos procesos de fabricación, tales como la reutilización de aguas residuales, de condensados, la implementación de torres de enfriamiento de aguas residuales, el uso de magnetismo. Luego, también existen biotecnologías como los lodos activados, consorcios de bacterias y hongos que resultan eficientes en la reducción de la(DBO5), de hasta el 95%, DQO del 90%, SST 87%, SDT 70% entre otros. Se concluye que en la actualidad la industria azucarera cuenta con tecnologías limpias con las cuales es viables desarrollar una actividad productiva sostenible desde los puntos de vista ambiental, social y económica.

Palabras clave: ingenios azucareros, impactos ambientales, tecnologías limpias, acuíferos.

Abstract

This document describes the results of a research process whose objective is to analyze the status of the implementation of clean technologies in the sugar industry that promote environmentally sustainable processes for the protection of water resources in the sugar mills' areas of influence. It is based on theoretical elements of sustainable development and the ecological economy, taking into account that they are technologies that can contribute to the development of an industry that is compatible with the environment. The methodology is mixed and descriptive based on the documentary review of investigative background on negative environmental impacts of mills and technologies that contribute to generating sugar production with less harmful effects on water bodies. The results allow us to understand that the main negative impacts are represented in the reduction of aquatic areas and in some cases the disappearance, as well as contamination by organic matter, changes in the pH, presence of chemical elements in abundant quantities that have deteriorated the conditions of life of species that inhabit these ecosystems. On the other hand, clean technologies have been identified that are part of the same manufacturing processes, such as the reuse of wastewater, condensate, the implementation of wastewater cooling towers, the use of magnetism. Then, there are also biotechnologies such as activated sludge, consortiums of bacteria and fungi that are efficient in reducing DB05 up to 95%, COD 90%, TSS 87%, TDS 70%, among others. It is concluded that currently the sugar industry has clean technologies with which it is feasible to develop a sustainable productive activity from the environmental, social and economic points of view.

Keywords: sugar mills, environmental impacts, clean technologies, aquifers.

Introducción

La industria azucarera a través de los ingenios es responsable de impactos negativos sobre el medio ambiente que afectan gravemente el suelo, el aire, el paisaje y especialmente los acuíferos. Sobre estos últimos, los principales mecanismos de contaminación son los efluentes resultantes del proceso de fabricación caracterizado por la generación de vinazas y aguas residuales resultantes de la evaporación, condensación y lavado de equipos y maquinaria que contienen altas concentraciones de materia orgánica rica en fibras, fósforo, potasio que alteran las propiedades de los cuerpos de agua en donde se depositan [1]. A esto se suman la presencia de metales pesados como el mercurio, plomo, molibdeno y otros que aumentan la toxicidad [2].

Sin embargo, a pesar de tales afectaciones, en la actualidad existen tecnologías que permiten desarrollar una actividad industrial que puede ser más compatible con el medio ambiente, de tal manera que pueden reducirse significativamente los impactos negativos sobre los cuerpos de agua en las áreas en donde se han establecido los ingenios.

Debido a ello, esta investigación pretende analizar el estado de la implementación de las tecnologías limpias en la industria azucarera que propician procesos ambientalmente sostenibles para la protección de los recursos hídricos en las zonas de influencia de los ingenios.

Conforme a tal propósito, el presente documento se compone de siete apartados, además de estos aspectos introductorios iniciales que constituyen el primero. El segundo corresponde a los aspectos que describen el problema, el cual parte de considerar los impactos negativos de los ingenios en los cuerpos de agua de las zonas aledañas. Se complementa con los objetivos específicos consistentes en describir los impactos negativos de la industria en mención, luego identificar las tecnologías limpias que contribuyen a la sostenibilidad ambiental y por último discutir los resultados de la implementación de tales tecnologías. Finaliza con la justificación, la cual se hace con base las dimensiones social, económica y ambiental.

En el segundo apartado se presentan las bases teóricas y conceptuales, para lo cual se presentan tres antecedentes de tecnologías limpias, así como aspectos relacionados con el desarrollo sostenible y la economía ecológica.

En el tercero se describe la ruta metodológica, que responde a un enfoque mixto, el cual implica que se harán análisis de datos cuantitativos y cualitativos resultantes de la implementación de la técnica de la revisión documental de antecedentes sobre impactos ambientales y de alternativas limpias en el proceso productivo del azúcar a nivel nacional e internacional.

En el cuarto apartado se presentan los resultados del primero objetivo, los cuales indican que los impactos de los ingenios empiezan desde las mismas actividades de siembra, en donde la expansión de la frontera agrícola ha conllevado a la disminución de áreas, caudales e inclusive la desaparición de acuíferos (ríos y lagos) y bosques, con lo cual las especies acuáticas y terrestres han pasado a la categoría de altamente amenazadas. Además, existen afectaciones en cuanto a las propiedades físico-químicas y biológicas del agua, ya que los efluentes sin tratamientos rigurosos llegan a los acuíferos y modifican la demanda biológica de oxígeno (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT), elementos como el fósforo, nitrógeno y potasio, así como metales pesados representados en el plomo, mercurio y molibdeno, entre otros.

En el quinto, se describen los resultados del segundo objetivo, en donde se comprende que las tecnologías limpias están dadas en la implementación de la reutilización de aguas residuales, el montaje de dispositivos de recolección de grasas y materia orgánica, uso del magnetismo para evitar la incrustación de materiales contaminantes, la construcción de torres de enfriamiento, utilización de coberturas vegetales en los cultivos, uso de aguas residuales en el ferti riego, entre otros. Así mismo, están las biotecnologías que, a través del uso de lodos activados, bacterias y hongos es factible mejorar parámetros como los de la DBO₅, DQO, SST, SDT, pH y metales pesados.

En el sexto, se presenta una breve discusión que permite comprender cómo estas tecnologías se constituyen en alternativas viables para que los ingenios las incorporen a fin de lograr garantizar el desarrollo sostenible como prácticas de la economía ecológica.

Y finalmente, en el sexto apartado se plantean algunas conclusiones que permiten entender que, las tecnologías descritas evidencian que la industria azucarera, si bien es responsable de altos impactos nocivos sobre el medio ambiente y especialmente de los cuerpos de agua, cuentan con tecnologías limpias que les puede contribuir a garantizar el desarrollo sostenible a partir de una actividad que incorpora elementos de la economía ecológica. Así mismo, se plantean algunas recomendaciones tendientes a la incorporación de estas tecnologías para prevenir, mitigar o controlar los impactos de los ingenios.

1. Planteamiento del problema

1.1. Descripción del problema

La actividad industrial ha contribuido al mejoramiento de la calidad de vida de las personas en vista de la diversificación de los bienes de consumo [3], principalmente porque ha sido posible mantener la seguridad alimentaria ante las limitaciones de la producción agrícola debido a algunos problemas sociales (guerras) y ambientales (cambio climático) en algunos momentos históricos [4], pero también es innegable que es responsable de impactos ambientales negativos que afectan las condiciones naturales y de vida de las personas y del resto de seres vivos [5], además de las afectaciones sobre los factores abióticos como el paisaje, el aire y los cuerpos de agua que son quizá los que más cargas contaminantes reciben [6].

En el ámbito nacional, el sector industrial en general que se constituye en un tercio del producto interno bruto (PIB) es responsable del 20% de la contaminación y la de alimentos que participa con el 6% al producto [4], aporta un 12% de las cargas contaminantes, tales como las emisiones de gases de efecto invernadero, ruido, vibraciones y vertimientos [7].

Sobre estos últimos, los principales problemas que ocasionan las actividades productivas de los ingenios sobre los recursos hídricos están relacionados con la contaminación de ríos y aguas subterráneas debido al uso de plaguicidas y vertimientos de subproductos, además de la pérdida de cuerpos de agua a causa de la compactación del suelo ante el uso intensivo de maquinaria agrícola que al final se traduce en empobrecimiento de la diversidad biológica (acuática y terrestre) debido a la eliminación de seres vivos por la expansión de este monocultivo y por los impactos negativos de la instalación y funcionamiento de plantas industriales que alteran el ambiente [8].

De acuerdo con Barbosa [9] y Verardi [10], en gran medida los impactos ambientales más graves de la industria azucarera son invisibles a los ojos de la población, los consumidores y de los propios organismos ambientales, porque en los entornos rurales no presentan la misma visibilidad que en los urbanos, sobre todo si se trata de aguas subterráneas.

No obstante, en la industria en general y desde luego en la azucarera, se observa una tendencia frente al desarrollo de procesos de producción innovadores y amigables con el medio ambiente que propenden por minimizar los impactos negativos [11] [12].

Esto significa que, en la actualidad, los productores de azúcar cuentan con tecnologías y normas que propenden por generar productos que incorporan tecnologías limpias [13], las cuales a partir de investigaciones sobre métodos y herramientas de producción permiten reducir ostensiblemente la contaminación [14] al punto que en el caso colombiano ha dado como resultado una visión estratégica de ASOCAÑA para 2030, que entre otros propósitos está el de implementar procesos que contribuyan a la conservación del medio ambiente, sobre todo abandonando prácticas que generan altas cargas contaminantes [15].

Sin embargo, a pesar de tal objetivo definido desde el gremio azucarero, persisten problemas relacionados con los vertimientos sobre cuerpos de agua, así como la utilización inadecuada de las fuentes hídricas, la degradación de las capas freáticas, incorporación de sustancias tóxicas que resultan del material de arrastre por escorrentía, además de materiales dulces de subproductos de la obtención de azúcar, grasas de lubricación de la maquinaria, entre otros [16].

Lo anterior significa que es necesario incorporar tecnologías limpias que aporten a un proceso industrial compatible con el medio ambiente, que asegure la sostenibilidad de la producción de azúcar, así como la protección de los recursos hídricos de las áreas donde operan este tipo de factorías [17]. Aunque se reconoce el valor ambiental de las tecnologías limpias, persiste en algunos productores la renuencia para incorporarlas en sus procesos, debido principalmente a que en principio no consideran pertinente la innovación para la protección del medio ambiente, así como la ausencia de exigencias y vigilancia del cumplimiento en materia normativa por parte de organismos estatales [18].

A pesar de estas situaciones, en la mayoría de los casos se ha tomado conciencia de producir azúcar a partir de procesos limpios, pues se ha comprendido la necesidad de la protección del medio natural y ofrecer a los consumidores un

producto que cumple con estándares ambientales y en muchos casos ecológicos que le otorgan un mayor valor agregado, a la vez que supone una responsabilidad social empresarial [19] [20].

Ante las consideraciones anteriores sobre la responsabilidad de la industria azucarera en la contaminación y la incorporación de procesos innovadores que cada vez toma más fuerza para la protección de los recursos hídricos y a generación de productos con sostenibilidad ambiental, esta propuesta de investigación busca dar respuesta a la siguiente pregunta:

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es el estado de la implementación de las tecnologías limpias en la industria azucarera que propician procesos ambientalmente sostenibles para la protección de los recursos hídricos en las zonas de influencia de los ingenios?

1.3. Justificación

Al hacerse referencia a las tecnologías limpias implementadas por los ingenios azucareros en sus procesos industriales, se entiende que son aquellas que propenden por una actividad económica que propende por una compatibilidad ambiental, de tal manera que se logran minimizar los efectos nocivos sobre los cuerpos de agua y en ese sentido, el estudio relacionado en el estado de la implementación de este tipo de tecnologías que describe esta monografía se justifica desde cuatro perspectivas fundamentales:

1.3.1. Social

Porque difundirá hallazgos de procesos de implementación de este tipo de tecnologías en aras de lograr no solo un proceso industrial ameno con el medio ambiente, sino que puede contribuir a mejorar la calidad de vida de las comunidades de las zonas aledañas a los ingenios, sobre todo aquellas que dependen de los cuerpos de agua que han sido objeto de contaminación. Al respecto, [21], plantean que son alternativas eficientes que redundan en mecanismos de intervención efectivos para el mejoramiento del saneamiento básico en áreas de influencia de las unidades industriales azucareras y procuran una mitigación de los impactos

negativos sobre el medio ambiente en general, favoreciendo los ecosistemas y las especies acuáticas y terrestres.

1.3.2. Económica

En el sentido que los resultados de la implementación de tecnologías limpias no solo implican reducciones en materia de impactos negativos sobre los cuerpos de agua, sino que se traducen en beneficios para los ingenios en la medida que reducen los costos en tasas retributivas debido a la reducción de las cargas contaminantes [22], a la vez que al desarrollar procesos ambientalmente responsables les permite a las industrias una mayor aceptación por los consumidores en razón de llevar a cabo un proceso productivo que propende por impactar con menor intensidad al medio ambiente [23]. De ese modo, se aportan elementos que ponen en escena procesos productivos ceñidos a la economía ecológica, la cual propende por elementos de análisis para la satisfacción de las necesidades de consumo con bajos impactos negativos sobre la naturaleza [24].

1.3.3. Ambiental

Es un estudio que se justifica debido a que ofrece información sobre tecnologías que puede implementarse para procesos industriales, los cuales pueden desarrollarse procurando mantener las condiciones ambientales con bajos niveles de afectaciones, de manera que los ecosistemas y los organismos y especies acuáticos y terrestres alcancen condiciones que garanticen la calidad ambiental de las zonas naturales aledañas y los cuerpos de agua, sino la misma industria que depende de la oferta de un recurso vital, con lo cual el desarrollo sostenible puede ser objeto de aportes desde el uso de tecnologías limpias [15].

1.3.4. Académica

Es un estudio pertinente, porque a través de los análisis de los impactos ambientales de la industria azucarera sobre los cuerpos de agua y principalmente de las investigaciones en las que se han implementado tecnologías limpias se aportan elementos descriptivos con los cuales se evidencia la efectividad de las mismas a manera de información que puede tomarse como insumo para futuras investigaciones aplicadas en el contexto regional y nacional en los ingenios.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar el estado de la implementación de las tecnologías limpias en la industria azucarera que propician procesos ambientalmente sostenibles para la protección de los recursos hídricos en las zonas de influencia de los ingenios

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar los impactos negativos del proceso industrial azucarero sobre los cuerpos de agua de las zonas de influencia de los ingenios.
- Describir los procesos y beneficios de la implementación de las tecnologías limpias aplicadas en el proceso industrial azucarero que aportan a la sostenibilidad ambiental de los recursos hídricos en las zonas de ingenios con base en antecedentes investigativos.
- Elaborar una discusión analítica acerca del papel de las tecnologías limpias utilizadas en el proceso industrial azucarero frente a los recursos hídricos de las zonas de influencia de los ingenios.

2. Estado del arte y bases teóricas

Para efectos de comprender los aportes de las tecnologías limpias orientadas a lograr procesos industriales azucareros que propenden por la sostenibilidad de los recursos hídricos en las zonas de influencia de los ingenios, es necesario identificar algunos ejercicios investigativos en los contextos internacional y nacional que muestran la posibilidad de implementarlas en aras de la minimización de los impactos negativos. Además, es indispensable reconocer algunos aspectos relacionados con el desarrollo sostenible y la economía ecológica, campos de conocimiento en los que es posible incluir las tecnologías limpias por cuanto pueden aportar a mantener las condiciones de los cuerpos de agua para el futuro y procurando además garantizar una producción que genera beneficios económicos a partir de apuestas que pueden contribuir a la restauración y conservación del equilibrio ecológico.

2.1. Estado del arte

Las tecnologías limpias hacen parte de aquellos procesos que permiten una producción de bienes y servicios compatibles con el medio ambiente, pero no solo hacen parte del proceso de fabricación como tal, sino que se incluyen aquellas que se utilizan con posterioridad a la obtención de productos para corregir los impactos generados.

Un primer estudio que puede destacarse es el de Ramos y Lorenzo [17], el cual da cuenta de acciones limpias en los procesos generales como específicos de producción de azúcar, en donde el uso de los condensados permite reducir la demanda de agua, la implementación de dispositivos recolectores de grasas y sub productos evitan que se contaminen los cuerpos de agua, el uso de aguas residuales contaminadas sobre los cultivos ayudan a fertilizar los suelos y mejor crecimiento de las plantas de caña, la recirculación del agua caliente que optimiza el gasto en energía, además de la construcción de torres de enfriamiento, de modo que se almacenan aguas residuales disponibles para otros procesos, como por ejemplo la preparación de la lechada de cal para la calificación de los jugos y del azúcar.

Al anterior se suma el estudio de Bernal [3], el cual destaca que los procesos industriales como los de los ingenios pueden generar alternativas de optimización de insumos, especialmente de agua si se implementa la reutilización de vertimientos que contienen ciertas propiedades físico-químicas como la acidez o de elementos químicos necesarios en otras fases, de manera que no se derraman al ambiente sino que reingresan a la cadena de valor. En ese sentido, destaca que las vinazas pueden utilizarse para fertilizar suelos al someterlos a algún grado de tratamiento que les elimine la toxicidad por metales pesados.

Otras tecnologías limpias están representadas en las alternativas biológicas que como en el caso del estudio de Badillo [25], muestran que es viable reducir los impactos de los efluentes a partir de la implementación de biotecnologías de remediación, tales como los lodos activados que facilitan la remoción de materiales suspendidos responsables de problemas de eutrofización por ejemplo.

A estas se suman el uso de bacterias cuyos consorcios presentan una alta eficiencia para reducir la DBO5, DQO, SST, SDT, pH, potasio, nitrógeno, fósforo y metales pesados, que como lo muestra el estudio de Saranraj y Stella [26] son microorganismos que debido a sus capacidades metabólicas degradan los sólidos y materiales orgánicos permitiendo la mejora del color, olor y demás propiedades físico-químicas.

Finalmente, pueden destacarse los hongos que como lo plantean Tapie y Prato [27], gracias a sus propiedades para descomponer las materia orgánica de los efluentes pueden mejorarse los parámetros de calidad del agua. Estos actúan como consumidores de los nutrientes del agua contaminada y ayudan a evitar problemas de eutrofización.

2.2. Bases teóricas

Teniendo en cuenta que las tecnologías limpias hacen parte de las innovaciones que permiten lograr procesos productivos que contribuyen a la sostenibilidad ambiental y a la obtención de beneficios económicos incurriendo en mínimos deterioros de los cuerpos de agua, las bases teóricas que sustenta el estudio son el desarrollo sostenible y la economía ecológica.

2.2.1. El desarrollo sostenible

Teniendo en cuenta que se trata de la implementación de las tecnologías limpias para la producción de azúcar y que propende por la protección de los recursos hídricos, pueden considerarse pertinentes los elementos teóricos del desarrollo sostenible y de la economía ecológica.

El desarrollo sostenible se refiere a un campo teórico en el que prevalece la concepción del carácter intrínseco de los procesos industriales a la propia esencia del medio ambiente, debido a que es la principal fuente de recursos primarios susceptibles de transformación para la satisfacción de necesidades de la humanidad [28]. El desarrollo sostenible es una mirada integral del desarrollo, teniendo en cuenta que no solo el ámbito económico caracterizado por la generación de riqueza es el relevante, sino que se debe volver la mirada al origen de la vida misma que está en el medio ambiente, el cual no solo cumple la función de provisión de recursos, sino de sumidero de los residuos y subproductos que las actividades antrópicas generan [29]. En ese sentido, al indagarse por las tecnologías limpias utilizadas por la industria azucarera, es posible obtener una aproximación a los procesos por los cuales desde este tipo de producción se propende por el desarrollo sostenible, teniendo en cuenta que desde la ONU se ha establecido como uno de los 17 objetivos de desarrollo el cuidado y protección del medio ambiente [30].

2.2.2. La economía ecológica

En cuanto a la economía ecológica, debe entenderse como un campo de conocimiento que se enfoca en el análisis de los procesos productivos que apuntan a la sostenibilidad ambiental de los procesos productivos con fines económicos como los de la industria, de manera que es una perspectiva científica para comprender como el uso de la energía y materiales para la obtención de alimentos destinados al consumo permiten identificar el nivel de sostenibilidad ambiental del sistema económico [20]. La economía ecológica se articula con los procesos industriales debido a que emerge como una disciplina científica que integra elementos de la economía, la ecología, la termodinámica, la ética y otras ciencias

naturales y sociales para generar conocimientos sobre las interacciones entre el hombre y el medio ambiente en razón a los procesos productivos [31]. Por ello, las tecnologías limpias que favorecen la producción sostenible y compatible con el medio ambiente, pueden considerarse como las formas por las cuales la protección y conservación de los recursos hídricos es viable.

3. Metodología

Es una investigación que combina información cuantitativa y cualitativa, de manera que se puede considerar de enfoque mixto y de tipo descriptivo mediante la implementación de la revisión documental o bibliográfica como técnica de recolección de información predominante.

3.1. El enfoque mixto

Al combinar información cuantitativa y cualitativa, es posible realizar un análisis más holístico de un problema o tema investigado, puesto que la objetividad de los datos numéricos se complementa con los elementos de tipo subjetivo que puede extraerse a partir de opiniones o enunciados de investigadores o individuos involucrados en un proceso científico de recolección y análisis de datos [32] [33].

En este caso, al analizarse los impactos ambientales de los ingenios sobre los cuerpos de agua en zonas aledañas y de los beneficios de la tecnologías limpias que contribuyen a minimizarlos, se utiliza información cuantitativa de indicadores con base en estudios en el ámbito nacional e internacional y se complementan con miradas subjetivas que permiten obtener una mayor comprensión de los hallazgos, de manera que pueda servir como información que pueda tomarse como referente para ejercicios aplicados futuros.

3.2. Investigación descriptiva

Teniendo en cuenta que el estudio no es de alcance experimental, se trata de un ejercicio que describe una aproximación al estado del arte sobre la implementación de tecnologías limpias en la industria azucarera, específicamente en los ingenios para efectos de evitar o minimizar los impactos ambientales negativos de los procesos productivos. Es decir, se presenta un análisis de información resultante de investigaciones internacionales y nacionales sin intervenir sobre una problemática en particular, siendo entonces un estudio no experimental y que por lo tanto se limita a exponer los hallazgos sobre un tema sin modificarlo [34], que como en este caso parte de describir los impactos ambientales de los ingenios sobre los cuerpos de

agua y el uso de tecnologías limpias, lo cual no significa que se intervenga para verificar su funcionalidad mediante un proyecto aplicado.

3.3. Técnica de recolección de información

En vista que se realiza un análisis descriptivo de investigaciones sobre impactos ambientales negativos de la industria azucarera y de tecnologías limpias como alternativas para minimizar o evitarlos, mitigar o minimizar los impactos ambientales en los ámbitos nacional e internacional. En ese sentido, se implementa el mapeo sistemático, consistente en una búsqueda, síntesis y análisis de publicaciones, tales como artículos científicos de revistas indexadas, tesis de los niveles de maestría y doctorado, así como de informes y libros disponibles en repositorios físicos y digitales para obtener información pertinente con las categorías y/o variables relacionadas [35]. En tal sentido, se lleva a cabo un proceso de síntesis de información de los diferentes documentos, con lo cual es posible identificar en primer lugar los impactos ambientales de los ingenios azucareros sobre los cuerpos de agua, las tecnologías limpias implementadas y los beneficios de estas.

3.4. Procedimiento

Con base en los objetivos planteados, el estudio se desarrolla en tres fases con sus respectivas actividades como se describen a continuación:

3.4.1. Fase I. Identificación de impactos de la industria azucarera sobre los cuerpos de agua.

La implementación de esta fase conlleva el desarrollo de cinco pasos que describe la propuesta de Petersen [35] para una revisión sistemática:

- **Definición de preguntas:** es decir, el planteamiento de preguntas acerca de los usos del agua en los procesos de producción de azúcar, así como de los impactos negativos.
- **Realización de la búsqueda:** es la consulta de bases de datos como de acceso libre, tales como Dialnet, Redalyc, Reserachgate y Scielo, además de Semantic Scholar, IEEE, ScienceDirect, que son de acceso exclusivo, a las que se suman otras fuentes representadas en repositorios digitales de

universidades, organismos nacionales e internacionales y centros de investigación en materia ambiental.

- **Revisión de documentos:** consistente en la lectura para identificar los que son relevantes para la presente investigación.
- **Revisión de resúmenes y palabras clave:** que permite una clasificación de las publicaciones conforme a las variables relevantes del estudio.
- **Extracción de datos:** que es la síntesis de información con la que se da respuesta a las preguntas que se han planteado.

Los resultados de esta fase son los que se presentan en el capítulo 4, en el que se describen los usos del agua en la industria azucarera y los impactos negativos sobre los cuerpos de agua en zonas aledañas.

3.4.2. Fase II. Descripción de los procesos y beneficios de la implementación de las tecnologías limpias aplicadas en la industria azucarera.

Para determinar cuáles tecnologías limpias se utilizan actualmente en la industria azucarera y los beneficios, se implementa el método de mapeo sistemático siguiendo las mismas etapas de Petersen [35] descritas en la fase anterior:

- **Formulación de preguntas:** son preguntas relacionadas con el tipo de tecnologías limpias implementadas según procesos de producción de azúcar y preguntas acerca de los beneficios de su implementación.
- **Búsqueda de antecedentes:** se refiere a la revisión de bases de datos de acceso libre (Dialnet, Redalyc, Researchgate y Scielo), de acceso exclusivo (IEEE, Semantic Scholar y ScienceDirect) y otras fuentes en las que se agrupan los repositorios digitales de universidades en los que están disponibles tesis de maestría y doctorado, además de informes de centros de investigación y otras organizaciones que han realizado estudios sobre implementación de tecnologías limpias en la industria azucarera para la protección de recursos hídricos y/o mitigación de impactos negativos. Se trata de la búsqueda de trabajos realizados en el ámbito nacional e internacional al respecto.

- **Revisión de publicaciones:** es la descripción de publicaciones que permite definir cuáles son los pertinentes para la presente investigación.
- **Revisión de resúmenes y palabras clave:** con base en estos parámetros es viable clasificar las publicaciones de acuerdo con cada variable o categoría relevante.
- **Extracción de datos:** es la etapa final, en la cual se describen los hallazgos relevantes de las investigaciones sobre las tecnologías limpias identificadas.

De acuerdo con los anteriores pasos, los resultados de cada uno de estos son los que se presentan en el capítulo 5, en el cual se da cuenta de las tecnologías según los procesos de producción, así como los beneficios en materia ambiental, social y económica.

3.4.3. Fase III. Discusión analítica de las tecnologías limpias frente a los recursos hídricos en los ingenios

En esta fase se identifican aquellas categorías y variables que emergen de los estudios más relevantes sobre el uso de tecnologías limpias y los beneficios que estas presentan sobre la reducción de impactos ambiental en los cuerpos de agua aledaños a los ingenios azucareros. Las actividades para alcanzar tal discusión son las siguientes:

- **Identificación de categorías y/o variables emergentes:** Se refiere a la identificación de los aspectos característicos comunes entre los antecedentes investigativos consultados a raíz del uso de tecnologías limpias en la industria azucarera.
- **Discusión comparativa:** Es la confrontación de hallazgos relacionados con los impactos de las tecnologías limpias sobre los recursos hídricos en zonas de ingenios.
- **Análisis final:** Son las consideraciones finales a las que se llegan teniendo en cuenta los análisis comparativos de hallazgos de los antecedentes en los ámbitos nacional e internacional.

- **Elaboración de conclusiones y recomendaciones:** Presentación de aspectos relevantes según cada objetivo. Además, se formulan sugerencias para el uso de tecnologías limpias para una industria azucarera ambientalmente sostenible de cara a los recursos hídricos en zonas de ingenios.

4. Impactos negativos del proceso industrial azucarero sobre los cuerpos de agua de las zonas de influencia de los ingenios.

Los impactos negativos de esta industria son producto, inicialmente de los usos del agua en cada proceso que se desarrolla en los ingenios y luego a raíz de la disposición de las aguas residuales. Para ello, siguiendo la propuesta de Petersen [35] para un mapeo sistemático descrito en el numeral 3.4.1, los resultados descritos a continuación son producto de las siguientes preguntas orientadoras:

Tabla 1. Preguntas orientadoras para el mapeo sistemático

Preguntas orientadoras	Motivación
1. ¿Qué estudios existen sobre los usos del agua conforme a los procesos de la industria azucarera?	Determinar el número de publicaciones acerca de los usos del agua en los procesos de producción de azúcar
2. ¿Cómo se distribuyen anualmente los estudios durante el periodo 2010 – 2022?	Identificar la frecuencia de publicación durante el periodo 2010 – 2022.
3. ¿En qué países se han realizado los estudios?	Determinar los países de origen de los estudios descritos.
4. ¿Qué hallazgos presentan los estudios en cuanto a usos del agua en la procesos de la producción de azúcar?	Describir los usos del agua que hace la industria azucarera en sus diferentes procesos.

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con estas preguntas, el proceso de búsqueda se realizó teniendo en cuenta bases de datos de acceso gratuito, tales como Dialnet, Redalyc, Reserchgate y Scielo, además de ScienceDirect y Semantic Scholar y otras fuentes. Para la búsqueda se asumieron los siguientes criterios de inclusión y exclusión.

Tabla 2. Criterios de inclusión y exclusión de publicaciones sobre usos del agua en los ingenios azucareros

Inclusión	Exclusión
Publicaciones en español e inglés sobre usos del agua en los ingenios azucareros	Publicaciones en otro idioma diferente al español e inglés.
Publicaciones desde al año 2010 a 2022.	Publicaciones anteriores a 2010
Artículos de revisión o de resultados completos disponibles en bases de datos o repositorios de revistas científicas.	Artículos incompletos o completos no disponibles en bases de datos o repositorios de revistas científicas.
Tesis de maestría o doctorado en físico o digitales disponibles en repositorios de universidades relacionadas con el tema.	Tesis de nivel de pregrado.
Estudios de acceso al menos a resumen y/o abstract	Estudios sin resumen y/o abstract o sin acceso a estos.

Fuente: elaboración propia

Además de los términos de inclusión y exclusión, la búsqueda ameritó considerar palabras clave, tanto en español como en inglés para efectos de identificar las publicaciones relevantes para dar respuesta a las preguntas orientadoras. Para ello, la Tabla 3 describe las que se utilizaron para efectos de hacer filtros en las bases de datos seleccionadas.

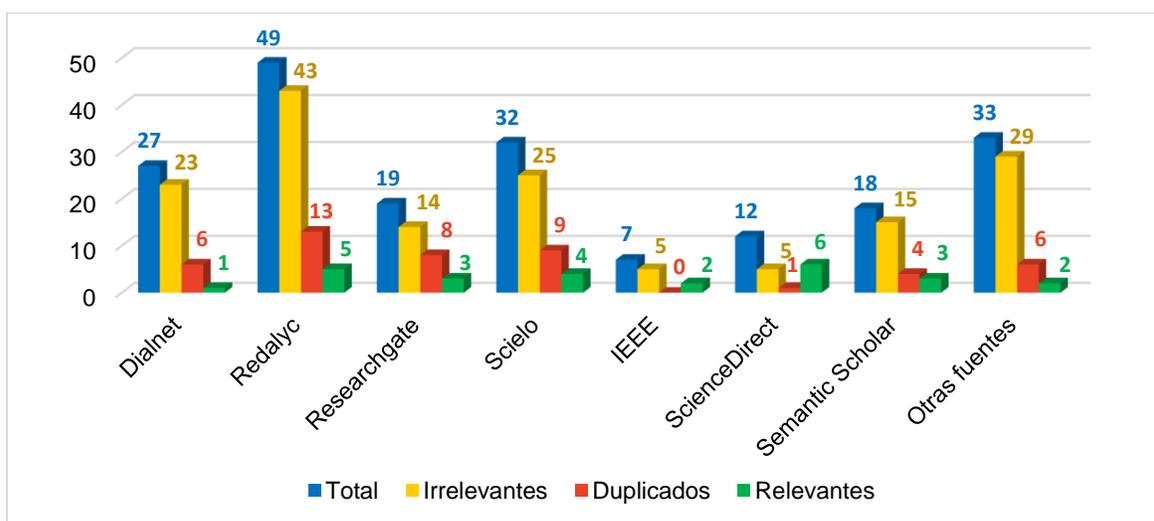
Tabla 3. Palabras clave para determinar la relevancia de las publicaciones sobre usos del agua en la industria azucarera

Palabras clave	Keywords
Usos del agua	Uses of water
Ingenios azucareros	Sugar mills
Cuerpos de agua	Water sources

Fuente: elaboración propia

A partir de la implementación de los anteriores lineamientos para el mapeo, es posible dar respuesta a la primera pregunta, la cual da cuenta de 197 publicaciones primarias y 26 relevantes y de las cuales ScienceDirect con 6 publicaciones es la que más aporta al estudio, seguida de Redalyc con 5 y Scielo con 4.

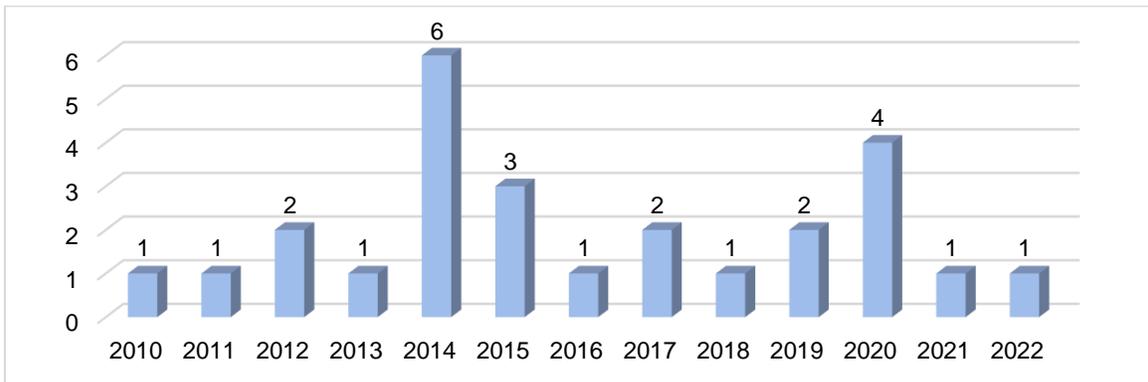
Figura 1. Número de publicaciones encontradas según bases de datos



Fuente: elaboración propia

Frente a la segunda pregunta, el 23% de los estudios relevantes se concentran en los últimos cinco años, pero es en el 2014 cuando se publicó el mayor número de estudios, tal como se deduce a partir de los datos de la Figura 2.

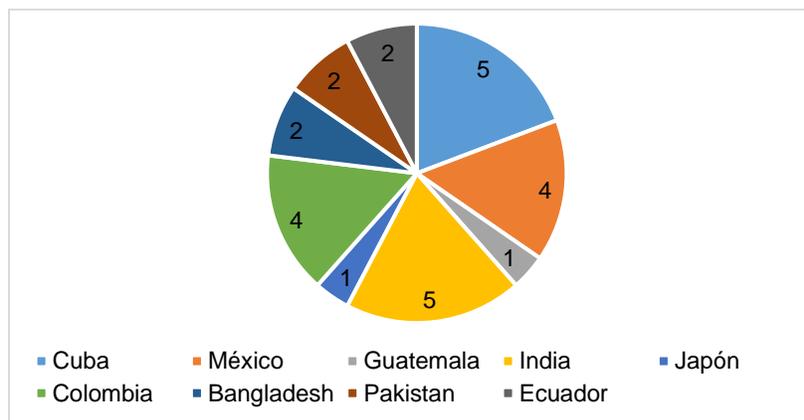
Figura 2. Distribución de estudios relevantes según año de publicación.



Fuente: elaboración propia

En cuanto a la tercera pregunta, puede destacarse que Cuba e India son los países que más presentan publicaciones con un total de 5 cada uno, seguidos de México y Colombia con 4 y otros en menores cantidades.

Figura 3. Distribución de estudios relevantes según países



Fuente: elaboración propia

Posteriormente, con base en la revisión de las publicaciones relevantes, se realizó un extracción de información que permite dar respuesta a la cuarta pregunta. A partir de ello, se comprende cómo la industria azucarera en los ingenios hace uso del agua conforme a los diferentes procesos, los cuales se describen a continuación en donde se referencian los estudios encontrados.

4.1. Usos del agua según procesos de producción de azúcar

En la industria azucarera la demanda de agua es permanente, la cual comienza desde la siembra de la caña de azúcar mediante la irrigación de los cultivos, a los

que le siguen el lavado de los tallos cuando son aptos para someterse a la obtención de sus jugos, la condensación de vapor, lavado de carbón, alimentación de calderas, lavado de filtros y otros procesos [36].

4.1.1. Irrigación de cultivos

Es quizá una de las actividades en donde mayor cantidad de agua se requiere, puesto que desde la siembra hasta cuando las plantas están en condiciones de ser cosechadas para su aprovechamiento transcurre un tiempo entre 14 y 17 meses [37], de manera que a través de las lluvias y mediante sistemas de riego es necesario mantener las condiciones de humedad para garantizar tallos de óptima calidad. Durante este tiempo, los cuerpos de agua de la zona de los cultivos es objeto de contaminación debido a que los suelos contienen materiales químicos a raíz de la fertilización, de manera que con las lluvias o a raíz de la implementación de riego, se generan corrientes hídricas que van a los ríos y lagunas, así como el agua que se filtra al subsuelo [22].

Además, en vista de las actividades de arado de que son objeto los cultivos, los suelos quedan expuestos, con lo cual al presentarse las temporadas lluviosas se genera material de arrastre que implica problemas de sedimentación en los cuerpos de agua de la zona de interés directo [38], con lo cual las condiciones del agua también se alteran en tanto se reduce la capacidad de oxigenación y en algunos casos los reservorios hídricos pueden desaparecer ante la masiva presencia de limo que genera crecimiento de plantas [39].

De acuerdo con lo anterior, la irrigación, sea natural o artificial, implica afectaciones de los cuerpos de agua en sus condiciones físico-químicas como biológicas, puesto que, como producto de la aplicación de agroquímicos sobre suelos y plantas de caña de azúcar, al final se genera material de arrastre que deriva en contaminación y con ello impactos negativos sobre la biodiversidad de los lugares de influencia de los cultivos.

4.1.2. Lavado de la caña

Cuando los tallos han logrado las condiciones necesarias para procesarse, se realiza el proceso de corte y una vez transportados a la planta de producción se

someten a un proceso de lavado. Este proceso también demanda grandes cantidades de agua y durante el lavado se genera material orgánico que se convierte en residuos que generalmente se disponen como material compostable como abono para los suelos [40].

Sin embargo, el agua utilizada sufre cambios en sus propiedades físico-química, principalmente porque durante el lavado los tallos se someten a rozamientos para su limpieza, lo cual causa emanación de jugos que, aunque son en bajas cantidades, hace que no se mantengan las mismas condiciones del líquido inicial, así como residuos de agroquímicos como los plaguicidas cuyos residuos permanecen en la caña, aunque en la mayoría de los casos inactivos dependiendo del tiempo previo de aplicación a la cosecha [41]. Algunos indicadores frente al uso de agua en este proceso muestran que se requieren en promedio 68m³ para lavar una cantidad de 14 toneladas [42], lo que significa que es uno de los procesos que más demanda del recurso y que a su vez es responsable de una gran cantidad de agua residual contaminada con material dulce y agroquímicos.

4.1.3. Molienda de la caña de azúcar

Es un proceso que implica la preparación de la caña en primer lugar, la cual consiste en romper las estructuras duras del tallo, para lo cual una serie de cuchillas lo cortan en trozos sin extraer el jugo, pero genera residuos fibrosos que posteriormente deberán limpiarse utilizando agua para removerlos de los diferentes sitios en donde se alojan debido a los giros de las láminas cortadoras [43]. Luego sucede se realiza la molienda, es decir, la extracción del jugo de la caña quedando como subproducto el bagazo, al cual se le realiza aspersiones de agua para efectos de aprovechar al máximo el insumo necesario para producir azúcar [44] [45].

Prácticamente todo el contenido del jugo pasa a las calderas, pero los residuos como el bagazo y material fibroso se dispone en contenedores en los que se decantan líquidos como acondicionamiento para obtener briquetas utilizables como fuente de energía, principalmente mediante la quema, los cuales contienen alto contenido de sustancias dulces que en algún momento deberá derramarse sobre

lagunas dispuestas para tratamiento o sobre los sistemas de canalización que generalmente terminan en ríos o arroyos [46] [47].

En vista de lo anterior, la molienda tiene como consecuencias la utilización de agua, pero a su vez la generación de material orgánico que termina en los depósitos de aguas residuales o en los cuerpos de agua de la zona de influencia de los ingenios y cuando no es objeto de tratamiento, significa que se devuelve al ambiente sin las condiciones adecuadas para evitar afectaciones sobre la calidad de este recurso y sobre la biodiversidad.

4.1.4. Lavado de filtros

Cuando se ha realizado el proceso de molienda, el jugo pasa a las calderas a través de filtros, los cuales impiden que lleguen impurezas, principalmente residuos de caña consistentes en partículas que no han sido exprimidas por completo, así como de bagazo, lo que implica que estos filtros se saturen de materia orgánica que requiere removerse para efectos de evitar la aparición de microorganismos descomponedores que afecten la producción y pasos posteriores.

Estos filtros consisten en dispositivos que generalmente tienen calibres de 10 μ -500 μ , los cuales capturan material particulado tendiente a lograr un jugo de alta pureza que se someterá a cocción para la cristalización [48]. Dependiendo de los diseños y eficiencia, el lavado de filtros requiere de un promedio de 0.5m³ de agua y con base en el número de calderas, la cantidad total puede variar [49] [50].

En ese sentido, al tratarse del lavado de dispositivos que contienen alto contenido de materia orgánica en pequeñas partículas, cuando se hacen las descargas el agua se convierte en una sustancia con altos niveles de azúcares que pueden fermentarse y con ello generar afectaciones a los cuerpos hídricos de la zona de influencia.

4.1.5. Condensación del vapor y cristalización

Una vez el jugo pasa a las calderas, comienza un proceso de cocción, en el cual sucede la evaporación de una cantidad promedio del 70% al 78% de la cantidad de líquido que ingresa al proceso [51]. En este proceso, los vapores llegan a las

distintas tuberías del ingenio, los cuales pasan a estado líquido, siendo una sustancia dulce que modifica las condiciones del agua y gran parte se filtra a los depósitos de aguas residuales [52] [53] [54].

Esto significa que se realiza una concentración del jugo, el cual posteriormente dará como resultados cristales de azúcar, pero implica la generación de vapor que lleva consigo cantidades de azúcares que luego son vertidos al ambiente y por lo tanto sobre los cuerpos de agua adyacentes y algunos que están a distancias mayores debido a que el vapor se desplaza lo suficiente hasta encontrar condiciones en donde se precipita y por lo tanto contaminando suelos y corrientes hídricas.

4.1.6. Eliminación de ceniza volante

A raíz de los procesos de combustión de briquetas que se utilizan para las calderas, la generación de ceniza es un problema que requiere del uso de agua para mantener las instalaciones en óptimas condiciones de limpieza. Las cenizas que se esparcen contienen fósforo, potasio y otros elementos que al mezclarse con el agua usada para retirarlas de las instalaciones hacen que las propiedades físico-químicas se alteren, tanto el pH, el color y otros aspectos [55] [56].

Debido a que la combustión es un proceso continuo, la generación de cenizas también lo es, de manera que la limpieza implica una periodicidad que induce a que se utilice abundantes volúmenes de agua con lo cual, los vertimientos representan altos niveles de contaminación, sobre todo en aquellos ingenios que no han implementado mecanismos adecuados de gestión de este tipo de aguas [57].

De acuerdo con lo anterior, el uso de agua para la limpieza de cenizas implica en primer lugar grandes volúmenes, que al entrar en contacto con las cenizas generan cambios significativos en sus propiedades y al derramarse sobre el ambiente sin tratamientos adecuados generan alta contaminación a los cuerpos hídricos, teniendo en cuenta que al adquirir elementos químicos como el fósforo o el potasio ocasiona reacciones que modifican las condiciones tolerables para el uso humano o para los animales y plantas.

4.1.7. Limpieza de superficies de la planta física

Es uno de los usos más frecuentes y generalmente se utilizan detergentes, disolventes y otros compuestos químicos que alteran las propiedades del agua y es la forma más común de contaminación al generarse aguas residuales en calidad de grises [39]. Normalmente, estas aguas se canalizan al sistema de alcantarillado que los ingenios han habilitado para su vertimiento final y en la mayoría de los casos terminan en ríos cercanos, así como una parte que se filtra a los cuerpos de agua subterráneos [36]. Se trata entonces de un uso que es responsable de la generación de aguas residuales cuya característica principal son los altos contenidos de fosfatos y agentes tensoactivos que afectan gravemente las propiedades normales del agua, al punto que ocasionan problemas para la oxigenación y con ello alteraciones de la micro biodiversidad acuática ya que principalmente se desarrollan colonias de microorganismos anaerobios [58].

4.1.8. Mantenimiento y limpieza de maquinaria y equipo de transporte

La maquinaria está representada en la que permite la realización de los procesos de producción, tales como calderas, cortadoras, tolvas, tándems, cintas transportadoras, entre otros; y el equipo de transporte corresponde a los vehículos, tales como camiones cañeros, tractores, cosechadoras, sembradoras, entre otros que requieren de limpieza y mantenimiento. La limpieza implica el uso de agua y por lo tanto la generación de aguas residuales con contenidos de materia orgánica como partículas de tallos, hojas, sedimentos de suelo, entre otros que están en la maquinaria de uso agrícola y los vagones de transporte.

El agua contaminada producida a raíz de la limpieza normalmente se vierte sobre los suelos en las áreas sembradas, aunque en muchos casos se realizan en zona de talleres en donde la disposición contribuye a un mejor manejo [38]. Luego, quizá el problema más grave está en el mantenimiento, sobre todo si no se cuentan con mecanismos de gestión de residuos de lubricantes, grasas, líquido de frenos, anticorrosivos y otros con alto contenido de sustancias tóxicas que terminan en los suelos y a través del material de arrastre por las lluvias en ríos y lagos, además de los acuíferos subterráneos [59] [60].

De acuerdo con lo anterior, el uso de agua no es solo para el proceso productivo como tal de azúcar, sino que incluye a todas las actividades indirectas implican utilización y en las cuales las alteraciones de este recurso. Sin embargo, las formas de uso descritas anteriormente y que generan problemas de contaminación son solo aspectos someros que permiten tener una idea de cómo la industria azucarera en sus distintas fases o actividades afectan el agua, ante lo cual es necesario identificar los impactos negativos que de manera más específica se presentan sobre los cuerpos hídricos en sus zonas de influencia.

4.2. Impactos negativos de los ingenios sobre los cuerpos de agua

Siguiendo los mismos lineamientos de la propuesta de Petersen [35], se plantearon preguntas relacionadas con publicaciones e indicadores acerca de los impactos de los ingenios sobre los cuerpos de agua. Estas preguntas tienen como finalidad consolidar un conjunto de estudios a nivel de artículos científicos y tesis de grado de maestría o doctorado pertinentes con los objetivos de la investigación.

Tabla 4. Preguntas orientadoras para la búsqueda de publicaciones sobre impactos negativos de los ingenios sobre los cuerpos de agua

Preguntas orientadoras	Motivación
1. ¿Qué estudios existen acerca de los impactos negativos sobre propiedades físico-químicas, las áreas de cuerpos de agua y la biodiversidad en zonas aledañas de ingenios azucareros?	Determinar el número de publicaciones que describen resultados investigativos acerca de los impactos negativos de los ingenios azucareros en lo físico-químico, sobre el área de cuerpos de agua y sobre la biodiversidad en zonas aledañas.
2. ¿Cómo se distribuyen anualmente los estudios durante el periodo 2010 – 2022?	Identificar la frecuencia de publicación durante el periodo 2010 – 2022.
3. ¿En qué países se han realizado los estudios?	Determinar los países de origen de los estudios descritos.
4. ¿Qué hallazgos presentan los estudios relevantes acerca de los impactos negativos sobre propiedades físico-químicas, las áreas de cuerpos de agua y la biodiversidad en zonas aledañas de ingenios azucareros?	Describir los resultados de los estudios acerca de los impactos negativos sobre propiedades físico-químicas, las áreas de cuerpos de agua y la biodiversidad en zonas aledañas de ingenios azucareros

Fuente: elaboración propia

No obstante, para efectos de delimitar las publicaciones que tienen correspondencia con los propósitos del estudio, se han planteado los siguientes criterios de inclusión y exclusión.

Tabla 5. Criterios de inclusión y exclusión de publicaciones sobre impactos negativos de los ingenios azucareros

Inclusión	Exclusión
Publicaciones en español e inglés sobre impactos negativos de ingenios azucareros en cuerpos de agua	Publicaciones en otro idioma diferente al español e inglés.
Publicaciones desde al año 2010 a 2022.	Publicaciones anteriores a 2010
Artículos de revisión o de resultados completos disponibles en bases de datos o repositorios de revistas científicas.	Artículos incompletos.
Tesis de maestría o doctorado en físico o digitales disponibles en repositorios de universidades relacionadas con el tema.	Tesis de nivel de pregrado.
Informes de organizaciones o centros de investigación sobre impactos negativos de los ingenios azucareros.	Literatura gris sin evidencia de autor o fecha de publicación.
Estudios de acceso al menos al resumen y/o abstract	Estudios sin resumen y/o abstract o sin acceso a estos.

Fuente: elaboración propia

Luego, en aras de identificar los estudios relevantes, se planteó una serie de palabras clave con las cuales la especificidad de los temas y variables sobre las que se enfocaron los estudios guardan correspondencia con las del estudio.

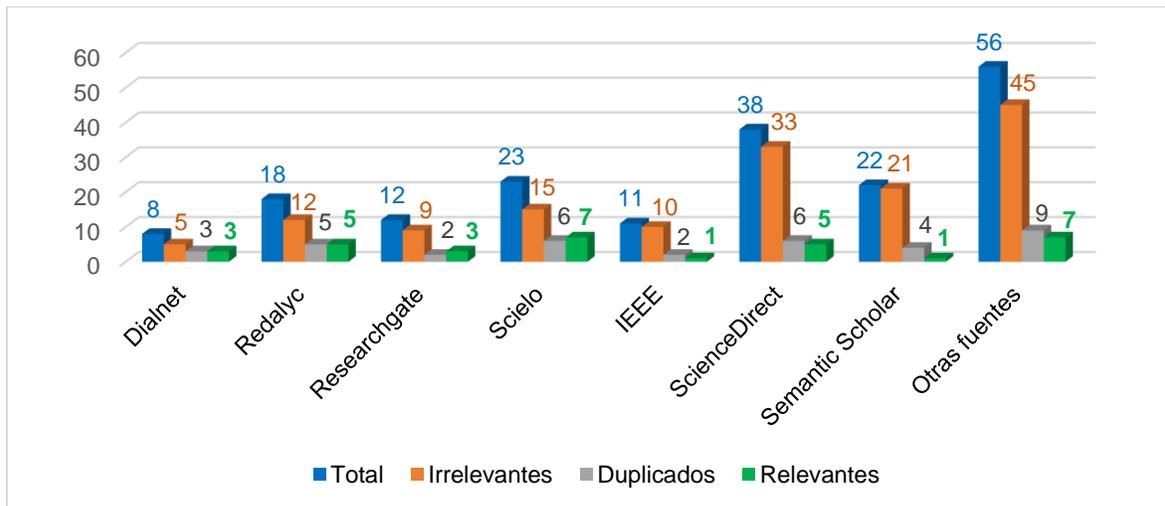
Tabla 6. Palabras clave para la identificación de estudios relevantes sobre impactos negativos de los ingenios azucareros en los cuerpos de agua

Palabras clave	Keywords
Impactos ambientales negativos	Negatives environmental impacts
Ingenios azucareros	Sugar mills
Contaminación	Pollution
DBO5	BO5D
DQO	COD
Sólidos suspendidos	Solids suspended
Metales pesados	Heavy metals

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta estos criterios para la búsqueda de las publicaciones, los resultados del mapeo sistemático permiten evidenciar que durante el periodo 2010-2021 existen 188 publicaciones relacionadas con impactos de los ingenios azucareros sobre los cuerpos de agua, de los cuales 32 son relevantes.

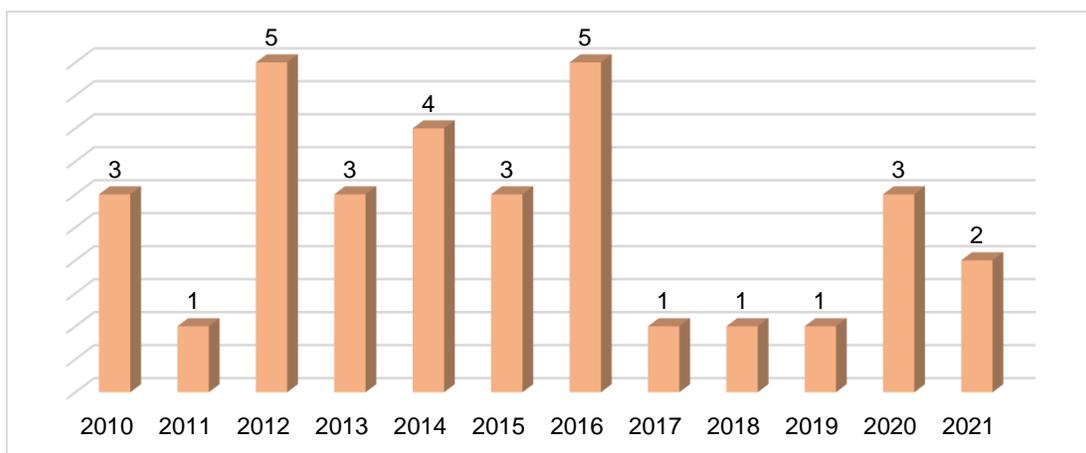
Figura 4. Estudios sobre impactos negativos de los ingenios azucareros sobre cuerpos de agua



Fuente: elaboración propia

Los datos anteriores señalan que Scielo y Redalyc son las bases de datos en las que más publicaciones que dan respuesta a la pregunta se encuentran, seguida de otras fuentes representadas en repositorios de revistas y de universidades y organizaciones en donde existen artículos, tesis e informes. En cuanto a la frecuencia de los estudios relevantes, puede observarse que 19 de las 32 se publicaron antes de 2016.

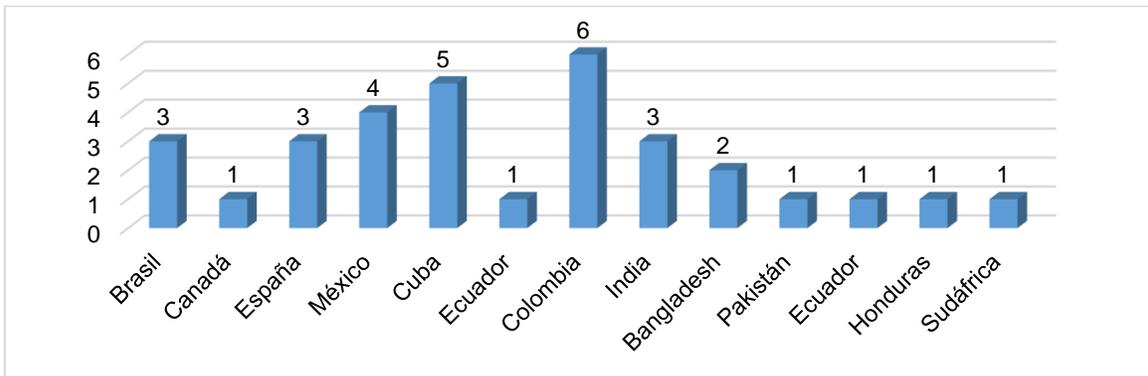
Figura 5. Distribución de publicaciones sobre impactos de los ingenios azucareros en cuerpos de agua por año



Fuente: elaboración propia

En cuanto a la concentración de las publicaciones relevantes encontradas según país, Colombia es el que más presenta, seguido de Cuba y México.

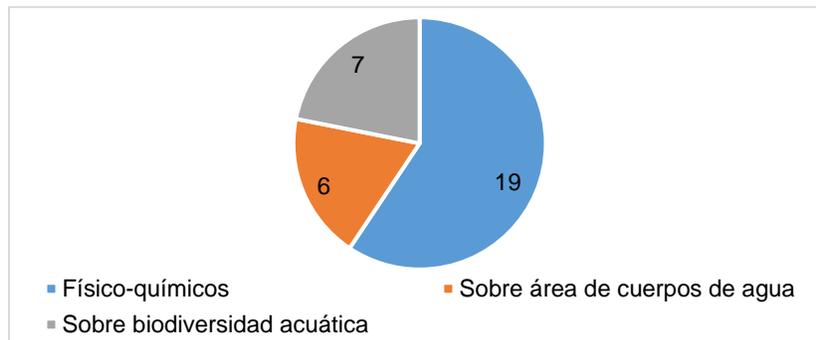
Figura 6. Distribución de las publicaciones relevantes por país



Fuente: elaboración propia

Y al discriminarse por el tipo de impactos, los estudios relevantes se clasifican en 19 publicaciones sobre impactos en las propiedades físico-químicas, 6 sobre el área (superficie) y 7 en la biodiversidad de los cuerpos de agua, como puede apreciarse en la Figura 7.

Figura 7. Distribución de publicaciones relevantes según el tipo de impacto negativo en los cuerpos de agua



Fuente: elaboración propia

A partir de los hallazgos anteriores, la extracción de información conforme a cada tipo de impacto, a continuación, se describen los hallazgos con los que se responde la cuarta pregunta.

4.2.1. Impactos físico-químicos

Como producto de las actividades productivas en las que se requiere de uso de agua y de aquellas que no, pero que al final generan residuos que terminan afectándola, suceden procesos de descomposición de material orgánico resultante de la caña de azúcar, ante lo cual los efluentes orgánicos ejercen una alta DBO₅

que finaliza con el agotamiento del oxígeno suministrado por el ambiente a los cuerpos de agua [61]. Al respecto, se considera que en términos promedio la DBO₅ del agua resultante de las actividades descritas anteriormente que oscilan entre 260 a 11.000 miligramos por litro (mg/L) por causa de las fibras de material crudo y en las actividades de refinería los rangos van de 4 a 18.000 mg/L.

Tabla 7. Nivel de DBO₅ en aguas residuales de actividades de producción de azúcar

Actividad	Por producto crudo (mg/l)	Por productos refinados (mg/l)
Agua residual por lavado de caña	260 - 700	
Agua producto de condensación	30 – 150	4 – 21
Agua con suspensión de lodo de filtro	2.900 – 11.000	730
Agua con residuos de carbón y cenizas		750 – 1200
Agua residual de lavado de maquinaria y equipos		15.000 – 18.000

Fuente: elaboración propia con base en Chen [62]

Sin embargo, al revisarse las escalas que se describen en la Tabla 2, puede comprenderse que la única actividad que no contamina es la condensación en la generación de productos refinados, pues los niveles de DBO₅ están en el rango correspondiente a agua pura, pero en los productos crudos sería una afectación baja, mientras que las actividades de lavado de filtros, así como de maquinaria y equipos genera una contaminación extremadamente alta. En tal sentido, la actividad azucarera es responsable de efectos nocivos sobre los cuerpos de agua en prácticamente toda la cadena de valor [63], pues los usos del líquido están presentes en todos los procesos y la intensidad de la contaminación depende de los subproductos resultantes.

Tabla 8. Clasificación del agua según niveles de DBO₅

Clasificación	Rango de niveles de DBO ₅ (mg/l)
Sin contaminación	Entre 2 y 20
Contaminación baja	Entre 20 y 100
Contaminación media	Entre 100 y 500
Contaminación alta	Entre 500 y 3.000
Contaminación muy alta	Entre 3.000 y 15.000

Fuente: Deniz [64]

Los impactos de la industria azucarera sobre el agua también pueden comprenderse a partir en la DQO, teniendo en cuenta que es la cantidad de oxígeno requerida para

efectos de la oxidación de la materia orgánica y convertirla en H₂O y CO₂, cuya cantidad se expresa en mg/l y muestra que cuanto más alto es su valor, mayor es el grado contaminación [65].

Tabla 9. Clasificación del agua según niveles de DQO

Clasificación	Rango de niveles de DBO ₅ (mgO ₂ /l)
Sin contaminación	DQO ≤ 10
Buena calidad	10 < DQO ≤ 20
Aceptable	20 < DQO ≤ 40
Contaminada	40 < DQO ≤ 200
Muy contaminada	DQO > 200

Fuente: CONAGUA [66]

Teniendo en cuenta esta escala, algunos estudios muestran que en promedio los niveles de DQO en las aguas residuales generadas por las actividades de producción de azúcar son elevados, pues si se tienen en cuenta el estudio de Díaz [22], los niveles en el agua residual es de 8323 ± 3379 mg/l, mientras que a raíz de la vinaza vertida es de 23000 ± 8049 mg/l. Por su parte el estudio de De la Hoz [36], los niveles de las descargas es de 29172 mg/l al término del proceso de fabricación y de 13332 mg/l al mantenerse en las lagunas de oxidación. De igual manera, en otro estudio realizado por Motito [39], se observan datos de 12000 y 9200 mg/l en el primer año de análisis, los cuáles comenzaron a reducirse en cerca del 66% en el tercero ante cambios en los procesos industriales de un ingenio cubano.

Al compararse los datos de los estudios anteriores con los de la tabla 3, puede concluirse que la actividad industrial azucarera en términos de DQO genera impactos negativos muy graves sobre el agua, pues las aguas residuales resultantes superan ampliamente los niveles que se consideran tolerables para mantener el agua en óptimas condiciones.

Otro indicador físico-químico es el relacionado con el oxígeno disuelto (OD), es decir, la cantidad en mg/l de este elemento que contiene el agua y que en tanto más alta sea, mayor calidad del líquido significa, teniendo en cuenta que es el que necesitan los organismos acuáticos para vivir [1]. Los niveles de OD y la clasificación del agua que permiten comprender las afectaciones de la industria azucarera son los que se muestran en la Tabla 10:

Tabla 10. Clasificación del agua según niveles de OD

Condición del agua	Niveles de OD mg/l	Consecuencias
Anoxia	0	Muerte de todos los organismos aerobios
Hipoxia	0 – 5	Muerte de especies y organismos sensibles
Aceptable	5 – 8	OD adecuado para la vida de mayoría de organismos
Buena	8 – 12	Condiciones adecuadas para la vida de peces y otros organismos acuáticos
Sobresaturada	< 12	Condiciones óptimas para producción fotosintética plena

Fuente: Almazán [67]

Frente a estos niveles según cada escala, la producción azucarera es responsable de pérdida de oxígeno en el agua y las cargas residuales pueden presentar niveles de OD entre 0 y 5, donde mueren la totalidad de los organismos aerobios o en el mejor de los casos muere una gran proporción que no ha desarrollado capacidades de adaptación a bajos niveles de este gas, un problema que se destaca en el estudio de Vannucci [68]. Un estudio que muestra bajos niveles de este elemento en las aguas residuales de los ingenios azucareros es el de Kolhe [2], en el cual se observa que sin llevarse a cabo un tratamiento de este tipo de aguas el nivel de OD en dos meses (noviembre y diciembre) es de 1,29 y 1,5 mg/l respectivamente, mientras que si son objeto de tratamientos los niveles son de 2,52 y 2,95 mg/l, lo que significa que el nivel de contaminación es demasiado alto y siguiendo la escala de la tabla 3 solo las especies y organismos más adaptados (anaerobios) podrían sobrevivir, lo que representa que este tipo de aguas resultantes de la actividad industrial azucarera impacta de manera extremadamente negativa sobre el medio ambiente. En un estudio similar, los niveles verificados en aguas residuales al término del proceso de fabricación corresponden a 0,3 – 2,8 mg/l [69].

Los impactos también se evidencian a partir del pH, cuya medición permite comprender la concentración molar de iones de hidrógeno en el agua y por ende el grado de alcalinidad o acidez a partir de los protones libres [70]. En vista que este indicador es fundamental para gran parte de las reacciones químicas, ayuda por lo tanto a determinar cómo son las aguas residuales de los ingenios en cuanto a rangos óptimos de pH que de acuerdo con cada proceso en la fabricación de azúcar pueden cambiar sus estados y sus niveles de toxicidad [71]. Aunque cada autoridad

ambiental de los países, dependiendo del tipo de efluentes ha establecido escalas de pH permitidas, puede considerarse que aquellas aguas cuyos niveles oscilan entre 4 y 9 son los tolerables ambientalmente. No obstante, es indispensable identificar el tipo de organismos acuáticos que habitan un ecosistema en particular, por lo que algunos de los niveles tolerables a considerarse según cada especie podrían ser los que se describen en la Tabla 11.

Tabla 11. pH aceptable para la vida acuática

Escala	Organismos/especies
2 - 13	Las bacterias
6.5 - 12.5	Algas
6 - 9.5	Peces (carpa, siluro, chupadores) e insectos
6.5 - 9.5	Peces (crappie, agalla azul, bajo)
7 - 9.5	Caracoles, almejas, mejillones
7 - 8.5	Resto de especies (trucha, ninfas de efímera, larvas, anfibios, otras)

Fuente: SWRCB [72]

Si bien son escalas que permiten comprender el tipo de especies que pueden vivir en aguas con tales niveles de pH, en el caso del agua marina generalmente los rangos oscilan entre 7.5 y 8.4, mientras que en el agua dulce los valores van de 6.5 a 8.5, lo que significa que son aguas en las que es posible mantener la vida de la mayoría de organismos [72]. Sobre esto, estudios como el de Valera para un ingenio en Centroamérica evidencian que, en términos de pH, las aguas residuales al pasar por cada proceso de producción de azúcar están en los niveles tolerables, aunque en la limpieza de maquinaria y equipos en la que se usan químicos el rango es más amplio, lo que implica que, dependiendo de las sustancias utilizadas, las aguas pueden presentar alto nivel de acidez (4,72) o de alcalinidad (9.0).

Tabla 12. pH según efluentes de ingenio azucarero

Efluente según proceso	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Brasileña	6.52	7.0	9.87	0.19
Condensados de Tacho	6.17	8.0	7.30	0.54
Evaporador Efecto	7.0	8.5	7.99	0.60
Parshall	7.0	8.0	7.20	0.45
Molinos	7.0	7.0	7.0	0.00
Precipitado	8.0	8.0	8.0	0.00
Limpieza de maquinaria y equipos	4.72	9.0	6.86	4.50

Fuente: Valera [73]

En el estudio de Díaz [22], las aguas residuales conjuntas de los procesos de producción contienen niveles promedio de pH de 4.28 con una desviación estándar de 1.04, mientras que al ser objeto de vertimientos de vinaza, la media es de 4.22 con una desviación estándar de 0.34. Por su parte, en otro trabajo investigativo sobre análisis de agua residual cruda de un ingenio en Ecuador [74], muestra niveles de 4.40 y 7.34 respectivamente, lo que demuestra que el agua resultante de cada proceso de producción hacen que los vertimientos se caractericen por la acidez.

En tal sentido, los impactos nocivos de la industria azucarera están representados en niveles de pH que tiende a reducirse y en cuanto haya presencia de metales pesados, un alto nivel de acidez aumenta la toxicidad del agua y por ende afecta a las especies que sufren muerte masiva.

Otro de los indicadores de impactos de la industria del azúcar sobre los cuerpos de agua son los niveles de fosfato, pues en caso que se supere el nivel de 0,1 mg/L, se está ante una contaminación muy alta, pues favorece la eutrofización que se traduce en el crecimiento de algas y plantas que reducen la capacidad de oxigenación y por lo tanto ocasiona muerte de fauna acuática en razón a la escasez del vital gas [75].

Algunas de las razones de la presencia de fosfatos en las aguas residuales de los ingenios son el uso de detergentes, tanto para la limpieza de maquinaria y equipos como en las labores de aseo de instalaciones sanitarias del personal de trabajo, a las cuales se suma la aplicación de fertilizantes a los cultivos que con las lluvias y la implementación del regadío arrastra residuos de este elemento, en la mayoría de los casos representados en ortofosfatos [76].

En el caso de un estudio realizado sobre un ingenio del Valle del Cauca en Colombia [77], puede observarse que a partir de tres muestras, las vinazas que son los residuos que mayores impactos presentan en los ecosistemas presentan niveles superiores a los límites permitidos para que las aguas sean aptas para la vida de especies acuáticas, por lo que el crecimiento de algas y plantas que requieren de fósforo puede ser acelerado.

Tabla 13. Carga contaminante por fosfatos en ingenio

Fosfatos	Mg/L		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
PO ₄ ⁻³	4.75	4.65	4.85
P ₂ O ₅	3.55	3.25	3.65
P	1.55	1.40	1.60

Fuente: Zúñiga y Gandini [77]

A estos hallazgos se agregan los de De la Hoz [36], que evidencian cantidades de fósforo total de 12,81 mg/L del agua residual al término de la producción de azúcar y de 16,38 mg/L al depositarse en lagunas de oxidación. También se observan contenidos extremadamente altos en el trabajo de [39], en donde el agua residual depositada en dos lagunas presentan 24.0 y 25.0 mg/L de PO₄⁻³ respectivamente. Los datos anteriores son indicadores de una afectación de la calidad del agua que en caso de no realizarse los tratamientos necesarios conlleva al problema de eutrofización de los cuerpos hídricos de las zonas aledañas a los ingenios, especialmente de lagunas que no son objeto de circulación como en el caso de los ríos.

Otro problema asociado a las anteriores alteraciones del agua es la presencia de sólidos totales (ST) que resultan de la suma de los disueltos y suspendidos que están constituidos por partículas orgánicas y sales que escapan a filtros de 0.45 micras [78]. Estos implican acumulación de material orgánico e inorgánico que afectan el color, olor y sabor del agua y debido a su tamaño reducido pueden ocasionar problemas en la salud, especialmente de la fauna acuática y de la terrestre que consume este recurso, pues la presencia de partículas puede significar la presencia de agentes patógenos.

Al estar presentes tales organismos, es posible la aparición de infecciones en los animales y personas, por lo que si se tiene como referencia los niveles de expuestos en la Tabla 8, las aguas residuales de los ingenios pueden considerarse altamente contaminadas al término de cada lote de producción de azúcar y que por lo tanto implica la necesidad de implementar procesos tendientes a mejorar la calidad del agua, sobre todo ante los vertimientos que estos realizan a los cuerpos que se encuentran en las zonas de influencia directa o indirectamente.

Tabla 14. Escala de niveles de sólidos totales disueltos

Calidad del agua	Sólidos totales (mg/L)
Excelente	0 - 300
Buena	300 - 600
Aceptable	600 - 900
Pobre o no recomendable	900 - 1200
Inaceptable	1200 <

Fuente: OMS [79]

Aunque cada unidad industrial presenta niveles diferentes, la investigación de Zúñiga y Gandini [77] sobre un ingenio en Colombia, muestra que en tres muestras analizadas, los niveles de ST superan los recomendados por la OMS para el consumo humano al alcanzarse valores de 7655, 7521 y 8460. Así mismo, en el trabajo de Valera [73] se observan valores de 4058 y en los del estudio de De la Hoz [36] valores de 3245. Finalmente, se destacan valores extremadamente altos en la investigación de Chang [80] al alcanzar 24400, 17000 y 7000 mg/L observados en tres muestras.

También puede considerarse como impacto negativo el relacionado con la salinidad de los cuerpos de agua, que a causa de la aplicación de fertilizantes y otros agroquímicos que la lluvia arrastra modifica las condiciones normales naturales. Sobre esto, el trabajo de Perafán [81] señala que cerca de 85 mil hectáreas de tierra presentan este problema, la cual afecta el sistema hídrico a lo largo del río Cauca en el Departamento del Valle, siendo los cultivos de caña los principales responsables de las sales que van a los ríos, lagunas y reservorios naturales.

4.2.2. Impactos sobre las áreas de humedales

Los impactos generalmente son sobre los lagos, lagunas y ríos, los cuales han sufrido reducción en sus áreas y en sus caudales teniendo como causa principal la expansión de los cultivos de caña y el establecimiento de zonas de operaciones. En algunos casos como en México, en la zona de Veracruz, algunos ríos han sufrido reducciones en su caudal por causa en primer lugar de la alta demanda de agua por parte de los ingenios, para lo cual al captarla para los procesos de fabricación ha ocasionado que se hayan secado áreas a lo largo del curso, al punto que algunas lagunas que antes se formaban en la actualidad se han secado y otras el área en

2015 representaba menos del 40% en comparación con el año 2000, mientras que algunos humedales han desaparecido, al pasar de 32 a solo 8 durante el mismo periodo [82].

Impactos similares se observan en Ecuador, en donde la caña de azúcar como monocultivo se ha convertido en la actividad agroindustrial que mayores volúmenes de agua demanda, con lo cual se han afectado los caudales de algunos ríos y de los reservorios subterráneos, pero al ampliarse las áreas cultivadas los humedales han desaparecido causando por lo tanto disminuciones en la oferta natural del recurso hídrico [83].

También en el norte de Brasil, el estudio del Centro por el Derecho a la Vivienda y en contra de los Desalojos (COHRE) [84], en donde la industria azucarera ha causado pérdidas de humedales y reducción en la extensión de lagos y lagunas a raíz de la demanda de agua y de la expansión de los cultivos. En este mismo país, en el Estado de Mato Grosso [85], la industria azucarera ha sido responsable de afectaciones en la calidad del agua subterránea a raíz de los plantíos que implementan una fertilización química con el propósito de aumentar la producción de etanol, así como problemas de eutrofización de lagos y lagunas que al final se tradujeron en zonas cultivables a raíz de la densidad de plantas que habían invadido los acuíferos.

En el caso colombiano, el informe de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) [86]¹, muestra que durante el periodo comprendido entre 1957 y 1986 se perdió el 72% de las hectáreas de humedales, al pasar de 10.049 a solo 2.795, así como reducciones en los bosques nativos del 66% durante el mismo periodo, pues en el primer año el Valle del Cauca contaba con 25.320 hectáreas y en el último con 8.668. Hacia 2012, el área de humedales en el Valle del Cauca estaba conformada por 2.500 hectáreas, de las cuales la laguna de Sonso

¹ Este antecedente, aunque es anterior al año 2010, se considera relevante debido a que presenta información relacionada con la pérdida de áreas de humedales a raíz de la actividad azucarera en el Valle del Cauca, Colombia.

representa 2.000 [87], quizá el cuerpo de agua que se ha logrado conservar ante la ampliación de la frontera del monocultivo de la caña de azúcar.

4.2.3. Impactos sobre la biodiversidad

Ante las afectaciones físico-químicas y la reducción de las áreas de los cuerpos de agua, los impactos también han sido en materia de biodiversidad, principalmente de flora que ha sido talada y de especies de fauna que han muerto o han tenido que emigrar a otras zonas. Sobre los efectos nocivos en el crecimiento de plantas, la investigación de Saranraj [88] evidencia que debido a la alta capacidad contaminante de los efluentes de los ingenios, las vinazas y las aguas vertidas sobre cuerpos de agua reducen ostensiblemente el poblamiento de especies de arbustos, enredaderas y pastos naturales, principalmente porque los suelos adquieren altos niveles de acidez que en la mayoría de los casos provoca el crecimiento exclusivo de plantas como los helechos, barbasco y otras que compiten con la vegetación autóctona, al punto que en zonas como las de Tamil Nadu, India.

En otros estudios se identifican efectos nocivos de los ingenios sobre zonas aledañas, principalmente en la población de peces que se ha reducido significativamente y en muchos casos la desaparición mediante dos vías: la primera debido a que los cultivos han reducido el área de los ríos y lagunas, causando desaparición de estos cuerpos hídricos y por ende de las especies; mientras que la segunda es a través de los aumentos en la toxicidad de las aguas por las vinazas, residuos de fertilizantes, de aceites y químicos de las maquinarias que se vierten [89]. Este estudio realizado en Bangladesh, muestra que los impactos negativos de los ingenios azucareros sobre la biodiversidad son demasiado altos, pues entre las 17 factorías que existen en la zona de análisis, prácticamente ninguno realiza tratamientos adecuados de las descargas contaminantes. Aspectos similares se presentan en regiones de Hyderabad, India, donde la pérdida de especies acuáticas como peces y anfibios ha superado el 40% en los últimos 10 años [90].

En el caso colombiano y específicamente en la zona del Valle del Cauca, las afectaciones sobre la biodiversidad han sido en materia de desaparición de flora, pues en la zona plana y el piedemonte del valle del río Cauca, el bosque seco

tropical ha desaparecido prácticamente en su totalidad [81]. En cuanto a la flora, la CVC hasta hace cerca de dos décadas registraba un número importante de especies de las cuales 27 estaban en status de amenazadas y 120 estaban muy amenazadas [91].

Tabla 15. Flora del valle del Cauca en zonas de cultivos de caña de azúcar

Tipo de flora	Total especies	Amenazadas	Muy amenazadas
Gimnospermas	6		
Monocotiledóneas	360	7	20
Dicotiledóneas	564	20	100

Fuente: CVC [91]

Por su parte, las especies de fauna amenazadas son 61, de las cuales las aves (25) y mamíferos (19) representaban la mayor cantidad, pero las que están en condición de muy amenazadas ascendían a 137, siendo las aves con 55, los anfibios con 32 las que más estaban en tal condición [86].

Tabla 16. Fauna del valle del Cauca en zonas de cultivos de caña de azúcar

Tipo de fauna	Total especies	Amenazadas	Muy amenazadas
Aves	819	25	55
Mamíferos	150	19	24
Reptiles	160	3	26
Peces de agua dulce	161		
Anfibios	146	14	32

Fuente: CVC [86]

Los datos más recientes (2016), muestran que, ante las actividades antrópicas, principalmente las de la industria azucarera, en el valle del Cauca, las especies amenazadas son las de peces (45), anfibios y reptiles con 29 cada uno, aves 161 y mamíferos 44 [92], datos que, si comparan con los de la tabla 10, han sufrido un aumento que representa gravedad para la conservación de la fauna de las zonas en donde la producción de caña y azúcar se desarrolla actualmente. Se evidencia por lo tanto que, aunque quizá no es la única actividad que supone una amenaza para la biodiversidad, es la mayor responsable

4.3. Análisis

Los resultados del mapeo sistemático permitieron evidenciar la existencia de abundante literatura, tanto sobre los usos del agua conforme a los procesos de producción de azúcar, así como de los que describen impactos sobre los cuerpos de este recurso. Para los primeros, de un total de 197, se identificaron 26 relevantes siendo ScienceDirect, Redalyc y Scielo las bases de revistas en donde más se encontraron. Así mismo, Cuba e India son los países que mayor número de publicaciones presentaron, seguidos de Colombia.

En cuanto a estudios sobre impactos negativos sobre los cuerpos de agua, se encontraron 188, de los cuales 32 se consideraron relevantes, concentrados en su mayoría en Scielo (7), ScienceDirect (5), Redalyc (5) y otras fuentes (7). En este caso, la mayoría se realizaron en Colombia (6), Cuba (5) y México (4).

De acuerdo con los estudios encontrados, puede destacarse que la actividad azucarera si bien representa una industria muy necesaria ante el papel importante que ha adquirido para la alimentación, se constituye en una de las principales causantes de desequilibrios ambientales, sobre todo en lo relacionado con los cuerpos de agua, sea por la alta demanda que implica cada proceso de la producción de azúcar, así como en los vertimientos de las descargas que afectan las condiciones naturales de ríos y lagos y lagunas.

A pesar de la normatividad existente, no solo a nivel nacional sino en el mundo, gran parte de los ingenios todavía siguen implementando prácticas poco adecuadas en la producción azucarera para efectos de minimizar los impactos negativos sobre el medio ambiente. Luego, estos en su mayoría se presentan en países pobres como algunos de América Central, India, Bangladesh, Indonesia, Colombia, Ecuador, Brasil y otros en los que las autoridades aún están sujetos a problemas de seguimiento, evaluación y aplicación de sanciones.

Esta industria sigue siendo una de los principales contaminantes de los cuerpos de agua, pues se mantiene el uso de fertilizantes responsables de la salinización de los reservorios subterráneos, la aplicación de pesticidas para el control de plagas que provocan toxicidad, así como derrames de sustancias químicas en los procesos

de mantenimiento de maquinaria y equipo, tanto de transporte como del proceso de producción de azúcar, lo que significa que aceites, grasas y metales pesados se depositan en los suelos que al final mediante el efectos de las precipitaciones lluviosos terminan en los cuerpos de agua.

Además, debido a la generación de sub productos como la vinaza y aguas residuales en cada uno de los procesos (lavado, evaporación y otros), los cuerpos de agua son sometidos a cambios drásticos en sus propiedades físico-químicas, al punto que la DBO₅ y DQO se incrementan ostensiblemente, evidenciando por la tanto una serie de impactos que causan de paso problemas sobre la población de especies de fauna acuática. A esto se suma la acumulación de fosfatos que contribuyen a la eutrofización, causante de repoblamiento de algas y algunas plantas que generan desequilibrios sobre los ecosistemas en las zonas de influencia de los ingenios.

Puede afirmarse que los ingenios ante los requerimientos de agua, pero a su vez a causa de los sub productos, se convierten en factorías que requieren no solo de la vigilancia de las autoridades ambientales, sino de la implementación de tecnologías que les permitan desarrollar una actividad con menores impactos, lo cual no solo puede garantizarles su sostenibilidad desde el punto de vista económico, sino ambiental, teniendo en cuenta que es posible conservar los suelos y cuerpos de agua que son la base para el cultivo de la caña como principal insumo.

Finalmente, es de destacar que todos los impactos negativos de los ingenios están presentes en al entorno colombiano, específicamente en la zona del valle del río Cauca que tradicionalmente, desde comienzos del siglo pasado se impuso el monocultivo que ha significado la presencia de 21 ingenios, la mayoría en el Departamento del Valle, causando efectos negativos, sobre el ambiente y sobre todo en los cuerpos de agua.

5. Tecnologías limpias aplicadas en la industria azucarera para la sostenibilidad ambiental de los recursos hídricos en zonas de ingenios

Cuando se habla de tecnologías limpias, se hace referencia a la implementación de procesos con los cuales contribuir a prevenir, mitigar y en otros casos a controlar los impactos negativos de los ingenios sobre el medio ambiente y especialmente en los cuerpos de agua. En vista que esta industria requiere de varias actividades, algunas tecnologías responden a los procesos por los cuales se obtiene el azúcar y otros productos como el etanol en condiciones ambientalmente amigables, pero también están aquellas alternativas de biorremediación, principalmente las que utilizan bacterias y hongos para mejorar los parámetros físico-químicos de los efluentes de los ingenios. Luego, a partir de su naturaleza, es posible determinar los beneficios sobre los cuerpos de agua en las zonas aledañas, siendo, por lo tanto, tecnologías que contribuyen a la sostenibilidad ambiental.

De acuerdo con esto, siguiendo la propuesta de Petersen [35] para un mapeo sistemático se parte de las siguientes preguntas:

Tabla 17. Preguntas orientadoras para el mapeo sistemático de tecnologías limpias en la industria azucarera

Pregunta	Motivación
1. ¿Qué estudios existen acerca de tecnologías implementadas para la fabricación de azúcar con bajos impactos ambientales sobre los cuerpos de agua aledaños a los ingenios?	Identificar alternativas de fabricación de azúcar con bajos impactos ambientales sobre los cuerpos de agua aledaños a los ingenios.
¿Cómo se distribuyen las publicaciones de acuerdo con los años durante el periodo 2010 – 2022?	Determinar la periodicidad de las publicaciones sobre estas tecnologías.
¿En qué países se han realizado las publicaciones sobre tales tecnologías?	Identificar los países más prolíficos en estudios relacionados con tales tecnologías.
2. ¿Sobre qué tipo de procesos de fabricación de azúcar están enfocados los estudios existentes?	Determinar los procesos de fabricación de azúcar susceptibles de bajos impactos ambientales sobre los cuerpos de agua aledaños a los ingenios.
4. ¿Qué hallazgos describen las publicaciones acerca de las tecnologías en cuanto a impactos sobre los cuerpos de agua en zonas aledañas de los ingenios azucareros?	Describir los resultados de las tecnologías implementadas para reducir los impactos de los ingenios azucareros sobre los cuerpos de agua aledaños.

Fuente: elaboración propia

Una vez definidas las preguntas, para dar respuesta a la primera se siguen los criterios de inclusión y exclusión descritos en la Tabla 18, con los cuales es posible identificar estudios pertinentes.

Tabla 18. Criterios de inclusión y exclusión de publicaciones sobre tecnologías de fabricación de azúcar con bajos impactos ambientales sobre cuerpos de agua

Inclusión	Exclusión
Publicaciones en español e inglés sobre tecnologías de fabricación de azúcar con bajos impactos ambientales sobre cuerpos de agua	Publicaciones en otro idioma diferente al español e inglés sobre tecnologías de fabricación de azúcar con bajos impactos ambientales sobre cuerpos de agua.
Publicaciones desde el año 2010 a 2022.	Publicaciones anteriores a 2010
Artículos de revisión o de resultados completos disponibles en bases de datos o repositorios de revistas científicas.	Artículos incompletos.
Tesis de maestría o doctorado en físico o digitales disponibles en repositorios de universidades relacionadas con el tema.	Tesis de nivel de pregrado.
Informes de organizaciones o centros de investigación sobre tecnologías de fabricación de azúcar con bajos impactos ambientales sobre cuerpos de agua	Literatura gris, sin autor o sin fecha de publicación.
Estudios de acceso al menos al resumen y/o abstract	Estudios sin resumen y/o abstract o sin acceso a estos.

Fuente: elaboración propia

Además, se establecieron palabras clave en español e inglés con las cuales se logró delimitar con mayor pertinencia los estudios que pueden ser relevantes para identificar las tecnologías limpias y los resultados de su efectividad en la remediación de cuerpos de agua afectados por la actividad industrial azucarera.

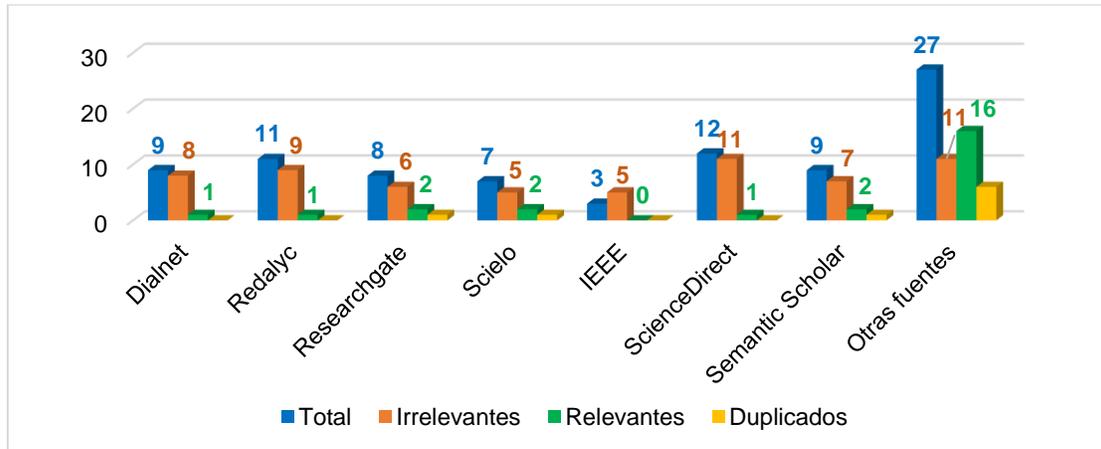
Tabla 19. Palabras clave para la identificación de estudios relevantes sobre tecnologías limpias para la remediación de cuerpos de agua afectados por los ingenios azucareros

Palabras clave	Keywords
Ingenios azucareros	Sugar mills
Biorremediación	Bioremediation
Cuerpos de agua	Water resources
Tecnologías limpias	Clean technologies

Fuente: elaboración propia

Con base en los anteriores criterios, el proceso de búsqueda arrojó un total de 86 publicaciones, de las cuales 25 fueron relevantes para responder la pregunta uno.

Figura 8. Publicaciones sobre tecnologías en los procesos de fabricación de azúcar con bajos impactos sobre los cuerpos de agua

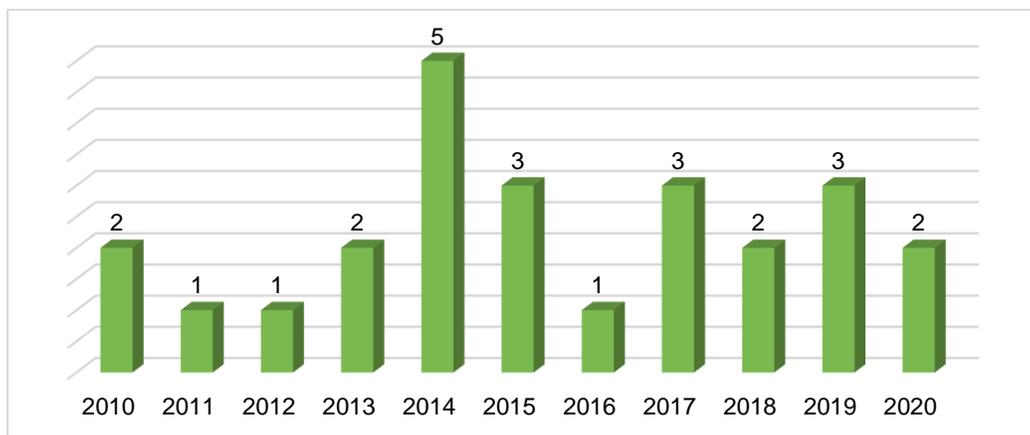


Fuente: elaboración propia

Las publicaciones encontradas que son relevantes están disponibles en su mayoría (16) en otras fuentes, representadas en repositorios digitales de tesis de grado de universidades, de informes de organizaciones y otros, seguidas de Researchgate, Semantic Scholar y Scielo con 2 cada una.

En cuanto a la distribución de las publicaciones por años, la mayoría (14) se concentran en los cinco entre 2010 y 2015.

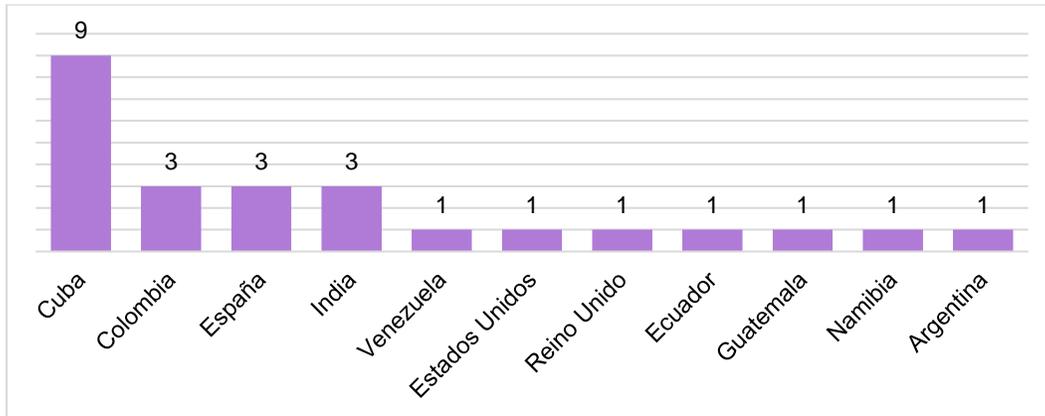
Figura 9. Distribución por año de las publicaciones sobre tecnologías de procesos de producción de azúcar con bajos impactos en cuerpos de agua



Fuente: elaboración propia

Así mismo, según los países de origen de las publicaciones, la mayoría se concentran en Cuba (9), seguidos de Colombia, España e India con tres cada uno.

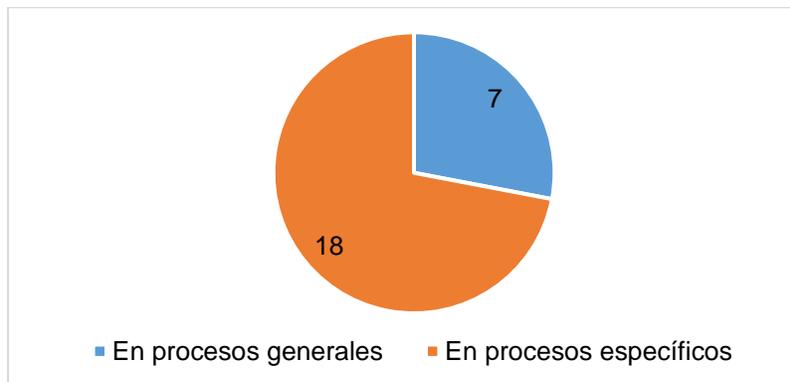
Figura 10. Distribución de publicaciones sobre tecnologías en procesos de producción de azúcar con bajos impactos negativos sobre cuerpos de agua



Fuente: elaboración propia

Finalmente, al revisarse las publicaciones, se identifican tecnologías enfocadas sobre dos tipos de procesos, los generales y los específicos, de los cuales 7 documentos dan cuenta de los primeros y 18 de los otros.

Figura 11. Distribución de publicaciones sobre tecnologías en producción de azúcar con bajos impactos sobre cuerpos de agua según tipo de procesos



Fuente: elaboración propia

Luego, a partir de la extracción de información, para dar respuesta a la última pregunta, los estudios relevantes dan cuenta de hallazgos sobre tecnologías en procesos de fabricación que contribuyen a minimizar los impactos sobre los cuerpos de agua, tal como se describen a continuación:

5.1. Procesos de producción más limpia

Existe una amplia variedad de tecnologías limpias que pueden implementarse en los ingenios, las cuales comienzan desde las mismas actividades generales que

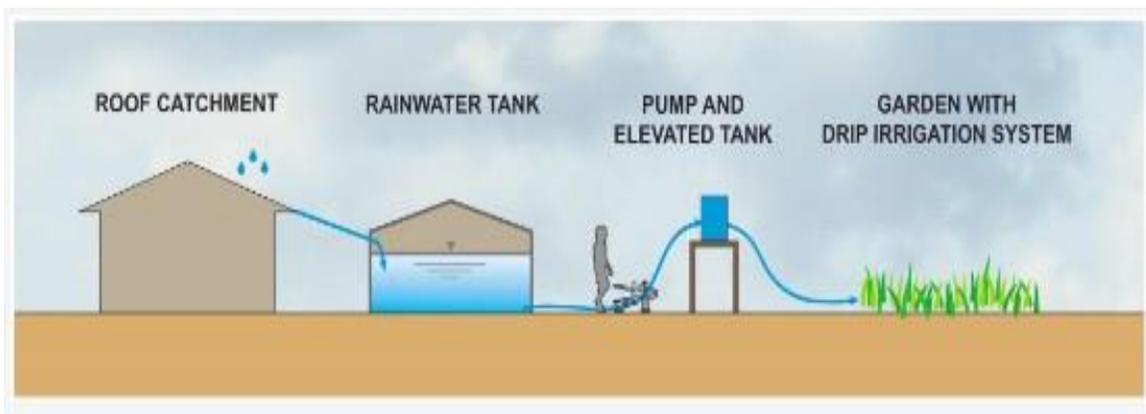
implica obtener azúcar, hasta las específicas según cada proceso de la cadena de producción. Para ello, se toma como base algunos referentes que describen cómo estas tecnologías reducen el consumo de agua, reducen la contaminación y optimizan los insumos, inclusive los mismos subproductos de cada proceso. Además, es destacable que, en algunos casos estas tecnologías no significan el uso de maquinarias, dispositivos u otros accesorios producto de investigación y desarrollo avanzados, sino que pueden ser procesos relativamente sencillos que permiten mermar los impactos negativos.

5.1.1. Tecnologías limpias en procesos generales

Para estos casos, se comprenden como actividades generales, aquellas que son transversales a prácticamente todos los procesos y en los cuales es posible mermar la contaminación del agua. En tal sentido, pueden describirse las siguientes:

Implementación de sistemas de canaletas y tanques cisternas para la recuperación y reutilización de agua de lluvia. El agua proveniente de las lluvias es de suma importancia, ya que en promedio el 72% de la demanda total para los cultivos la proveen las precipitaciones y solo el 28% de los sistemas de riego se alimentan de ríos, lagos o embalses [93]. Sin embargo, para el resto de actividades al interior de los ingenios, el agua que se requiere generalmente proviene de estos últimos reservorios, pero en aquellos en donde se han implementado esta opción tecnológica de capturar y almacenar el agua de las lluvias, ha llegado a representar porcentajes entre el 15 y el 20% [17].

Figura 12. Sistema de captación de aguas lluvias para uso en ingenios

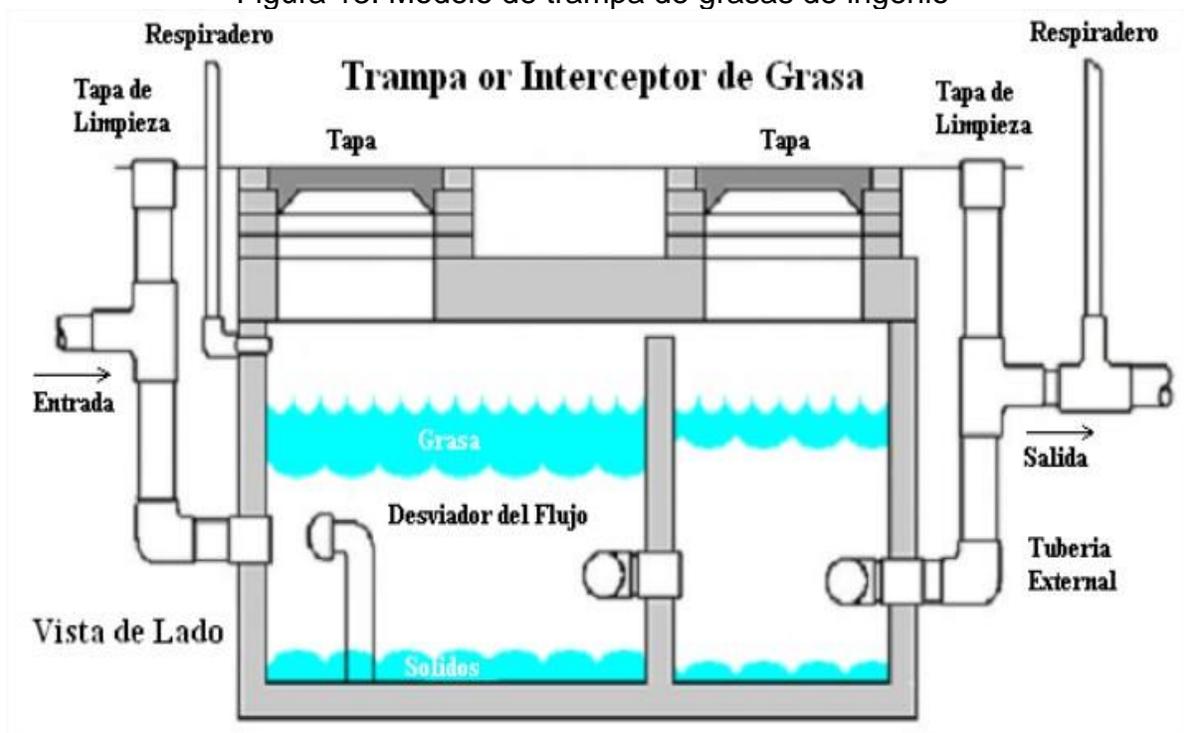


Fuente: Woltersdorf [94]

Implementación de trampas de grasas. Son cajas elaboradas a partir de acero inoxidable que permiten el paso de los jugos y materiales cristalizados de la caña que permiten la captura de las grasas generadas durante el proceso, así como de retener sólidos por medio de la precipitación.

La ventaja de estas trampas radica en que son removibles, de tal manera que, con una periodicidad de dos veces por semana por lo regular, evita que las grasas sean vertidas a los cuerpos de agua, lo mismo que los sólidos, reduciendo la contaminación [95].

Figura 13. Modelo de trampa de grasas de ingenio



Fuente: Thompson [95]

Utilización de las aguas biodegradables. Son aguas que al ser objeto de un tratamiento, son susceptibles de aprovecharse, principalmente en actividades como el lavado instalaciones, superficies, canales y algunos equipos de la planta de producción, así como de contenedores de los vehículos transportadores de caña.

De acuerdo con Blake [96], al reutilizarse estas aguas residuales, se optimiza el consumo de este importante recurso, ya que con una misma cantidad demandada

inicialmente es posible satisfacerse varias actividades del proceso productivo para la obtención de azúcar.

Figura 14. Reutilización de agua en lavado de maquinaria



Fuente: Agrobal [97]

En general, son procesos que contribuyen a reducir los impactos de la actividad industrial azucarera en las zonas de influencia de los ingenios, principalmente reduciendo la contaminación y mermando la demanda de agua de fuentes naturales al reutilizarse las generadas a través de tratamientos que en inicialmente no son los que implican su potabilización.

5.1.2. Procesos específicos

Cuando se trata de tecnologías limpias aplicadas sobre procesos específicos, pueden identificarse aquellas que se implementan sobre los cultivos, luego las que se implementan en la zona de molino y finalmente en la fabricación del azúcar.

5.1.2.1. Tecnologías limpias en la zona de cultivos

Básicamente se reconocen tres tipos de tecnologías, siendo la fertilización orgánica la más común, el laboreo mínimo, el control de malezas mediante prácticas mecánicas, las siembras en contorno y el ferti-riego utilizando aguas residuales biodegradables.

Fertilización orgánica: los subproductos como los trozos caña en el proceso de corte y el bagazo en seco se convierten en abonos para los cultivos, lo cual evita que gran parte de estos residuos se depositen en zanjas y riachuelos en donde a

razón del represamiento del agua se descompone causando problemas de contaminación y con ello afectando la fauna de los cuerpos de agua.

Figura 15. Uso de subproductos para fertilización de cultivos de caña



Fuente: Scialabba y Hatam [98]

Esta tecnología limpia es efectiva en tanto no solo permite fertilizar los suelos para los cultivos, sino que dada su carga orgánica favorece la biodiversidad, aportando a la generación de hongos, bacterias y otros microorganismos que aportan a la reconstitución edafológica del suelo y evitando que las fuentes de agua sufran eutrofización [41].

Laboreo mínimo: al usar maquinaria de manera intensiva y permanente, los suelos son objeto de remoción de su capa vegetal y con ello los acuíferos subterráneos principalmente sufren alteraciones al quedar más expuestos a la filtración del agua,

sobre todo si esta lleva sustancias contaminantes como agroquímicos (fertilizantes y pesticidas). Este tipo de laboreo es posible mediante la incorporación del arado de cinceles, el cual remueve el suelo sin necesidad de levantar las capas como lo hace el de discos, evitando por lo tanto una mayor afectación a los niveles freáticos [99].

Figura 16. Arado de cincel en la preparación de suelos de cultivos de caña



Fuente: FARMET [100]

Una de las ventajas que ofrece este tipo de tecnología es el aprovechamiento de la cobertura vegetal como abono sin necesidad de llevar a cabo un arado que revierte el suelo, lo que permite mantener la humedad necesaria para las siembras y reduciendo de paso la demanda de agua para la realización de la siembra [17].

Control de malezas con cobertura de paja: se considera una tecnología limpia en tanto al mantenerse hojas o de caña u otras especies sobre la superficie se impide el crecimiento de plagas que compiten con las plántulas, pero a su vez mantiene la humedad con lo cual se requieren menos cantidades de agua para el normal crecimiento [17].

Figura 17. Cobertura de paja para el control de plagas y ahorro de agua



Fuente: Machado [101]

Al utilizarse cobertura de paja o de hojas de la misma caña, principalmente durante el proceso de crecimiento de las plantas, los suelos logran recuperar las propiedades edafológicas y el nivel freático tiende a ser más superficial debido a que se reduce la evaporación a causa del material que actúa como esponja retenedora de agua [102]. Además, las coberturas de este tipo favorecen el desarrollo de microorganismos que contribuyen a la generación de producción más sostenible y compatible con el medio ambiente, pues como lo señalan Higa y Parr [103], son alternativas con las cuales en los cultivos se generan micro reservorios que contribuyen a ampliar la red de aguas subterráneas claves para el desarrollo de los bosques aledaños a las áreas de siembra o que están en las márgenes de ríos y quebradas.

Uso de aguas residuales biodegradables: se constituyen en alternativas para el ferti riego, y en vista de su alta carga de material orgánico contribuyen a obtener cultivos sanos, productivos y de alto valor orgánico. Este tipo de aguas requieren de tratamientos previos, sobre todo para reducir la carga de pH y elementos pesados

que pueden generar toxicidad en los suelos y las aguas, ya que con la lluvia pueden terminar en los ríos y lagunas más cercanos.

Además de la carga orgánica representada en sólidos de bagazo, residuos de azúcar y cenizas, estas aguas contienen elementos químicos como el fósforo y el potasio, lo cual contribuye a mejorar y mantener la fertilidad de los suelos sin tener que utilizarse fertilizantes [104]. En estudios como el de Villar-Font [105], se evidencia que, a raíz del uso de estas aguas en actividades como la fertilización de cultivos, la carga contaminante sobre los cuerpos de aguas se redujo significativamente, sobre todo en lo relacionado con la DQO y DBO₅, al pasar de niveles de 3500 a 2300 mg/L y 2300 a 1650 mg/L respectivamente. De acuerdo con Scialabba y Hattam [98], el uso de este tipo de aguas, con un tratamiento previo que las hace aptas para los suelos, ayuda a reconstruir la capa vegetal y facilita la aparición de bacterias que enriquecen el suelo y ayudan a la capacidad de absorción de nutrientes por parte de la caña y de otros cultivos que se desarrollen.

Figura 18. Uso de aguas biodegradables de los ingenios sobre cultivos de caña



Fuente: Cenicaña [106]

El uso de las aguas residuales representa una tecnología limpia en tanto pueden aprovecharse eficientemente sus componentes, lo que reduce costos para los

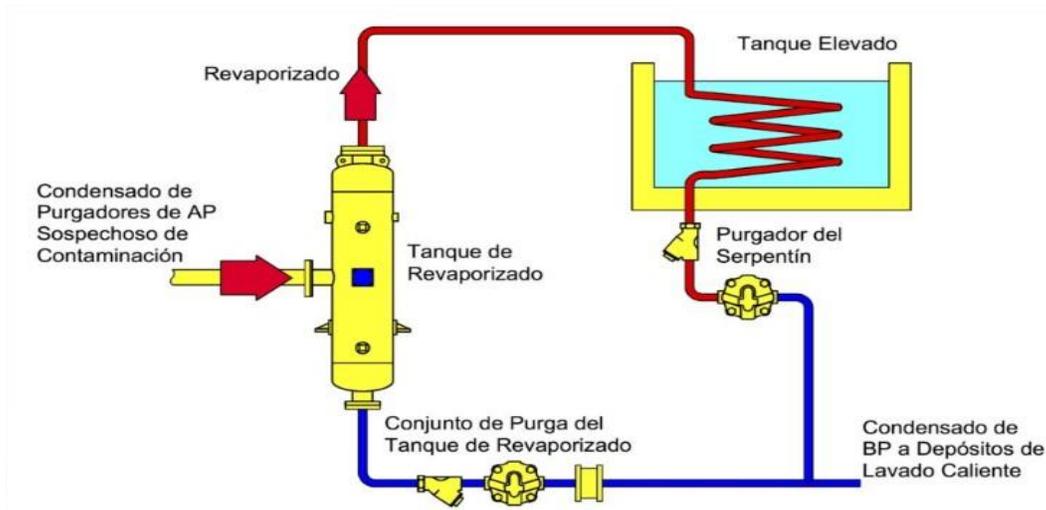
inversionistas por concepto de fertilizantes, pero a su vez a la reducción de la demanda de agua de las fuentes naturales y evita que gran parte de los elementos contaminantes se depositen en las aguas aledañas y por el contrario se metabolizan mediante la micro fauna que puede prosperar con esos mismos residuos orgánicos.

5.1.2.2. Tecnologías limpias en la zona de molinos

Los procesos que se desarrollan en los ingenios en cada una de las fases de la producción de azúcar pueden dar como resultado tecnologías que pueden contribuir al ahorro de agua como a la disminución de los impactos en el medio. Así, en la fase molido de la caña que hace que esté lista para someterse a otros pasos productivos, pueden destacarse el uso del condensado para la imbibición que optimiza el uso de energía.

Condensado contaminado como agua de imbibición. Puede considerarse como una tecnología limpia en el sentido que, en la industria azucarera, el condensado de los serpentines que se encuentran en depósitos de soluciones puede presentar niveles de acidez que a su vez representan problemas de contaminación, pero, aunque esté en tales condiciones el condensado lleva el mismo calor que un condensado limpio, de modo que representa una oportunidad para aprovechar el rendimiento de los sistemas de vapor y a su vez puede utilizarse agua residual.

Figura 19. Uso de condensado contaminado como imbibición



Fuente: Martínez [107]

De acuerdo con Martínez [107], el condensado contaminado caliente se dirige a un depósito en donde sale agua fría a través de un tubo en la parte baja, para que el agua fría que se repone circule a través del serpentín absorbiendo calor hasta en 6°C, lo que significa recuperar energía, lo que a su vez implica un ahorro del 1% en combustible y evita que se derrame agua contaminada con mayor frecuencia.

5.1.2.2. Tecnologías limpias en la zona de fabricación

Son tecnologías y/o procesos que al implementarse en la fabricación de azúcar contribuyen principalmente al uso eficiente de la energía, del agua y evita los derrames frecuentes de contaminantes a las fuentes de agua, lo que le permite a los reservorios una mayor capacidad de recuperación.

Utilización de condensados contaminados. Estos pueden utilizarse en dos procesos: la lechada de cal y la dilución de mieles. La primera se hace con el fin de clarificar el azúcar, además de controlar los niveles de pH del agua de enfriamiento y el de los filtros, entre otros. Para ello, al utilizarse los condensados contaminados en la lechada de cal, se optimiza el uso de agua y dado que los condensados son bajos en niveles de pH permite que la solución realice una mayor floculación de los no azúcares, es decir, materiales orgánicos que contienen los jugos de la caña [108].

De acuerdo con Urbaniec [109], al utilizarse los condensados, un ingenio puede reducir alrededor del 10% de las necesidades de agua y se alcanza una mayor eficiencia en cuanto a la capacidad de floculación y aglutinación de materiales suspendidos, principalmente de residuos de fibras de bagazo en los jugos de caña.

Para la dilución de mieles, el uso del condensado evita que se hagan vertimientos al ambiente y al contar con un grado de tratamiento que no signifique toxicidad, se convierte en insumo para bajar el grado de concentración de las mieles que se generan en el proceso, lo que a su vez da como producto melazas que pueden destinarse para el consumo animal y el uso en la elaboración de dietas alimenticias para bovinos, caprinos, porcinos y otras especies para las cuales se convierte en fuente de energía [110].

Al utilizarse los condensados en la dilución de mieles, el impacto del efluente sobre el medio ambiente se reduce, dado que, al reutilizarse el agua, aun con contenido contaminante se alarga el ciclo del agua, aumentando de paso la eficiencia en el aprovechamiento de las aguas residuales en la cadena de valor del ingenio.

Figura 20. Aprovechamiento de condensados en dilución de mieles



Fuente: González [111]

Estudios como los de González [111], señalan que al utilizarse el condensado de vapor con contenido de material orgánica, principalmente fibras de bagazo, pueden aprovecharse para la obtención de subproductos como la melaza, la cual tiene entre otros fines la alimentación de especies animales, reduciendo la cantidad de vertimientos.

Utilización de magnetizadores en equipos de evaporación: consisten en dispositivos que prolongan los ciclos de limpieza, reduciendo el uso de agentes químicos, agua y a su vez evita la necesidad de realizar tratamientos de efluentes derivados de la evaporación en el proceso de fabricación del azúcar [17]. Estos magnetizadores por lo tanto contribuyen a que se reduzcan los impactos negativos sobre los cuerpos de agua aledaños a los ingenios al no verterse aguas contaminadas. Según Oliveros [112], al incorporarse el magnetismo se facilita el tratamiento del agua que se debe verter en las calderas, las bombas de vacío y

desde luego en los jugos de caña, al tiempo que permite mermar las incrustaciones en los equipos favoreciendo de paso una mayor eficiencia en la transferencia de calor y los materiales suspendidos y adheridos como los ferromagnéticos pueden captarse de una mejor manera y con ello se evita la contaminación de aguas al no tener que usarse sustancias químicas para removerlos. Las incrustaciones consisten en la solidificación del carbonato de calcio y otros compuestos en las paredes de tuberías y en equipos por donde pasa el agua, para lo cual tradicionalmente se usan agentes químicos que aumentan la toxicidad del agua. [113].

Figura 21. Dispositivos de electromagnetismo



Fuente: Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado [114]

Implementación de torres de enfriamiento. Se trata de una tecnología mediante la cual puede aprovecharse agua reutilizable y se logra mantener grandes volúmenes. Son edificaciones con tanques en los que se depositan condensados o aguas que han sido utilizadas en el lavado de la materia prima y otros procesos que no han causado alteraciones irreversibles en las propiedades del agua.

Las torres son construcciones que a través de tuberías se nutren de agua proveniente de los procesos de la fabricación de azúcar, especialmente de la condensación que una vez ha sido utilizada es factible de reutilizarse ante algunos tratamientos que la hacen aprovechable, pero requiere de un enfriamiento y almacenamiento para que esté disponible para otros procesos [115]. Esto permite

lograr un ahorro en la demanda de agua proveniente de reservorios y al reutilizarse el agua proveniente del condensado, se vierte cada vez menos a ríos o lagos.

Figura 22. Torres de enfriamiento de agua



Fuente: SISESA [100]

Las torres de enfriamiento se constituyen en reservorios artificiales, cuyos volúmenes de aguas reutilizables permiten alcanzar una mayor eficiencia en el uso del agua, ahorrando costos por nueva dotación y aprovechamiento de aguas residuales que para otros procesos pueden ayudar a una mejor calidad, tal es el caso de la lechada de cal y clarificación de los jugos. Las tecnologías descritas anteriormente son solo algunas que pueden destacarse como alternativas viables de implementarse en los procesos de fabricación de azúcar y en los cultivos de caña para que esta industria minimice sus impactos negativos sobre los recursos hídricos en las zonas aledañas. Sin embargo, también existen otras tecnologías limpias que pueden utilizarse, sobre todo de tipo correctivo o más específicamente de biorremediación, las cuales ofrecen una mayor compatibilidad ambiental.

5.1.3. Tecnologías de biorremediación de aguas residuales

Debido a que la actividad industrial azucarera implica vertimientos de aguas residuales, en la mayoría de los casos los cuerpos de agua de las zonas aledañas han sido objeto de contaminación, lo que ha ocasionado incrementos en la DBO5 y DQO, así como alteraciones en el pH y en la salinidad de los suelos. También han sido objeto de toxicidad en razón a que los vertimientos pueden llevar consigo

metales pesados, fosfatos y otros agentes contaminantes que pueden causar muerte de especies acuáticas. Además, han sido objeto de eutrofización, que ha hecho que algunos reservorios naturales hayan desaparecido. Ante estas problemáticas expuestas, algunas investigaciones muestran que la biorremediación se ha constituido en una apuesta para la corrección en alguna medida de los impactos negativos de los ingenios. Para ello, conforme a la propuesta de Petersen [35], se definen las siguientes preguntas:

Tabla 20. Preguntas orientadoras sobre tecnologías de biorremediación a partir de lodos activados, bacterias y hongos en zonas de ingenios azucareros.

Preguntas	Motivación
3. ¿Qué publicaciones existen acerca del uso de bacterias y hongos y cuál es su efectividad para la biorremediación ambiental de cuerpos de agua aledaños afectados por los ingenios azucareros?	Determinar los estudios sobre biorremediación de cuerpos de agua y su efectividad ante el uso de bacterias y hongos.
¿Cómo están distribuidas las publicaciones anualmente durante el periodo 2010 – 2022?	Determinar la periodicidad de las publicaciones sobre estas tecnologías.
¿En qué países se han realizado estudios de remediación con lodos activados, bacterias y hongos para la biorremediación ambiental de cuerpos de agua aledaños afectados por ingenios azucareros?	Identificar los países más prolíficos en estudios relacionados con tales tecnologías de biorremediación de cuerpos de agua afectados por ingenios azucareros..
¿Cuál ha sido la efectividad de estas tecnologías de remediación de cuerpos de agua aledaños afectados por los ingenios azucareros?	Describir los resultados sobre la efectividad de las tecnologías de biorremediación de cuerpos de agua afectados por los ingenios azucareros.

Fuente: elaboración propia

Conforme a las anteriores preguntas, los términos de inclusión y exclusión son los siguientes:

Tabla 21. Términos de inclusión y exclusión sobre tecnologías de biorremediación basadas en lodos activados, bacterias y hongos de cuerpos de agua afectados por los ingenios azucareros

Inclusión	Exclusión
Publicaciones en español e inglés sobre biorremediación con lodos activados, bacterias u hongos sobre cuerpos de agua afectados por los ingenios azucareros.	Publicaciones en otro idioma diferente al español e inglés sobre tecnologías de biorremediación diferentes a lodos activados, bacterias y hongos sobre cuerpos de agua afectados por ingenios azucareros.

Publicaciones desde al año 2010 a 2022.	Publicaciones anteriores a 2010
Artículos de revisión o de resultados completos disponibles en bases de datos o repositorios de revistas científicas.	Artículos incompletos.
Tesis de maestría o doctorado relacionadas con las tres alternativas de biorremediación de agua afectados por ingenios azucareros disponibles en repositorios digitales de universidades.	Tesis de nivel de pregrado.
Informes de organizaciones o centros de investigación tres alternativas de biorremediación de cuerpos de agua afectados por ingenios azucareros disponibles en repositorios digitales	Literatura gris, sin autor o sin fecha de publicación.
Estudios de acceso al menos al resumen y/o abstract	Estudios sin resumen y/o abstract o sin acceso a estos.

Fuente: elaboración propia

Conforme a los parámetros de búsqueda de Petersen [35], para delimitar la búsqueda se han establecido las siguientes palabras clave:

Tabla 22. Palabras clave para la búsqueda de publicaciones relevantes de tecnologías de biorremediación

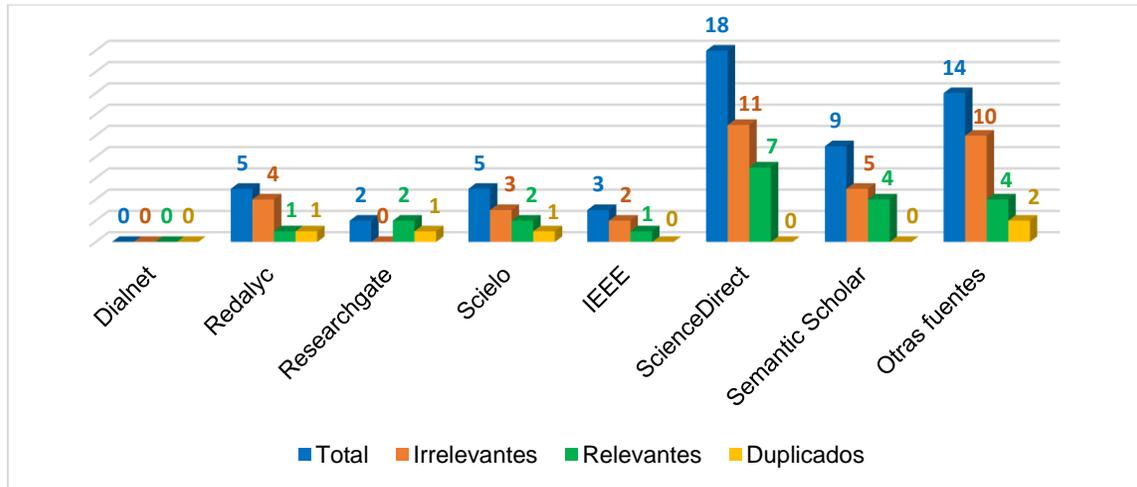
Palabras clave	Keywords
Ingenios azucareros	Sugar mills
Contaminación	Pollution
Biorremediación	Bioremediation
Lodos activados	Muds activate
Hongos	Fungi
Bacterias	Bacteria

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta las preguntas y los criterios de exclusión, se realizó la búsqueda en bases de datos y motores de búsqueda de publicaciones, tales como Dialnet, Redalyc, Researchgate y Scielo que son de acceso libre, así como las restringidas IEEE, ScienceDirect, Semantic Scholar. A estas se suman los repositorios de universidades y organizaciones en los que existen tesis de grado e informes.

De acuerdo con la búsqueda, se logró identificar un total de 56 publicaciones, de las cuales 21 se consideraron relevantes para dar respuesta a la pregunta planteada, de los cuales ScienceDirect tiene 7, seguida de Semantic Scholar y otras fuentes con 4 cada una.

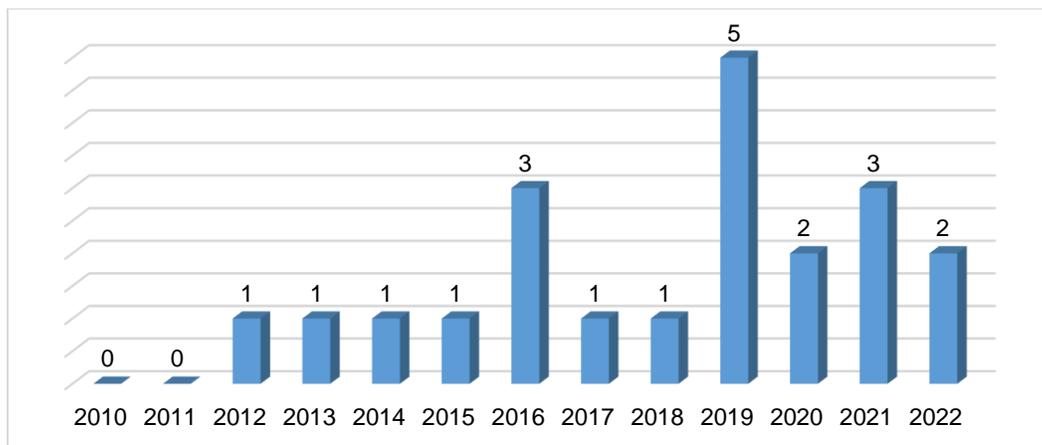
Tabla 23. Publicaciones sobre biorremediación basada en lodos activados, hongos y bacterias de cuerpos de agua afectados por ingenios azucareros



Fuente: elaboración propia

Luego, al discriminarse por año de publicación, se observa que más del 80% (17) se dieron a conocer después del año 2015, siendo el año 2019 el que mayor número presentó.

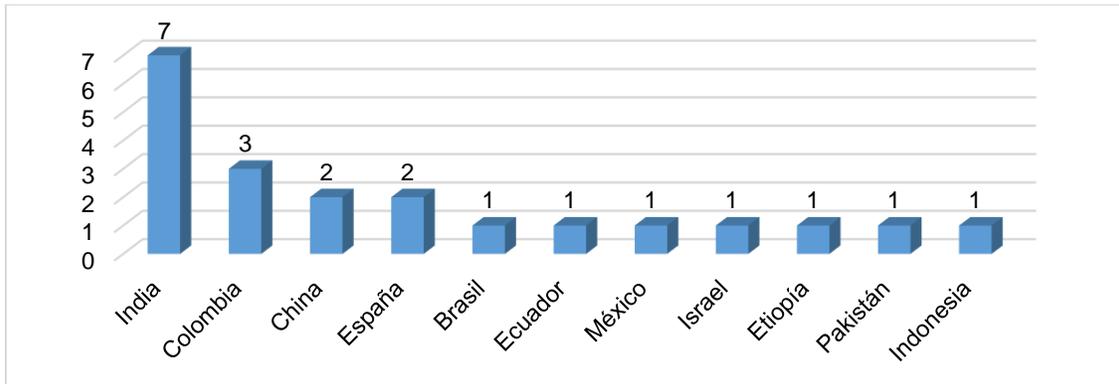
Figura 23. Distribución anual de publicaciones sobre biorremediación basada en lodos activados, hongos y bacterias de cuerpos de agua afectados por ingenios azucareros



Fuente: elaboración propia

Al revisarse las publicaciones según país de origen, puede destacarse que India es el que mayor número de estudios aporta con 7, la tercera parte del total de relevantes y le siguen Colombia con 3 y China y España con 2 respectivamente.

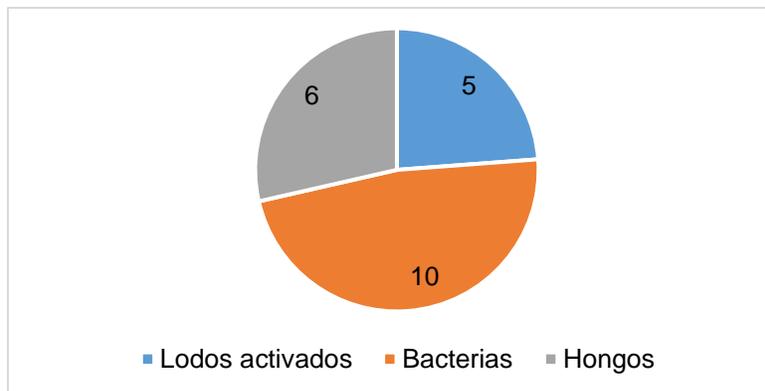
Figura 24. Distribución por país de publicaciones sobre biorremediación de cuerpos de agua basada en lodos activados, hongos y bacterias



Fuente: elaboración propia

Finalmente, según los tipos de biotecnología de remediación sobre los que se realizó la búsqueda de estudios, los resultados permiten señalar que para los lodos activados usados en cuerpos de agua aledaños a los ingenios se encontraron 5 publicaciones, 6 sobre hongos y 10 sobre bacterias.

Figura 25. Distribución de publicaciones según tipo de biotecnologías de remediación de cuerpos de agua afectados por los ingenios azucareros



Fuente: elaboración propia

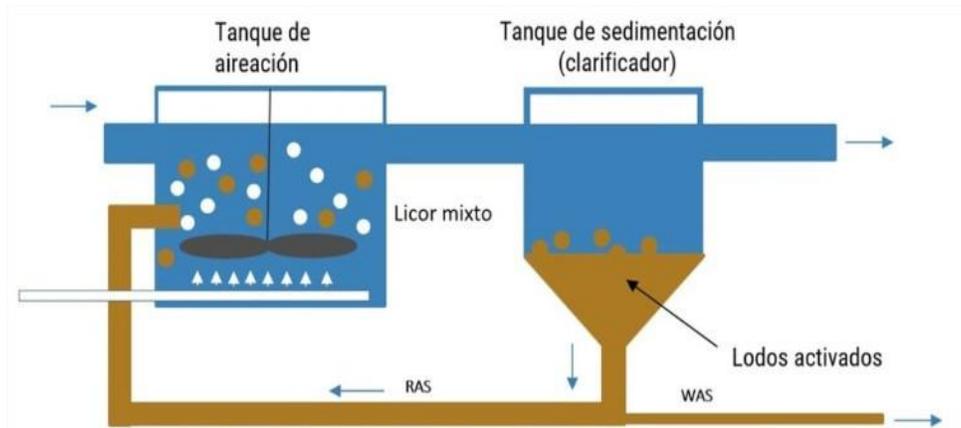
Con este conjunto de artículos relevantes conforme a cada biotecnología de remediación, la efectividad para corregir aguas afectadas por los ingenios se comprende a partir de los siguientes hallazgos producto de la extracción de datos.

5.1.3.1. Biotecnología de lodos activados

Los lodos activados son fangos con una carga bacteriana dispersa que ayudan a la floculación, mediante depósitos agitados, con suficiente aireación que hacen que se

alimento de aguas residuales a raíz de su capacidad de metabolización de los contaminantes, especialmente los sólidos suspendidos orgánicos y a su vez la reducción de parámetros como los DBO5 y DQO [116] [117]. Como tecnología utilizada para tratar aguas residuales de ingenios, algunos antecedentes son el de Viracucha [74], el cual evidencia una alta efectividad en la remoción de material orgánicos suspendido al alcanzar un nivel de reducción del 97% en la DBO₅, lo que condujo a que las aguas recobraran su capacidad de oxigenación.

Figura 26. Sistema de lodos activados para remediación de efluentes



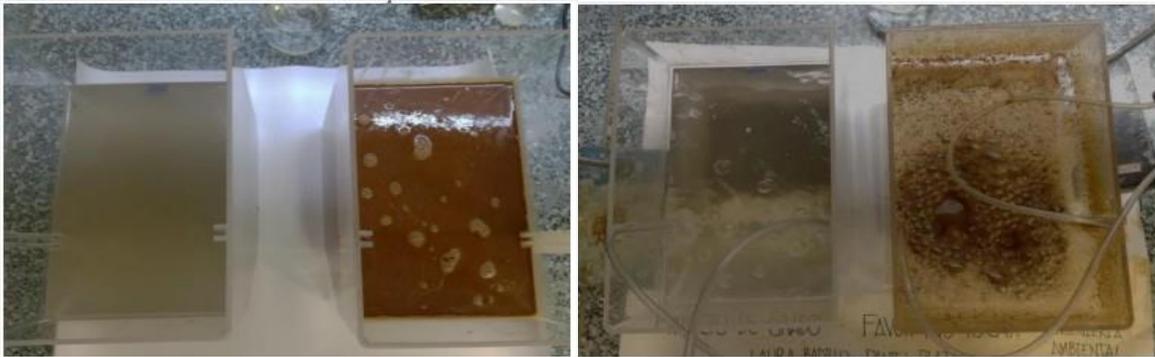
Fuente: CROPAIA [118]

La investigación de Singh [119], también generó resultados favorables para mejorar las propiedades físico-químicas de un efluente de un ingenio en Uttar Pradesh, India, principalmente en parámetros como los STS, SDT, DBO, DQO al alcanzarse cambios de 69 al 87%, del 42 al 63%, 79 al 94%, 75 al 85% respectivamente.

En el ámbito nacional, la investigación de Badillo [25], consistente en la implementación de un reactor SBR para el tratamiento de la vinaza, el cual a raíz del uso de los lodos activados arrojó mejoras en los parámetros físico-químicos, puesto que los sólidos suspendidos disminuyeron, siempre que los SDT lograron reducirse en 22.07%; los STS en 76.48% y los SST en 72.42%.

En cuanto a nitritos la reducción fue del 100%, lo mismo que de nitratos; la turbiedad en 18.88% y la DQO en un porcentaje del 11.62%. Finalmente, se incrementó el OD en 25.81% y el nivel de pH no sufrió cambios al mantenerse en un nivel de 3.8.

Figura 27. Reactor SBR al inicio y al final del tiempo de tratamiento de vinaza



Fuente: Badillo [25]

Los lodos activados se han convertido en una alternativa de remediación de las aguas residuales de los ingenios al devolverle las condiciones físico químicas que permiten realizar vertimientos sin causar impactos altamente nocivos.

5.1.3.2. Biotecnología de remediación de efluentes con bacterias

Existen bacterias que debido a su capacidad metabólica en condiciones anaerobias pueden contribuir a corregir las propiedades físico-químicas de los efluentes, algunas con poder de síntesis de material orgánico que al descomponerlo mejoran los parámetros de calidad en las aguas residuales. En el caso de los efluentes de los ingenios, el trabajo de investigación aplicada de Saranraj y Stella [26] sobre el uso de un consorcio de bacterias (*Bacilo sutiles* + *Serratia marcescens* + *Enterobacter asburiae*) permitió mejoras significativas en la remediación.

Tabla 24. Uso de bacterias en tratamiento de efluentes de ingenio azucarero en India

Parámetro	Antes del tratamiento	Después del tratamiento
Color	Marrón	Incoloro
Olor	Desagradable	Inodoro
pH	4.64	7.0
SST (mg/L)	479	329
SDT (mg/L)	1540	488
DBO5 (mg/L)	1090	327
DQO (mg/L)	3260	391
Cloruro (mg/L)	377	283
Potasio ((mg/L)	125	102
Nitrógeno (mg/L)	1300	1021
Fósforo (mg/L)	6.17	6.2
Plomo (mg/L)	0.52	0.19
Manganeso (mg/L)	0.095	0.01

Fuente: Saranraj y Stella [26]

Hallazgos similares ofrece el estudio de Yadav [120], que de acuerdo con un consorcio de bacterias lograron evidenciar cambios significativos en las propiedades físicas del agua, sobre todo en la reducción de metales pesados como el plomo y molibdeno en el 97% y 94% respectivamente de los acuíferos presentes en zonas aledañas de un ingenio en India.

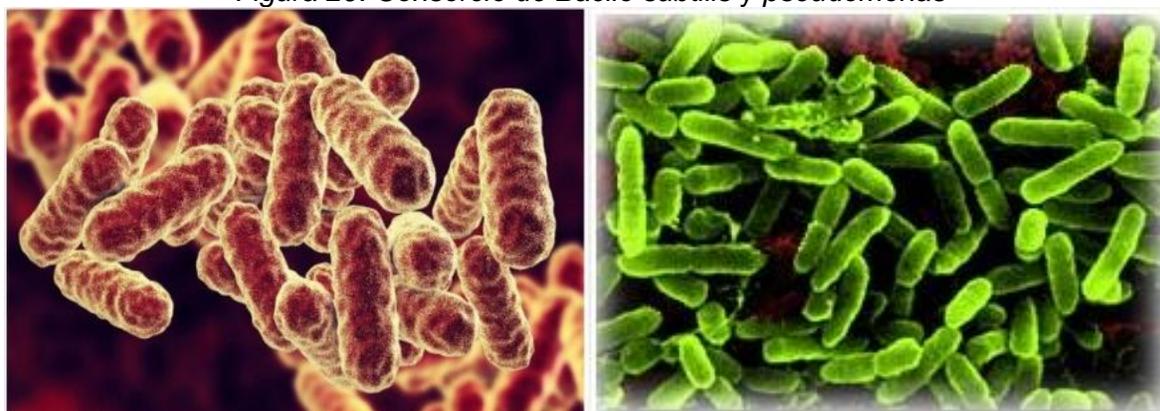
Figura 28. Consorcio de *Bacilo subtilis*, *Serratia marcescens* y *Enterobacter asburiae*



Fuente: Villarreal [121]; Lifeder [122]; [123]

Otro consorcio que muestra resultados similares al anterior es el compuesto entre *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas fluorescens* implementado por Jagannathan [124], el cual muestra que es viable mejorar las propiedades físico-químicas de los efluentes, con lo cual se evidencia que las bacterias son una alternativa eficiente para tales efectos.

Figura 29. Consorcio de *Bacilo subtilis* y *pseudomonas*



Fuente: Villarreal [121]; June [125]

El uso de este consorcio muestra cambios significativos en los parámetros físico-químicos, excepto en la reducción del fósforo que lo incrementa levemente, como se indica en la Tabla 25.

Tabla 25. Uso de bacterias en tratamiento de fluentes

Parámetro	Antes del tratamiento	Después del tratamiento
Color	Marrón	Incoloro
Olor	Desagradable	Inodoro
pH	4.64	7.0
SST (mg/L)	379	329
SDT (mg/L)	1310	388
DBO5 (mg/L)	1069	327
DQO (mg/L)	2260	591
Cloruro (mg/L)	377	283
Potasio ((mg/L)	125	102
Nitrógeno (mg/L)	1300	1021
Fósforo (mg/L)	6.17	6.2

Fuente: Jagannathan [124]

En otro estudio, al utilizarse *Candida tropicalis* recién aislada, también se observaron resultados altamente efectivos, ya que se logró la eliminación de DQO en un 90%, de nitrógeno en el 89% y fosfatos en el 82% [126]. De igual manera, el estudio de Kumar [127], demostró una efectividad del 92% de eliminación de DQO, 86% del fósforo y 85% del nitrógeno, además de la desaparición del color marrón y los malos olores de las aguas residuales. Y en medidas similares se logró eliminar los olores, color y elementos habituales en las aguas residuales en los hallazgos de los trabajos de Lin [128], Sahu [129] y Pachiega [130].

5.1.3.3. Biotecnología de remediación de efluentes con hongos

Además de las bacterias, existen hongos que gracias a sus capacidades ligninolíticas descomponen compuestos orgánicos de las aguas residuales, contribuyendo a la biorremediación en tanto eliminan los sólidos suspendidos responsables de portar elementos químicos [131].

Para la remediación de efluentes de ingenios azucareros, el estudio de Buvanewari [132], muestra que a partir de tres experimentos que utilizaron tres especies de hongos (*Aspergillus niger*, *Penicillium sp* y *Fusarium sp*), los mejores resultados los arrojó el primer cultivo, pues lograron reducir los SDT en un 18.74%, la DBO5 en 47.62% y la DQO 44.68%, todos durante un tiempo de seis días de tratamiento.

Figura 30. Hongo *Aspergillus niger* para el tratamiento de efluentes



Fuente: Lifeder [133]

Aunque las otras especies presentan reducciones menores a las de *Aspergillus niger*, con un tiempo mayor a los de los experimentos también pueden ser una alternativa. Sin embargo, para efectos de una mayor efectividad se sugiere utilizar el de mayor efectividad.

Otra alternativa es el hongo de pudrición blanca *Pleurotus ostreatus*, que se presenta en los mismos cultivos de caña, el cual según el estudio de Tapie [27] realizado en Colombia, contribuye a mejorar los parámetros de efluentes de los ingenios, principalmente las vinazas que son las principales contaminantes y cuyas observaciones muestran que al utilizarse tal especie fungosa, se logró una remoción de DQO del 87%, para la DB05 del 92%, así como reducciones en los SST del 83% y SDT del 72%, lo que demuestra una alta efectividad para mejorar las condiciones de las aguas residuales de la industria azucarera, siendo por lo tanto una tecnología limpia que puede implementarse en los ingenios.

También los estudios de Sarwar [134], Vishnoi [135] y Mathur [136] describen niveles de efectividad superiores al 80% en la eliminación de DBO5 y DQO, además de SDT en niveles entre el 70% y el 75%, resultados que confirman el buen desempeño de bacterias para la remediación de aguas residuales de ingenios azucareros.

Figura 31. Hongo *Pleurotus ostreatus* para tratamiento de vinazas



Fuente: Berrocal y Muñoz [137]

Además de las propiedades para actuar en la remediación de aguas, este hongo es comestible, lo que significa que las contribuciones son en doble vía, ya que por un lado reducen las cargas contaminantes de las vinazas y por otro proveen un insumo para la alimentación.

Las anteriores tecnologías, se constituyen en alternativas para hacer que la actividad industrial azucarera se desarrolle normalmente incurriendo en la minimización de impactos sobre el medio ambiente y especialmente en los cuerpos de agua que están en las zonas aledañas. Puede destacarse, además, que son tecnologías viables de implementarse, no solo porque son relativamente de bajo costo, sino porque los insumos, tanto materiales como biológicos para el caso de la biorremediación son de fácil consecución.

5.2. Beneficios de la implementación de tecnología limpias

Los beneficios de la implementación de estas tecnologías están dados en varias dimensiones, los cuales demuestran que más allá de contribuir a la sostenibilidad ambiental, permiten que la industria azucarera se desarrolle con una mayor responsabilidad empresarial. En tal sentido, pueden destacarse impactos positivos como los siguientes:

5.2.1. Beneficios ambientales

De las tecnologías limpias que se implementan sobre los procesos generales y específicos, los principales beneficios están representados en la reducción de la demanda de agua de los reservorios naturales (ríos y lagunas), puesto que al hacerse reutilización de aguas residuales que han sido tratadas en algún grado, no se requiere de reposición de agua con la misma frecuencia que si no se hace recirculación de condensados, por ejemplo. En este sentido, Ramos y Lorenzo [17] y Motito [39], señalan que los ingenios que hacen uso de aguas residuales en los procesos de lavado o para la clarificación de los jugos al aplicarse como componente de la lechada de cal, pueden lograr ahorros hasta de un 20% de nuevas cantidades de agua que entran al proceso de fabricación.

Además, la reutilización implica que se realizan vertimientos con una menor frecuencia, lo cual le da más tiempo al medio ambiente para cumplir con su función de sumidero, pues con menores cantidades de efluentes por unidad de tiempo, no se incurre en la saturación. Sobre esto, el estudio de De la Hoz [36], plantea que debido a los altos volúmenes de aguas residuales generadas por los ingenios, los suelos y los cuerpos de agua reciben permanentemente vertimientos, pero al reutilizarse, es posible mermar no solo la frecuencia, sino los volúmenes que minimizan los impactos negativos.

Por otra parte, en tanto los efluentes sean objeto de algunos tratamientos, sobre todo si se reduce los niveles de toxicidad de metales pesados, pueden utilizarse como ferti riego, de modo que también en los cultivos se reduce la demanda de agua de los reservorios naturales, al tiempo que el material orgánico ayuda a la recomposición edafológica de los suelos, disminuyendo por ende la aplicación de fertilizantes químicos.

5.2.1. Beneficios sociales

En las zonas de influencia de los ingenios existen comunidades humanas, tanto en los niveles urbano (poblados) como campesino, las cuales generalmente hacen uso de la oferta ambiental de recursos como el agua y los suelos. En el caso del primero, los ríos y lagunas son los que abastecen los acueductos urbanos y veredales, los

cuales en la mayoría de los casos no cuentan con plantas de tratamiento para potabilizar el agua, de manera que cuando en los ingenios se hacen vertimientos contaminados, de alguna manera terminan en esos cuerpos de agua, sobre todo por la acción de las lluvias.

Conforme a esta situación expuesta, al implementarse las tecnologías limpias en los ingenios, se reduce la carga contaminante, se mejoran las condiciones físico-químicas en el caso de las alternativas de biorremediación y se merma la demanda de agua, lo que a su vez implica menores impactos para las comunidades señaladas.

Además, al implementarse las acciones limpias que se han expuesto, se logran conservar las especies acuáticas, entre ellas las de peces que para las personas pueden ser una de las fuentes de alimentación. Así mismo, son tecnologías que pueden reducir las afectaciones sobre la flora (bosques), los cuales son necesarios para la provisión de material maderable que requieren las comunidades.

En ese sentido, estas acciones limpias se constituyen en esfuerzos de responsabilidad social empresarial de la industria azucarera, que no solo contribuyen a garantizar la sostenibilidad del ambiente, sino del desarrollo normal de las actividades de otras comunidades de interés.

5.2.1. Beneficios económicos

La implementación de estas tecnologías conlleva inversiones iniciales, las cuales pueden constituirse en costos para los ingenios. Sin embargo, se convierten en activos que hacen que las plantas de producción se valoricen, no solo por cuanto son objeto de inyección de capital, sino porque representan acciones de innovación que fomentan la productividad y la generación de azúcar socialmente responsable.

No obstante, en el caso de la reutilización de aguas, los ingenios reducen la demanda de agua de reposición, con lo cual los ahorros por este concepto pueden ser hasta del 20% [17] [39]. De igual manera, al utilizarse efluentes con tratamientos en los regadíos, el ahorro por fertilizantes puede alcanzar porcentajes de mínimo el 10% [115] así como costos por compensación ante afectaciones a terceros por contaminación de fuentes hídricas [61].

Por otra parte, al implementarse tecnologías limpias, en algunos casos, las autoridades ambientales pueden reducir las tasas retributivas que deben pagar los ingenios al demostrar que sus vertimientos han sido objeto de reducciones de cargas contaminantes.

Finalmente, al desarrollarse una industria azucarera que implementa tecnologías limpias, es factible que el azúcar o etanol generado adquieran un mayor valor económico en tanto son más compatibles con el medio ambiente, aspectos que los consumidores y los organismos de certificaciones de calidad los consideran de alto impacto para efectos de alcanzar una industria acorde con los objetivos de desarrollo sostenible y que al mismo tiempo permite la realización de actividades económicas con matices ecológico.

6. Discusión de las tecnologías limpias del proceso industrial azucarero frente a los recursos hídricos en zonas de los ingenios

Las tecnologías descritas en el capítulo son el resultado de la implementación de acciones que la misma cadena de valor de la industria azucarera ha permitido identificar y en otros casos como los de la biorremediación son producto de la investigación a través de experimentos que han procurado reducir las cargas contaminantes a través de alternativas que se consideran biotecnologías.

Representan tecnologías que de acuerdo con los escenarios en donde se implementan, resultan más efectivas para la protección de los recursos hídricos, pues en algunos países la normatividad ambiental no se cumple a cabalidad, sobre todo porque la institucionalidad no es suficiente, tal el caso de los procesos de producción azucarera de la India, Bangladesh, los de Centroamérica y otros en donde los impactos ambientales negativos de los efluentes de los ingenios siguen siendo muy altos.

No obstante, son países en donde más se han emprendido acciones limpias para minimizar tales impactos, lo cual ha sido posible a partir de investigaciones que propenden por hacer de esta industria una actividad económica sostenible, no solo desde lo ambiental, sino que como ya se anotó, también impactan en lo social y en lo económico.

Entre las tecnologías limpias en los procesos de sembrado, el uso de las aguas residuales representa una alternativa de alto valor en las tres dimensiones expuestas, pues de acuerdo con los estudios de Díaz [22], permiten mejorar las condiciones de los suelos en los cultivos, se evita el vertimiento de materiales contaminantes sobre cuerpos de agua y sobre el suelo y a su vez coadyuvan a la reconstitución de la capa vegetal. Luego, esta reutilización implica reducciones en la demanda de agua de las fuentes naturales que son las que suministran el líquido a los ingenios y otras actividades en las zonas de influencia de los ingenios, lo cual ayuda a que las propiedades físico-químicas y biológicas de los cuerpos de agua tengan un mayor margen de restauración. Al respecto, Aristizábal [1] y González [108], señalan que los efluentes no solo se constituyen en desperdicios

contaminantes que deben dirigirse a algún lugar en el medio ambiente con las consecuencias que ello implica si no se someten a tratamientos, pues dadas sus propiedades representan subproductos aprovechables para otras fases del proceso productivo, sea desde la de cultivo como hasta la obtención del azúcar para la comercialización.

Los condensados que son agua de vapor de las calderas, si bien representan un material contaminante, son susceptibles de reincorporarse a otras fases de producción, entre ellas la de clarificación de los jugos, además de recircularse por las tuberías para efectos de mantener la energía evitando costos adicionales por el suministro de vapor o por la incineración de subproductos como el bagazo en la obtención de calor. Frente al aprovechamiento de los condensados, Prada [51] plantea que, si se utilizan en otras fases, los ahorros en costos por concepto de energía pueden alcanzar niveles cercanos al 15%, con lo cual no solo se evita hacer vertimientos frecuentes, sino que es posible optimizar los recursos financieros para la operación de los ingenios.

Aunque la industria azucarera implica de la implementación de procesos complejos, es destacable estos mismos dan como resultado la posibilidad de reincorporar los subproductos para llevar a cabo una producción más limpia, sobre todo en cuanto a la sostenibilidad de los suelos y los cuerpos de agua. Es destacable que tecnologías como las torres de enfriamiento, el uso de magnetismo, la instalación de bandejas recolectoras de grasas, entre otras requieren principalmente de acciones mecánicas y por lo tanto no se hace necesario el desarrollo de métodos químicos que pueden representar altos costos y a la vez se generan menores impactos negativos.

Los hallazgos de estudios como los de Cisneros [138] y Qureshi [90], muestran que los principales impactos positivos a raíz de la implementación de estas tecnologías están relacionados con los ahorros de agua (20%), energía (entre el 105 y 15%) y disminuciones en los vertimientos en niveles cercanos al 25%, pues como producto de la reutilización se disminuye la frecuencia. Luego, teniendo en cuenta que la industria azucarera cubana ha sido una de las pioneras en la incorporación de

tecnologías limpias [17] [43], es quizá en donde más se han difundido, pero se han replicado en zonas industriales como las de India, Pakistán, Bangladesh y Centroamérica en donde los resultados han sido óptimos para la conservación de los cuerpos de agua [38] [132] [103] [39].

En el caso colombiano, también se han dado pasos importantes para la implementación de tecnologías que están presentes en los procesos de producción del azúcar, al punto que los aprovechamientos de los efluentes han permitido reducir la contaminación, aunque todavía se requiere de voluntad por parte de los inversionistas para avanzar aún más hacia una sostenibilidad de esta actividad desde el punto de vista ambiental [40] [65] [25].

En cuanto a las tecnologías encaminadas a la biorremediación de efluentes, el uso de los lodos activos se constituye en una alternativa biológica que aporta al mejoramiento de las condiciones físico-químicas sin incurrir en inversiones cuantiosas para devolver aguas con mejores parámetros al medio ambiente. Es destacable la capacidad de esta tecnología en la disminución de la DBO₅, la DQO, fósforo con lo cual se evitan problemas como la eutrofización de los cuerpos de agua a los cuales llegan las aguas residuales. De acuerdo con Viracucha [74] y Rahim y Mostafa [89], esta tecnología puede aportar a la reducción de la DBO₅ hasta el 95% según las observaciones de sus respectivos estudios, del 87% en la DQO y del 90% en los SST y SDT. Sin embargo, presentan algunas limitaciones para reducir los niveles de metales pesados como el plomo o el mercurio [118].

Los resultados de las biotecnologías con bacterias y hongos también se constituyen como alternativas que pueden aportar significativamente a la biorremediación de efluentes, con lo cual las vinazas que contienen alta carga orgánica pueden alcanzar reducciones de la DBO₅ y DQO superiores al 95%, con la diferencia con los lodos que los metales pesados logran sintetizarse con mayor nivel de eficiencia, pues en algunos consorcios de bacterias el nivel de mg/L merma en cerca del 20% [41] [26], excepto en el fósforo que debido a las capacidades metabólicas de las bacterias tiende a incrementarse levemente.

Tanto las tecnologías resultantes de las mismas prácticas de producción de azúcar en sus diferentes fases, como las que hacen parte de alternativas de biorremediación se constituyen en procesos con los cuales la actividad industrial azucarera puede contribuir al desarrollo sostenible de los entornos en donde operan, pues al implementarse tales métodos, los cuerpos de agua pueden en primer lugar ser objeto de preservación en cuanto se reduce la demanda del líquido para las etapas productivas; se prolonga la capacidad de resiliencia para recuperarse ante las afectaciones que anteriormente han sufrido en tanto la frecuencia de los vertimientos puede mermarse. En el caso de las de biorremediación, que pueden implementarse una vez se han generado los efluentes, también ayudan que se recuperen las propiedades físico-químicas del agua para devolverla al ambiente sin afectar sustancialmente los suelos y acuíferos subterráneos.

Al respecto, las industrias que incluyen procesos de conservación del medio ambiente, son concebidas como actividades que propenden por el logro de los objetivos de desarrollo de la ONU [30], pues son tecnologías que no solo se enfocan en la preservación de los recursos naturales, sino que pueden aportar al desarrollo económico y social de las comunidades en donde operan.

De igual manera, al ser tecnologías compatibles con los fines económicos de la industria azucarera, contribuyen a que se materialicen acciones de la economía ecológica, es decir, aquellas que pretenden generar bienes y servicios que, si bien utilizan los recursos naturales, los impactos tienden a reducirse en la medida que se incorporan acciones que mitigan o controlan los impactos negativos sin necesidad de suspender la producción y por ende garantiza los retornos a los inversionistas.

Lo anterior permite confirmar entonces que, al interior de la industria azucarera es factible la implementación de tecnologías limpias, las cuales aseguran una sostenibilidad de esta actividad económica y de los recursos hídricos de las zonas de influencia, siendo una contribución al desarrollo en términos económicos, sociales y ambientales de cualquier país o región en donde se incorporen.

Conclusiones

A raíz de los resultados de la investigación conforme a cada uno de los objetivos planteados y siguiendo el primero de los específicos, se concluye que la industria azucarera es una de las actividades antrópicas que más impacta negativamente sobre el medio ambiente y frente al agua que es uno de los principales recursos, los efectos negativos ocurren principalmente en el deterioro y extinción de acuíferos debido al crecimiento de las áreas de cultivos de caña, generando consigo pérdidas en la flora y fauna de los lugares en donde se amplía la frontera agrícola con tales fines.

A lo anterior se suman impactos negativos por contaminación, sobre todo porque los efluentes que no son tratado adecuadamente se caracterizan por altos niveles de DBO₅, DQO, SST, SDT y metales tóxicos, los cuales al ser vertidos modifican las condiciones físico-químicas de los cuerpos de agua y los suelos de las zonas aledañas a los ingenios, cuyos efectos son la eutrofización cuando se trata de contenidos elevados de nutrientes, especialmente fósforo y potasio; así como muerte de especies acuáticas como los peces y aquellos microorganismos que son fundamentales para la función biológica del recurso hídrico y la edafología de los suelos.

Si se consideran los elementos teóricos, de continuarse con estos impactos que tradicionalmente se han generado desde la industria del azúcar, los objetivos de desarrollo en aras de alcanzar la sostenibilidad suponen un riesgo, puesto que, al ampliarse la producción sin tomar acciones tendientes a prevenir, mitigar y controlar los efectos de esta actividad, los cuerpos de agua pueden desaparecer.

No obstante, los resultados que dan respuesta al segundo objetivo específico de la investigación permiten concluir que en la actualidad los ingenios cuentan con múltiples opciones tecnológicas limpias, tanto de reutilización de aguas residuales en sus distintas fases productivas, mecánicas como la incorporación de dispositivos de optimización del agua y la energía, así como aquellas de biorremediación en las que agentes biológicos que están disponibles en los mismos entornos de los

ingenios pueden hacer de la generación de azúcar una producción ambientalmente responsable, al punto que elevan el valor agregado de la cadena.

Las tecnologías en los procesos de producción se identifican según cada fase productiva, donde el uso de las aguas residuales contribuye a fertilizar los suelos, resultando en insumo biodegradable que los cultivos las asimilan para el crecimiento de las plantas de caña. Así mismo, estas mismas aguas pueden servir como aditivos para clarificación de los jugos y del azúcar debido a sus contenidos de nutrientes y elementos químicos que coadyuvan a la cristalización y a su vez al recircular por las tuberías de las calderas aportan al ahorro de energía. Estas tecnologías en los procesos aportan principalmente a la reducción de la demanda de agua y la frecuencia de los vertimientos.

Además, como complemento a las anteriores, se dispone de biotecnologías que se utilizan lodos activados, consorcios de bacterias y hongos que gracias a sus capacidades metabólicas reducen la DBO₅, la DQO, los SST, SDT, pH y metales pesados, con lo cual los efluentes pueden ser significativamente menos nocivos para el ambiente y sobre todo para los cuerpos de agua aledaños. En ese sentido, son tecnologías que pueden articularse a los planteamientos de la economía ecológica que propende por la producción de bienes y servicios con el mínimo impacto sobre el equilibrio natural, pues como lo plantean Castiblanco [31] y Ortega [24], al articularse la economía a la ecología, la sostenibilidad de los recursos naturales se fortalece, puesto que el medio ambiente requiere de prácticas compatibles que aseguren su preservación y conservación.

Con base en la discusión de los hallazgos que corresponden al tercer objetivo específico, puede concluirse que las tecnologías limpias hacen parte de aquellas prácticas industriales que, dependiendo de las condiciones de cada ingenio azucarero, aportan a la conservación de los recursos hídricos de las zonas de influencia, para lo cual sean los métodos que optimizan el consumo de agua o reducen la frecuencia de los vertimientos aportan a mantener una industria amigable con el ambiente. Para ello, estas unidades productivas también cuentan con los beneficios de microorganismos que no son de alto costo para implementarse,

máxime cuando sus resultados en términos de eficiencia para la remoción de DBO₅, DQO, SST, pH, metales pesados y materia orgánica es alta.

Finalmente, como conclusión general, se puede afirmar que los ingenios son industrias que generan contaminación de varias maneras, siendo a través de los efluentes la que mayores impactos nocivos presenta, los cuales pueden mitigarse y en algunos casos controlarse a través de las tecnologías limpias, las cuales resultan en alternativas de bajo costo y altamente eficientes para mejorar los parámetros de las vinazas y aguas residuales.

Recomendaciones

Dado que la industria azucarera es una actividad altamente contaminante, se sugiere implementar las tecnologías limpias que se complementan en cada fase de producción, pues no riñen con los procesos y por el contrario contribuyen a optimizar el consumo de agua, reducir la frecuencia de los vertimientos y ahorran los gastos en términos de energía.

Además, teniendo en cuenta que es inevitable la generación de efluentes, se recomienda la implementación de las tecnologías de biorremediación, las cuales ofrecen una alta efectividad en la remoción de materiales suspendidos, DBO5, DQO y materia orgánica, además de metales pesados que pueden hacer que los vertimientos sean más compatibles con los cuerpos de agua de las zonas aledañas.

Por otra parte, si bien existen consorcios de bacterias que se han descrito en los hallazgos, puede resultar de alto valor científico que los ingenios inviertan en procesos de biorremediación de efluentes a través de los microorganismos autóctonos como los de montaña, principalmente de las rizosferas, que de acuerdo con algunos estudios como los de Arias [139], Rivera [140] y Chaurasia [141] ofrecen alta eficiencia en la corrección de aguas residuales industriales.

Referencias bibliográficas

- [1] C. Aristizábal, «Caracterización físico-química de una vinaza resultante de la producción de alcohol de una industria licorera a partir del aprovechamiento de la caña de azúcar,» *Ingenierías USBMed*, vol. 6, nº 2, pp. 36-41, 2015.
- [2] A. Kolhe, S. Ingale y A. Sarode, «PHysico–chemical analysis of sugar mill effluents,» *Sodh, Samiksha aur Mulyankan International Research Journal*, nº 3, pp. 307-311, 2011.
- [3] A. Bernal, C. Beltrán y A. Márquez, «Producción Más Limpia: una revisión de aspectos generales,» *I3+*, vol. 3, nº 2, pp. 66-85, 2017.
- [4] FAO, *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*, Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019.
- [5] C. De Miguel y M. Tavares, *El desafío de la sostenibilidad ambiental en América Latina y el Caribe*, Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2015.
- [6] A. Nishihara, F. Mele y G. Pérez, *Perfil ambiental de la industria azucarera de la provincia de Tucumán obtenido a partir de la técnica del Análisis del Ciclo de Vida*, Santiago del Estero, Argentina: INTA, 2015.
- [7] L. García, «Crisis ambiental en Colombia. Universidad Central,» 4 marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.ucentral.edu.co/noticentral/crisis-ambiental-colombia>.
- [8] A. Zoratto, «Principales impactos de la caña de azúcar,» de *II Fórum Da Alta Paulista*, Sao Paulo, 2006.
- [9] H. Barbosa, *Diversificação das aplicações do bagaço de cana de açúcar*, João Pessoa, Brasil: Universidade Federal da Paraíba, 2018.
- [10] A. Verardi, A. Blasi, A. Molino, L. Albo y V. Calabro, «Improving the enzymatic hydrolysis of saccharum officinarum L. bagasse by optimizing

- mixing in a stirred tank reactor: Quantitative analysis of biomass conversion.,» *Fuel Processing Technology*, vol. 149, pp. 15-22, 2016.
- [11] M. Montilla, G. Morillo, P. Ramírez y S. Alizo, «Impacto ambiental del Central Azucarero Trujillo, S.A en la población del Municipio Motatán, Estado Trujillo,» *Sapienza Organizacional*, vol. 5, nº 9, pp. 28-158, 2018.
- [12] N. Aguilar, «Diversificación productiva de la industria azucarera ¿Reto tecnológico, económico o social?,» *Mundo Siglo XXI*, vol. 9, nº 18, pp. 53-66, 2016.
- [13] C. Domínguez, H. Bravo y R. Sosa, «Prevención, minimización y control de la contaminación ambiental en un ingenio azucarero de México,» *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 15, nº 4, pp. 549-560, 2015.
- [14] L. Barba-Ho y D. Becerra, «Biodegradabilidad y toxicidad de herbicidas utilizados en el cultivo de caña de azúcar,» *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, nº 10, pp. 11-19, 2011.
- [15] ASOCAÑA, Reporte de sostenibilidad del sector azucarero colombiano 2015-2016, Cali, Colombia: Asociación de Cultivadores de Caña de Colombia, 2016.
- [16] E. Latorre, Empresa y medio ambiente en Colombia, Bogotá: Prisma, 2015.
- [17] S. Ramos y Y. Lorenzo, «Acciones de Producción más Limpia para implementar en la industria azucarera cubana,» *CIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar.*, vol. 51, nº 1, pp. 60-66, 2017.
- [18] F. Ramos, M. Cuéllar y D. Sáez, «El desarrollo tecnológico y social de la industria azucarera. El caso de las biorefinerías,» *Revista Universidad y Sociedad*, vol. 10, nº 5, pp. 295-300, 2018.
- [19] M. Pérez, M. Peña y P. Álvarez, «Agro-industria cañera y uso del agua: análisis crítico en el contexto de la política de agrocombustibles en Colombia,» *Ambiente & Sociedad*, vol. 14, nº 2, pp. 153-177, 2011.
- [20] S. Restrepo y D. Bedoya, El uso del agua en el cultivo de caña de azúcar. una mirada desde la huella hídrica, Cali: Universidad del Valle, 2015.

- [21] V. Zambrano, D. Liens y M. Arias, «Opciones de producción más limpia en línea de producción de la unidad empresarial de base Vinos Bayamo,» *Ciencia en su PC*, nº 2, pp. 44-55, 2016.
- [22] M. Díaz, F. Eng, Y. Herrera y Y. Lorenzo, «El manejo de los residuales líquidos de la industria de azúcar y sus derivados en Cuba, en el contexto de las legislaciones ambientales actuales,» *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 50, nº 3, pp. 59-63, 2016.
- [23] P. Paredes, «Producción más limpia y el manejo de efluentes en plantas de harina y aceite de pescado,» *Industrial Data*, vol. 17, nº 2, pp. 72-80, 2014.
- [24] M. Ortega y M. Rivera, «Indicadores internacionales de Soberanía Alimentaria. Nuevas herramientas para una nueva agricultura,» *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, vol. 14, pp. 53-77, 2010.
- [25] L. Badillo, Construcción y operación de reactor sbr a escala para tratamiento de vinaza proveniente de un ingenio azucarero (Valle del Cauca), Bogotá: Universidad El Bosque, 2019.
- [26] P. Saranraj y D. Stella, «Bioremediation of sugar mill effluent by immobilized bacterial consortium,» *International Journal of Research in Pure and Applied Microbiology*, vol. 2, nº 4, pp. 43-48, 2013.
- [27] W. Tapie, D. Prato y H. Sánchez, «Biodegradación de vinazas de caña de azúcar mediante el hongo de pudrición blanca *Pleurotus ostreatus* en un reactor de lecho empacado,» *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, vol. 19, nº 2, pp. 145-150, 2016.
- [28] T. Miranda, A. Suset, A. Cruz, H. Machado y M. Campos, «El Desarrollo sostenible. Perspectivas y enfoques en una nueva época,» *Pastos y Forrajes*, vol. 30, nº 2, pp. 191-204, 2007.
- [29] F. Himmelstern, La importancia del desarrollo sostenible, Bogotá: La República, 2015.
- [30] ONU, «Objetivos de desarrollo del Milenio. Informe 2015,» septiembre 2015.
[En línea]. Available:

<https://www.undp.org/content/dam/colombia/docs/ODM/undp-co-odsinformedoc-2015.pdf>.

- [31] C. Castiblanco, «La economía ecológica: Una disciplina en busca de un autor,» *Investigación*, vol. 10, nº 3, pp. 7-22, 2007.
- [32] Z. Pereira, «Los diseños de método mixto en la investigación en educación: Una experiencia concreta.,» *Revista Electrónica Educare*, vol. 15, nº 1, pp. 15-29, 2011.
- [33] R. Hernández, C. Fernández y P. Baptista, *Metodología de la investigación*, 5ta edición ed., México: McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A., 2014.
- [34] R. Hernández y C. Mendoza, *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*, México: Editorial Mc Graw Hill Education, 2018.
- [35] K. Petersen, R. Feldt, S. Mujtaba y M. Mattsson, «Systematic Mapping Studies in Software Engineering,» de *12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE)*., Karlskrona, Sweden, 2008.
- [36] Y. De la Hoz, Y. Izquierdo y O. López, «Caracterización y tratamiento de aguas residuales del central azucarero "Manuel Fajardo", para disminuir la contaminación en la fabricación de azúcar,» *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúca*, vol. 51, nº 3, pp. 72-74, 2017.
- [37] M. Rojas, A. Rodríguez, L. González y M. Heydrich, «Influencia de diferentes factores en el crecimiento de bacterias endófitas de caña de azúcar,» *Revista Colombiana de Biotecnología*, vol. 17, nº 2, pp. 140-148, 2015.
- [38] C. Domínguez, H. Bravo y R. Sosa, «Prevención, minimización y control de la contaminación ambiental en un ingenio azucarero de México,» *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 15, nº 4, pp. 549-560, 2014.
- [39] J. Motito, D. Del Toro y O. Rosseaux, «Estudio de las aguas industriales y residuales en la UEB Central Azucarero "Paquito Rosales",» *Tecnología Química*, vol. 34, nº 3, pp. 172-183, 2014.

- [40] J. Vélez, H. Burbano, J. Navia y E. Gómez, «Descomposición de residuos de *Saccharum officinarum* L. y su efecto fertilizante en *RapHanus sativus* L.,» *Revista de Ciencias Agrícolas*, vol. 36, nº 1, pp. 109-119, 2019.
- [41] M. Acmad y M. Kibret, «Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective,» *Journal of King Saud University – Science*, vol. 26, nº 1, pp. 1-20, 2014.
- [42] E. Bonilla, Efectos financieros y ambientales del cambio de sistema de limpieza industrial de la caña de azúcar, de húmedo a seco (2004-2008), Ciudad de Guatemala: Universidad Rafael Landívar, 2015.
- [43] B. Rodríguez, A. Contreras y E. Rosa, «Análisis de alternativas de mejora para la producción de azúcar en la provincia de Cienfuegos,» *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 48, nº 1, pp. 44-53, 2014.
- [44] H. Ortiz, S. Salgado, M. Castelán y S. Córdova, «Perspectivas de la cosecha de la caña de azúcar cruda en México,» *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. Esp, nº 4, pp. 767-773, 2012.
- [45] C. Domínguez, H. Bravo y R. Sosa, «Prevención, minimización y control de la contaminación ambiental en un ingenio azucarero de México,» *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 15, nº 4, pp. 549-560, 2014.
- [46] L. Ortiz, G. Salgado y I. Aranda, «Efectividad de la recuperación de residuos de cosecha de la caña de azúcar con equipo mecánico,» de *Memorias de la XXXIII Convención de la Asociación de Técnicos Azucareros de México (ATAM)*, Veracruz, México, 2011.
- [47] S. Fujii, Y. Kanematsu, Y. Kikuchi y T. Nagakaki, «Effect of bagasse drying on thermal energy storage utilizing zeolite water vapor ad/desorption at a sugar mill,» *Journal of Energy Storage*, vol. 51, pp. 1-11, 2022.
- [48] E. Santana, E. Marcet, E. Martínez, R. Carrillo y M. Marcet, «El jugo de caña de azúcar como aditivo en la reutilización del bagazo de malta,» *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 51, nº 3, pp. 28-34, 2017.

- [49] J. Solís, K. Calleja y M. Durán, «Desarrollo de jarabes fructosados de caña de azúcar a partir del guarapo,» *Tecnología, Ciencia, Educación*, vol. 25, nº 1, pp. 53-62, 2010.
- [50] K. Keruthiga, S. Mohamed, N. Ghandi y K. Muthukumar, «Sugar industry waste-derived anode for enhanced biohydrogen production from rice mill wastewater using artificial pHoto-assisted microbial electrolysis cell,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, nº 39, pp. 20425-20434, 2021.
- [51] L. Prada, A. Chaves y H. García, «Efectos de la presión de evaporación y la variedad de caña en la calidad de la miel,» *Corpoica. Ciencia y Tecnología Agorpecuaria*, vol. 16, nº 2, pp. 153-165, 2015.
- [52] V. Saravanan y K. Valarmathi, «Model based controller design for Melter process in sugar industry,» de *2012 Third International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT 2012)*, 2012.
- [53] D. Pan y C. Ning, «Mechanism Modeling and Nonlinear Model Adaptive-Predictive Control of Multiple Evaporators System in Sugar Mill,» de *2019 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*, 2019.
- [54] E. Molinet, «Chapter 16 - Water in Cane Sugar Mills, Its Uses, Care and Treatment for Boiler Feed,» *Manufacture and Refining of Raw Cane Sugar*, vol. 3, pp. 231-239, 2013.
- [55] D. Vidal, J. Torres y L. González, «Ceniza de bagazo de caña para elaboración de materiales de construcción: estudio preliminar,» *Revista de Física*, vol. 48, nº Especial, pp. 14-23, 2014.
- [56] A. Azzaz, M. Jeguirin, V. Kimigopoulou, C. Doulgeris, M. Goddard y S. G. C. Jellali, «Olive mill wastewater: From a pollutant to green fuels, agricultural and water source and bio-fertilizer – Hydrothermal carbonization,» *Science of The Total Environment*, nº 733, pp. 1-12, 2020.

- [57] C. Gutierrez, G. Mistretta, G. Zamora, F. Peralta, M. Golato, G. Juárez, M. Ruiz, D. Paz y J. Cárdenas, «Contenido de sílice total en cenizas de residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar (RAC) en Tucumán, Argentina,» *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, vol. 95, nº 1, pp. 21-26, 2018.
- [58] F. Ríos, Comportamiento ambiental de tensioactivos comerciales biodegradabilidad, toxicidad y ozonización (tesis doctoral), Granada: Universidad de Granada, 2014.
- [59] J. Velasco, F. Gómez, A. Hernández, J. Salinas y A. Guerrero, «Residuos orgánicos de la agroindustria azucarera: retos y oportunidades,» *Agroproductividad*, vol. 10, nº 11, pp. 99-104, 2017.
- [60] T. Vu, J. LeBlanc y C. Chou, «Clarification of sugarcane juice by ultrafiltration membrane: Toward the direct production of refined cane sugar,» *Journal of Food Engineering*, nº 264, pp. 1-5, 2020.
- [61] J. Silva, ,. P. Torres y C. Madera, «Reutilización de aguas residuales tratadas en la agricultura: una oportunidad para el sector cañero,» *III+3 Investigación, Innovación e Ingeniería*, nº 2, pp. 10-25, 2014.
- [62] J. Chen, Manual del azúcar de caña, México: Limusa. Noriega Editores, 2000.
- [63] O. Triana, T. León, M. Céspedes y A. Cámara, «Caracterización de los residuos de la cosecha de la caña de azúcar almacenados a granel,» *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 48, nº 1, pp. 65-70, 2014.
- [64] F. Deniz, Análisis estadístico de los parámetros DQO, DBO5 y SS de las aguas residuales urbanas en el ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa, Las Palmas, España: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2010.
- [65] M. Palomino, M. Ortegón, T. Rojas, J. Martínez, J. Valderrama, R. Barragán, A. Pérez y H. Luna, «Evaluación del potencial acidogénico para producción de AGV de melaza de la industria azucarera como valorización de este subproducto,» *Revista ION,*, vol. 29, nº 1, pp. 71-80, 2016.

- [66] CONAGUA, Escala de clasificación de calidad del agua: Demanda Química de Oxígeno, México: Comisión Nacional del Agua, 2014.
- [67] M. Almazán, A. Almazán, B. Carreto, E. Hernández, A. Damián y R. Almazán, «Calidad y clasificación de usos del agua en la cuenca baja del río Papagayo, Guerrero, México,» *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, vol. 3, n° 9, pp. 293-305, 2016.
- [68] S. Vannucci, A. Pereira, A. Duarte, M. Alves y F. Almeida, «Agroindustrial best practices that contribute to technical efficiency in Brazilian sugar and ethanol production mills,» *Energy*, vol. 177, n° 15, pp. 397-411, 2019.
- [69] A. Gezae, K. Haigh, P. Vaskan y J. Görgens, «Environmental impact assessment of lignocellulosic lactic acid production: Integrated with existing sugar mills,» *Food and Bioproducts Processing*, vol. 99, pp. 58-70, 2016.
- [70] M. Velázquez y M. Ordorica, «Ácidos, Bases, pH y Soluciones Reguladoras.,» Docplayer, 2009. [En línea]. Available: <https://docplayer.es/18356168-Acidos-bases-pH-y-soluciones-reguladoras-maria-de-la-luz-velazquez-monroy-miguel-angel-ordorica-vargas.html>.
- [71] V. Kumar, R. Valadez, P. Kumar, J. Singh y P. Kumar, «Effects of treated sugar mill effluent and rice straw on substrate properties under milky mushroom (*Calocybe indica* P&C) production: Nutrient utilization and growth kinetics studies,» *Environmental Technology & Innovation*, vol. 19, pp. 1-11, 2020.
- [72] SWRCB, «Folleto informativo de pH. State Water Resources Control Board,» 2013. [En línea]. Available: https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3140sp.pdf.
- [73] K. Valera, Caracterización de las aguas residuales de la industria azucarera Tres Valles, en Honduras, Zamorano, Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, 2016.

- [74] S. Viracucha, Tratamiento biológico de aguas residuales generadas en un ingenio azucarero – con la tecnología de lodos activados, Quito: Universidad Central del Ecuador, 2012.
- [75] SEMARNAT, Calidad del agua en cuerpos superficiales: fosfatos, nitratos y sólidos suspendidos totales, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2008.
- [76] R. Ramalho, Tratamiento de Aguas Residuales, Barcelona, España: Reverte S. A., 2013.
- [77] V. Zúñiga y M. Gandini, «Caracterización ambiental de las vinazas de residuos de caña de azúcar resultantes de la producción de etanol,» *DYNA*, vol. 80, nº 177, pp. 124-131, 2012.
- [78] P. García, Caracterización del agua recirculada y optimización de la dosificación de lechada de cal en el agua residual del Ingenio Risaralda S.A., Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, 2010.
- [79] OMS, Guías para la calidad del agua de consumo humano, Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 2018.
- [80] L. Chang, Y. Rosabal y D. Benítez, «Caracterización preliminar por métodos fisicoquímicos y microbiológicos de aguas residuales de una planta azucarera en época de zafra de Mabay, Cuba,» *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, vol. 17, nº 2, pp. 63-68, 2021.
- [81] A. Perafán, Transformaciones paisajísticas en la zona plana vallecaucana, Salamanca, España: Universidad de Salamanca, 2005.
- [82] E. González, Dinámicas de la agroindustria azucarera en los ríos Atoyac y río Blanco, Veracruz: consecuencias ambientales y territorialidades., México: Universidad Autónoma Metropolitana, 2015.
- [83] A. Zapatta, «Consumo de agua en la agroindustria ecuatoriana,» de *Azúcar Roja Desiertos Verdes*, México, FIAN Internacional - FIAN Suecia - HIC - AL - SAL., 2012, pp. 185-190.

- [84] COHRE, «Monocultivos de eucalipto y caña de azúcar: entre desalojos y otras violaciones a los derechos entre desalojos y otras violaciones a los derechos Nor te, Espirito Santo,» de *Azúcar Roja Desiertos Verdes*, México, FIAN Internacional - FIAN Suecia - HIC - AL - SAL., 2012, pp. 139-142.
- [85] M. Mendonça, «Impacto del monocultivo de caña para la producción etanol,» de *Azúcar Roja Desiertos Verdes*, México, FIAN Internacional - FIAN Suecia - HIC - AL - SAL., 2012, pp. 123-126.
- [86] CVC, Comparación de cobertura de bosques y humedales entre 1957 y 1986 con delimitación de las comunidades naturales críticas en el Valle geográfico del río Cauca., Santiago de Cali: Corporacion Autonoma Regional del Valle del Cauca - Grupo de Gestión Ambiental, Centro de Datos para la Conservación –CDC-, 1990.
- [87] CVC, Humedales, Santiago de Cali: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2012.
- [88] P. Saranraj, «Impact of Sugar Mill Effluent to Environment and Bioremediation: A Review,» *World Applied Sciences Journal*, vol. 30, nº 3, pp. 299-316, 2014.
- [89] M. Rahim y M. Mostafá, «Impact of sugar mills effluent on environment around mills area,» *AIMS Environmental Science*, vol. 8, nº 1, pp. 86-99, 2021.
- [90] A. Qureshi, A. Mahessar, M. Leghari, B. Lashari y F. Mari, «Impact of Releasing Wastewater of Sugar Industries into Drainage System of LBOD, Sindh, Pakistan,» *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 6, nº 5, pp. 381-386, 2015.
- [91] CVC, “Plan de Gestión Ambiental para el Valle del Cauca 1998 - 2002. “Una visión de Futuro”, Santiago de Cali: Corporación Autonoma Regional del Valle del Cauca, 2002.
- [92] Gobernación del Valle del Cauca, Diagnóstico Sector Ambiental, Santiago de Cali: Departamento Administrativo de Planeación, 2020.

- [93] ASAZGUA, ¿Cómo ahorran agua los ingenios azucareros de Guatemala?, Guatemala: Asociación de Azucareros de Guatemala, 2019.
- [94] L. Woltersdorf, S. Liehr y P. Muñeca, «Recolección de agua de lluvia para la horticultura a pequeña escala en Namibia: diseño de variantes de jardines y evaluación de los impactos y la adaptación al cambio climático,» *Water*, vol. 7, n° 4, pp. 1402-1421, 2015.
- [95] K. Thompson, «Trampa o interceptor de grasa,» 22 agosto 2018. [En línea]. Available:
https://www.austintexas.gov/sites/default/files/files/Water/SSD/Pretreatment/wwwssd_iw_greasepres_esp.pdf.
- [96] F. Blake, «The decision to develop aquaculture standards or not?,» *The Organic Standard*, vol. 3, pp. 12-13, 2001.
- [97] AGROBAL, «¿Corrosión y oxidación en el tractor de sembrado en ingenios?,» AgroBal. Innovación en Agricultura, 01 diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://agrobalmexico.com/2021/12/01/la-guia-definitiva-limpieza-y-lavado-de-tu-tractor/>.
- [98] n. Scialabba y c. Hattam, Innovaciones de los agricultores, desarrollo de las comunidades y manejo ecológico en la agricultura orgánica. estudio de caso, Roma: FAO - Agricultura Orgánica, Ambiente y Seguridad Alimentaria, 2003.
- [99] O. Morales, Diseño de un sistema de arado para la preparación del suelo diseño de un sistema de arado para la preparación del suelo, Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada, 2015.
- [100] FARMET, Arado de cincel en la preparación de suelos, Madrid: España, 2017.
- [101] L. Machado, «Impulsar el desarrollo cañero desde las ciencias,» *Periódico Vanguardia*, pp. 2-4, 23 junio 2022.
- [102] «Prácticas agrícolas sostenibles que incrementan los rendimientos de diferentes cultivos en Sancti Spíritus, Cuba,» *Agronomía Costarricense*, vol. 40, n° 2, pp. 117-127, 2016.

- [103] T. P. J. Higa, *Beneficial y Effective Microorganisms for a Sustainable Agriculture and Environment*, Atamai, Japan:: International Nature Farming Venter, 1994.
- [104] E. Díaz, *Uso eficiente del agua en el ingenio*, La Habana: Universidad de La Habana, 2014.
- [105] J. Villa-Font, *Estación depuradora de agua residuales para la industria azucarera con aprovechamiento energético*, Madrid: Universidad de Comillas, 2017.
- [106] CENICANÑA, *Manejo de aguas*, Florida, Colombia: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia, 2019.
- [107] D. Martínez, «Cómo gestionar el condensado contaminado en la industria química,» *Vapor para la Industria*, 31 octubre 2017. [En línea]. Available: <https://vaporparalaindustria.com/gestionar-condensado-contaminado-en-la-industria-quimica/>.
- [108] M. González, I. Alomá, R. Espinosa y E. González, «Tecnologías y sistemas para el manejo de agua y condensados en la producción de azúcar,» *Revista Centro Azúcar*, vol. 42, pp. 72-87, 2015.
- [109] K. Urbaniec, P. Zalewski y J. Kleme, «Applications of process integration methods to retrofit design for Polish sugar factories,» *Sugar Industry/Zuckerindustrie*, vol. 125, nº 4, p. 439–443., 2006.
- [110] A. Báez y M. Benavides, *Propuesta de mejora del sistema de dilución de mieles en el área de cristalización del ingenio azucarero del norte (IANCEM)*, Quito: Universidad Central del Ecuador, 2022.
- [111] K. González, «Uso de la melaza en la alimentación de ovinos,» *Zootecnia, Veterinaria, y Producción Animal*, 21 mayo 2018. [En línea]. Available: <https://zoovetespasion.com/ovinos/alimentacion-de-ovinos/uso-de-la-melaza-en-la-alimentacion-de-ovinos/>.
- [112] J. Oliveros, «Los magnetizadores en la Industria Azucarera Cubana,» *Radio HC Cuba*, 04 abril 2019. [En línea]. Available:

<https://www.radiohc.cu/noticias/nacionales/187608-los-magnetizadores-en-la-industria-azucarera-cubana#:~:text=Los%20magnetizadores%20se%20instalan%20en,de%20Ia%20regi%C3%B3n%20oriental%20del.>

- [113] J. Tristá, R. Vázquez, D. Deas y J. Núñez, Tratamiento magnético de soluciones acuosas, una alternativa eficiente para industrias productoras de azúcar, Santiago de Cuba: Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, 2010.
- [114] Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, Magnetismo aplicado: Imanes y bloqueo, Santiago de Cuba: Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, 2016.
- [115] A. Ingaramo, H. Heluane, M. Colombo, T. Argüello y M. Cesca, «Uso Eficiente del Agua en Ingenios Azucareros,» *Investigación y Desarrollo*, vol. 23, nº 1, pp. 1-16, 2014.
- [116] M. Gil, Procesos de Descontaminación de Aguas, Madrid: Thomson Editores España , 2005.
- [117] Z. Jiang, W. Shuangfei, L. Shiguang, X. Ping y X. Tian, «Kinetics of combined thermal pretreatment and anaerobic digestion of waste activated sludge from sugar and pulp industry,» *Chemical Engineering Journal*, vol. 295, nº 1, pp. 131-138, 2016.
- [118] G. Sela, «Lodos activados. El proceso de lodos activados,» CROPAIA, 2020. [En línea]. Available: <https://cropaia.com/es/>.
- [119] D. Verma, P. Mandal y P. Singh, «Quality and Treatment of Sugar Industry Effluent -A Study,» *Journal of Indian Association for Environmental Management*, vol. 41, nº 1, pp. 1-7, 2021.
- [120] M. Yadav, R. Yadav y V. Gole, «Chapter 7 - Sugar industry wastewater treatment: Current practices and advances,» *Microbial Ecology of Wastewater Treatment Plants*, pp. 151-174, 2021.

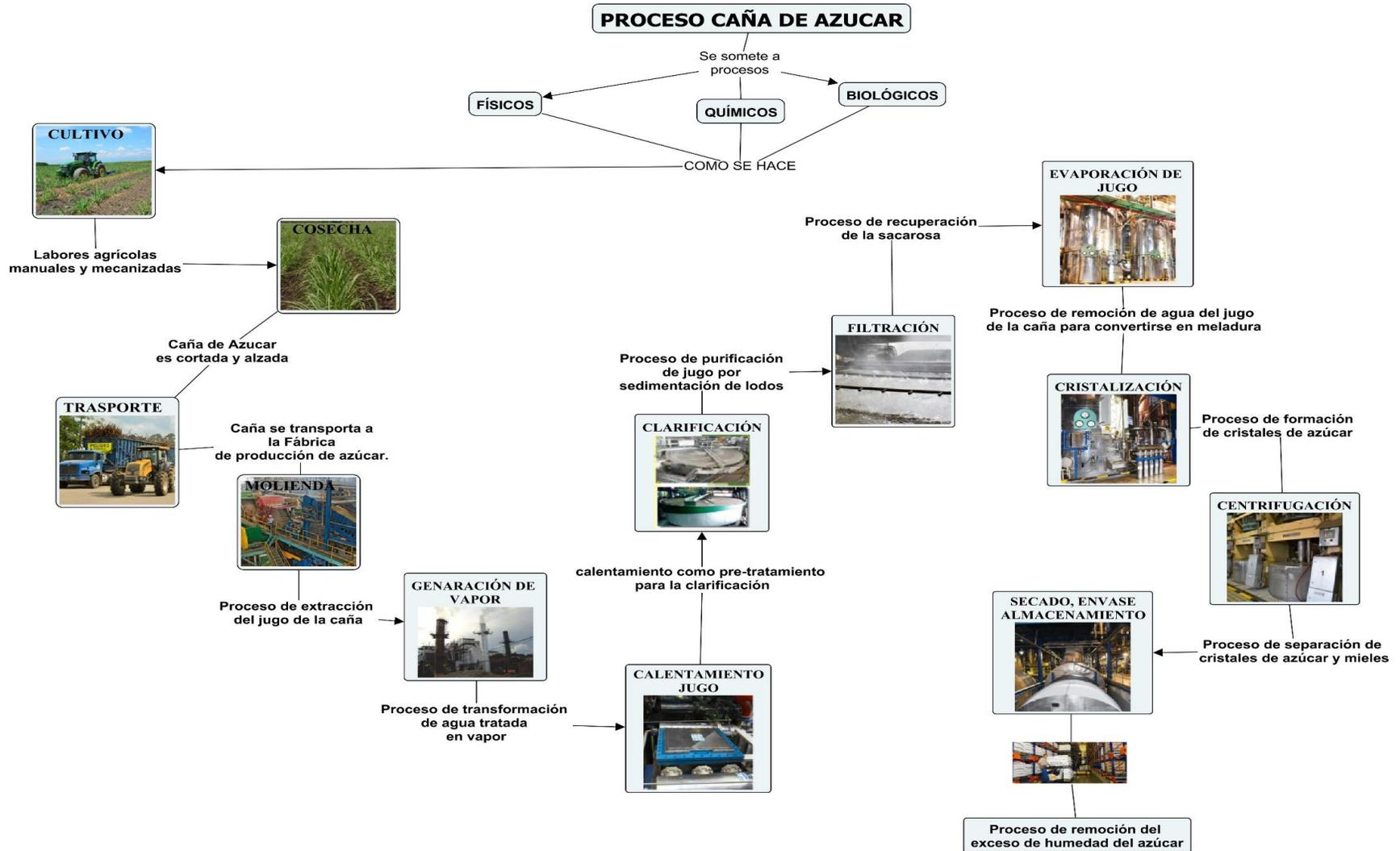
- [121] M. Villarreal, E. Villa, L. Cira, M. Estrada, F. Parra y S. De los Santos, «El género *Bacillus* como agente de control biológico y sus implicaciones en la bioseguridad agrícola,» *Revista mexicana de fitopatología*, vol. 36, nº 1, pp. 95-130, 2018.
- [122] Lifeder, «¿Qué es el *Serratia marcescens*?: *Serratia marcescens*,» Lifeder, 2 marzo 2022. [En línea]. Available: <https://www.lifeder.com/serratia-marcescens/>.
- [123] G. Ruiz, Características microbiológicas y clínico-epidemiológicas de enterobacterias productoras de carbapenemasa oxa-48 en el contexto de un brote hospitalario (tesis de doctorado), Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 2016.
- [124] R. Jagannathan, K. Venkatraman y R. Vasuki, «Bioremediation of sugar mill effluent by immobilized bacterial consortium,» *International Journal Of PHarmacy & Technology*, vol. 6, nº 3, pp. 7107-7114, 2014.
- [125] L. June, «*Pseudomonas fluorescens*,» Blog Ozono21, 19 junio 2014. [En línea]. Available: <https://www.ozono21.com/blog/bacterias/superbacteria-resiste-antibioticos/attachment/pseudomonas-fluorescens/>.
- [126] Y. He, Y. Zhang, T. Li, X. Peng y X. Jia, «High-concentration COD wastewater treatment with simultaneous removal of nitrogen and pHospHorus by a novel *Candida tropicalis* strain: Removal capability and mechanism,» *Environmental Research*, vol. 212, pp. 1-10, 2022.
- [127] P. Kumar, V. Kumar, J. Singh y P. Kumar, «Electrokinetic assisted anaerobic digestion of spent mushroom substrate supplemented with sugar mill wastewater for enhanced biogas production,» *Renewable Energy*, vol. 179, pp. 418-426, 2021.
- [128] P. Lin y Trzcinski, «A review of modified and hybrid anaerobic baffled reactors for industrial wastewater treatment,» *Water Science and Engineering*, vol. 15, nº 3, pp. 247-256, 2022.
- [129] O. Sahu, «Sustainable and clean treatment of industrial wastewater with microbial fuel cell,» *Results in Engineering*, vol. 4, pp. 1-7, 2019.

- [130] R. Pachiega, M. Franco, C. Varella, I. Kimiko, M. Varesche, J. De Oliveira y S. Maintinguer, «Hydrogen bioproduction with anaerobic bacteria consortium from brewery wastewater,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, pp. 155-163, 2019.
- [131] G. Hernández, N. Álvarez y L. Ríos, «Biorremediación de organofosforados por hongos y bacterias en suelos agrícolas: revisión sistemática,» *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, vol. 18, n° 1, pp. 139-159, 2017.
- [132] S. Buvaneswari, S. Damodarkumar y S. Murugesan, «Bioremediation studies on sugar-mill effluent by selected fungal species,» *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, vol. 2, n° 1, pp. 50-58, 2013.
- [133] Lifeder, «Hongos: ¿Qué es el *Aspergillus niger*?», Lifeder, 2 marzo 2022. [En línea]. Available: <https://www.lifeder.com/aspergillus-niger/>.
- [134] S. Sarwar, «Biodegradation Capability of Native Fungi Present in the Effluent of a Local PHarmaceutical Industry near Lahore, Pakistan,» *Journal of Mycology & Mycological Sciences*, vol. 2, n° 1, pp. 1-7, 2019.
- [135] N. Vishnoi y S. Dixit, «Bioremediation: New Prospects for Environmental Cleaning by Fungal Enzymes,» *Recent Advancement in White Biotechnology Through Fungi*, pp. 17-52, 2019.
- [136] M. Mathur y P. Gehlot, «Mechanistic evaluation of bioremediation properties of fungi,» *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*, pp. 267-286, 2021.
- [137] F. Berrocal y M. Muñoz, Control sanitario del cultivo de *Pleurotus ostreatus*., Córdoba, España: Junta de Andalucía - Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera - Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural, 2014.
- [138] O. Cisneros, A. Rivas, J. Díaz y V. Castanedo, Tratamiento de las aguas residuales del Ingenio Casasano en un humedal de flujo intermitente, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2012.

- [139] A. Arias, «Microorganismos eficientes y su beneficio para la agricultura y el medio ambiente.,» *Journal de Ciencia e Ingeniería*, vol. 2, nº 2, pp. 42-45, 2010.
- [140] M. Rivera, «Adaptación y selección de microorganismos autóctonos en medios de cultivos enriquecidos con petróleo crudo,» *Terra latinoamericana*, vol. 20, nº 4, pp. 423-434, 2012.
- [141] A. Chaurasia, B. Meena y A. Tripathi, «Actinomycetes: an unexplored microorganism for plant growth promotion and biocontrol in vegetable crops.,» *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 34, nº 9, pp. 132-146, 2018.
- [142] J. Trujillo, Impacto ambiental de la actividad azucarera y estrategias de mitigación, Veracruz, México: Universidad Veracruzana, 2011.
- [143] T. Romero y D. Vargas, «Uso de microorganismos eficientes para tratar aguas,» *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 38, nº 3, pp. 88-100, 2017.
- [144] I. Rojas, «Elementos para el diseño de técnicas de investigación: una propuesta de definiciones y procedimientos en la investigación científica,» *Tiempo de Educar*, vol. 12, nº 24, pp. 277-297, 2011.
- [145] A. Strauss y J. Corbin, Bases de la investigación cualitativa. Técnicas y procedimientos para desarrollar la teoría fundamentada, Medellín: Editorial Universidad de Antioquia., 2002.
- [146] SISESA, «Torres de enfriamiento SISESA,» Asociación de Técnicos Azucareros de México A.C., 2016. [En línea]. Available: <http://www.atamexico.com.mx/wp-content/uploads/2018/11/11.-F%C3%81BRICA-ELABORACI%C3%93N-XL.pdf>.

Anexos

Anexo 1. Proceso de obtención de la azúcar de caña



Fuente: Incauca. 2021

Anexo 2. Biotecnología de lodos activados para biorremediación de vinazas



Fuente: Noyola [125]

Anexo 3. Biotecnología de bacterias para biorremediación de aguas residuales



Fuente: Saranraj [88]

Anexo 4. Biotecnología de hongos para biorremediación de aguas residuales



Fuente: Saranraj [88]