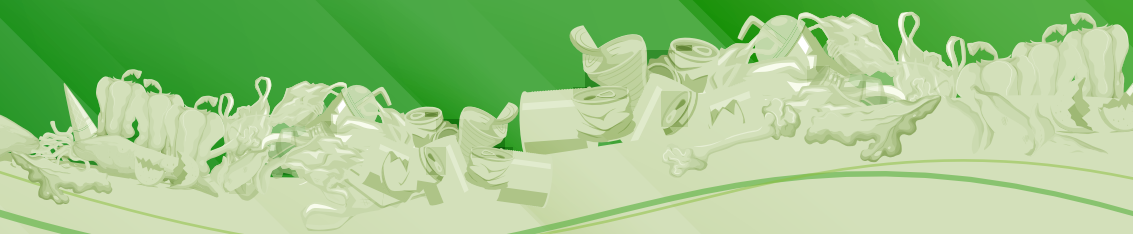


GESTIÓN DE RESIDUOS Y BIOMASA:

Avances en la economía circular



Ocazonez Jiménez, Isabel Cristina Patricia

Gestión de residuos y biomasa : avances en la economía circular / Isabel Cristina Patricia Ocazonez Jiménez [y otros veintidós autores]. -- Bucaramanga (Colombia) : Universidad Santo Tomás, 2020.

173 páginas: ilustraciones, figuras y tablas a color. -- (Colección Contribuciones de Investigación; 7).

Incluye referencias bibliográficas al final de cada capítulo

e-ISBN: 978-958-8477-85-5

Contenido: Elaboración y caracterización fisicoquímica y microbiológica de abonos orgánicos: alternativa para mitigar el efecto contaminante de la gallinaza en la agricultura. -- Análisis exergoambiental del proceso de obtención de aceite Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis*) en Santander, Colombia. -- Análisis cuantitativo de los pretratamientos en la biomasa lignocelulósica para la producción de combustibles avanzados. -- Compostaje una alternativa sostenible para obtención de biosólidos. -- Aceites esenciales como potenciales antimicrobianos orales naturales. Estudios In Vitro. -- Estudio de las propiedades de diferentes aceites residuales de cocina para la producción de biodiésel. -- Conversión de azúcares fermentables presentes en la biomasa lignocelulósica pretratada con peróxido de hidrógeno.

1. Energía biomásica 2. Residuos agrícolas 3. Aceite de maní 4. Abono orgánico 5. Recuperación de aceites usados 6. Aceites vegetales como combustibles 7. Residuos combustibles I. Sandoval Rincón, Mónica Viviana II. Quintero Dallos, Viviana III. Valderrama Ríos, Claudia Marcela IV. González González, Nancy Consuelo V. Rozo Correa, Ciro Eduardo VI. Cervantes Díaz, Martha VII. Alvarado Rueda, Lizeth Johanna VIII. Bayona Ayala, Olga Lucía IX. Candela Soto, Angélica María X. Acevedo Argüello, César Augusto XI. Contreras Gómez, Alix Estela Yusara XII. Monroy Becerra, Joam Eduardo XIII. Ramírez Corredor, Lina Valeria XIV. Cuéllar Rodríguez, Luz Ángela XV. Herrera, Laura Viviana XVI. Laura Valentina Duarte Velandia XVII. Céspedes, Mabel Gricelda XVIII. Parra, Silvia Fernanda XIX. González Herreño, Liz Anyela XX. Ferreira-Beltrán, Deyanira XXI. Plata, Vladimir XXII. Maradei García, María Paola XXIII. Universidad Santo Tomás. Dirección de Investigación e Innovación. XXIV. Serie XXV. Título.

662.87 SDD 23

CO-BuUST

Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación CRAI, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga.

DIRECTIVOS

Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga

Fray Oscar Eduardo GUAYÁN PERDOMO, O.P.

Rector Seccional

Fray Mauricio GALEANO ROJAS, O.P.

Vicerrector Académico

Fray Rubén Darío LÓPEZ GARCÍA, O.P.

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dirección de Investigación e Innovación

PhD Yudy Natalia Flórez Ordóñez

Directora

Hilda Luz González Cabanzo

Ingeniera de Soporte

Departamento de Publicaciones

C.P. Freddy Luis Guerrero Patarroyo

Director

Diseño y producción gráfica

Centro de Diseño e Imagen Institucional - CEDII

Dis. Graf. Olga Lucía Solano Avellaneda

Directora

C.S. María Amalia García Núñez

Corrección de Estilo

Dis. Graf. Jhon Fredy Hoyos Pino

Diseño y diagramación

e-ISBN: 978-958-8477-85-5

Edición

© Universidad Santo Tomás
Bucaramanga, Colombia 2020

Libro

Gestión de residuos y biomasa:

Avances en la economía circular

Autores

Varios

Compilador

Dirección de Investigación e Innovación

Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga

© Derechos reservados

Universidad Santo Tomás

Seccional Bucaramanga, Colombia

Carrera 18 No. 9 - 27

PBX: (57-7) 698 5858

CONTENIDO

Prólogo 11

Elaboración y caracterización fisicoquímica y microbiológica de abonos orgánicos: alternativa para mitigar el efecto contaminante de la gallinaza en la agricultura 17

Isabel Cristina Patricia Ocazonez Jiménez, Mónica Viviana Sandoval Rincón

Análisis exergoambiental del proceso de obtención de aceite Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis*) en Santander, Colombia 39

Viviana Quintero Dallos, Claudia Marcela Valderrama Ríos, Nancy Consuelo González González, Ciro Eduardo Rozo Correa, Martha Cervantes Díaz,

Análisis cuantitativo de los pretratamientos en la biomasa lignocelulósica para la producción de combustibles avanzados 65

Lizeth Johanna Alvarado Rueda, Olga Lucía Bayona Ayala, Angélica María Candela Soto, César Augusto Acevedo Argüello,

Compostaje una alternativa sostenible para obtención de biosólidos 81

Alix Estela Yusara Contreras Gómez, Joam Eduardo Monroy Becerra Lina Valeria Ramírez Corredor, Luz Ángela Cuéllar Rodríguez

**Aceites esenciales como potenciales antimicrobianos
orales naturales. Estudios *In Vitro* 105**

*Martha Cervantes Díaz, Ciro Eduardo Rozo Correa, Laura Viviana Herrera,
Laura Valentina Duarte Velandía, Mabel Gricelda Céspedes, Silvia Fernanda Parra,
Liz Anyela González Herreño*

**Estudio de las propiedades de diferentes aceites residuales
de cocina para la producción de biodiésel 129**

Deyanira Ferreira-Beltrán, Vladimir Plata, María Paola Maradei García,

**Conversión de azúcares fermentables presentes
en la biomasa lignocelulósica pretratada con peróxido
de hidrógeno 151**

*Olga Lucía Bayona Ayala, Lizeth Johanna Alvarado Rueda,
Angélica María Candela Soto*

Lista de figuras

Figura 1. Recolección de residuos vegetales en la plaza de mercado central del municipio de Piedecuesta	20
Figura 2. Selección de los residuos vegetales en la planta piloto	21
Figura 3. Trituración de residuos vegetales.....	21
Figura 4. Preparación de las muestras de abono orgánico	22
Figura 5. Abonos después del proceso de maduración.....	23
Figura 6. Definición de exergía	42
Figura 7. Metodología seguida para el análisis exergoambiental	47
Figura 8. Esquema de producción de la fase industrial	48
Figura 9. Simulación del proceso de extracción de aceite.....	52
Figura 10. Irreversibilidad y eficiencias exergéticas por etapas del proceso	55
Figura 11. Evaluación de puntuación única para categorías de impacto medio.....	57
Figura 12. Evaluación del daño ambiental del proceso de obtención de aceite Sacha Inchi	58
Figura 13. Análisis del tipo de documentos.....	72
Figura 14. Producción anual de publicaciones en el periodo comprendido entre 2006 a 2019.....	72
Figura 15. Producción de los países con cinco publicaciones o más	73
Figura 16. Producción anual de los cinco países con el mayor número de publicaciones	74
Figura 17. Red de colaboración internacional de coautoría entre países.....	74
Figura 18. Coocurrencia de palabras clave	76
Figura 19. Coocurrencia de los términos de biomasa.....	77
Figura 20. Coocurrencia de los términos de pretratamiento de biomasa	77
Figura 21. Comportamiento generación de lodos Colombia.....	83
Figura 22. Relaciones usadas en el experimento compostaje de lodos.....	86
Figura 23. Humedad en lodos crudos, material compostado y biotransformado.....	88
Figura 24. Fósforo en lodos crudos, material compostado y biotransformado	88
Figura 25. Nitrógeno en lodos crudos, material compostado y biotransformado.....	89
Figura 26. Materia orgánica en lodos crudos, material compostado y biotransformado	89
Figura 27. Intercambio catiónico en lodos crudos, material compostado y biotransformado.....	89

Figura 28. PH en lodos crudos, material compostado y biotransformado	90
Figura 29. Conductividad eléctrica en lodos crudos, material compostado y biotransformado	90
Figura 30. Metales pesados As, Cd, Cu, Cr y Hg en lodos crudos	91
Figura 31. Metales pesados Mo, Ni, Pb, Se y Zn en lodos crudos	91
Figura 32. Metales pesados As, Cd y Cu en material compostado	92
Figura 33. Metales pesados Cr, Hg y Mo en material compostado	93
Figura 34. Metales pesados Ni, Pb, Se y Zn en material compostado	93
Figura 35. Metales pesados as, Cd, Cu, Cr y Hg en material biotransformado.....	94
Figura 36. Metales pesados Mo, Ni, Pb, Se y Zn en material biotransformado	95
Figura 37. Crecimiento de la lámina foliar de la lechuga	96
Figura 38. Crecimiento de la raíz de la lechuga.....	96
Figura 39. Mecanismo de acción de compuestos tipo fenólicos presentes en aceites esenciales	112
Figura 40. Métodos de obtención de los aceites esenciales estudiados en este proyecto de investigación.	115
Figura 41. Determinación de la CIM y la CBM de los aceites esenciales bajo estudio.....	118
Figura 42. Compuestos de referencia vancomicina (Sigma-Aldrich, 99,9% de pureza, Saint Louis, EE. UU.); y metronidazol (comercial- purificado en LICB).	119
Figura 43. Determinación de la CBM por el método de siembra en medio sólido con asa calibrada	120
Figura 44. Principales compuestos presentes en el aceite esencial de tomillo (Thymus Vulgaris)	122
Figura 45. Prácticas culinarias utilizadas en los establecimientos visitados (a: criterio para para desechar los aceites residuales, b: tiempo de reuso, c: tiempo de uso, d: temperatura de cocción)	134
Figura 46. Condiciones de almacenamiento de los aceites residuales utilizados en los establecimientos visitados (a: tiempo de almacenamiento, b: tipo de contenedor, c: lugar de almacenamiento, d: separación de los restos de alimentos)	135
Figura 47. Índice de acidez de los aceites residuales por establecimiento. Las barras de error muestran la desviación estándar de las réplicas.....	136
Figura 48. Índice de peróxidos de los aceites residuales por establecimiento. Las barras de error muestran la desviación estándar de las réplicas	137

Figura 49. Contenido de humedad de los aceites residuales por establecimiento. Las barras de error muestran la desviación estándar de las réplicas 137

Figura 50. Viscosidad dinámica de los aceites residuales por establecimiento. Las barras de error muestran la desviación estándar de las réplicas 138

Figura 51. Índice de acidez de los aceites residuales por categoría. Las barras de error muestran los intervalos de diferencia mínima significativa al 95%. Las categorías que tienen letras diferentes son estadísticamente diferentes según la prueba de comparación múltiple LSD..... 139

Figura 52. Índice de peróxidos de los aceites residuales por categoría. Las barras de error muestran los intervalos de diferencia mínima significativa al 95%. Las categorías que tienen letras diferentes son estadísticamente diferentes según la prueba de comparación múltiple lsd..... 140

Figura 53. Contenido de humedad de los aceites residuales por categoría. Las barras de error muestran los intervalos de diferencia mínima significativa al 95%. Las categorías que tienen letras diferentes son estadísticamente diferentes según la prueba de comparación múltiple lsd..... 141

Figura 54. Viscosidad dinámica de los aceites residuales por categoría. Las barras de error muestran los intervalos de diferencia mínima significativa al 95%. Las categorías que tienen letras diferentes son estadísticamente diferentes según la prueba de comparación múltiple lsd..... 142

Figura 55. Índice de acidez de los aceites residuales vs. viscosidad dinámica 143

Figura 56. Índice de peróxidos de los aceites residuales vs. viscosidad dinámica 143

Figura 57. Contenido de humedad de los aceites residuales vs. viscosidad dinámica..... 144

Figura 58. Rendimiento obtenido a partir de la transesterificación en medio básico de los aceites residuales. Las barras de error muestran la desviación estándar de las réplicas 145

Figura 59.Índice de acidez de los aceites residuales vs. rendimiento 145

Figura 60. Viscosidad dinámica de los aceites residuales vs. rendimiento 146

Figura 61. Índice de peróxidos de los aceites residuales vs. rendimiento..... 147

Figura 62. Rendimiento obtenido a partir de la transesterificación en medio básico de los aceites residuales por categoría. Las barras de error muestran los intervalos de diferencia mínima significativa al 95%. Las categorías que tienen letras diferentes son estadísticamente diferentes según la prueba de comparación múltiple LSD.....	147
Figura 63. Diagrama de flujo de trabajo para el desarrollo de la investigación	154
Figura 64. Cultivo de caña de azúcar y almacenamiento de bagazo de caña de azúcar, finca Bore Sur	159
Figura 65. Porcentaje de solubización de biomasa en el pretratamiento y en la hidrólisis enzimática	166
Figura 66. Gramos de glucosa / gramos de biomasa natural a 72h de la hidrólisis enzimática	167
Figura 67. Gráfico de Pareto	168
Figura 68. Superficies de respuesta para la producción de glucosa manteniendo el tamaño de partícula en el punto central	168
Figura 69. Microfotografías sem para análisis morfológico.....	170

Listas de tablas

Tabla 1. Relación de mezclas utilizadas para los abonos preparados.....	22
Tabla 2. Composición nutricional necesaria para los alimentos requeridos en la industria avícola.....	24
Tabla 3. Estimación de la producción de deyecciones de las ponedoras	25
Tabla 4. Relación de tipos de alimentos y la edad de las aves según el balance nutricional necesario para la producción	25
Tabla 5. Caracterización fisicoquímica de diferentes tipos de gallinaza.....	26
Tabla 6. Medicamentos utilizados en la industria avícola colombiana.....	29
Tabla 7. Resultados parámetros fisicoquímicos de los abonos propuestos	30
Tabla 8. Resultados parámetros microbiológicos de los abonos propuestos	31
Tabla 9. Resultados parámetros fisicoquímicos de la gallinaza.....	32
Tabla 10. Resultados parámetros fisicoquímicos de la gallinaza	33
Tabla 11. Variables exergoambientales del proceso.....	46
Tabla 12. Exergía de producto y combustible.....	50
Tabla 13. Asignación de los impactos ambientales a corrientes de exergía del proceso	51
Tabla 14. Resultados de la simulación en aspen plus.....	53
Tabla 15. Exergía de flujo	54
Tabla 16. Inventario para la producción de un litro de aceite de Sacha Inchi.....	56
Tabla 17. Variables exergoambientales del proceso.....	59
Tabla 18. Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en biomasa agrícola	68
Tabla 19. Díez primeras revistas con el mayor número de publicaciones	75
Tabla 20. Parámetros y métodos empleados en caracterización de las muestras	85
Tabla 21. Resultados parámetros microbiológicos en lodos	92
Tabla 22. Resultados parámetros microbiológicos en material compostado	94
Tabla 23. Resultados parámetros microbiológicos en material biotransformado	95
Tabla 24. Dinámica científica general del estudio de la actividad biológica de los aceites esenciales frente patógenos orales. base de datos Scopus (Elsevier, B.V. 2020).	106

Tabla 25. Composición química y propiedades biológicas de los aceites esenciales bajo estudio	113
Tabla 26. Compuestos mayoritarios presentes en los aceites esenciales estudiados	116
Tabla 27. Condiciones de cultivo de microorganismos de <i>Porphyromonas gingivalis</i> y <i>Streptococcus mutans</i>	118
Tabla 28. Actividad antibacteriana de aceites esenciales evaluados en el presente estudio frente a <i>S. Mutans</i> (ATCC 25175) y <i>P. gingivalis</i> (ATCC 33277).....	121
Tabla 29. Condiciones de cocción utilizadas en los establecimientos visitados.....	132
Tabla 30. Propiedades de los aceites residuales en comparación con las propiedades de los aceites vírgenes	138
Tabla 31. Coeficiente de variación del rendimiento obtenido a partir de la transesterificación en medio básico de los aceites residuales por categoría.....	148
Tabla 32. Protocolos NREL.....	154
Tabla 33. Rampa de temperaturas	155
Tabla 34. Resultados contenido de humedad y cenizas.....	160
Tabla 35. Resultados porcentaje de lignina soluble e insoluble celulosa y hemicelulosa	161
Tabla 36. Condiciones de reacción	162
Tabla 37. Remoción de lignina de la biomasa pretratada con peróxido de hidrógeno	163
Tabla 38. Diseño experimental para la hidrólisis enzimática	165

PRÓLOGO

La economía se mueve de manera activa gracias al poder adquisitivo del mercado de los diferentes bienes y servicios que se pueden ofrecer a los clientes potenciales; es decir, un grupo focalizado de personas cuyo objeto es suplir sus necesidades. En un proceso en el que se realice la explotación de los recursos naturales dando paso a la fabricación de productos tangibles, los cuales para llegar al consumidor requieren una serie de etapas comerciales y el producto cumple su ciclo pasando de ser considerado un bien a un desecho. Este proceso da como resultado un movimiento lineal de fabricación-producción y consumo del bien en cuestión, esto se conoce como economía lineal.

La industria ha aumentado su interés por el apropiamiento y la materialización del concepto de producción limpia, concepto que está relacionado con el desarrollo sostenible y la ecoeficiencia. La producción limpia consta de un mejoramiento continuo, control de la calidad y de reingeniería de los procesos. Para lo cual se requiere una revisión de las operaciones de los procesos que forman parte de una actividad productiva o de servicios, con miras a encontrar las diversas posibilidades de mejoramiento u optimización en el uso de los recursos.

La economía circular crea una nueva visión de la industria, debido a que tiene como finalidad integrar economía, sociedad y medio ambiente como un concepto sostenible, tiene como objetivo principal dar un valor agregado a los productos desechados, buscando reducir al mínimo la generación de residuos, de tal forma que su ciclo de vida sea cerrado. La

gestión de residuos industriales es vista como una herramienta útil para combatir y mitigar las problemáticas ambientales, de tal forma que la recolección de residuos y su adecuado aprovechamiento han cobrado una gran importancia, adicionalmente las nuevas tecnologías que apoyan este proceso alcanzan un lucro de los desechos y minimizan el impacto ambiental de las industrias.

Teniendo en cuenta que la gestión de residuos es una alternativa totalmente sostenible y viable dentro del marco de la economía circular, en la Universidad Santo Tomás se han desarrollado investigaciones en el campo del aprovechamiento de los residuos de toda índole, ya sea de origen vegetal o animal, este será el eje central de este libro donde se muestran los resultados obtenidos.

En el primer capítulo “Elaboración y caracterización fisicoquímica y microbiológica de abonos orgánicos: alternativa para mitigar el efecto contaminante de la gallinaza en la agricultura” se detectó que el uso de la gallinaza como única fuente de nutrientes para el cultivo de cebolla larga conlleva una contaminación de suelos y fuentes hídricas, siendo una causa de enfermedades en animales y humanos que consumían el producto cultivado.

Como solución a esta problemática se propuso la elaboración de nuevos abonos obtenidos de residuos orgánicos y gallinaza, residuos vegetales de plazas de mercado local y del mismo cultivo de cebolla larga. La caracterización de estos abonos dio como resultado un abono con mayor contenido de macro y micronutrientes, mayor relación carbono/nitrógeno y menor cantidad de patógenos, para finalmente catalogarse como abono inocuo.

En el segundo capítulo “Análisis exergoambiental del proceso de obtención de aceite de Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis*) en Santander, Colombia” se evidencia cómo a partir de la exergía se lleva a cabo un estudio exergoambiental con el objetivo de identificar el impacto ambiental en el proceso agrícola y comercial del aceite de Sacha Inchi durante todo su ciclo de vida.

Los resultados obtenidos arrojan que solo la tapa del envase es responsable del 57% del impacto ambiental y el cultivo del 32%, debido a su elevado consumo energético en la etapa industrial se tuvo como consecuencia un alto impacto y finalmente la destrucción de exergía. El aprovechamiento de biomasa en diferentes etapas se convierte en una alternativa de valorización del producto.

En el tercer capítulo “Análisis cuantitativo de los pretratamientos en la biomasa lignocelulósica para la producción de combustibles avanzados” se tiene como objetivo conocer la tendencia investigativa del pretratamiento de la biomasa lignocelulósica para obtener biocombustibles, el análisis se limitó entre los años 2006 hasta el 2019 por la base de datos de Scopus.

El procesamiento y estudio de los datos se hizo con respecto a los indicadores de actividad y de relación, como resultado se obtuvo que Estados Unidos es el mejor posicionado con respecto a la investigación en esta área y Latinoamérica solo presenta investigación en Brasil, además se refleja la baja cooperación entre los distintos países a nivel global.

En el capítulo “Compostaje, una alternativa sostenible para obtención de biosólidos” se aborda la problemática de residuos de lodos en las plantas de tratamiento de agua residuales (PTAR) de dos ciudades de Colombia: Bucaramanga y Tunja. Estos lodos representan un problema con alto impacto ambiental debido a su alto contenido de metales pesados y patógenos.

En la investigación se planteó como solución la biotransformación de estos lodos en biosólidos, evaluados bajo las condiciones de crudo y se obtuvo como resultado que las condiciones son favorables para su reincorporación al suelo, ya sea como acondicionador o como remedidor de suelos contaminados. Este proceso representa un avance en el aprovechamiento de los residuos y una reincorporación de estos en el ciclo productivo.

En el quinto capítulo “Aceites esenciales como potenciales antimicrobianos orales naturales. Estudios *in vitro*” se tuvo como objeto de estudio la acción antimicrobiana que ejercían aceites esenciales de Anís (*Pim-*

pinella anisum), Romero (*Rosmarinus officinalis*), Citronela (*Cymbopogon nardus*), Palmarosa (*Cymbopogon martinii*), Tomillo (*Thymus vulgaris*) y Cardamomo (*Elettaria cardamomum*) sobre patógenos bucales que ocasionan caries y enfermedad periodontal.

Los aceites esenciales de las diferentes especies presentaron efecto inhibitorio contra los patógenos evaluados y se tiene en cuenta que son alternativas viables para combatir enfermedades bucales, esto demuestra que el aprovechamiento de los recursos naturales de manera eficiente puede contribuir a los diferentes campos de acción.

En el sexto capítulo “Estudio de las propiedades de diferentes aceites residuales de cocina para la producción de biodiésel” se evalúa el potencial para la producción de biodiésel de diferentes aceites de cocina en diferentes establecimientos gastronómicos, para ello, los aceites se clasificaron de acuerdo con su procedencia y pasaron un proceso de refinación.

Obteniendo que el gran impacto que tiene el proceso de cocción sobre las propiedades de los aceites residuales, especialmente el índice de acidez y el índice de peróxidos. Se encontró que los aceites residuales generados por los restaurantes tradicionales son los más apropiados para la producción de biodiésel mediante transesterificación en medio básico.

Para el séptimo capítulo “Conversión de azúcares fermentables presentes en la biomasa lignocelulósica pretratada con peróxido de hidrógeno” hicieron uso del bagazo de caña de azúcar y hojarasca como biomasa lignocelulósica para evaluar su comportamiento cuando se mezclan estos dos residuos; se le aplicó un pretratamiento oxidativo como peróxido de hidrógeno y así observar los cambios correspondientes; así mismo, la conversión de azúcares fermentables para obtener etanol de segunda generación teniendo en cuenta diferentes variables en el proceso de sacarificación apoyados con un diseño de experimentos.

Se determinó la composición inicial de la mezcla de la biomasa lignocelulósica bagazo de caña de azúcar y hojarasca en proporción (90:10) determinando el contenido de lignina soluble de 10,72% y de lignina insoluble de 22,11%, las cuales están en los rangos reportados

en la literatura. Se estudió la conversión de azúcares fermentables para la producción de etanol de segunda generación a partir de la biomasa lignocelulósica del bagazo de caña de azúcar y hojarasca. El desempeño de la etapa del pretratamiento con peróxido de hidrógeno es un factor clave para el procesamiento de biomasa, aumentando la conversión a azúcares fermentables en la etapa de hidrólisis, ya que se disminuye el porcentaje de lignina, evitando la recalcitrancia de la biomasa lignocelulósica.

Todo el contenido expuesto en este libro demuestra cómo la biomasa lignocelulósica y los aceites de cocina se pueden utilizar para obtener biocombustibles, se puede mejorar el proceso de obtención de aceite de Sacha Inchi mediante un análisis exergoambiental, el compostaje es una alternativa para producir abonos de residuos orgánicos y gallinaza y una opción para la biotransformación de lodos de PTAR en biosólidos y el uso de aceites esenciales como potenciales antimicrobianos orales naturales, todas estas alternativas totalmente efectivas son los pilares y objetivos propuestos en el tema global de la economía circular.

Estas investigaciones son un incentivo para continuar trabajando en temas relacionados con la economía circular, ya que estamos en un mundo que necesita cambios urgentes con motivo del deterioro ambiental que avanza a pasos agigantados, el uso de biomasa y la gestión de residuos se convierten en una alternativa clave para aminorar estas problemáticas ambientales que nos compete a todos.

Ciro Eduardo Rozo Correa

Elaboración y caracterización físicoquímica y microbiológica de abonos orgánicos: alternativa para mitigar el efecto contaminante de la gallinaza en la agricultura

Isabel Cristina Patricia Ocazonez Jiménez,
Facultad de Química Ambiental,
grupo de Investigaciones Ambientales para el Desarrollo Sostenible - GIADS,
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia
Correo electrónico: isabel.ocaciones@ustabuca.edu.co ORCID:

Mónica Viviana Sandoval Rincón,
Facultad de Ingeniería Ambiental,
grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales - GINAM,
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia
Correo electrónico: monica.sandoval@ustabuca.edu.co ORCID:

Introducción

El Distrito de Manejo Integrado (DMI) del Páramo de Berlín se ubica en el complejo de páramos del Almorzadero que hace parte del sistema paramuno Jurisdicciones Santurbán. La importancia de este complejo de páramos reside en que, además de contener relevantes componentes bióticos, se constituye en una fuente de recursos hídricos para el abastecimiento de gran parte de la población de Norte de Santander y del oriente de Santander (Von Humboldt, 2017).

Según la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR), en el DMI del Páramo de Berlín se destinan 5231 hectáreas de suelo para actividades agrícolas, de las cuales 4328 hectáreas son

para cultivos de cebolla. La gallinaza fresca ha sido la principal fuente de fertilización de estos cultivos, generando problemas como altos niveles de proliferación de la mosca doméstica que se incuba en la gallinaza y emisión de malos olores al ambiente (CAS, 2006).

La cebolla (*Allium fistulosum*) llamada comúnmente cebolla rama o junca, ocupa un renglón importante en la producción agrícola de Santander (DANE, 2014.). El principal requerimiento nutricional de la cebolla es el nitrógeno. Entre las fuentes de este elemento, es la gallinaza fresca. Varios problemas se han presentado por la aplicación de gallinaza, entre ellos; toxicidad por sales en las plantas, transmisión al suelo y al agua de virus y bacterias que causan enfermedades en animales y al hombre, presentando un riesgo para la salud (Delgado et al., 2014).

Por otra parte, el uso de la gallinaza como fuente de nitrógeno en el cultivo de cebolla (*Allium fistulosum*) está generando problemas de acumulación de metales pesados en plantas (Orjuela, 2014). Estudios realizados por Montenegro, et al. (2017) indican que la gallinaza cruda tiene un impacto positivo en el rendimiento del cultivo de cebolla y la esporulación de hongos micorrízicos arbusculares (Montenegro et al., 2017). Además, la producción intensiva en la industria avícola ha provocado el uso de antibióticos que previenen y tratan enfermedades infecciosas o promueven el crecimiento animal, sin embargo, la mayoría de estos productos no son absorbidos por completo en el intestino del animal, y por lo tanto, una cantidad considerable se excreta sin alteración alguna (Kumar et al., 2005). El estiércol es reconocido como un importante reservorio de bacterias resistentes a los antibióticos (Jian Qiang Su et al., 2014).

Debido a esta problemática se hace necesario implementar estrategias para disminuir el uso de la gallinaza cruda, con el fin de mitigar los impactos negativos, tanto para el ambiente como para la salud pública. Las enmiendas orgánicas, como los residuos vegetales y estiércoles de aves y bovinos tratados con técnicas de compostaje, representan una alternativa adecuada de fertilización. El uso de estos productos naturales mejora las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, la porosidad, aireación, capacidad de retención de agua, estabilidad estructural y disponibilidad de nutrientes, potencializando la calidad del cultivo (Suwendu et al., 2017).

Teniendo en cuenta lo anterior, este proyecto elabora y analiza abonos orgánicos que sustituyan la gallinaza cruda en cultivos de cebolla (*Allium fistulosum*), se prepararon dos clases de abonos orgánicos, uno mezclando residuos vegetales de plazas de mercado con gallinaza, y el otro mezclando residuos del cultivo de cebolla (*Allium fistulosum*) con gallinaza. Tanto a la gallinaza como a los abonos preparados se les hicieron los respectivos análisis fisicoquímicos y microbiológicos, teniendo en cuenta los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos establecidos en la norma NTC 5167 del 2011. Por otra parte, se realizó una búsqueda bibliográfica de los alimentos y medicamentos veterinarios empleados en la cría de gallinas ponedoras, con el objetivo de analizar su influencia en la calidad de la gallinaza.

Método de elaboración de los abonos orgánicos

Para la realización de los abonos se tuvo en cuenta la metodología probada en la planta piloto de residuos biodegradables del grupo de Investigaciones Ambientales para el Desarrollo Sostenible (GIADS) de la Facultad de Química Ambiental, ubicada en el Campus El Limonal (Ocazonez, 2014). El fundamento de la metodología utilizada en la planta piloto para elaboración de abonos a base de residuos biodegradables se fundamenta en el desarrollo de un proceso de fermentación aerobia con prevención de lixiviados. Los procesos desarrollados para la elaboración de abonos orgánicos en la planta piloto de residuos biodegradables son los siguientes:

Selección de los residuos vegetales en el sitio de origen

Los residuos vegetales fueron adquiridos en la Plaza Central de mercado del municipio de Piedecuesta, mientras que los residuos de cebolla se obtuvieron en las bodegas de la Central de Abastos de Bucaramanga donde se almacena y distribuye este producto. La gallinaza cruda para las mezclas fue obtenida en una bodega donde se comercializa.

Los residuos fueron recogidos en costales desde los puestos de venta de verduras y frutas de la plaza como de la Central de Abastos con el

objetivo de obtener una buena selección. Posteriormente, fueron transportados a la planta piloto de residuos biodegradables de El Limonal, continuando con el proceso. En las actividades de preparación de los abonos participaron estudiantes del espacio académico de Gestión de Residuos Sólidos de la Facultad de Ingeniería Ambiental (figura 1).

Figura 1. *Recolección de residuos vegetales en la plaza de mercado central del municipio de Piedecuesta*



Fuente: Elaboración propia.

Selección y pesaje de los residuos vegetales en la planta piloto

Aun cuando los residuos fueron seleccionados en el sitio de origen, en la planta piloto se hace una segunda selección que consiste en retirar el material no vegetal que pudo haber llegado mezclado con los residuos de interés. Después de seleccionados, los residuos vegetales se pesaron en una balanza de piso con capacidad de 500 kg (figura 2).

Figura 2. Selección de los residuos vegetales en la planta piloto



Fuente: Elaboración propia.

Trituración de residuos vegetales

Una vez los residuos fueron seleccionados y pesados, se hizo el proceso de trituración, utilizando un triturador eléctrico de cuchillas con una capacidad de 500 kg/hora (figura 3).

Figura 3. Trituración de residuos vegetales



Fuente: Elaboración propia.

Preparación de abonos

Una vez finalizada la trituración, se procedió a preparar dos mezclas de abonos orgánicos (llamados de aquí en adelante RV-G y RC-G), según las proporciones descritas en la tabla 1. Estas proporciones fueron planteadas teniendo en cuenta resultados obtenidos en esta planta piloto. La gallinaza fue utilizada como material secante para prevenir la generación de lixiviados y corregir la relación carbono nitrógeno de la mezcla. Esta gallinaza es cruda y corresponde a la caracterizada previamente. La tercera muestra corresponde a gallinaza cruda empleada en las mezclas. En la figura 4 se muestra la preparación de las mezclas.

Tabla 1. *Relación de mezclas utilizadas para los abonos preparados*

Mezclas		Composición
RV-G	60 % Residuos vegetales de plaza de mercado	40 % gallinaza cruda
RC-G	60 % Residuos de cebolla	40 % gallinaza cruda
Gallinaza	Gallinaza cruda	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. *Preparación de las muestras de abono orgánico*



Fuente: Elaboración propia.

Aireación de los abonos

El proceso de aireación o volteo de las mezclas preparadas se realizó una vez por semana durante seis semanas. En la figura 5 se muestran los abonos preparados después de seis semanas de maduración.

Figura 5. *Abonos después del proceso de maduración*



Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Se hizo un análisis bibliográfico de las investigaciones adelantadas sobre la composición nutricional de los alimentos y medicamentos veterinarios utilizados en la industria avícola, y su influencia en la calidad de la gallinaza destinada como enmienda orgánica en cultivos de cebolla (*Allium fistulosum*).

Composición nutricional de los alimentos utilizados en la industria avícola

La industria avícola es reconocida por la producción intensiva de residuos con alto contenido en nutrientes y material orgánico como la gallinaza, que, usada inadecuadamente, sin pretratamiento de compostaje, causa impactos ambientales negativos, por contaminación en suelos, aguas, emisión de olores desagradables, elevadas concentraciones de gases, y proliferación de vectores y microorganismos patógenos (Estrada, 2005).

La revisión bibliográfica demuestra que la gallinaza se utiliza tradicionalmente como abono en el sector agrícola, por lo que resulta imprescindible el análisis de su composición; la cual es influenciada por el tipo de dieta, el consumo de alimento, el sistema de alojamiento de las aves, la edad y la línea (pollos de engorde o gallinas ponedoras) (FENAVI-FONAV, 2000). La composición nutricional se presenta a continuación (tabla 2).

Tabla 2. *Composición nutricional necesaria para los alimentos requeridos en la industria avícola*

Aminoácidos esenciales	Aminoácidos no esenciales	Vitaminas liposolubles	Vitaminas hidrosolubles	Macrominerales	Microminerales
Mitoinina	Alalina	Vitamina A	Tiamina	Calcio	Hierro
Lisina	Aspargina	Vitamina D3	Riboflavina	Fósforo	Cobre
Fenilalanina	Cistina	Vitamina E	Biotina	Magnesio	Manganeso
Arginina	Serina	Vitamina K	Piridoxina	Sodio	Yodo
Histidina	Tirosina		Niacina	Potasio	Cobalto
Isoleucina	Ácido glutámico		Ácido pantoténico	Cloro	Molibdeno
Leucina	Glutamina		Ácido fólico	Azufre	Selenio
Treonina	Glicina		Cianocobalamina		
Triptófano	Prolina		Colina		
Valina	Ácido aspártico				

Fuente: Martínez et al., 2012.

La calidad de la gallinaza también depende: del tipo de alimento, edad de las aves, cantidad de plumas, temperatura ambiente, ventilación y tiempo de permanencia en el galpón. Sin embargo, es importante resaltar que la cantidad de gallinaza producida está relacionada con la producción de las heces, la cual es proporcional a la cantidad de alimento consumido. En la tabla 3 se aprecia una estimación de la producción de deyecciones de las gallinas ponedoras, en la cual se muestra una relación proporcional en la que, a mayor consumo de alimento por día se genera una mayor cantidad de deyecciones diarias.

De acuerdo con la edad de las aves existe un tipo de alimento comercial que tiene la composición nutricional requerida para cada etapa de crecimiento. En la tabla 4 se establece la relación de la edad con el tipo

de alimento requerido por su aporte nutricional, los cuales presentan un balance ideal de energía, proteína, minerales, vitaminas y aminoácidos. De esta manera, se puede inferir que existe una relación estrecha en la calidad del producto avícola (huevo o pollo) y subproducto como la gallinaza, con el tipo de alimento suministrado a las aves.

Tabla 3. *Estimación de la producción de deyecciones de las ponedoras*

Tipo de gallina	Consumo de alimento g/ave/día	Digestibilidad del alimento %	Materia seca deyecciones g/Ave/día
Liviana	100 – 110	75 – 80	20 - 27
Semipesada	110 – 120	75 – 80	22 – 30

Fuente: Estrada, 2005.

Teniendo en cuenta que la gallinaza se utiliza como enmienda orgánica en diferentes tipos de cultivos, es imprescindible conocer su composición, la cual cambia de acuerdo con el momento de recolección, tipo de almacenamiento y proceso de compostaje. La literatura reporta que la gallinaza seca posee una mayor concentración de nutrientes que a su vez dependen del tiempo y rapidez de secado. En la tabla 5 se aprecia la caracterización de diferentes tipos de gallinaza, permitiendo reconocer los criterios ideales para tener en cuenta al momento de utilizar dicho residuo como enmienda orgánica.

Tabla 4. *Relación de tipos de alimentos y la edad de las aves según el balance nutricional necesario para la producción*

Tiempo de suministro	Nombre comercial del alimento	Composición del alimento					
		Proteína %	Grasa %	Fibra %	Humedad %	Calcio %	Fósforo %
1 a 8 semanas de vida	Pollitas	18	2,5	6	13	-	-
9 a 16 semanas de vida	Pollas	14	2,5	8	13	-	-

Tiempo de suministro	Nombre comercial del alimento	Composición del alimento					
		Proteína %	Grasa %	Fibra %	Humedad %	Calcio %	Fósforo %
17 a 18 semanas de vida	Prepostura P-80	18	3	6	13	2,20	0,70
46 semanas hasta finalizar la producción	Ponedoras	15,5	2,5	6	13	3	0,45

Fuente: Solla, 2017.

Tabla 5. Caracterización fisicoquímica de diferentes tipos de gallinaza

Parámetros	Gallinaza de jaula	Gallinaza de piso	Pollinaza
pH	9	8	9,5
Conductividad (Ms/cm)	6,9	1,6	4,1
Humedad (%)	57,8	34,8	25,8
Cenizas (%)	23,7	14	39
Potasio (K ₂ O %)	1,9	0,89	2,1
Carbono orgánico (%)	19,8	24,4	23
Materia orgánica (%)	34,1	42,1	39,6
Nitrógeno (%)	3,2	2,02	2,3
Relación C/N	6,2	12,1	10
Fósforo	7,39	3,6	4,6
Microorganismos	18x10 ⁶ UFC/g		
CIC (meq/100g muestra)	58,2	77	
CIC (meq/100g MO)	226	138	125
Liposolubles	3	0,96	
Retención de agua (ml/g muestra)	1,39	0,86	
Contenido de hidrosolubles (%)	4,1	5,5	
Densidad aparente (g/cc)	0,57	0,27	

Fuente: Estrada, 2005.

Debido a que la utilización de la gallinaza como enmienda orgánica es una prometedora alternativa para la sustitución de productos y fertilizantes químicos tóxicos, actualmente se han identificado problemas relacionados con las aplicaciones de dichas excretas, principalmente por acumulación de trazas de metales en las plantas, suelos y fuentes hídricas, lo que representa un riesgo en la salud pública (Delgado et al., 2010). En las investigaciones reportadas en la literatura se identificaron cantidades de metales pesados como zinc (Zn), cadmio (Cd), cobre (Cu), plomo (Pb) y mercurio (Hg) en residuos avícolas, lo cual representa un potencial riesgo ambiental (Delgado et al., 2014). El Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) mostró que los metales que alcanzaron valores significativos en suelos fueron el zinc (Zn) y cadmio (Cd), los estudios hechos en las partes aéreas de las plantas mostraron que solo el cobre (Cu) y el mercurio (Hg) evidenciaron diferencias significativas, y análisis en organismos del suelo como las lombrices demostraron pequeñas trazas de Cd, Cu, Zn y Hg. Se debe considerar que, la movilidad de un metal no depende solo de su especiación química, sino de una serie de parámetros como pH, materia orgánica, carbonatos, minerales de arcilla, entre otros. En general la movilidad de los metales pesados es muy baja, por lo que se presenta en los primeros centímetros del suelo, siendo lixiviados a los horizontes inferiores del suelo en muy pequeñas cantidades (Galán et al., 2008).

Medicamentos veterinarios presentes en enmiendas orgánicas aplicados en cultivos agrícolas

Los antibióticos se consumen diariamente con el fin de prevenir o tratar infecciones bacterianas o fúngicas en la industria avícola, sin embargo, su uso excesivo contribuye a la veloz expansión de la problemática de resistencia de antibióticos que amenaza la efectividad de los tratamientos convencionales en animales y humanos (Carvalho et al., 2016). Los estudios estiman que el uso mundial de antibióticos es de 100.000 a 200.000 por año y alrededor de un 70% de las ventas totales es para uso veterinario (Bloem et al., 2017). Algunos de los medicamentos veterinarios que se emplean con mayor frecuencia corresponden a las

penicilinas con un (25%), tetraciclinas con un (33%) y sulfonamidas un (11%) (Beatriz, et al., 2018).

Debido a que los antibióticos no se metabolizan por completo en el cuerpo, sin embargo se excretan sin cambio alguno entre un 17% - 90% (Beatriz et al., 2018), se están investigando métodos que ayuden en la disminución del ciclo de vida del medicamento (Nadali et al., 2018). Algunas de las principales rutas de entrada de estos compuestos al suelo y agua comprende la excreción de heces y orina de animales de pastoreo, el uso de agua reciclada para riego, aplicación de estiércol sin composta como enmiendas y fertilizantes del suelo (Carvalho et al., 2016). De esta manera, una vez que se libera un antibiótico al medio ambiente, su comportamiento, destino y persistencia estarán determinados no solo por sus propiedades fisicoquímicas propias (solubilidad en agua, volatilidad, lipofilia y capacidad de absorción), sino también por las propiedades del suelo, tales como pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, entre otros (Beatriz et al., 2018).

Teniendo en cuenta lo mencionado se demuestra la importancia de realizar un previo tratamiento de compostaje a cualquier tipo de enmienda orgánica, que vaya a ser usada para potencializar la producción de un determinado cultivo, pues estudios realizados sugieren que el compostaje puede reducir el ciclo de vida de algunos antibióticos, por lo que consecuentemente se previene la resistencia bacteriana en humanos y animales (Chaoqi et al., 2018).

La tabla 6 detalla algunos medicamentos que son utilizados en la industria avícola, con fines terapéuticos para el tratamiento de enfermedades respiratorias y digestivas. Los resultados obtenidos de dicha consulta evidencian que se utilizan mayoritariamente las quinolonas en un (39,98%), seguidas del grupo inmunológico o vacunas (18,82%), principalmente la vacuna de Newcastle cepa B1 Hitchner (8,24%), el grupo de vitaminas (14,11%), los antiparasitarios (12,94%) y el grupo de los mucorreguladores (1,17%), y se asegura que el 51% de estos medicamentos se manejan fuera del rango terapéutico (Astaíza et al., 2014).

Tabla 6. Medicamentos utilizados en la industria avícola colombiana

	Grupo	%	Principio activo	%
Antibióticos promotores de crecimiento	Quinolonas	39,98	Enrofloxacina	30,58
			Norfloxacina	5,88
			Ciprofloxacina	3,52
			Fluoroquinolona	
	Macrólidos	8,23	Tilosina	3,52
			Timilcosina	5,88
	Fenicoles	2,35	Florfenicol	2,35
			Fosfomicina	
	Tetraciclinas	1,17	Clortetraciclina	
			Oxitetraciclina	1,17
Sulfabenzamida			1,17	
Sulfas		Sulfonamidas		
		Newcastle cepa b1 (Hitchner)	8,24	
		Newcastle cepa La sota	3,53	
		Newcastle B1 y La sota	2,35	
		Gumboro	1,17	
Vacunas	Inmunológico	18,82	Bronquitissero tipo Massachusetts + Newcastle cepa B1 Hitchner	3,53
			Amprolio	3,52
			Internos	9,41
			Externos	3,52
Antiparasitarios			Fenbendazole	3,52
			Levamisole	2,37
Mucorreguladores			Metrifonato	3,52
			Bromhexina	1,17

Fuente: Astaíza et al., 2014.

Caracterización fisicoquímica y microbiológica de la gallinaza y los abonos orgánicos preparados

Caracterización fisicoquímica de los abonos preparados

En la tabla 7 se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos a los abonos preparados, estos análisis se hicieron en el Laboratorio Siana Ltda.

Tabla 7. Resultados parámetros fisicoquímicos de los abonos propuestos

Parámetro	Residuo vegetal con gallinaza (RV-G)	Residuo cebolla con gallinaza (RC-G)
Calcio (%)	4,01	4,52
Carbono orgánico total (%)	29,2	24,6
Fósforo total (%)	1,97	12,13
Magnesio (%)	0,42	0,54
Nitrógeno total (%)	2,03	2,07
Potasio (%)	2,98	2,90
Sodio (%)	0,39	0,42
Relación C/N	14,38	11,88

Fuente: Elaboración propia.

Para que un abono o fertilizante orgánico sea adecuado para su utilización sin causar impactos negativos, deberá cumplir con los límites permisibles de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos establecidos en la norma NTC 5167 del 2011 (ICONTEC, 2011). Dentro de los parámetros fisicoquímicos descritos por esta norma está el carbono orgánico total (mínimo 15%), nitrógeno y potasio totales (declararlos si cada uno es mayor de 1%). Como se puede observar en la tabla 7, el carbono orgánico total en los dos abonos preparados supera el valor mínimo de la

norma (29,2% en RV-G y 14,6% en RC-G), el nitrógeno también (2,03% en RV-G y 2,07% en RC-G) y de igual manera se observa en el potasio (2,98 en RV-G y 2,90 en RC-G).

Caracterización microbiológica de los abonos orgánicos preparados

La norma NTC 5167 del 2011 establece los requisitos microbiológicos que se deben cumplir para productos orgánicos, como abonos o fertilizantes. Los resultados de la caracterización microbiológica de los abonos orgánicos preparados se muestran en la tabla 8. Estos análisis se realizaron en el Laboratorio Siana Ltda.

Tabla 8. Resultados parámetros microbiológicos de los abonos propuestos

PARÁMETRO	RV-G	RC-G	UNIDADES
Recuento de aerobios mesófilos	21x10 ³	42x10 ³	
Coliformes totales	<10	<10	UFC/g de biosólido en base seca
Coliformes fecales	<10	<10	
Escherichia coli	<10	<10	
Salmonella spp	Ausencia	Ausencia	Ausencia o presencia/25g de biosólido en base seca
Recuento de Mohos	11x10 ³	60x10 ²	UFC/g de biosólido en base seca
Recuento de levaduras	<10	<10	

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, la norma NTC 5167 del 2011 establece requisitos microbiológicos que se deben cumplir para productos orgánicos, como abonos o fertilizantes. Entre estos requisitos se encuentran parámetros, como *Salmonella spp* (ausente a 25g) y coliformes totales (<1000 UFCg). De acuerdo con los valores obtenidos se puede observar que, los abonos orgánicos preparados (RV-G y RC-G) cumplen con los límites establecidos en la norma NTC 5167. Dicho de otra forma, el resultado obtenido de coliformes totales y de *Salmonella spp* fue de <10UFCg/

y ausente a 25g/biosólido en base seca, respectivamente (ICONTEC, 2011). Lo que significa que estos abonos pueden considerarse inocuos por contener concentraciones bajas de patógenos.

Caracterización fisicoquímica de la gallinaza utilizada en la preparación de los abonos orgánicos

En la tabla 9 se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos a la gallinaza utilizada para preparar los abonos, estos análisis fueron hechos en el Laboratorio de Investigaciones Ambientales de la Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga, por la Margareth Barón, química ambiental, joven investigadora del proyecto: “Evaluación de la calidad del agua y del suelo afectados por el uso de excretas de gallinas ponedoras (gallinaza) en cultivos de *Allium fistulosum* en el Distrito de Manejo Integrado del Páramo de Berlín, municipio de Tona, Santander”.

Tabla 9. Resultados parámetros fisicoquímicos de la gallinaza

Parámetro	Gallinaza
Calcio (%)	0,0014833
Carbono orgánico total (%)	3,6793
Fósforo total (%)	3,2
Magnesio (%)	0,0059
Nitrógeno total (%)	2,02
Potasio (%)	0,079
Sodio (%)	0,15652
Relación C/N	1,82

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, la NTC 5167 del 2011 (ICONTEC, 2011) presenta los parámetros fisicoquímicos que debe tener un abono o fertilizante orgánico. De acuerdo con los datos registrados en la tabla 9, la gallinaza utilizada en la preparación de los abonos orgánicos no cumple con la concentración mínima de carbono orgánico total

(3,68%), tampoco el potasio (0,079%), mientras que la concentración de nitrógeno supera lo exigido por la norma (2,02%).

Comparando los resultados de las tablas 7 y 9, la concentración de los elementos evaluados fue mayor en los abonos que en la gallinaza utilizada en la preparación a excepción del fósforo, en la gallinaza fue de 3.2% y en los abonos de 1,97 y 2.13%. Se puede afirmar que la mezcla de la gallinaza con residuos vegetales mejora los aportes nutricionales del fertilizante.

Caracterización microbiológica de la gallinaza utilizada en la preparación de los abonos orgánicos

Como se mencionó anteriormente, la norma NTC 5167 del 2011 establece los requisitos microbiológicos que se deben cumplir para productos orgánicos como abonos o fertilizantes. Los resultados de la caracterización microbiológica de la gallinaza utilizada en la preparación de los orgánicos se muestran en la tabla 10. Estos análisis se realizaron en el Laboratorio Siana Ltda.

Tabla 10. *Resultados parámetros fisicoquímicos de la gallinaza*

Parámetro	Gallinaza	Unidades
Recuento de aerobios mesófilos	21X10 ³	
Coliformes totales	96X10 ²	UFC/g de biosólido en base seca
Coliformes fecales	3X10	
Escherichia coli	3X10	
Salmonella spp	Ausencia	Ausencia o presencia/25g de biosólido en base seca
Recuento de Mohos y levaduras	11x10 ³	UFC/g de biosólido en base seca
Recuento de levaduras		

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los datos registrados en la tabla 10, se observa que la gallinaza utilizada en la preparación de los abonos orgánicos supera las concentraciones de coliformes totales y fecales, como la de *Escherichia coli* exigidas por la NTC 5167 del 2011 (*Salmonella* spp, ausente y los coliformes totales y fecales, menor de 1000 UFC/g). Esto significa, que la gallinaza es un fertilizante contaminante y no apto como insumo agrícola.

Conclusiones

La gallinaza utilizada en la preparación de las mezclas presenta una deficiencia en el carbono orgánico total, además, no aporta nutrientes suficientes al suelo y al cultivo de cebolla, como es el caso de los micronutrientes o nutrientes secundarios como el calcio, magnesio y sodio, debido a que los porcentajes presentes son muy bajos. Es necesario un aporte adicional de estos nutrientes, por ser esenciales y de gran importancia para el crecimiento óptimo de las plantas.

Aunque las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de los dos abonos propuestos son adecuadas, el abono orgánico realizado con residuo vegetal y gallinaza (RV-G) es el mejor, ya que presenta aportes significativos en carbono orgánico total (29,2%), relación C/N (14,38), potasio (2,98%) y magnesio (0,42 %). A su vez, presenta valores de nitrógeno y demás parámetros ya mencionados dentro de los rangos permisibles por las normativas NTC 5167 de 2011, lo cual quiere decir que es un abono orgánico apto y rico en nutrientes esenciales para la optimización de los cultivos.

Con objetivo de generar una compensación en los nutrientes del suelo, y potencializar el aporte nutricional suministrado por la gallinaza, se propone la utilización de los abonos orgánicos elaborados (RV-G y/o RC-G) los cuales aportarían un porcentaje mayor en macronutrientes y micronutrientes esenciales para el crecimiento adecuado de la cebolla (*Allium fistulosum*). A su vez, se aprovechan los residuos vegetales del cultivo y residenciales aplicando principios de economía circular. Además, disminuye el impacto negativo ambiental y de salud pública causado por el contenido de patógenos en la gallinaza.

De manera general, se puede concluir que es posible preparar un fertilizante orgánico libre de patógenos con el contenido de nutrientes igual o mejor que la gallinaza fresca, que pueda sustituir su uso en cultivos de cebolla (*Allium fistulosum*), contribuyendo a disminuir la contaminación microbiológica en el suelo, las fuentes hídricas y los alimentos. Así mismo, el uso de fertilizantes orgánicos preparados por mezcla de residuos de cosecha, otros residuos vegetales y gallinaza fresca por la vía de descomposición aerobia, ayudaría a reducir el almacenamiento de residuos de cosecha convertidos en sitios de contaminación y proliferación de agentes patógenos en las zonas de cultivo.

Referencias

- Alberto, J., Herrán, F., Raudel, R., Torres, S., Enrique, G., Martínez, R., Ximhai, R. (2008). *Importancia de los abonos orgánicos*, 4, 57-67. Universidad Autónoma Indígena de México. [http://www.uaim.edu.mx/webraximhai/Ej-10articulosPDF/Art\[1\]%204%20Abonos.pdf](http://www.uaim.edu.mx/webraximhai/Ej-10articulosPDF/Art[1]%204%20Abonos.pdf)
- Astaíza, J. M. et al. (2014). Diagnóstico de los principales antibióticos recomendados para pollo de engorde (broiler) por los centros agropecuarios del municipio de Pasto, Nariño, Colombia. *Revista Médica Veterinaria*, pp. 99-110.
- Beatriz, J. L., et al. (2018). Persistence and availability of veterinary antibiotics in soil and soil-manure systems. *Science of the total Environment*, 2018, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.314>.
- Bloem, E. A. et al. (2017). Contamination of organic nutrient sources with potentially toxic elements, antibiotics and pathogen microorganisms in relation to P fertilizer a review. *Science of The Total Environment*, 607, 225-242. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.274>
- Buol, S. W., Hole, F. D. y McCracken, R. J. (1973). *Soil Genesis and Classification* (1a. ed.). Ames, IA: Iowa State University Press. ISBN 978-0-8138-1460-5.
- Calidad Microbiológica. (2016). Análisis microbiológico. Coliformes fecales. http://www.calidadmicrobiologica.com.co/index.php?option=com_content&view=article&id=24&Itemid=246
- Carvalho, I. S. et al. (2016). Antibiotics in the aquatic environments: a review of the European scenario. *Environment International*, 94, 736-757. <https://doi.org/10.1016/j.envint>.
- Castelló, J. A. (2000). La gallinaza. En *Selecciones Avícolas*, pp. 5-35.

- Corporación Autónoma Regional de Santander - CAS. (2006). *Caracterización y diagnóstico del páramo de Almorzadero*. CAS.
- Chaoqi, P. R. et al. (2018). Effect of composting and soil type on dissipation of veterinary antibiotics in land-applied manures. *Chemosphere* 196, 270-279.
- DANE. (2014). *Estadísticas agropecuarias. Encuesta Nacional Agropecuaria*. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/2014/presentacion_ena_2014
- Delgado, M. J. et al. (2010). Phytotoxicity of uncomposted and composted poultry manure. *AJP African Journal of Plant Science*, pp. 154-162.
- Delgado, A.M., Miralles, H.R., Peralla, F.A. y Almestre, R.C. (2014). Heavy metal concentration in soil, plant, earth worm and leachate from poultry manure applied to agricultural land in Spain. *Rev. int. contam-Ambio*, 30(1), 45-50.
- Delgado, M. (2014). *Heavy metals concentration in soil, plant, earth worm and leachate from poultry manure applied to agricultural land*. Instituto nacional de investigación y tecnología agraria y alimentaria. Madrid, España.
- Delgado, M., Miralles, R., Alonso, F., Rodríguez, C. y Martín, J. (2014). Heavy metals concentration in soil, plant, earthworm and leachate from poultry manure applied to agricultural land. Universidad Autónoma de Méjico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(1), 43-50.
- Duque, C.O. (2014). *Industria avícola: impacto ambiental y aprovechamiento de los residuos*. Corpoica y CEISA.
- Efsa, H. et al. (2016). *The European Union summary report on antimicrobial resistance in zoonotic and indicator bacteria from humans, animals and food in* (pp. 1-207).
- Estrada, M. M. (2005). Manejo y procesamiento de la gallinaza. *Revista La Sallista de Investigación*, 2(1), 43-48. <https://www.redalyc.org/pdf/695/69520108.pdf>
- FAO. (2008). *Gestión de residuos de aves de corral en los países en desarrollo*. <http://www.fao.org/3/al716s/al716s00.pdf>
- FENAVI- FONAV. (2000). Producción de compost en la industria avícola. *Cuadernos Avícolas 11*. Grupo interdisciplinario de estudios moleculares GIEM. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Universidad de Antioquia.
- Fuente, B., et al. (2012). Respuesta productiva de gallinas a dietas con diferentes niveles de proteína. *Archivos de medicina veterinaria*, 44(1), 67-74. <https://dx.doi.org/10.4067/S0301-732X2012000100010>.

- Gómez, T., González, M., & Chiroles, S. (2004). Microorganismos presentes en el compost. Importancia de su control sanitario. *Medio Ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente*.
- ICONTEC. (2011). NTC 5167. <https://ecollection-icontec-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/normavw.aspx?ID=4372>
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. (2017). *Atlas de Páramos de Colombia*.
- Intagri. (2017). La gallinaza como fertilizante. *Ciencia e Investigación Agraria, 1* (Nutrición Vegetal), 3. <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/gallinaza-como-fertilizante>
- Ocazonez, I. (2014). Disminución del tiempo de compostaje de residuos de poda de árboles para la elaboración de abonos empleados en pastizales. *Informe Final de Investigación*. Universidad Santo Tomás, Facultad de Química Ambiental, Bucaramanga.
- Jaramillo, C. (2016). *Mineralización de la gallinaza y de los restos de cosecha en el suelo. Aplicación al cultivo de la coliflor en la Huerta de Valencia*. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Producción Vegetal.
- Jian Qiang Su, J. et al. (2014). Functional metagenomic characterization of antibiotic resistance genes in agricultural soils from China. *Environment International, 65*, 9-15.
- Kumar, K. et al. (2005). Antibiotic Use in Agriculture and Its Impact on the Terrestrial Environment. *Advances in Agronomy, 87*, 1-54.
- Laich, F. (2011). *El papel de los microorganismos en el proceso del compostaje*. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias. <https://www.icia.es/biomusa/en/jornadas-y-actividades/jornada-tecnica-sobre-calidad-y-fertilidad/65-el-papel-de-los-microorganismos-en-el-proceso-de-compostaje/file>
- Marín, A., Albarrán, J. G., Fuenmayor, F., & Perdomo, D. (2009). Evaluation of the growing regulator effect on the in vitro regeneration of five cassava cultivars (*Manihot esculenta* Crantz). *Revista Científica UDO Agrícola, 9*(3), 556-562. <http://www.bioline.org.br/request?cg09110>
- Montenegro, S., Posada, S. y Barrera, S. (2017). Efecto de la gallinaza sobre *Azotobacter* sp., *Azospirillum* sp. y hongos micorrízicos arbusculares en un cultivo de cebolla (*Allium fistulosum*). *Entramado, 13*(2), 250-257.
- Nadali, A., et al. (2018). Attenuation of tetracyclines during chicken manure and bagasse cocomposting: Degradation, kinetics, and artificial neural network modeling. *Journal of Environmental Management, 1203-1210*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.003>.

- Orjuela, C. Y. (2014). Propuesta del Plan de Manejo Ambiental para la Avícola Acapulco ubicada en el municipio San Antonio del Tequendama, departamento de Cundinamarca, Colombia (pp. 1-19). Universidad Militar Nueva Granada.
- Pareja, M. M. (2005). Manejo y procesamiento de la gallinaza. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1). <https://web-b-ebshost-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/ehost/detail/detail?vid=8&sid=49cec3e1-bda2-4a3d-b7d4-102aa3fec39%40pdc-v->
- Reyes, Y.C., Vergara, I., Torres, O.E., Díaz, M., y González, E.E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66-77. <http://www.monmeros.com/descargas/dpmanualfertilizacion.pdf>
- Solla. (2017). *Manual de manejo ponedoras para huevo comercial* (pp. 1-13). Solla S.A.
- Suwendu D, et al. (2017). Composted Cattle Manure Increases Microbial Activity and Soil Fertility More Than Composted Swine Manure in a Submerged Rice Paddy. *Front. Microbiol.* (pp. 1702-1710).
- Toro, F. (2018). *Ficha técnica sanitizado. Sistema integral de gestión avial. Nutrición vegetal.* https://s3.amazonaws.com/croper/products/data_sheet_fs/000/005/667/original/Ficha_Técnica_Sanitizado.pdf?1556641968
- Universidad de Extremadura. (2006). *Edafología, ciencias ambientales.* Facultad de Ciencias. <http://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/ECAP/ECAL6MHongos.htm>
- Yalcin, H., y Kavuncuoglu, H. (2014). Physical, Chemical and Bioactive Properties of Onion (*Allium Cepa* L.) Seed and Seed Oil. *Journal of Applied Botany and Food Quality* 87, 87-92.
- Yate, D. M. F., y Segura, A. V. Y. (2017). Alternativas de aprovechamiento para los excrementos de las granjas avícolas ubicadas en el municipio de Fómeque Cundinamarca. *Documentos de Trabajo ECAPMA*, (2). <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/workpaper/article/view/1815/2022>

Análisis exergoambiental del proceso de obtención de aceite Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis*) en Santander, Colombia

Viviana Quintero Dallos,
grupo de Investigación Ambiental - GIA, Universidad Mariana, Pasto, Nariño.
Correo electrónico: viquintero@umariana.edu.co

Claudia Marcela Valderrama Ríos,
*Laboratorio de Espectroscopía Atómica y Molecular, LEAM,
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia*
Correo electrónico: claudia2158086@correo.uis.edu.co

Nancy Consuelo González González,
*Facultad de Química Ambiental,
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia*
Correo electrónico: nancy.gonzalez01@ustabuca.edu.co

Ciro Eduardo Rozo Correa,
*Facultad de Química Ambiental,
grupo de Investigaciones Ambientales para el Desarrollo Sostenible -
GIADS, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia*
Correo electrónico: ciro.rozo@ustabuca.edu.co

Martha Cervantes Díaz,
*Facultad de Química Ambiental,
grupo de Investigaciones Ambientales para el Desarrollo Sostenible -
GIADS, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia*
Correo electrónico: martha.cervantes@ustabuca.edu.co

Introducción

En la actualidad el aceite de Sacha Inchi constituye un producto potencial para la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica, debido a su alto contenido de ácidos grasos de poliinsaturados (PUFA), los cuales representan cerca del 85% del peso total del fruto, de acuerdo con lo reportado por Fanali et al. (2011) y la presencia de compuestos bioactivos, tales como tocoferoles, carotenos, compuestos polifenólicos y fitoesteroles (Chirinos et al., 2013). Dicho aceite es obtenido de la planta oleaginosa Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis*) conocida también “Maní forestal”, la cual se caracteriza por ser planta anual trepadora y sus frutos capsulares. La *Plukenetia volubilis* Linneo se encuentra naturalmente en regiones de clima de selva tropical en América del sur. Este ecotipo se cultiva fácilmente entre los 30 y 2110 m.s.n.m. a temperaturas entre 10 a 36 °C (Bueno et al., 2018). Sus frutos están formados por cuatro cápsulas dehiscentes, donde se encuentran las semillas que son de color marrón oscuro, ovaladas y con un diámetro de 1,5 a 2 centímetros (Kodahl, 2020).

A nivel mundial, la transformación y exportación de Sacha Inchi está liderada por Perú, que en el 2017 exportó US\$2.028.620 de aceite y su principal comprador fue Corea del Sur, con una participación en el mercado del 61% (Comtrade, 2018). Por otro lado, es importante resaltar que el mercado de esta planta no solo se direcciona al aceite, también se comercializan productos de valor agregado como proteínas, *snacks*, cápsulas que provienen de corrientes intermedias del proceso, los cuales corresponden al 78% de las exportaciones registradas para Perú. En Colombia, este cultivo constituye una estrategia para la mitigación de cultivos ilícitos, debido a sus cortos periodos de producción (8 meses), y su alta rentabilidad económica (Revista Dinero, 2019). En el 2018, en Colombia se cosecharon 2419 toneladas de fruto Sacha Inchi en 760 hectáreas, los departamentos con mayor participación: Caquetá 37%, Valle del Cauca 20% y Putumayo 18% (Gómez y Montaña, 2019). A nivel comercial, se cuantificaron cerca de 290 toneladas de aceite, las cuales fueron producidas por 25 empresas, de acuerdo con datos suministrados de la Cooperativa Sacha Colombia, bajo la configuración tecnológica de prensado en frío (Sacha Colombia, 2018), la cual no requiere el uso de solventes, entregando un aceite con propiedades óptimas para el consumo

humano y con menor impacto ambiental. Sin embargo, los esquemas de proceso existentes muestran la necesidad de diversificar la canasta de productos y valorizar las corrientes intermedias conocidas como residuos para mejorar su productividad económica y la disminución de impacto ambiental.

El objetivo de este trabajo fue realizar un ejercicio de ingeniería, conducente a identificar las ineficiencias e impactos ambientales del proceso de obtención de aceite de Sacha Inchi a partir de la evaluación exergoambiental, la cual constituye una herramienta de análisis de exergía de todo el ciclo de vida completo, lo que permite lograr una mejor gestión de recursos, al considerar los impactos ambientales por emisiones de residuos, consumo de recursos naturales y destrucción de exergía del sistema de estudio (Salehi, Mahmoudi, Bazargan y McKay, 2018). Se consideran los siguientes conceptos:

Análisis exergoambiental

El análisis exergoambiental es la aplicación de un método basado en la exergía que evalúa el rendimiento ambiental y el potencial de mejora de los procesos desde el punto de vista termodinámico y ambiental. La comprensión de la relación entre la exergía y el ambiente consiste en un análisis exergético, una evaluación del ciclo de vida del impacto ambiental y una evaluación exergoambiental (Morozyuk, Tsatsaronis y Koroneos, 2016).

Análisis exergético

El concepto de exergía es definido como “el trabajo útil máximo que se puede extraer de un sistema a medida que se equilibra reversiblemente con su entorno (sistema de referencia)” (Dincer, Rosen y Al-Zareer, 2018). La interacción de exergía entre un sistema S y su ambiente de referencia R, se puede llevar a cabo por medio de flujo, calor y trabajo como se describe en la figura 6.

Figura 6. Definición de exergía

Fuente: Definición de exergía. Adaptado de Quintero (2018).

La exergía de flujo Ex se define como la suma de los términos del componente físico Ex_{ph} y químico Ex_{ch} (ecuación 1); el componente físico se relaciona con la diferencia entre las condiciones de un sistema con el ambiente de referencia y el componente químico con la interacción y el cambio de la materia del sistema, como se aprecia en las ecuaciones 2 y 3, respectivamente.

$$Ex = Ex_{ph} + Ex_{ch} \quad (1)$$

$$Ex_{ph} = m \sum_i \left(f m_i ((h - h_0) - T_0(s - s_0)) \right) \quad (2)$$

$$Ex_{ch} = n \sum_i (x_i E_{ch}^* + RT_0 x_i \ln(x_i)) \quad (3)$$

Donde

n: flujo molar de la corriente

m: flujo másico de la corriente

x_i : fracción molar del componente i en la corriente

f_{m_i} : fracción másica del componente i en la corriente

Ech^* : Exergía química específica de cada componente

T_0 : Temperatura del estado de referencia

h : entalpía del componente i

h_0 : entalpía del componente i a las condiciones de referencia

s : entropía del componente i

s_0 : entropía del componente i a las condiciones de referencia.

En relación con las demás transferencias de exergía de flujo como la de trabajo Ex_W , asociada con la cantidad de trabajo útil que puede tomarse de una corriente eléctrica suministrada a equipos como motores y otros equipos accionadores que transmitan energía a las sustancias y la de calor Ex_Q , definida como el máximo trabajo que puede obtenerse del calor Q transmitido a las mismas temperaturas a las que se encuentra el sistema durante el proceso, son descritas en las ecuaciones 4 y 5, respectivamente (Dincer y Ronsen, 2013).

$$Ex_W = \dot{W} \quad (4)$$

$$Ex_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) * Q \quad (5)$$

Siendo $\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$ la eficiencia de Carnot

Q: El calor transferido

T: Temperatura de la masa de control

T₀: Temperatura del estado de referencia

Dadas las interacciones de flujo de exergía de entrada (in) y salida (out) del sistema con las fronteras de este, permite visualizar la calidad de la energía intercambiada y la capacidad de los sistemas para realizar trabajo útil, de esta manera, evaluar las ubicaciones y magnitudes de las

destrucciones de exergía de cada etapa del sistema E_D , según lo indica la ecuación 6 (Dincer y Ronsen, 2013b).

$$E_D = \sum_j (1 - \frac{T_o}{T_j}) Q_j - (\dot{W}) + \sum_k Ex_{in} - \sum_l Ex_{out} \quad (6)$$

Se debe agregar que el análisis de exergía requiere la clasificación de los flujos de exergía de producto $\dot{E}_{P,k}$ como la de combustible $\dot{E}_{F,k}$ para cada etapa del sistema, de acuerdo con lo propuesto por Morozuyuk, Tsatsaronis y Koroneos (2016), además, la estimación de la variable exergética, eficiencia exergética, como parámetro de desempeño, como lo indica la ecuación 7.

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (7)$$

Análisis ambiental

El análisis ambiental se lleva a cabo mediante una evaluación de ciclo de vida, en la que se realiza la identificación y evaluación de los impactos ambientales de los flujos de entrada y salida del proceso. El análisis de ciclo de vida comprende 4 fases secuenciales, como lo establece la norma ISO 14040 (2006):

1. **Objetivos y alcance del estudio:** En esta fase se expone la finalidad por la que se desarrolla el estudio y se establece el alcance donde se define la amplitud, profundidad y el detalle de este.
2. **Análisis del inventario.** Una vez definida la primera fase, se hace el inventario de los flujos elementales que constituye el consumo de recursos naturales y energía, así como el de emisiones con base en un volumen o unidad de masa.
3. **Análisis del impacto.** En esta tercera parte, se relacionan las entradas y salidas seleccionadas en el inventario con los posibles impactos sobre el medio ambiente, la salud humana y la disponibilidad de recursos naturales, con el fin de clasificar, caracterizar y valorar la importancia de los impactos ambientales potenciales que se generan en el proceso, los cuales pueden ser expresados

en unidades globales (ecopuntos), utilizando la normalización de los datos. En esta fase, se emplea un método de evaluación para la transformación de los datos del inventario en resultados de carácter ambiental. Entre los métodos de evaluación con mayor aplicación para la estimación de impactos de suelo, procesos agrícolas, transporte y edificios se encuentra EDIP 2003, Impact (2002)+ y TRACI (Morozyuk et al., 2016).

4. Interpretación: El estudio termina con la combinación de la segunda y tercera fase, con el propósito de extraer las conclusiones y recomendaciones de acuerdo con su objetivo.

Adicionalmente, es necesario incluir el balance de impactos ambientales a nivel de etapas, con la finalidad de conocer los impactos relacionados con las corrientes de procesos intermedios. El balance considera que la suma de la tasa de impactos ambientales del flujo de entrada $\dot{B}_{j,k,in}$ es igual a la asociada con los flujos de salida $\dot{B}_{j,k,out}$ en las etapas del proceso, como lo describe la ecuación 8. El modelo ambiental introduce también el uso de ecuaciones auxiliares por etapa, obtenidas mediante los principios P y F, indicados por Lazzaretto e Tsatsaronis (citado por Yürüsoy y Keçebaş, 2017).

$$\sum_{j=1}^n \dot{B}_{j,k,in} = \sum_{j=1}^n \dot{B}_{j,k,out} \quad (8)$$

Evaluación exergoambiental

Una vez realizado el análisis exergético y ambiental, de forma individual es necesario definir las variables exergoambientales con el propósito de evaluar el rendimiento ambiental del proceso. Meyer et al. (2009) definen cinco variables exergoambientales asociadas a los impactos ambientales de las corrientes de exergía de cada etapa del proceso. En la tabla 11 se presenta la definición de las variables exergoambientales, según lo indican las ecuaciones (9)-(13).

Tabla 11. Variables exergoambientales del proceso

Variable	Fórmula	Definición
Tasa del impacto ambiental de la corriente j	$\dot{B}_j = b_j \dot{E}_j$ (9)	Definida como el producto del impacto ambiental específico de la corriente b_j (mPts/unidad de exergía) y la exergía de flujo \dot{E}_j .
Impacto ambiental específico de combustible	$b_{F,k} = \frac{\dot{B}_{F,k}}{\dot{E}_{F,k}}$ (10)	Relación entre la tasa de impacto ambiental del combustible y la exergía de combustible.
Impacto ambiental específico de producto	$b_{P,k} = \frac{\dot{B}_{P,k}}{\dot{E}_{P,k}}$ (11)	Relación entre la tasa de impacto ambiental del producto y la exergía de producto.
Tasa de impacto ambiental asociada con la destrucción de exergía	$\dot{B}_{D,k} = b_{F,k} * \dot{E}_{D,k}$ (12)	Asociada como el producto del impacto ambiental específico del combustible y la exergía destruida.
Diferencia relativa de impacto ambiental específico	$r_{b,k} = \frac{b_{P,k} - b_{F,k}}{b_{F,k}}$ (13)	Definida como la relación entre la diferencia de los impactos ambientales específicos de producto-combustible y el de combustible.

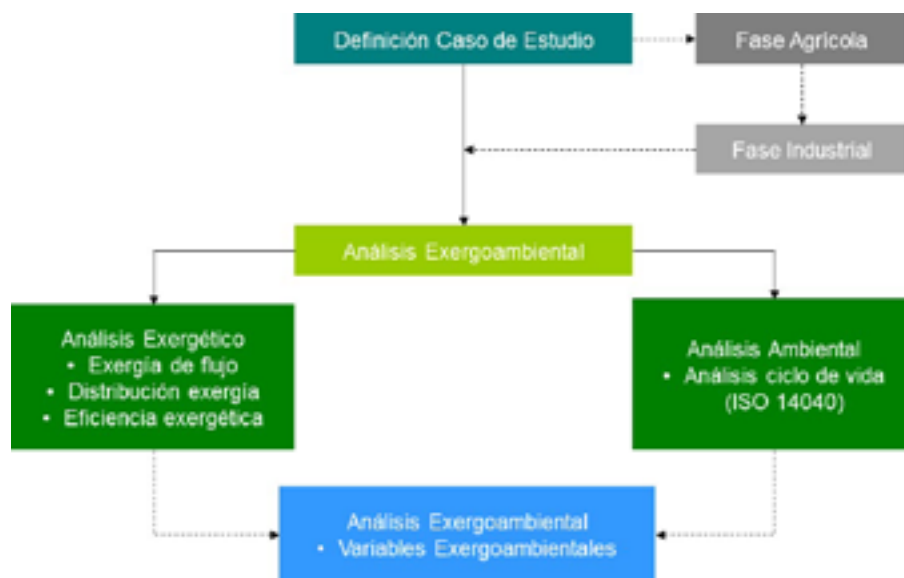
Fuente: Elaboración propia.

A partir de la estimación de las variables exergoambientales es posible realizar el análisis individual de las etapas del proceso, identificando cuáles de ellas tienen posibilidades de mejora, con la finalidad de mitigar los impactos ambientales generados por el proceso.

Metodología

La metodología que se llevó a cabo para el análisis exergoambiental del proceso de obtención de aceite Sacha Inchi se presenta en la figura 7.

Figura 7. Metodología seguida para el análisis exergoambiental



Fuente: Elaboración propia.

Definición del caso de estudio

En el presente trabajo se tomó como caso de estudio el proceso productivo de aceite Sacha Inchi en el departamento de Santander, para el cual se evaluaron dos fases: agrícola e industrial.

Fase agrícola

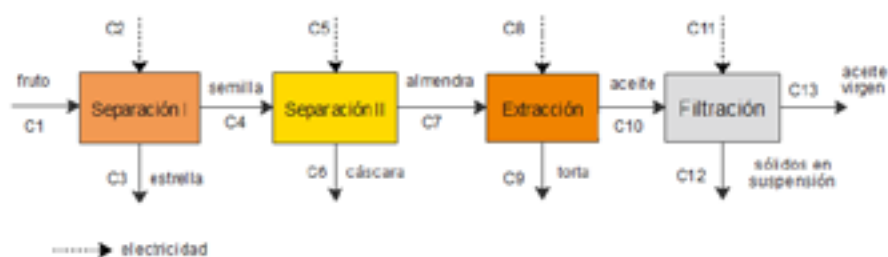
En la fase agrícola se tomó un cultivo ubicado en el municipio de Oiba, con 3,5 hectáreas (Ha), sin uso previo en actividades de siembra o ganadería, caracterizado por el manejo de prácticas de fertilización abonos orgánicos elaborados en la zona de plantación. Para el 2019 se reportó una producción aproximada de 10 toneladas de fruto Sacha Inchi, requiriendo 2 kg de fertilizante por kg de fruto.

Fase industrial

El esquema de procesamiento fue tomado de una empresa ubicada en la ciudad de Bucaramanga, la cual funciona como centro de acopio

de fruto Sacha Inchi para cultivos de la región, incluyendo el referente de este estudio. El proceso consta de cuatro operaciones unitarias como se muestra en la figura 8, en las etapas de separación I y II se realiza la remoción de las envolturas externas del fruto conocidas como estrella y cáscara; en la etapa de extracción se obtiene el aceite contenido en la almendra mediante la técnica de prensado en frío y este se limpia a través de una filtración que permite la remoción de sólidos suspendidos. En el 2019 bajo esta configuración se reporta la producción de 28.800 litros de aceite Sacha Inchi que son comercializados en el país.

Figura 8. Esquema de producción de la fase industrial



Fuente: Elaboración propia.

Análisis exergético

Para el análisis exergético se tomó la metodología propuesta por Dincer y Ronsen (2013) en la que se definen tres etapas como se describe a continuación:

a) Descripción y simulación del sistema:

El sistema seleccionado para el análisis exergético fue el esquema industrial (figura 8), donde cada unidad de proceso se evalúa como un volumen de control, con el propósito de identificar las corrientes de entrada y salida, junto con los productos y los residuos generados.

El ambiente de referencia se definió de acuerdo con los valores estándar de temperatura y presión ambiental de 25°C (298,15 Kelvin) y 101,325 Pa (0,10 MPa). Estos valores son muy cercanos a la temperatura promedio anual y presión atmosférica del departamento de Santander.

b) Simulación del proceso:

Con el objetivo de establecer propiedades termodinámicas como entalpía y entropía para los componentes y corrientes de proceso, elaborar los balances de masa y energía, así como contabilizar la transferencia de energía del sistema con el ambiente de referencia en forma de calor y trabajo; se realiza la simulación del proceso utilizando la herramienta Aspen Plus v.10.4, en estado estacionario.

Se propuso como base de cálculo 100 kg/h de fruto de Sacha Inchi. Las condiciones de operación, así como las relaciones de flujo reactivo-producto y el rendimiento fueron suministrados por la planta de procesamiento y lo reportado en la literatura por Ayala (2016). La información relacionada con caracterización de corrientes, así como los rendimientos, se tomaron de un estudio experimental previo que se llevó a cabo en la Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga (Rodríguez, 2020).

c) Evaluación energética:

Esta etapa se realizó de forma secuencial; el primer paso fue el cálculo de la exergía de corriente para cada volumen de control, teniendo en cuenta las ecuaciones (1-4) y los valores teóricos de exergía química específica para cada componente tomados de Özilgen y Sorgüven (2011), García, Marmolejo, Cárdenas y Morales (2018).

Posteriormente, se definió la exergía de producto y combustible, en cada unidad de proceso o volumen de control, tal como se presenta en la tabla 12.

Por último, se realizó un balance de exergía general del proceso y en cada volumen de control con el propósito de calcular las irreversibilidades, tal como se plantea en la ecuación (6) y se calcularon las eficiencias de etapas y proceso global por medio de la ecuación (7), y teniendo en cuenta el concepto de exergía de producto y combustible.

Tabla 12. *Exergía de producto y combustible*

Etapa	Exergía de producto	Exergía de combustible
Separación I	$\dot{E}_3 + \dot{E}_4 - \dot{E}_1$	\dot{E}_2
Separación II	$\dot{E}_7 + \dot{E}_6 - \dot{E}_4$	\dot{E}_5
Extracción	$\dot{E}_9 + \dot{E}_{10} - \dot{E}_7$	\dot{E}_8
Filtración	$\dot{E}_{13} + \dot{E}_{12} - \dot{E}_{10}$	\dot{E}_{11}

Fuente: Elaboración propia.

Análisis ambiental

En el análisis ambiental se estableció como objetivo la evaluación de los impactos generados en el proceso de producción de aceite de Sacha Inchi desde el cultivo hasta el envasado. Se tomó como unidad funcional un litro de aceite.

El análisis consideró el consumo de combustible diesel del transporte de semillas e insumos al cultivo (requerimiento de 0,12L de diesel/km), traslado de la cosecha a la planta transformadora en una camioneta turbo (consumo 0,4L diesel /km); de igual forma, se incluyó el combustible requerido para el transporte del material de envase para el aceite, desde el proveedor hasta la planta de procesamiento.

Adicionalmente, se contempló el cambio de uso de suelo de tierras pastizales a tierras de cultivo; donde el impacto generado por la absorción o emisión de dióxido de carbono es negativo. Por otro lado, dado que, para el cultivo evaluado en este trabajo, se usa fertilizantes orgánicos (producto de compostaje) los componentes de los fertilizantes son fijados en el suelo y no hay pérdidas por volatilización o escorrentía. Es importante mencionar que se despreció el consumo de agua desde la tecnosfera debido a que el agua requerida para riego es de origen pluvial. De igual forma, en la etapa de obtención del aceite no se contempló la emisión de material particulado, puesto que no fue posible cuantificarlo. En la

etapa de cultivo, el inventario se construyó a partir de la información recopilada en campo. Y para la etapa de producción, se hizo uso de la información suministrada por la empresa y la proporcionada en la simulación del proceso.

La evaluación de los impactos ambientales se realizó en el *software* SimaPro 9.0 (*SimaPro Faculty Temporary license* Universidad Santo Tomás), utilizando el método Impact 2002+, dado que este método considera las categorías de impacto medio y final (Jolliet, Saade-Sbeih, Shaked, Jolliet y Crettaz, 2016). Así mismo, se hizo la evaluación del daño ambiental asociado al fruto y el consumo de electricidad para cada una de las etapas del proceso. Los datos obtenidos para las categorías de impacto medio se normalizaron a la unidad *mid-point* (mPt). Esta unidad equivale a la centésima parte de la carga ambiental anual de un ciudadano europeo medio, y permite evaluar la carga ambiental total expresada como un puntaje único, en la que se asocian todos los impactos ambientales en una misma unidad.

Una vez analizado el ciclo de vida, se formuló el balance de impacto ambiental de cada etapa tal como se propone en la ecuación 8 y se incluyen las ecuaciones auxiliares P mostradas en la tabla 13.

Tabla 13. *Asignación de los impactos ambientales a corrientes de exergía del proceso*

Etapa	Balance de impacto ambiental	Ecuaciones P
Separación I	$\dot{B}_1 + \dot{B}_2 = b_3\dot{E}_3 + b_4\dot{E}_4$	$b_{P,sep1} = \frac{B_{P,sep1}}{E_{P,sep1}}$
Separación II	$b_4\dot{E}_4 + \dot{B}_5 = b_6\dot{E}_6 + b_7\dot{E}_7$	$b_{P,sep2} = \frac{B_{P,sep2}}{E_{P,sep2}}$
Extracción	$b_7\dot{E}_7 + \dot{B}_8 = b_9\dot{E}_9 + b_{10}\dot{E}_{10}$	$b_{P,ext} = \frac{B_{P,ext}}{E_{P,ext}}$
Filtración	$b_{10}\dot{E}_{10} + \dot{B}_{11} = b_{12}\dot{E}_{12} + b_{13}\dot{E}_{13}$	$b_{P,fil} = \frac{B_{P,fil}}{E_{P,fil}}$

Fuente: Elaboración propia.

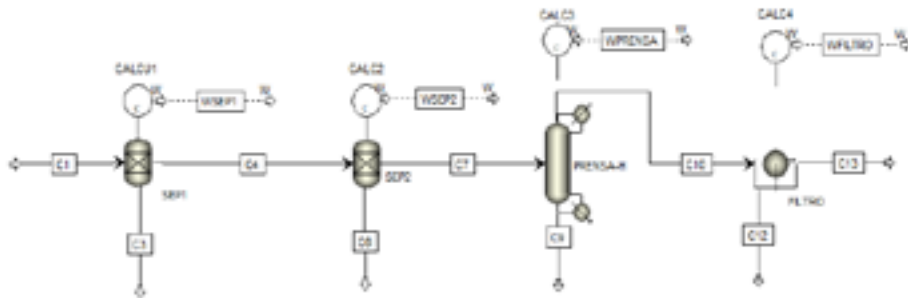
Evaluación exergoambiental

El rendimiento ambiental del proceso se evaluó teniendo en cuenta la estimación y el análisis de las variables exergoambientales indicadas en las ecuaciones (9-13) para las etapas, además la interconexión entre ellas para el proceso de obtención de aceite Sacha Inchi.

Discusión y conclusiones

Simulación del proceso: Las etapas del proceso fueron modeladas, utilizando Aspen Plus versión 10.4 tal como se muestra en la Figura 9. Para las unidades de separación de las capas externas del fruto, se utilizaron separadores genéricos especificando la relación de reparto de los componentes hacia las corrientes de salida, para la extracción del aceite se utilizó un separador que tiene en cuenta la pureza del aceite obtenido. Por último, se empleó un filtro de vacío con el propósito de separar los sólidos suspendidos en el aceite.

Figura 9. Simulación del proceso de extracción de aceite



Fuente: Elaboración propia en Aspen Plus versión 10.4.

Los requerimientos energéticos asociados al trabajo eléctrico en cada etapa de proceso se especificaron teniendo en cuenta rendimientos y eficiencias de los equipos existentes en planta: separación I 5,6 MJ/h, separación II 1,7 MJ/h, extracción de aceite 258,5 MJ/h y filtración 0,3 MJ/h. Dicha información se introduce al simulador por medio de la herramienta fortran.

En el proceso se identifican cinco corrientes principales: fruto (C1), semilla (C4), almendra (C7), aceite extraído (C10) y producto (C13), alcan-

zando una producción de 16 L de aceite, que equivalen a un rendimiento global del 63%, superior al 43% reportado por Ayala (2016), quien utiliza la misma variedad de semilla y tecnología de extracción. Por otro lado, se generan cuatro corrientes alternas denominadas subproducto: Estrella (C3), cáscara (C6), torta (C9) y sólidos en suspensión (C12). Las cuales constituyen el 85% del peso del fruto de Sacha Inchi. En la tabla 14 se presentan las condiciones de operación, el balance de masa del proceso (composición de cada corriente) y las propiedades energéticas calculadas teniendo en cuenta el paquete de fluido-termodinámico NTRL (Non-Random-Two-Liquid).

Tabla 14. Resultados de la simulación en aspen plus

	Co- rrien- tes	C1	C3	C4	C6	C7	C9	C10	C12	C13
Flujo Másico	kg/h	100	47,49	52,5	18,389	34,111	14,668	19,443	0,324	14,343
Tri- linoléico	kg/h	9,725	0,091	9,634	0,035	9,598	6,528	3,070	0	6,528
Trilinoléi- co	kg/h	7,236	0,068	7,168	0,026	7,142	4,858	2,284	0	4,858
Trioléico	kg/h	1,767	0,017	1,751	0,006	1,744	1,186	0,558	0	1,186
Tri- palmitico	kg/h	0,849	0,008	0,841	0,003	0,838	0,570	0,268	0	0,570
Triesteáiri- co	kg/h	0,641	0,006	0,635	0,002	0,633	0,430	0,202	0	0,430
Lignina	kg/h	15,114	10,651	4,463	4,123	0,340	0,015	0,325	0,015	0
Celulosa	kg/h	25,782	18,169	7,614	7,034	0,580	0,026	0,554	0,026	0
Hemicelu- losa	kg/h	10,668	7,518	3,150	2,910	0,240	0,011	0,229	0,011	0
Proteína	kg/h	13,139	2,660	10,479	1,030	9,449	0,273	9,176	0,273	0
Agua	kg/h	1,799	0,190	1,609	0,074	1,535	0,348	1,187	0	0,348
Ceniza	kg/h	1,975	0,760	1,215	0,294	0,921	0,001	0,920	0	0,001
Carbohi- dratos	kg/h	11,304	7,362	3,942	2,850	1,092	0,421	0,670	0	0,421
Tempera- tura	C	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Presión	atm	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Entalpía	kJ/h	-631992,8	-343541,1	-288451,5	-132994,9	-155456,6	-34782,57	-120674,08	-2332,67	-32449,90
Entropía	kJ/kg-K	-16,159	-20,990	-11,793	-20,990	-6,8417	-5,7374	-7,684	-10,267	-5,635

Fuente: Aspen Plus V10.4.

Las corrientes C3 y C6 muestran un alto contenido de material lignocelulósico, que puede ser aprovechado en diferentes usos, por ejemplo, como material absorbente, fertilizante o energía. Para la corriente asignada torta (C9), se evidencia la presencia de proteína (composición del 50% en peso) puede ser valorizada como ingrediente en alimentos funcionales y suplementos alimenticios. De manera experimental, Rodríguez (2020) logró aislar el 88,7% de proteína presente en este residuo, como propuesta para alimentación en rumiantes. En cuanto al aceite, sus componentes de ácidos grasos insaturados del 88% hacen de este producto una fuente vegetal en la dieta alimentaria.

Análisis exergoambiental

Análisis exergético

De acuerdo con la tabla 15, se identificó que las corrientes de estrella (47 kg/ 100 kg de fruto) y cáscara (18 kg/100 kg de fruto) pueden ser aprovechadas para la obtención de energía, debido a su alto contenido exergético, lo que implica la disminución del impacto ambiental, debido a que actualmente son considerados residuos. Lakkhana, Atong y Sricha-roenchaikul (2017) utilizaron la cáscara como biomasa en procesos de gasificación entregando un producto combustible con un poder calorífico bajo de 2,27MJ/m³ y en el esquema actual están siendo identificadas como residuos.

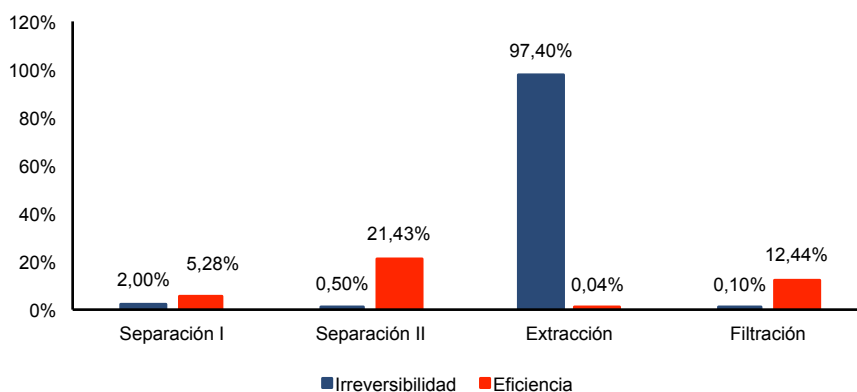
Tabla 15. *Exergía de flujo*

Corrientes	Exergía de flujo (MJ/h)
Fruto (C1)	1762,10
Aceite (C13)	188,77
Estrella (C3)	1030,33
Cáscara (C6)	398,87
Torta (C9)	143,19
Sólidos Susp (C12)	1,72

Fuente: Elaboración propia.

La evaluación exergética permitió identificar los puntos más importantes donde se generan las ineficiencias termodinámicas del esquema analizado, lo que da un panorama acerca de las posibles mejoras técnicas del proceso. En la figura 10 se evidencia que el 97% de las irreversibilidades se identificaron en la etapa de extracción con 258MJ/h, lo cual se sustenta en el bajo contenido exergético del aceite y el requerimiento de energía del equipo.

Figura 10. Irreversibilidad y eficiencias exergéticas por etapas del proceso



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la eficiencia exergética, se puede evidenciar un bajo rendimiento en todas las etapas del proceso debido a que la mayor parte de exergía se encuentra en las corrientes C3, C6 y C9 denominadas como desperdicio porque son arrojadas al ambiente sin uso específico.

De acuerdo con la tabla 15, se identificó que las corrientes de estrella (47 kg/ 100 kg de fruto) y cáscara (18 kg/100 kg de fruto) pueden ser aprovechadas para la obtención de energía, debido a su alto contenido exergético, lo que implica la disminución del impacto ambiental, debido a que actualmente son considerados residuos. Lakkhana, Atong y Sricha-roenchaikul (2017) utilizaron la cáscara como biomasa en procesos de gasificación entregando un producto combustible con un poder calorífico bajo de 2,27MJ/m³ y en el esquema actual están siendo identificadas como residuos.

Análisis ambiental

Los procesos de cultivo, la producción (de aceite) y el envasado (de aceite) que integran la obtención de aceite Sacha Inchi fueron definidos en el *software* Simapro. Los flujos de entrada y salida se establecieron para la producción de un 1 litro de aceite. Para el envase se cuantificó un consumo de 0,1769 kg de diésel para transporte y 0,1201 kg asociado al cultivo, tal como se presenta en la tabla 16. La fase agrícola incluyó también el uso 10,5 kg de fertilizantes orgánicos y la fase industrial el consumo de electricidad 4,639 Kwh. Adicionalmente, en la misma tabla se presenta el uso de 1,1 kg de botellas de vidrio, correspondientes a 4 unidades para el envase de un litro de aceite.

Los resultados de las categorías de impacto medio, después de la normalización de los datos a la unidad mid-point (mPt) se presenta en la figura 11, donde se observa que la mayor afectación corresponde a la categoría Inorgánicos respiratorios, de la cual el cultivo y envase son las etapas del proceso que impactan en mayor medida con 0,789 mPts (42%) y 0,578 mPts (30%), respectivamente. Estos valores se atribuyen a la utilización de compostaje; así como el transporte, ya sea de los insumos para la cosecha al cultivo o del material de envase a la planta procesadora.

Tabla 16. *Inventario para la producción de un litro de aceite de Sacha Inchi*

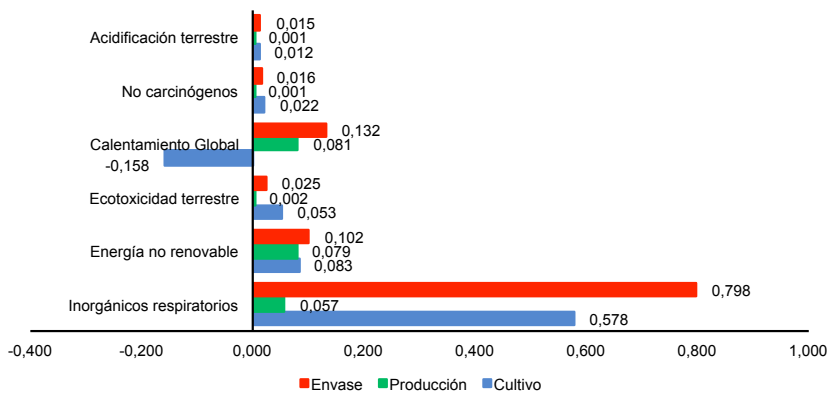
Entrada	Unidad	Cantidad			
		Cultivo	Producción	Envase	Total
1. Maquinaria agrícola					
Diésel	kg	0,0278			0,0278
Gasolina	kg	0,0541			0,0541
2. Fertilizantes					
3. Abono fertisol	kg	1,1413			1,1413
Compostaje	kg	9,1568			9,1568
5. Microorganismos eficientes					
Melaza	tkg	0,1043			0,1043

Entrada	Unidad	Cantidad			
		Cultivo	Producción	Envase	Total
Suero	kg	0,1043			0,1043
Levadura	kg	0,0031			0,0031
Agua	L	2,08			2,08
6.Semillas	kg	0,0026			0,0026
7.Botella	kg			1,1	1,1
8.Electricidad	kwh		4,639		4,639
9.Diésel transporte	kg	0,1201		0,1769	0,3167

Fuente: Elaboración propia.

De manera similar, la categoría de Calentamiento global se ve afectada principalmente por la etapa de envase con 0,132 mPt (7%). El valor negativo de puntuación para el cultivo -1,58 mPts, dentro de esta, se debe a un mayor consumo de CO₂ de la atmósfera por cambio de uso de suelo. Adicionalmente, en el uso de energías no renovables se evidencia una afectación de 0,102 mPt (5%) atribuidas al envase y 0,08 mPts (4%) para cada una de las etapas producción y cultivo. Las demás, ecotoxicidad terrestre, no carcinógenos y acidificación terrestre, en una menor contribución del 8% al impacto total del proceso.

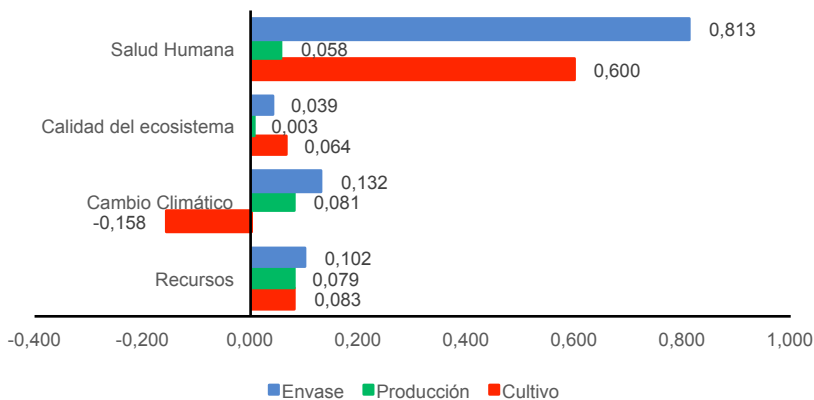
Figura 11. Evaluación de puntuación única para categorías de impacto medio



Fuente: Software SimaPro 9.0, método de evaluación Impact 2002+.

Dado que las categorías de punto medio se agrupan para establecer la afectación que se genera en las de punto final, en la figura 12 se observa que aquellas con mayor puntuación se relacionan con las de punto medio que mostraron un impacto alto. Este es el caso de la *salud humana*, cuyo alto valor es consecuente con el valor de mPts de Inorgánicos respiratorios. De manera similar, en la de cambio climático se obtiene un valor negativo para el cultivo, tal como ocurrió en la de Calentamiento global. Así mismo, *recursos* está relacionada con las *energías no renovables*, se observa una contribución equiparable entre los tres subsistemas evaluados. En cuanto a la *calidad del ecosistema* asociados con la acidificación y ecotoxicidad terrestre representa menor afectación al ambiente.

Figura 12. Evaluación del daño ambiental del proceso de obtención de aceite Sacha Inchi



Fuente: Software SimaPro 9.0, método de evaluación Impact 2002+.

Evaluación exergoambiental

La estimación de las variables exergoambientales definidas en las ecuaciones (10-13) se determinó a partir de los impactos ambientales de los flujos de salida de las etapas. A nivel global del proceso, que contempla la fase agrícola e industrial, las exergías de corriente de salida representan una tasa de impactos ambientales de 13 mPts/h, distribuidas en un 60,4% a la estrella, 13,2 - torta, 16% - aceite, 10,2% - cáscara y 0,3% a

los sólidos suspendidos removidos del aceite. Los resultados de las cuatro variables analizadas se presentan en la tabla 17, con ello la identificación de corrientes o procesos que deben ser considerados en primer momento, como propuestas en la mejora del proceso como estudio de caso.

Tabla 17. Variables exergoambientales del proceso

Etapa	b_P [mPts/ MJ]	b_F [mPts/ MJ]	\dot{B}_D [mPts/h]	\dot{r}_b dimensional
Separación I	0,251	0,013	0,07	18
Separación II	0,062	0,013	0,02	4
Extracción	36,733	0,013	3,43	2767
Filtración	0,107	0,013	0,00305	7

Fuente: Elaboración propia.

La variable $b_{P,k}$ referida al impacto ambiental específico de producto, estimada en 37 mPts/MJ para la etapa de extracción, evidencia el alto consumo energético que requiere la prensa ante la baja disponibilidad de exergía del producto. En segundo lugar de puntuación de impactos ambientales por unidad de exergía y muy distantes de la prensa, se encuentra la primera etapa, debido también al requerimiento energético que implica la separación de la primera envoltura del fruto. En términos, del impacto ambiental específico de combustible ($b_{F,k}$), es igual para todas las etapas del proceso de estudio, dado que existe una relación directa entre los impactos ambientales generados por el consumo de electricidad y la exergía de trabajo al definirse como la de combustible.

En relación con la tercera variable asociada con la destrucción de exergía (\dot{B}_D), la etapa de extracción implica la mayoría de la generación de impactos ambientales del proceso, estimados en 3,43 mPts/h, tal como se observa en la tabla 17, los cuales están asociados al 97% de las irreversibilidades del proceso. Los demás impactos ambientales muestran valores insignificantes con respecto a esta tercera etapa.

La variable diferencia relativa de impacto ambiental $r_{b,k}$ para la etapa de extracción presenta el valor más alto como se registra en la tabla 17, lo que indica un mayor potencial para reducir el impacto ambiental, debido a que se ubican la mayoría de las ineficiencias termodinámicas y así la contribución representativa al impacto ambiental asociado con todo el proceso. Cavalcanti, Carvalho Jonathan (2019) realizaron la evaluación exergoambiental de la planta de generación de energía a partir de biomasa de eucalipto, en la que sus resultados mostraron que los equipos con peor desempeño ambiental son aquellos con altas tasas de impacto ambiental asociado con la destrucción de exergía.

Conclusiones

Del análisis ambiental se puede concluir que el envase del aceite es la etapa del proceso que contribuye en gran medida a la categoría de punto medio de inorgánicos respiratorios, impactando directamente a la categoría final de salud humana. Por otro lado, el proceso de extracción del aceite no genera impactos representativos en ninguna de las categorías evaluadas.

El proceso de obtención de aceite del fruto Sacha Inchi presenta consumo de recursos energéticos, generación de emisiones y residuos al ambiente, así mismo irreversibilidades durante el proceso industrial de obtención de aceite.

La identificación de las ineficiencias termodinámicas y la contribución ambiental de cada etapa asociada con la fase industrial permitió visualizar la etapa extracción en la que se generan los mayores impactos ambientales asociados con la destrucción de exergía, lo cual está relacionada con su requerimiento energético.

Los residuos considerados dentro del esquema de procesamiento tienen un valor de exergía que se encuentra en desequilibrio con el ambiente, lo que resultan en un daño ambiental. Adicionalmente, las corrientes de salida de las unidades de separación presentan un contenido lignocelulósico potencial; como respuesta a ello, surge la propuesta de valorizarlas en sistemas de conversión de energía y luego ser utilizado como subproducto en la cadena industrial; de esta manera, la eficiencia en la gestión de recursos conduce a una disminución del impacto ambiental generado en

el proceso. También, el aprovechamiento de la proteína, una vez aislada de la torta residual, en la producción de alimentos funcionales.

Referencias

- Ayala, G. (2016). Análisis de crecimiento y producción de 3 variedades de Sacha Inchi (*Plukenetia Volubilis* L.), en el municipio de Tena Cundinamarca. Universidad de Ciencias Ambientales y Aplicadas.
- Bueno-Borges, L. B., Sartim, M. A., Gil, C. C., Sampaio, S. V., Rodrigues, P. H. V., y Regitano-d'Arce, M. A. B. (2018). Sacha inchi seeds from sub-tropical cultivation: effects of roasting on antinutrients, antioxidant capacity and oxidative stability. *Journal of Food Science and Technology*, 55(10), 4159–4166. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3345-1>
- Cavalcanti, E. J. C., Carvalho, M., y Jonathan, J. L. (2019). Exergoenviromental results of a eucalyptus biomass-fired power plant. *Energy*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116188>
- Chirinos, R., Zuloeta, G., Pedreschi, R., Mignolet, E., Larondelle, Y., y Campos, D. (2013). Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis*): A seed source of polyunsaturated fatty acids, tocopherols, phytosterols, phenolic compounds and antioxidant capacity. *Food Chemistry*, 141(3), 1732-1739. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.04.078>
- Comtrade. (2018). Base de datos de la Organización de las Naciones Unidas. <https://comtrade.un.org>
- Dincer, I., y Ronsen, M. A. (2013). Exergy and energy analyses. In *EXERGY: Energy, Environment and Sustainable Development* (2nd ed., p. 24).
- Dincer, I., Rosen, M. A., y Al-Zareer, M. (2018). Análisis exergoambiental. *Comprensión de Sistemas de energía* 1(5), 377-421). Elsevier Ltd. <https://doi.org/doi:10.1016/B978-0-12-809597-3.00108-5>
- Fanali, C., Dugo, L., Cacciola, F., Beccaria, M., Grasso, S., Dachà, M., ... Mondello, L. (2011). Caracterización química del aceite Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(24), 13043-13049. <https://doi.org/10.1021/jf203184y>
- García, J., Marmolejo, D., Cárdenas, J., y Morales, R. (2018). Exergy Analysis of an Extractive Distillation Column for Reducing Energy Consumption in a Bioethanol Production Process. *Computer Aided Chemical Engineering* 43, 513-518. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64235-6.50091-7>

- Gómez, D., y Montaña, E. (2019). *Caracterización en el eslabón de comercialización en la cadena de valor del cultivo de Sacha Inchi (Plukenetia volubilis) en el departamento del Meta*. Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/18025/2019darkisgomez?sequence=6&isAllowed=y>
- ISO 14040. (2006). *Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework*. International Organization for Standardization. Ginebra, Suiza.
- Jolliet, O., Saade-Sbeih, M., Shaked, S., Jolliet, A., y Crettaz, P. (2016). *Environmental Life Cycle Assessment*. <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/43927>
- Kodahl, N. (2020). Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.) from lost crop of the Incas to part of the solution to global challenges? *Planta*, 251(4), 1-22. <https://doi.org/10.1007/s00425-020-03377-3>
- Lakshana, C., Atong, D., y Sricharoenchaikul, V. (2017). Fuel Gas Generation from Gasification of Sacha Inchi Shell using a Drop Tube Reactor. *Energy Procedia* 138, 870-876. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.109>
- Meyer, L., Tsatsaronis, G., Buchgeister, J., y Schebek, L. (2009). Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems. *Energy*, 34(1), 75-89. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.07.018>
- Morozyuk, T., Tsatsaronis, G., y Koroneos, C. (2016). Environmental impact reduction using exergy-based methods. *Journal of Cleaner Production*, 118, 118-123. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.064>
- Özilgen, M., y Sorgüven, E. (2011). Utilización de energía y exergía, y emisión de dióxido de carbono en la producción de aceite vegetal, *Energy* 36(10), 5954-5967. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.020>
- Quintero, V. (2018). *Modelamiento, integración y evaluación exérgica de la producción conjunta de bioetanol de primera, segunda y tercera generación, a partir de caña de azúcar y biomasa*. Universidad Industrial de Santander. <https://doi.org/https://orcid.org/0000-0003-0307-7161>
- Revista Dinero. (2019). *La planta que le quita terreno a la coca en Colombia*. <https://www.dinero.com>
- Rodríguez, L. (2020). *Aislamiento de la proteína a partir del residuo sólido de la sachá inchi (Plukenetia volubilis linneo)*. Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga.
- Sacha Colombia. (2018). Biorefinería S.A. <http://sachacolombia.com>

- Salehi, N., Mahmoudi, M., Bazargan, A., y McKay, G. (2018). Exergy and Life Cycle-Based Analysis. *Handbook of Environmental Materials Management*, 1-22. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58538-3_84-2
- Yürüsoy, M., y Keçebaş, A. (2017). Advanced exergo-environmental analyses and assessments of a real district heating system with geothermal energy. *Applied Thermal Engineering*, 113, 449-459. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.054>

Análisis cuantitativo de los pretratamientos en la biomasa lignocelulósica para la producción de combustibles avanzados

Lizeth Johanna Alvarado Rueda,

*Departamento de Ciencias Básicas,
grupo de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas -
GICIBAYA, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia
Correo electrónico: lizeth.alvarado@ustabuca.edu.co*

Olga Lucía Bayona Ayala,

*Facultad de Química Ambiental,
grupo de Investigación en Nuevos Materiales y Energías Alternativas -
GINMEA, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia
Correo electrónico: olgabayona@ustabuca.edu.co*

Angélica María Candela Soto,

*Facultad de Química Ambiental,
grupo de Investigación en Nuevos Materiales y Energías Alternativas -
GINMEA, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia
Correo electrónico: angelica.candela01@ustabuca.edu.co*

César Augusto Acevedo Argüello,

*Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación – CRAI,
grupo Interdisciplinario de Investigación Educativa -
ESPIRAL, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia
Correo electrónico: cesar.acevedo@ustabuca.edu.co*

Introducción

La futura limitación de las reservas de los combustibles fósiles tiene centrada la atención mundial en la actualidad. La falta de petróleo no solo acarreará el aumento en los precios, la crisis en el mercado energético, sino también la alteración climática ocasionada por la quema de

este tipo de combustibles. Con esto, surge la necesidad de investigar en la búsqueda de fuentes renovables de energía y tecnologías de producción de biocombustibles que sean más sustentables, o por lo menos, disminuir los problemas relacionados con el uso de combustibles fósiles.

El mundo afronta el hecho de que la población aumenta vertiginosamente y en la misma medida crece el nivel de industrialización, y el consumo de recursos no renovables como petróleo y sus derivados. Con el uso de los derivados del petróleo se genera impacto ambiental y presión sobre los recursos naturales renovables. Para desligar el crecimiento económico del uso de combustibles fósiles, así como la contaminación ambiental debida a su combustión, ha aumentado el interés en el aprovechamiento de los recursos renovables para la obtención de energía, lo que se conoce como energías alternativas (Plaza Castillo et al., 2015). Un recurso renovable, utilizado en la producción de este tipo de energía, es la biomasa generada por los organismos fotosintéticos, que almacenan la energía en forma de azúcares, los cuales se pueden transformar, por ejemplo, a etanol para uso como biocombustible por medio de un proceso de fermentación (Alonso-Gómez y Bello-Pérez, 2018).

La biomasa es un recurso que no contribuye de forma significativa a las emisiones de dióxido de carbono, cuyo rango de producción se estima entre el 5% al 10% de la que se produce a partir de combustibles fósiles (Wang et al., 2013). La biomasa en general se puede clasificar como primaria, secundaria y terciaria. La primaria se produce por medio de la fotosíntesis y es tomada directamente a partir de la tierra, ejemplos de este tipo son los residuos que quedan luego de recoger las cosechas de los cultivos. La biomasa secundaria se obtiene a partir del procesamiento físico, químico o biológico de la biomasa primaria, como por ejemplo el aserrín, los lixiviados o el estiércol de animales. Por otra parte, la biomasa terciaria la constituyen todos aquellos productos posconsumo de materiales como las grasas animales, los aceites vegetales, los residuos de construcción y demolición, etc. (Osman et al., 2019).

Cuando la biomasa es utilizada en la producción de biocombustibles, tales como el bioetanol, este último se puede clasificar como de primera, segunda, tercera o cuarta generación. El etanol de primera generación

proviene de biomasa comestible y se obtiene a partir de la fermentación de azúcares, que se metabolizan por distintos microorganismos del género *Saccharomyces*, *Zymomonas*, *Kluyveromyces* y *Zygosaccharomyces*. Algunas desventajas de la producción de este tipo de alcohol es el debate entre alimentos versus combustibles, la baja eficiencia de las tierras además de las grandes limitaciones geográficas (Alonso-Gómez y Bello-Pérez, 2018).

El etanol de segunda generación se obtiene a partir de biomasa lignocelulósica, ya sea comestible o no, por ejemplo: a partir de residuos agrícolas tales como rastrojos de cultivos de cereales, cascarilla de arroz, hojas y ramas secas, o a partir de residuos industriales como el bagazo de caña. El principal reto en la obtención de este tipo de alcohol es la transformación bioquímica del sustrato lignocelulósico constituido de celulosa, hemicelulosa y lignina, al cual es muy difícil de acceder para poder convertir la glucosa a etanol. Dicha conversión requiere de enzimas especializadas que transformen efectivamente la glucosa a alcohol, ya sea realizando de forma simultánea la sacarificación y fermentación, o haciendo de forma separada hidrólisis enzimática y fermentación (Huron et al., 2016).

Finalmente, se encuentran los biocombustibles de tercera y cuarta generación, los cuales se originan a partir de biomasa con una alta densidad energética de fuentes, como macro y micro algas; cianobacterias, en el caso de los de tercera generación y organismos genéticamente modificados en el caso de los de cuarta generación (Haibo et al., 2016).

Cuando se utiliza la biomasa secundaria, especialmente la biomasa lignocelulósica, en la obtención de etanol de segunda generación se presenta una dificultad en el modo de acceder a los azúcares que componen el complejo constituido por celulosa, hemicelulosa y lignina; por lo que es necesario un pretratamiento, ya sea físico, químico o biológico, antes de realizar procesos posteriores de hidrólisis y fermentación (Mood et al., 2013).

En cuanto a la biomasa que puede ser utilizada para la producción de bioetanol, se encuentra una gran variedad, la cual incluye madera, residuos de madera, cultivos agrícolas y sus residuos, entre otros. De estas, es la biomasa proveniente de residuos agrícolas; hojas, tallos, mazorcas de

maíz, residuos de poda de los pastos, cascarilla de arroz; la que constituye la categoría más grande y es denominada biomasa lignocelulósica. La composición química de algunas biomásas lignocelulósicas provenientes de distintos cultivos se muestra en la tabla 18.

Tabla 18. *Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en biomasa agrícola*

Biomasa lignocelulósica	% celulosa	% Hemicelulosa	% Lignina
Mazorcas de maíz	33.6	37.3	19.3
Fibras de avena	39.4	27.1	20.7
Pastos	25-40	35-50	10-30
Tallos de maderas duras	40-55	24-40	18-25
Hojas	15-20	80-85	0
Periódicos	40-55	25-40	18-30
Conchas de las nueces	25-30	25-30	30-40
Paja del trigo	30-39	26-50	15-21
Cascarilla de arroz	34.4	29.3	19.2
Bagazo de caña de azúcar	45	20	30

Fuente: Adaptado de (Kumari y Singh, 2018).

La composición de celulosa, hemicelulosa y lignina en el complejo lignocelulósico se encuentra en el rango de 35-50%, 20-35%, 15-20%, respectivamente (Mood et al., 2013). La presencia de lignina y hemicelulosa dificulta el acceso de las enzimas de celulasa, que catalizan el proceso inicial en la conversión de la biomasa lignocelulósica en etanol, por lo tanto, la eficiencia de dicho proceso disminuye, de modo que es necesario removerlas, además de reducir la cristalinidad de la celulosa e incrementar la porosidad de la biomasa en el proceso de pretratamiento para mejorar la hidrólisis. Estos pretratamientos representan un desafío para el escalado a nivel industrial de la producción de etanol de segunda generación, dado que dicho complejo es difícil de degradar, lo que hace que se requiera un proceso de pretratamiento para su destrucción, de

manera que se pueda obtener de forma separada la celulosa, los componentes de la hemicelulosa y la lignina (Sun y Cheng, 2002).

Los distintos métodos de pretratamientos pueden clasificarse como: físicos, químicos, fisicoquímicos, biológicos o combinados.

Los pretratamientos físicos implican la descomposición del tamaño de la biomasa y la cristalinidad, aumentando el área superficial de materia lignocelulósica, mediante molienda o trituración, que mejoran los resultados de hidrólisis debido a la reducción de la cristalinidad, así como también las características de transferencia de masa por la reducción en el tamaño de partícula; sin embargo, muchos de estos pretratamientos no son efectivos por sí solos y su eficiencia puede ser mejorada cuando se combina con otro método (Montingelli et al., 2016).

Los tratamientos biológicos implican el uso de microorganismos (principalmente hongos) para degradar la lignina y la hemicelulosa y dejar la celulosa intacta. La degradación de la lignina se produce a través de la acción de las enzimas que degradan la lignina secretada por los hongos. Los tratamientos biológicos previos implican condiciones leves y son de bajo costo, además son seguros y ambientalmente amigables, las desventajas son las bajas tasas de hidrólisis y los largos tiempos de tratamiento previo en comparación con otros (Zhang et al., 2011).

La biomasa lignocelulósica puede ser pretratada por métodos químicos utilizando soluciones concentradas o diluidas de ácidos inorgánicos u orgánicos, tales como clorhídrico, nítrico, fosfórico, maleico, nitroso, fórmico, acético, entre otros. Generalmente, el uso de las soluciones concentradas es mucho más efectivo para el proceso de hidrólisis, sin embargo, ocurre un impacto negativo en los reactores y equipos donde se realiza el proceso, resultando también poco amigable para el medio ambiente (Ajayi y Adefila, 2012). La biomasa lignocelulósica puede ser oxidada mediante el uso de peróxido de hidrógeno (Suárez-Forero et al., 2019), en la que este separa la lignina y la solubiliza mejorando la actividad enzimática. Este método es muy utilizado en el pretratamiento de biomasa utilizadas para la producción de biogás y bioetanol, sin embargo, una desventaja es que durante el proceso de oxidación de la lignina se pueden generar compuestos aromáticos solubles que actúan

como inhibidores (Ziling et al., 2012). Otros métodos químicos muchos más costosos incluyen el uso de sustancias ozono, líquidos iónicos (Zhao et al., 2009) y solventes orgánicos (Zhao et al., 2009), además del uso de sustancias alcalinas como hidróxidos de amonio y de sodio que tampoco son ambientalmente amigables por cuanto es necesario la remoción de las sustancias básicas con grandes cantidades de agua (Chandra et al., 2012).

Finalmente, los pretratamientos fisicoquímicos y combinados, que incluyen la explosión de vapor, expansión de fibra de amoníaco (AFEX), ultrasonidos, extracción de disolventes orgánicos, el uso de microondas, de medios ácidos, alcalinos u oxidativos, de agua caliente líquida o el uso de líquidos iónicos, entre otros (Kumari y Singh, 2018).

A la fecha no existe un método de pretratamiento de la biomasa lignocelulósica que sea significativamente mejor que otro. La selección de este depende de factores que incluyen el tipo de biomasa, además de la selección de las mejores combinaciones costo-beneficio. En este sentido el objetivo de este trabajo es analizar a través de indicadores cuantitativos el desarrollo de estudios e investigaciones documentadas en artículos de Scopus acerca de distintos métodos de pretratamientos y su efecto en la utilización de biomasa lignocelulósica.

Metodología

Para evaluar la literatura científica relacionada con el pretratamiento realizado a las diferentes fuentes de biomasa se utilizó la siguiente estrategia de búsqueda.

La base bibliográfica citacional Scopus, desarrollada por Elsevier, fue consultada para recuperar 221 registros bibliográficos, entre artículos de revisión, artículos de investigaciones, revisión de la literatura, memorias de congresos y capítulos de libro, utilizando la siguiente ecuación de búsqueda: *TITLE-ABS-KEY (biomass AND pretreatment AND (“phosphoric acid” OR ultrasound OR “ionic liquid*”) AND ethanol)*.

Los registros fueron exportados como archivos .csv y posteriormente fueron importados en el *software* VantagePoint v12 desarrollado por Search Technology, Inc, para preparar y limpiar los datos aplicando algoritmos.

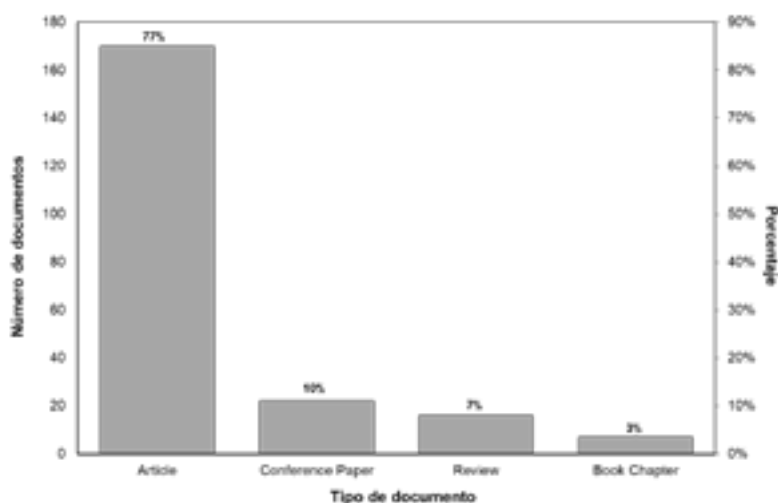
Los siguientes indicadores bibliométricos fueron extraídos de los registros en Scopus: registros por año de publicación, países de afiliación, el análisis de colaboración fue realizado para representar las características importantes del área de investigación en el conjunto de datos obtenidos por autor y palabras clave. Finalmente, las palabras clave fueron agrupadas en dos categorías: pretratamiento y biomasa, utilizando una matriz de proximidad, dichos términos fueron relacionados con la frecuencia de publicación por países.

Resultados y discusión

Tipos de documentos

Luego de la revisión de los 221 documentos encontrados estos fueron clasificados así: 170 fueron artículos de investigación, 21 memorias de congreso y 16 artículos de revisión, figura 13.

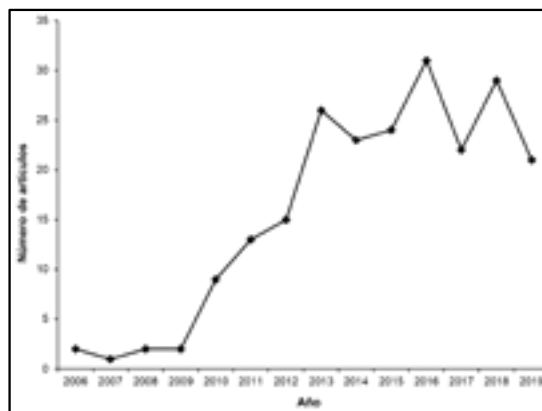
En la figura 13 se puede evidenciar el interés de la comunidad científica en el área de estudio, teniendo en cuenta que el número de registros de artículos de investigación corresponden al 77% del total de documentos consultados. Igualmente se puede indicar la importancia de la divulgación de estos trabajos por cuanto el porcentaje de documentos de divulgación en eventos de carácter científico representa el siguiente porcentaje más alto. Se observan también la tendencia a la consolidación de una línea de investigación importante, pues se registran contribuciones al total de documentos relacionados en forma de capítulos de libro y revisiones de estados del arte.

Figura 13. Análisis del tipo de documentos

Fuente: Elaboración propia.

Producción anual de investigación

En la figura 14 se presentan publicaciones realizadas en el periodo de investigación. Se puede observar un incremento en la tendencia de producción de artículos a partir del año 2009, el número de documentos aumentó de 2 publicados en el 2006 a 31 en el 2016.

Figura 14. Producción anual de publicaciones en el periodo comprendido entre 2006 a 2019

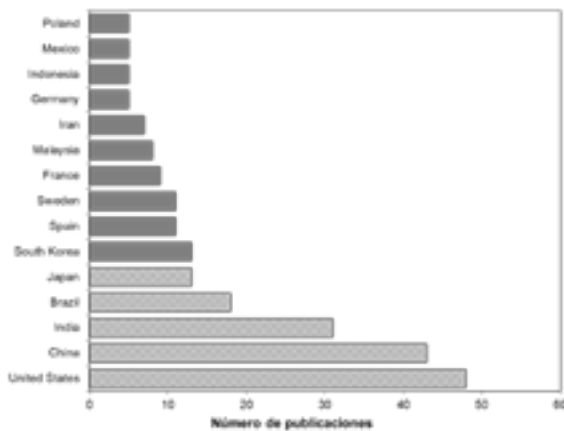
Fuente: Elaboración propia.

El aumento en el número de publicaciones puede ser relacionado con el aumento en el interés de los gobiernos en la exploración de los biocombustibles como sustituto de los combustibles derivados del petróleo, luego del incremento en los precios de estos últimos entre los años 2004 y 2009 (Murray y King, 2012).

Distribución por países

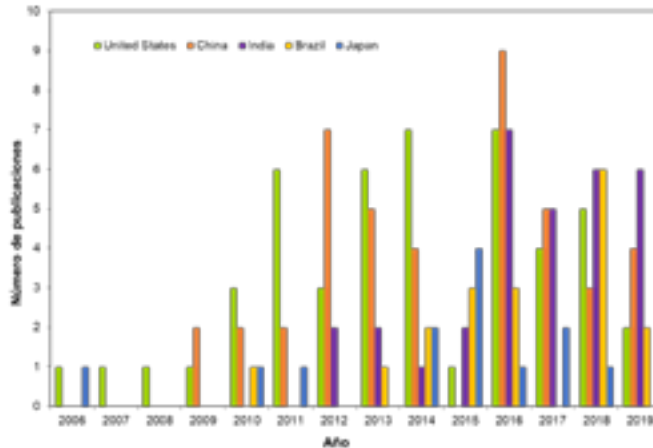
En la figura 15 se muestran los primeros quince países con un número de publicaciones mayores a 5 durante la ventana de observación. Se puede observar que el listado lo encabeza Estados Unidos con 48 publicaciones y dentro de los cinco primeros países, lo sigue China con 43 publicaciones e India con 31. En la figura 16 se presentan los cinco países con mayor número de publicaciones por año, se puede observar que Estados Unidos tiene periodos de mayor producción de publicaciones que otros países. Este hecho refleja la importancia de las políticas acerca de la producción y uso de biocombustibles direccionadas a la creación de empleos, mejoramiento de la economía y la protección del medio ambiente adoptadas por gobiernos de países como Estados Unidos, China y Brasil, lo que influye fuertemente en el creciente interés en el área de investigación. Igualmente, en países como España, Corea del Sur y Japón en los que a lo largo del periodo de observación se han empezado a introducir políticas similares (Prasad e Ingle, 2019).

Figura 15. *Producción de los países con cinco publicaciones o más*



Fuente: Elaboración propia.

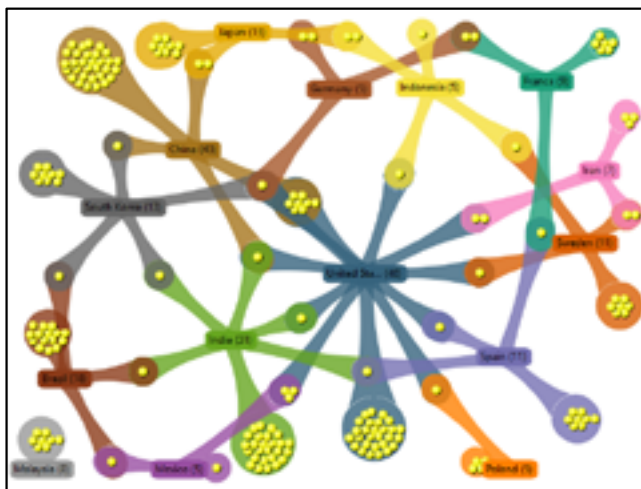
Figura 16. Producción anual de los cinco países con el mayor número de publicaciones



Fuente: Elaboración propia.

La figura 17 representa la red de colaboración internacional en las publicaciones entre los que tienen mayor número de registros. Se puede observar un número mayor de colaboraciones entre Estados Unidos y China, seguido por México e Irán. Es importante resaltar que países como China y Brasil que presentan un número considerable de publicaciones a pesar de estar menos conectados con otros países.

Figura 17. Red de colaboración internacional de coautoría entre países



Fuente: Elaboración propia.

Distribución por revistas

De los 221 documentos analizados, se encontró que 119 fueron publicados en 23 revistas. En la tabla 19 se muestra las diez primeras revistas con su clasificación por cuartiles en *Scimago Journal and Country Rank*, en las que fueron publicados 87 artículos que representan el 39% del total. El mayor número de artículos fue publicado en la revista *Bioresource Technology*, con 42 publicaciones, dicha revista publica artículos de investigación en las áreas de biomasa, tratamiento de residuos biológicos, bioenergía y biocombustibles, lo que la hace una publicación muy apropiada para este tema de investigación, igualmente el cuartil de esta revista y en general de las diez revistas mostradas en la tabla 19 se puede relacionar con la calidad de la investigación en esta área.

Tabla 19. *Diez primeras revistas con el mayor número de publicaciones*

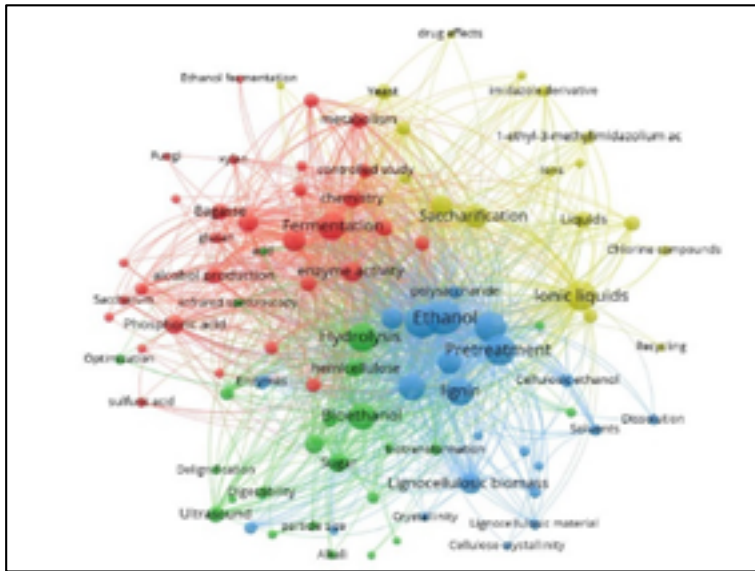
Revista	Número de publicaciones	Cuartil SJR
Bioresource Technology	42	Q1
Applied Biochemistry and Biotechnology	7	Q2
Biotechnology for Biofuels	6	Q1
ACS Sustainable Chemistry and Engineering	5	Q1
Chemical Engineering Transactions	5	Q3
Journal of Chemical Technology and Biotechnology	5	Q1
Waste and Biomass Valorization	5	Q2
BioResources	4	Q2
Green Chemistry	4	Q1
Industrial Crops and Products	4	Q1

Fuente: Elaboración propia.

Relación entre palabras clave

De acuerdo con las publicaciones científicas que resultaron utilizando los parámetros de búsqueda, aparecen términos en áreas de investigación comunes, tales como: etanol, hidrólisis, pretratamiento, fermentación, biomasa lignocelulósica (figura 18). Además se pudo evidenciar el interés en el área de pretratamientos de biomasa por la aparición de términos como ácido fosfórico, líquidos iónicos, ácido sulfúrico, los cuales se han reportado como agentes muy utilizados en el pretratamiento de biomasa para la obtención de biocombustibles (Chundawat et al., 2011).

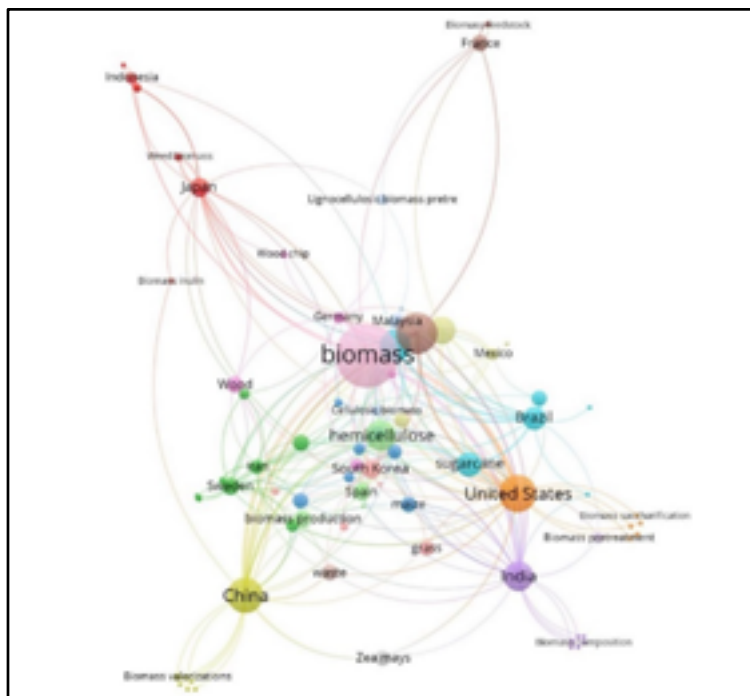
Figura 18. *Coocurrencia de palabras clave*



Fuente: Elaboración propia.

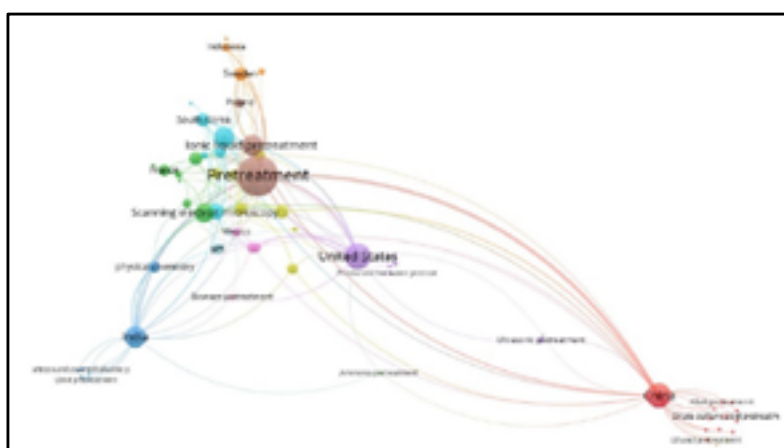
La figura 19 muestra la tendencia de investigación acerca de biomasa; países como Alemania, Estados Unidos, China muestran interés en el uso de distintos tipos de biomasa: lignocelulósicas, bagazo de caña, residuos agrícolas de maíz, pastos y madera como materia prima para la generación de biocombustibles. En cuanto a métodos de pretratamiento se puede observar en la figura 20 el creciente interés en el uso de líquidos iónicos y ultrasonido, este último que podría mejorar el proceso de hidrólisis de la biomasa, contribuyendo a aumentar la producción de biocombustible (Subheddar y Gogate, 2013).

Figura 19. Coocurrencia de los términos de biomasa



Fuente: Elaboración propia.

Figura 20. Coocurrencia de los términos de pretratamiento de biomasa



Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Se observó el interés en las áreas de investigación relacionadas con el uso de biomasa como fuente de biocombustibles, con un incremento en la investigación a partir del año 2009 y que se refleja en el elevado número de documentos de alta calidad evidenciado en la categoría de las revistas en las que están publicados dichos productos de investigación.

En países como Estados Unidos y China donde se presenta una elevada población, además de ser los países con mayor emisión de gases invernadero, la investigación en el área de la obtención y uso de los biocombustibles se presenta como una opción para mitigar los efectos del cambio climático.

Las redes de cooperación juegan un papel importante para el área de investigación del uso de biomasa y los biocombustibles. En las redes de colaboración, Estados Unidos se presenta como el país con mayor cooperación en comparación con otros países, lo que favorecería el intercambio y desarrollo de tecnologías para la valoración de biomasa en la producción de biocombustibles.

El único país latinoamericano que aparece con un número importante de productos de investigación es Brasil, sin embargo, se encuentra por debajo de Estados Unidos, a pesar de ser uno de los países con mayor producción de etanol en el mundo. Así mismo, presenta pocas colaboraciones con otros países.

Referencias

- Ajayi, O. A., y Adefila, S. S. (2012). *Methanol Production from Cow Dung* 2(7), 9-17.
- Alonso-Gómez, L., y Bello-Pérez, L. A. (2018). Materias primas usadas para la producción de etanol de cuatro generaciones: retos y oportunidades. *Agrociencia*, 52(7), 967-990.
- Chandra, R., Takeuchi, H., y Hasegawa, T. (2012). Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1462-1476. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.035>

- Chundawat, S. P. S., Beckham, G. T., Himmel, M. E., y Dale, B. E. (2011). Deconstruction of Lignocellulosic Biomass to Fuels and Chemicals. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 2(1), 121-145. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-061010-114205>
- Haibo, H., Long, S., y Singh, V. (2016). Techno-economic analysis of biodiesel and ethanol co-production from lipid-producing sugarcane. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 10(3), 299-315. <https://doi.org/10.1002/bbb.1640>
- Huron, M., Hudebine, D., Ferreira, N. L., y Lachenal, D. (2016). Impact of delignification on the morphology and the reactivity of steam exploded wheat straw. *Industrial Crops and Products*, 79, 104-109. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.10.040>
- Kumari, D., y Singh, R. (2018, julio). Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 877-891. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.111>
- Montingelli, M. E., Benyounis, K. Y., Stokes, J., y Olabi, A. G. (2016). Pretreatment of macroalgal biomass for biogas production. *Energy Conversion and Management*, 108, 202-209. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.008>
- Mood, H.S., Hossein, A., Tabatabaei, M., Salehi, G., Najafi, G. H., Gholami, M., y Ardjmand, M. (2013). Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 77-93. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.033>
- Murray, J., y King, D. (2012). Climate policy: Oil's tipping point has passed. *Nature*, 481(7382), 433-435. <https://doi.org/10.1038/481433a>
- Osman, A. I., Abdelkader, A., Farrell, C., Rooney, D., y Morgan, K. (2019, January). Reusing, recycling and up-cycling of biomass: A review of practical and kinetic modelling approaches. *Fuel Processing Technology*, 192, 179-202. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.04.026>
- Plaza, J., Daza, C., Coral, E., García, A., y Villafuerte, R. (2015). Design, Construction and Implementation of a Low Cost Solar-Wind Hybrid Energy System. *IEEE Latin America Transactions*, 13(10), 3304-3309. <https://doi.org/10.1109/TLA.2015.7387235>
- Prasad, S., y Ingle, A. P. (2019). Impacts of sustainable biofuels production from biomass. *Sustainable Bioenergy*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817654-2.00012-5>
- Suárez-Forero, S. J., Candela-Soto, A. M., Henao-Martínez, J. A., y Bayona-Ayala, O. L. (2019). Evaluación del desempeño del pretratamiento con peróxido de hidrógeno sobre bagazo de caña de azúcar para remoción de lignina. *Iteckne*, 16(1), 21-28. <http://dx.doi.org/10.15332/iteckne.v16i1.2158>

- Subhedar, P. B., y Gogate, P. R. (2013). Intensification of Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulose Using Ultrasound for Efficient Bioethanol Production: A Review. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(34), 11816-11828. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/ie401286z>
- Sun, Y., y Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology*, 83(1), 1-11.
- Wang, B., Gebreslassie, B. H., y You, F. (2013). Sustainable design and synthesis of hydrocarbon biorefinery via gasification pathway: Integrated life cycle assessment and techno-economic analysis with multiobjective superstructure optimization. *Computers and Chemical Engineering*, 52, 55-76. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.12.008>
- Zhang, Q., He, J., Tian, M., Mao, Z., Tang, L., Zhang, J., y Zhang, H. (2011). Bioresource Technology Enhancement of methane production from cassava residues by biological pretreatment using a constructed microbial consortium. *Bioresource Technology*, 102(19), 8899-8906. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.06.061>
- Zhao, H., Jones, C. L., Baker, G. A., Xia, S., Olubajo, O., Person, V. N., Division, C. S., Ridge, O., y Ridge, O. (2009). Regenerating cellulose from ionic liquids for an accelerated enzymatic hydrolysis. *Journal of Biotechnology*, 139, 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2008.08.009>
- Zhao, X., Cheng, K., y Liu, D. (2009). Organosolv pretreatment of lignocellulosic biomass for enzymatic hydrolysis. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 82, 815-827. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-1883-1>
- Ziling, S., Gaige, Y., Yan, G., y Tong, Z. (2012). *Comparison of two chemical pretreatments of rice*, 7(3), 3223-3236.

Compostaje una alternativa sostenible para obtención de biosólidos

Alix Estela Yusara Contreras Gómez,
Facultad de Química Ambiental,
grupo de Investigación en Nuevos Materiales y Energías Alternativas - GINMEA,
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: alix.contreras@ustabuca.edu.co

Joam Eduardo Monroy Becerra,
Facultad de Química Ambiental,
grupo de Investigación en Nuevos Materiales y Energías Alternativas - GINMEA,
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: joam.monroy@ustabuca.edu.co

Lina Valeria Ramírez Corredor,
Facultad de Química Ambiental, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: lina.ramirez@ustabuca.edu.co

Luz Ángela Cuéllar Rodríguez,
grupo de Investigación Ambiental, Civil y Básicas en Investigación -
ACBI, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia,
Correo electrónico: luz.cuellar@usantoto.edu.co

Introducción

Las residuales son la causa principal de la contaminación de los ríos. En el mundo aproximadamente el 80% de las aguas residuales producidas por los municipios son vertidas de manera directa o sin tratamiento a las corrientes superficiales o al mar (Moran, 2020). Colombia tiene un panorama similar al mundial, el Estudio Nacional del Agua-ENA determinó que para el 2016 tan solo se removió el 10% de la carga orgánica

generada por las aguas residuales domésticas, en términos de demanda biológica de oxígeno-DBO (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2020). Esto denota la necesidad de construir de nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales - PTAR o en su defecto optimizar las existentes, debido a que el inadecuado manejo de las aguas servidas de los municipios afecta directamente la calidad de las cuencas colombianas.

De acuerdo con la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios de Colombia, para el año 2017, el país contaba con 682 PTAR en operación, siendo las más significativas por la cantidad de agua residual producida las que corresponden a las principales ciudades del país, como son Santiago de Cali “PTAR Cañaveralejo”; Bogotá Distrito Capital “PTAR Salitre Fase I”; Área Metropolitana del Valle de Aburrá “PTAR San Fernando”, y Floridablanca “PTAR Río Frío”. (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018). Esta última tratando adicionalmente el 11% de las aguas residuales del municipio de Bucaramanga (Vanguardia Liberal, 2020).

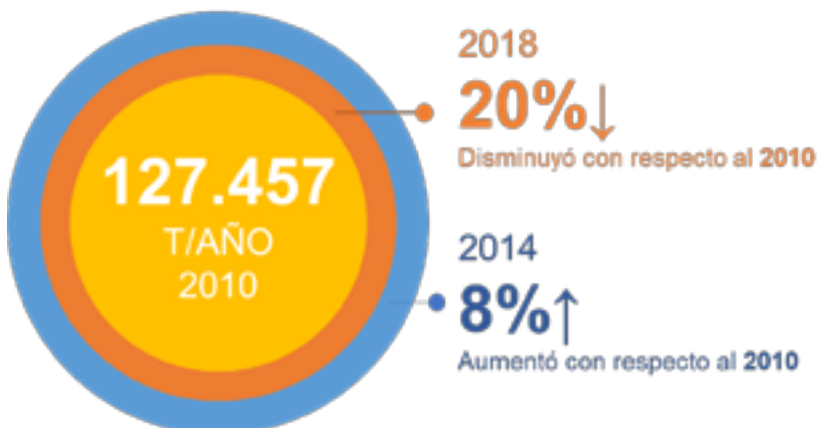
Y bien, las PTAR depuran las aguas residuales municipales, permitiendo que se disminuyan las cargas vertidas a los ríos colombianos, al aplicar la ley de la ecología “Todas las cosas han de ir a parar a alguna parte” es inevitable cuestionarse sobre ¿a dónde va la contaminación que se le retira a las aguas residuales?, al respecto lo que sucede es que se transforman en subproductos; gases y lodos, que en la mayoría si no se gestionan adecuadamente podrían producir impactos ambientales negativos. Sumado a ello, está el aumento de la generación de lodos que aumenta los costos de operación de las plantas, que en ocasiones podría llegar a representar el 60% de los mismos (Lozada y otros, 2005). Esto dificulta que las PTAR cuenten con el adecuado manejo de lodos, por lo que es usual que solo se apliquen lechos de secado, logrando reducir su volumen para finalmente disponerlos en rellenos sanitarios (Moreno, Álvarez, Ogaz y Aguilar, 2010).

La normatividad colombiana, Decreto 1287 de 2014 establece que lodos procedentes de PTAR deben ser transformados en biosólidos; un producto estabilizado cuyas características físicas, químicas y microbioló-

gicas que permiten su uso posterior. Esta norma los clasifica en tipo A o tipo B, siendo más exigente la primera tipología, porque adicionalmente a lo autorizado para la tipología B, permite la utilización del biosólido en jardinería y zonas verdes privadas. Ambos tipos de biosólido son compatibles para usos forestales, agrícolas, acondicionadores de suelo, estabilizadores de suelo, material de enmienda, cobertura para rellenos sanitarios y revegetalización (Colombia, 2014).

De acuerdo con la información disponible en el Sistema Único de Información - SUI de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, en el 2019 se produjeron 118.100 toneladas de lodos, pero se desconoce la cantidad que termina cumpliendo la normatividad de biosólidos, así como el tratamiento que cada generador realiza. Respecto al comportamiento en el tiempo, y analizando los años en que se realizó el ENA (2010, 2014 y 2018), es de resaltar que es muy variable, porque en el año 2010 la producción de lodos fue de 127.457 toneladas, luego en el año 2014 ascendió a 137.310 toneladas y en el año 2018 declinó hasta 102.248 toneladas, para finalmente aumentar en el año 2019 (figura 21). Según Superservicios este comportamiento es posible, porque así como existe año a año el ingreso de nuevas plantas de tratamiento, también se presenta la salida de operación de algunas, como resultado de optimizaciones, actuaciones judiciales, ordenamiento ambiental, entre otros (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018).

Figura 21. *Comportamiento generación de lodos Colombia*



Fuente: Elaboración de los autores a partir de información del SUI.

La dificultad del manejo de los lodos está en que sus características dependen directamente de los hábitos de consumo de las personas. Investigaciones anteriores han determinado que el principal problema de contaminación de los lodos se da por la alta concentración en patógenos y sus altas cargas orgánicas (Procuraduría General de la Nación, 2003), pero requieren también del estudio de otro tipo de contaminantes como son metales pesados y contaminantes emergentes como microplásticos, antibióticos, hormonas, entre otros.

Considerando la magnitud del problema y la relevancia de desarrollar métodos que contribuyan al manejo y disposición final de estos residuos, cumpliendo con la normatividad de biosólidos, incluso planteando ir más allá para la obtención de un producto con valores agregados, que permita diversificar sus utilidades. Esto motivó que la presente investigación involucrara como enfoque la economía circular, con el objetivo de establecer una transformación al lodo, que permita su aprovechamiento buscando su reincorporación al ciclo económico con beneficios ambientales.

La investigación fue realizada por la Universidad Santo Tomás durante el 2018, por el grupo de Investigación en Nuevos Materiales y Energías Alternativas - GINMEA de la Seccional Bucaramanga y el grupo de Investigación Ambiental, Civil y Básicas en Investigación - ACBI de la Seccional de Tunja, abarcando el estudio de las características de los lodos generados en las PTAR de las ciudades de Floridablanca (PTAR Río Frío) y Tunja, y el desarrollo de una propuesta de manejo como solución para la obtención de biosólidos con criterios de sostenibilidad ambiental.

Materiales, procedimientos y herramientas

Caracterización del lodo

La caracterización inicial se realiza con el fin de evaluar la muestra en relación con la normatividad que reglamenta los criterios de calidad para su uso final como biosólido. Estos parámetros están establecidos en el Decreto 1287 de 2014 y son: 1. Químicos: Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Mercurio (Hg), Molibdeno (Mb), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Selenio (Se) y Zinc (Zn). 2. Microbiológicos: Colifor-

mes fecales, Huevos de Helmintos Viables, Salmonella y Virus Entéricos (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2014). Adicionalmente, se sugiere analizar otros parámetros fisicoquímicos que permitan su evaluación como futuro coadyuvante del suelo. En la tabla 20 se indican los parámetros y métodos utilizados para la caracterización de muestras.

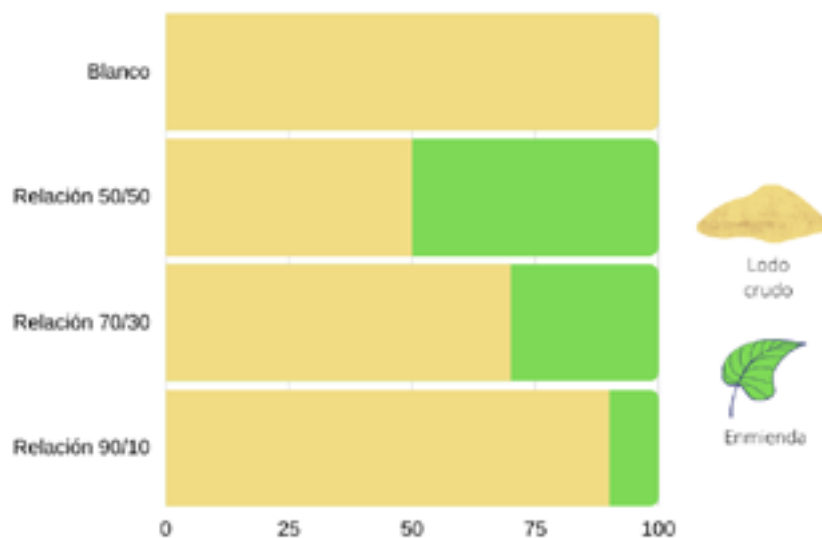
Tabla 20. *Parámetros y métodos empleados en caracterización de las muestras*

Parámetro	Método
Fósforo	Bray II
Nitrógeno	Kjeldahl
Materia orgánica	Walkley y black
Intercambio catiónico	Bases intercambiables
Cu, Mb, Se, Pb, Zn, Cr, Cd y Ni	Absorción atómica
As y Hg	Horno de grafito
Coliformes fecales	Recuento
Huevos de Helmintos	Recuento

Fuente: Elaboración de los autores.

Proceso de compostaje de lodos

El proceso de compostaje se desarrolló mediante la implementación de 6 pilas de compostaje, 3 para el proceso con los lodos de Floridablanca y 3 para el proceso con los lodos de Tunja, usando como material de enmienda residuos de poda en las siguientes proporciones: 50/50, 30/70 y 10/90. A cada experimento se adicionó una pila denominada “blanco” que solo se cubrió con tierra. El material de enmienda utilizado fue caracterizado por tratarse de residuos de poda susceptible de contaminación, por fuentes de emisión móviles, y se tomó como blanco material vegetal de referencia, obtenido de un área rural alejada. La figura 22 muestra la relación lodo y enmienda usada en el experimento.

Figura 22. Relaciones usadas en el experimento compostaje de lodos

Fuente: Elaboración de los autores.

La aireación en las pilas de compostaje se realizó dos veces por semana, según recomendación de otras investigaciones (Torres et al., 2007, p. 269), con el fin de disminuir los excesos de agua y mantener un ambiente propicio para las bacterias aerobias (Román, Martínez, y Pantoja, 2013). Esto se realizó en un tiempo de 3 meses, controlando variables en el sitio como: pH, humedad y temperatura.

Al terminar el proceso de compostaje se analizaron las variables de la tabla 20 y se evaluó el producto según la norma de biosólidos, pero también usando la norma técnica colombiana 5167 para establecer si cumplía con los requisitos de productos orgánicos usados como abonos, fertilizantes o enmiendas de suelo, aun siendo está muy ambiciosa para el producto (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC, 2011).

Proceso de vermicompostaje

El proceso de vermicompostaje se realiza utilizando animales detritívoros como lombrices o escarabajos. Esta práctica se ha incrementado

para la degradación de residuos orgánicos, debido a que se obtiene un abono en menos tiempo, es de fácil control y elevada calidad del producto final (Hait y Tare, 2011). Sin embargo, presenta como inconveniente que no puede alcanzar altas temperaturas, pues los organismos descomponedores deben permanecer a menos de 35°C, razón por la cual no es un proceso que permita la eliminación de patógenos (Ndegwa y Thompson, 2001), lo que motivó a desarrollar primero el proceso compostaje para los lodos.

El propósito de usar vermicompostaje fue obtener un biosólido con mejores características químicas y biológicas. Por ejemplo, Domínguez demostró que el vermicompostaje obtuvo mayor disminución (25 al 35%) en metales pesados que el compostaje para el caso de residuos orgánicos (Domínguez, 2016), siendo de gran interés para lodos residuales por su presencia de metales.

El vermicompostaje se hizo por 3 meses usando el biosólido compostado y larvas de escarabajo suministradas por la organización Tierra Viva, zocriadero con permisos ambientales, ubicado en el municipio de Tunja, departamento de Boyacá, en el marco del convenio existente entre la seccional de Tunja y dicha organización.

Aplicación de biosólidos en cultivos

La aplicación del producto final del compostaje con el proceso de bio-transformación, usando larvas de escarabajo, se realizó en un cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*) de la Organización No Gubernamental - ONG Campo Vivo, ubicada en el municipio de Samacá, departamento de Boyacá, Para el desarrollo de esta fase se realizó el montaje de 3 parcelas, una con biosólido obtenido de compostaje, otra con biosólido obtenido de vermicompostaje y el control que se manejó solo en tierra.

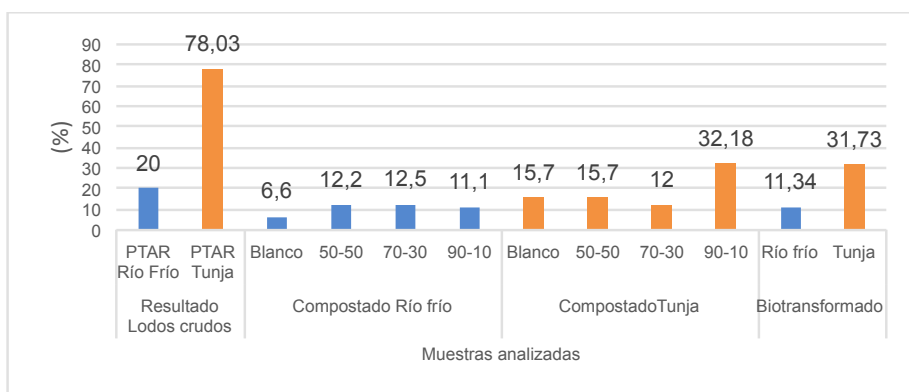
En cada parcela se sembraron 14 plántulas y semanalmente se llevó registro fotográfico, realizando además mediciones de cada plántula y cultivo microbiano de la tierra, con el objetivo de identificar si los microorganismos presentes eran beneficiosos o representaban alguna desventaja en el crecimiento de las plántulas.

Resultados

Resultados parámetros fisicoquímicos en lodos crudos, material compostado y biotransformado

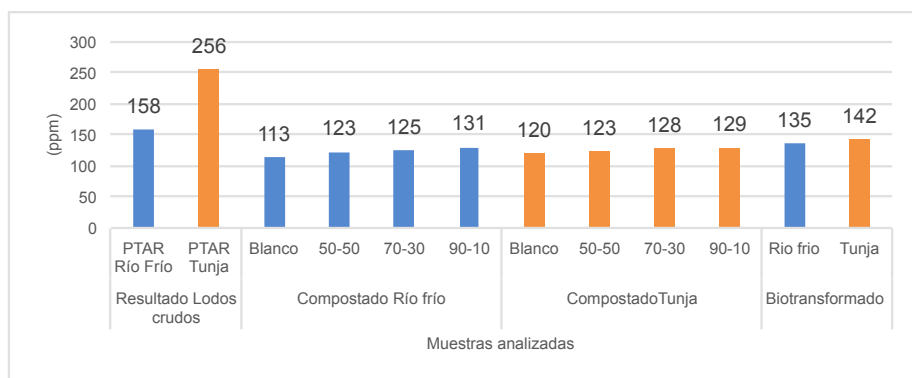
Desde la figura 23 a la 29 se muestran los resultados obtenidos para los parámetros fisicoquímicos, para las tres condiciones: 1. lodos crudos, 2. tratado mediante compostaje y 3. tratado mediante biotransformación con larvas de escarabajo, para los municipios de Floridablanca y Tunja.

Figura 23. Humedad en lodos crudos, material compostado y biotransformado



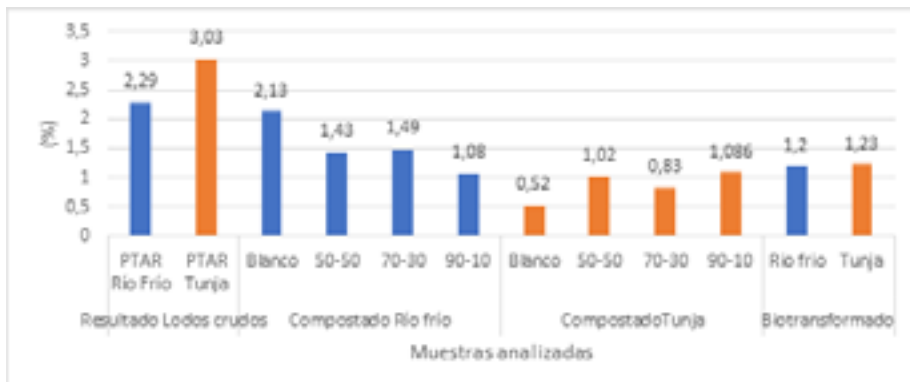
Fuente: Elaboración propia.

Figura 24. Fósforo en lodos crudos, material compostado y biotransformado



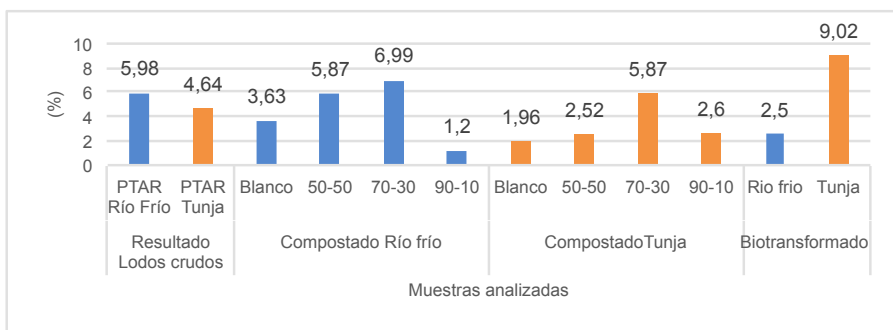
Fuente: Elaboración propia.

Figura 25. Nitrógeno en lodos crudos, material compostado y biotransformado



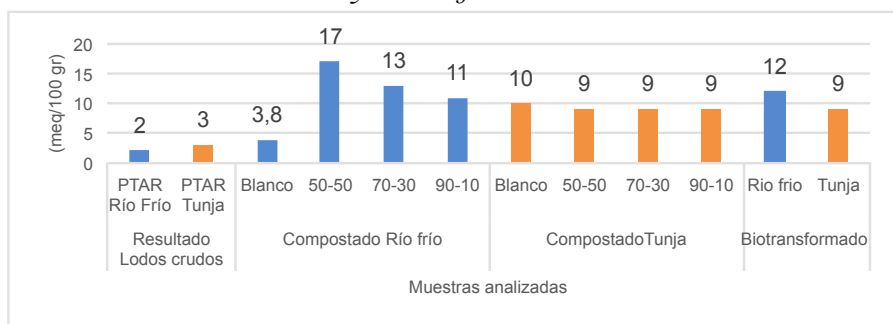
Fuente: Elaboración propia.

Figura 26. Materia orgánica en lodos crudos, material compostado y biotransformado

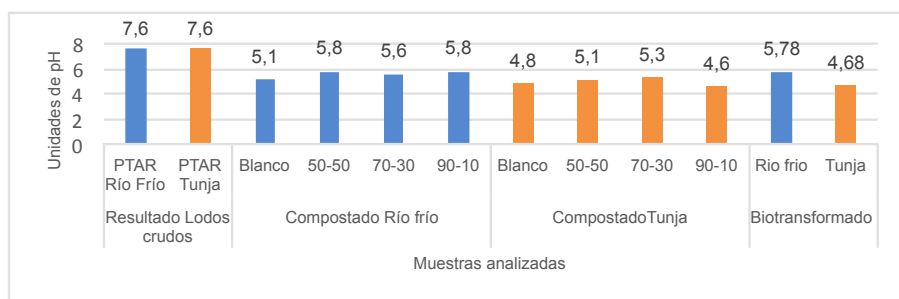


Fuente: Elaboración propia.

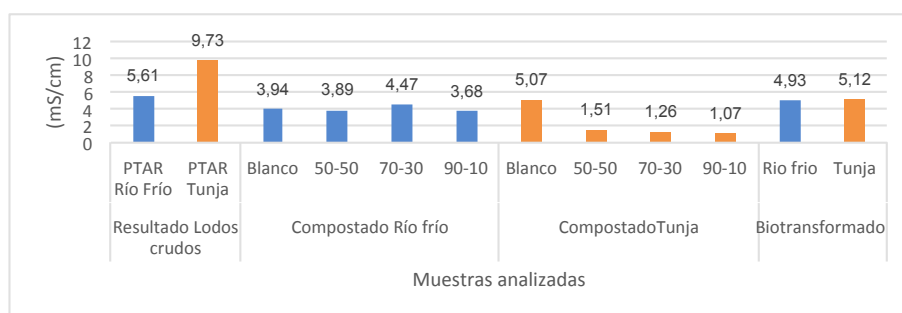
Figura 27. Intercambio catiónico en lodos crudos, material compostado y biotransformado



Fuente: Elaboración propia.

Figura 28. PH en lodos crudos, material compostado y biotransformado

Fuente: Elaboración propia.

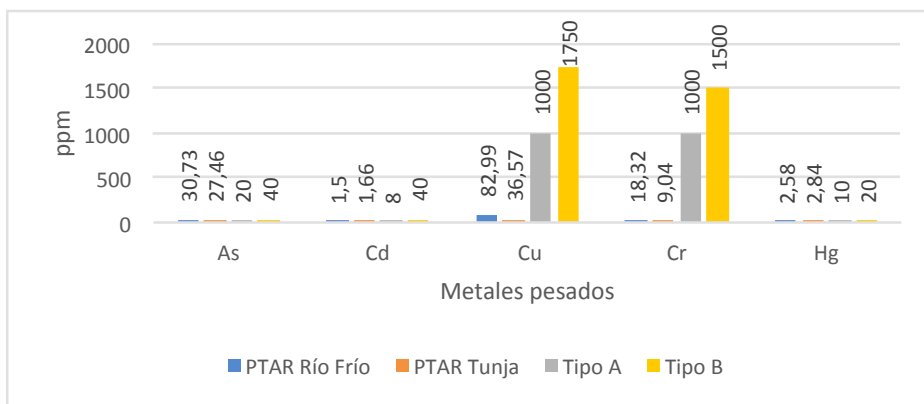
Figura 29. Conductividad eléctrica en lodos crudos, material compostado y biotransformado

Fuente: Elaboración propia.

Resultados metales pesados y parámetros microbiológicos en lodos crudos

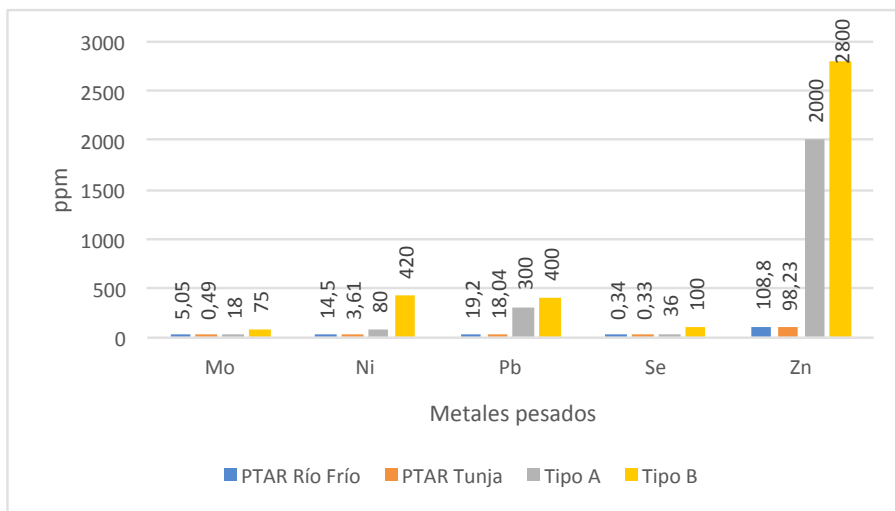
Las figuras 30 y 31 presentan los resultados del contenido de metales pesados en los lodos crudos de las ciudades de Floridablanca y Tunja en comparación con la normativa nacional de biosólidos.

Figura 30. Metales pesados As, Cd, Cu, Cr y Hg en lodos crudos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 31. Metales pesados Mo, Ni, Pb, Se y Zn en lodos crudos



Fuente: Elaboración propia.

La tabla 21 muestra los resultados de los parámetros microbiológicos obtenidos para los lodos crudos y su referente normativo.

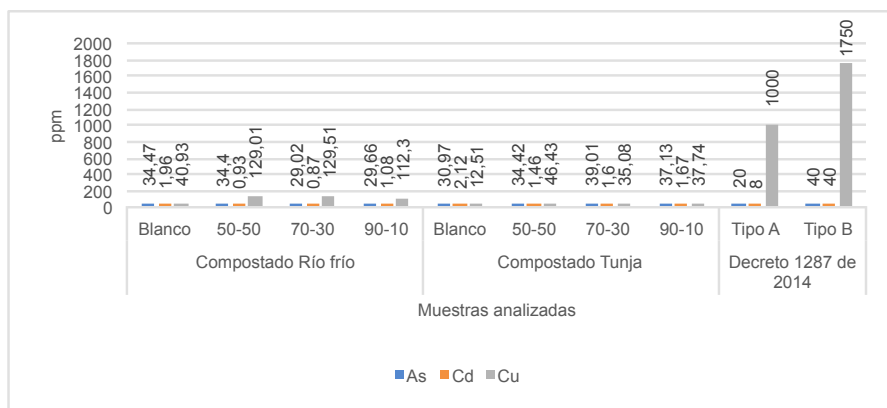
Tabla 21. Resultados parámetros microbiológicos en lodos

Parámetro	Resultado lodos crudos		Decreto 1287 de 2014	
	PTAR Río Frío	PTAR Tunja	Tipo A	Tipo B
Coliformes Fecales	5,50E+06	4,80E+06	<1,00 E+3	<2,00 E+6
Huevos de Helmintos	Presente	Presente	<1,0	<10,0
Salmonella	Presente	Presente	Ausencia	<1,00E+3

Fuente: Elaboración propia.

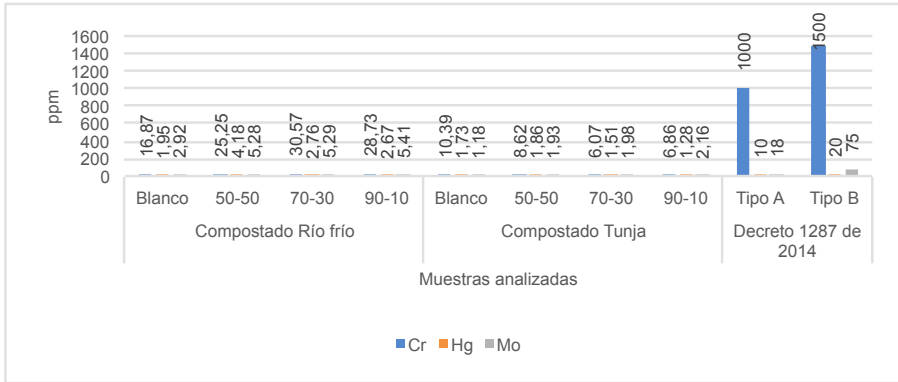
Resultados metales pesados y parámetros microbiológicos en material compostado

Las figuras 32, 33 y 34 muestran los resultados obtenidos para metales pesados en material compostado y en la tabla 21 se indican los resultados de parámetros microbiológicos.

Figura 32. Metales pesados As, Cd y Cu en material compostado

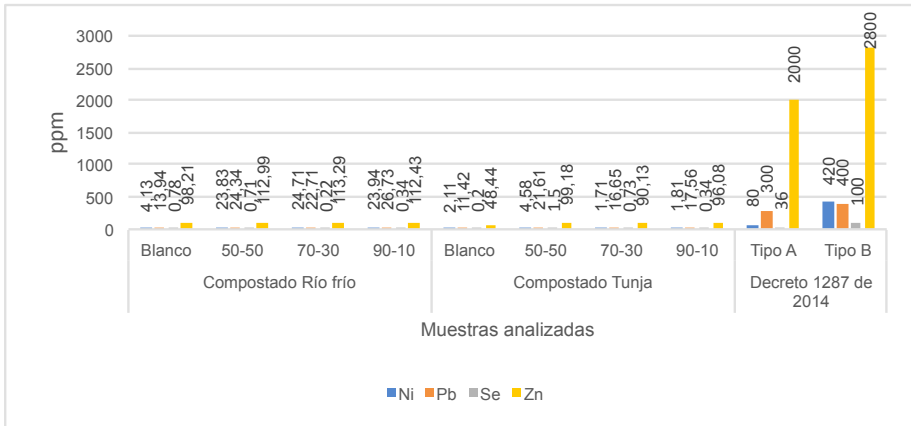
Fuente: Elaboración propia.

Figura 33. Metales pesados Cr, Hg y Mo en material compostado



Fuente: Elaboración propia.

Figura 34. Metales pesados Ni, Pb, Se y Zn en material compostado



Fuente: Elaboración propia.

La tabla 22 indica los resultados microbiológicos de los biosólidos compostados y biotransformados.

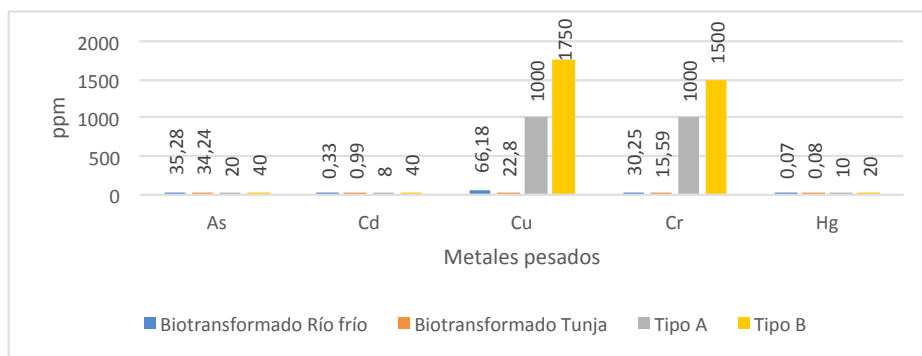
Tabla 22. Resultados parámetros microbiológicos en material compostado

Parámetro	Compostado PTAR Río Frio				Compostado PTAR Tunja				Decreto 1287 de 2014	
	Blanco	50-50	70-30	90-10	Blanco	50-50	70-30	90-10	Tipo A	Tipo B
Coliformes Fecales	2,03E+06	1,80E+06	1,03E+06	1,50E+06	1,36E+06	1,90E+06	2,03E+06	1,73E+06	<1,00 E+3	<2,00 E+6
Huevos de Helminetos	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Ausente	Ausente	<1,0	<10,0
Salmonella	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausencia	<1,00E+3

Fuente: Elaboración propia.

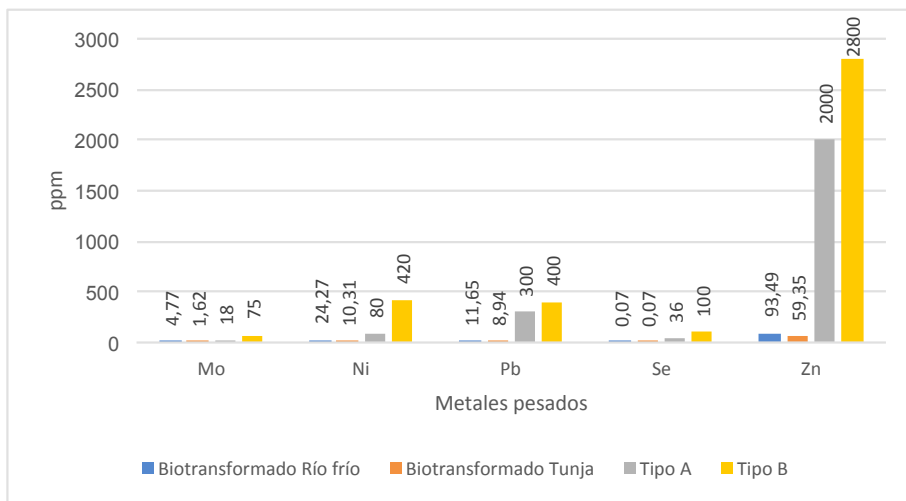
Resultados metales pesados y parámetros microbiológicos en material biotransformado

Las figuras 35 y 36 muestran los resultados obtenidos para metales pesados en los biosólidos biotransformados de los municipios de Florida-blanca y Tunja, y los resultados microbiológicos se observan en la tabla 23.

Figura 35. Metales pesados *As*, *Cd*, *Cu*, *Cr* y *Hg* en material biotransformado

Fuente: Elaboración propia.

Figura 36. Metales pesados Mo, Ni, Pb, Se y Zn en material biotransformado



Fuente: Elaboración propia.

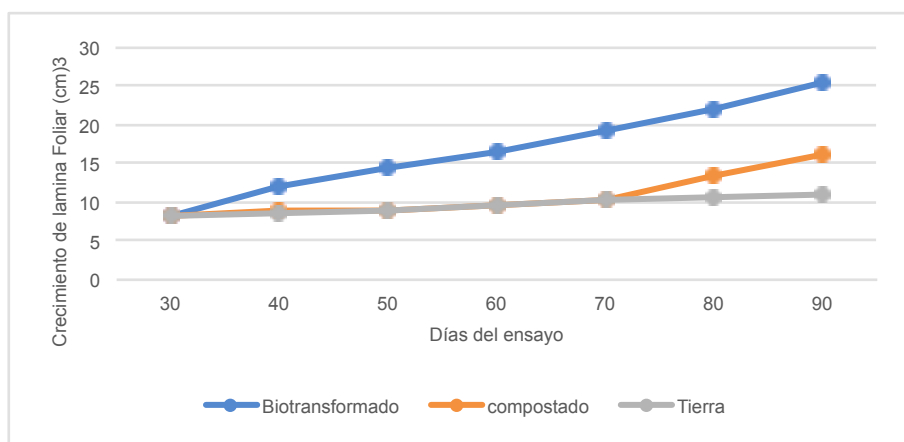
Tabla 23. Resultados parámetros microbiológicos en material biotransformado

Parámetro	Biotransformado		Decreto 1287 de 2014	
	PTAR Río Frío	PTAR Tunja	Tipo A	Tipo B
Coliformes Fecales	1,50E+06	1,73E+06	<1,00 E+3	<2,00 E+6
Huevos de Helmintos	Ausente	Ausente	<1,0	<10,0
Salmonella	Ausente	Ausente	Ausencia	<1,00E+3

Fuente: Elaboración propia.

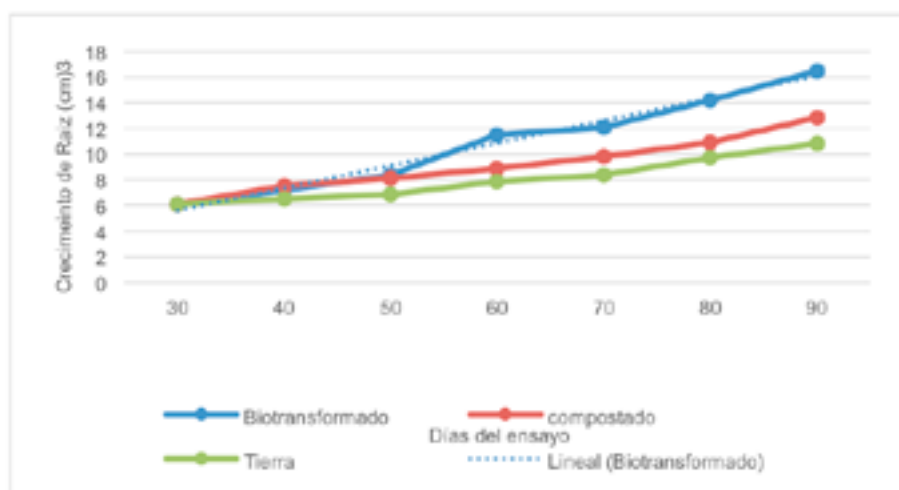
Resultados aplicación de biosólidos en cultivos

Las hojas en las plantas de los tres tratamientos presentaron crecimiento constante en las primeras dos semanas, luego en las siguientes 3 semanas el crecimiento se aceleró y después de la quinta semana alcanzó su valor máximo, cercano a 14 cm (figura 37). Donde se puede observar el mejor rendimiento en cuanto al crecimiento foliar de las lechugas cultivadas con lodos biotransformados por larvas de escarabajo.

Figura 37. *Crecimiento de la lámina foliar de la lechuga*

Fuente: Elaboración propia.

Durante los 90 días de evaluación, el crecimiento de la raíz se desarrolló en forma no lineal en las plantas de las tres parcelas. A partir de los 50 días el crecimiento longitudinal de las raíces para la parcela tratada con biosólido biotrasnformado o vermicompostado, mostró que existieron diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.05$), según los resultados del ANDEVA (figura 38).

Figura 38. *Crecimiento de la raíz de la lechuga*

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de conteo de colonias arrojaron para esta muestra de compostaje 43 unidades formadoras de colonias - UFC, 48 UFC para la muestra biotransformado y, por último, 40 UFC para el blanco o tierra.

Discusión

Parámetros fisicoquímicos en lodos crudos, material compostado y biotransformado

La figura 23 muestra una comparación de los resultados obtenidos para el parámetro humedad en las muestras de lodo crudo, material compostado y biotransformado. La mayor variación se presentó con la PTAR Tunja y también la mayor dificultad, ya que el lodo crudo de esta planta no recibe aún secado de lodos, pero logra después del proceso de compostaje una reducción al llegar a 12% como mínima en la relación 70-30. Por su parte, la PTAR Río Frío presentó una humedad de 20% en lodos crudos gracias a los procesos de secado en los lechos. Las reducciones observadas en las muestras de Floridablanca fueron muy pequeñas en relación con muestra blanco, logrando la mejor reducción en la relación 90-10. Las muestras biotransformado se comportaron de forma similar al proceso de compostaje.

De acuerdo con la figura 24, la PTAR Tunja presentó mayor reducción de este parámetro en el proceso de compostaje, pero en ambos casos se evidencia que la presencia de fósforo está asociada a la porción de lodo, por eso la porción con mayor concentración es la relación 90/10. En relación con el proceso de vermicompostaje en ambos casos el fósforo aumentó, lo cual se puede considerar como favorable por tratarse de un nutriente importante para el suelo.

Según la US EPA, los biosólidos compostados son productos que, por lo general, contienen menos nitrógeno total que la mayoría de las otras formas de biosólidos tratados, un factor principalmente generado debido al procesamiento de las muestras, la deshidratación, la dilución de nutrientes por el material de carga y la pérdida de amoníaco durante el proceso de compostaje (U.S. Environmental Protection Agency - US EPA, 1999). Esto se corroboró porque los resultados de la figura 25, muestran

la reducción significativa de nitrógeno para ambas procedencias del lodo, comportamiento que es similar para proceso de vermicompostaje. Esta reducción puede estar relacionada posiblemente por volatilización durante los tratamientos (The Food and Agriculture Organization - FAO, 2013).

Gracias al contenido de materia orgánica, el cual gradualmente aporta nutrientes, pueden modificarse otras propiedades como la capacidad de intercambio catiónico, la retención de humedad y la agregación del suelo mejorando sus características y productividad (The Food and Agriculture Organization - FAO, 2013). Los valores obtenidos para el parámetro materia orgánica en las diferentes etapas del proceso se muestran en la figura 26. En este caso, la muestra de lodos crudos de la PTAR Río Frío fue la que presentó la concentración más elevada con un valor de 5,98% en materia orgánica. Los valores más altos registrados en las muestras compostadas fueron, en ambos casos, en la proporción 70/30 así: Río Frío 6,99% M.O y Tunja 5,87% M.O. Las muestras de material biotransformado presentaron resultados en los que la PTAR Tunja mostró el valor más alto con 9,02% en M.O.

El parámetro capacidad de intercambio catiónico fue uno de los que presentó aumentos considerables en los resultados de las muestras analizadas de material compostado y biotransformado. Como se observa en la figura 27, los valores de C.I.C en lodos crudos tanto de la PTAR Río Frío como en la PTAR Tunja fueron muy bajos.

El pH fue uno de los parámetros que presentó menores variaciones a lo largo del proceso. Para el caso de las muestras de lodos crudos, como se observa en la figura 28, tanto de la PTAR Río Frío como Tunja, se obtuvieron valores de 7,6 en ambos casos, es decir, valores ligeramente alcalinos, sin embargo, después del proceso de compostado y biotransformado el pH de las muestras pasó a ser ligeramente ácido en todos los casos. Las variaciones en el pH mantuvieron una relación con la C.I.C de manera inversamente proporcional, de esta forma se logró confirmar la coherencia en los resultados. Si las muestras se analizaran en términos de suelo, las variaciones de pH implican una mejora de alto valor en la calidad de las muestras, ya que indican que podría favorecer la retención de nutrientes en el suelo y que, por tanto, podría implementarse en el mejoramiento de suelos con características como baja capacidad de intercambio catiónico.

Los resultados de conductividad eléctrica de la figura 29 indican la disminución en las concentraciones para el proceso de compostaje y se considera una mejora significativa en la calidad de las muestras. Los altos valores en C.E significan un alto contenido de sales en solución, es decir, una característica no deseada en suelos, debido a que esto podría representar una problemática a largo plazo en la realización de procesos vitales para las plantas como el crecimiento de estas. Por esta razón, el proceso de compostaje arroja mejores resultados que le material biotransformado.

Análisis metales pesados y parámetros microbiológicos en lodos crudos, material compostado y biotransformado PTAR Río Frío y PTAR Tunja

Metales pesados y parámetros microbiológicos en lodos crudos

Partiendo de los resultados obtenidos del proceso de caracterización de lodos crudos se comprueba la necesidad de la intervención en la estabilización de los biosólidos, en términos de metales pesados y patógenos a través del proceso de compostaje y biotransformación.

En relación con el contenido de metales pesados en lodos crudos, figuras 30 y 31, se evidencian bajas concentraciones y permiten para ambas ciudades su clasificación como biosólidos tipo B, aun sin tratamiento, por lo que para estos casos los metales no son una limitante.

Ahora bien, teniendo en cuenta los resultados de parámetros microbiológicos en lodos crudos (tabla 21) se encontró que ninguna de las muestras analizadas puede ser clasificada como biosólido, debido a que el parámetro coliforme fecales se encuentra muy por encima del Decreto 1287 de 2014, es decir, que dado estos resultados se requiere el tratamiento de los lodos para poderlos usar como biosólidos y reincorporarlos al suelo.

Metales pesados y parámetros microbiológicos en material compostado

Al observar los resultados obtenidos para metales pesados en material compostado se logran realizar ciertas comparaciones empleando sus respectivos blancos. Teniendo en cuenta las figuras 32, 33 y 34 se evidenciaron reducciones en algunos de los elementos analizados, así: PTAR Río Frío redujo en As, Cd y Se; PTAR Tunja redujo en: Cd, Cr, Hg y Ni. Suponiendo que las reducciones generadas en los elementos analizados corresponden a un comportamiento ideal, el aumento en algunos de estos valores representa una anomalía. Al observar los resultados obtenidos se encontró aumentos en algunos metales analizados de esta forma: PTAR Río Frío aumentó en Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn; PTAR Tunja aumentó en: As, Cu, Mo, Pb, Se y Zn.

Este aumento registrado en las concentraciones de estos metales se relaciona directamente con una interferencia generada por parte del material de enmienda empleado en la realización del proceso de compostaje, teniendo en cuenta que el material vegetal fue tomado de sitios expuestos a emisiones de fuentes móviles. No obstante, a pesar de los aumentos registrados en las concentraciones, se sigue cumpliendo con lo establecido en la normativa nacional para biosólido tipo B para ambos municipios.

Los resultados de parámetros microbiológicos (tabla 22) evidenciaron disminuciones significativas, principalmente en coliformes fecales. La reducción más alta para la PTAR Río Frío se presentó en la proporción 70/30 y para la PTAR Tunja correspondió a la relación 90/10. Gracias a estas reducciones se logró que para ambos municipios se obtengan biosólidos con clasificación tipo B, lo cual comprueba la eficiencia del proceso de compostaje como medio de estabilización de lodos residuales en la reducción de patógenos, que es uno de los parámetros de mayor riesgo.

Los procesos de aireación/volteo son indispensables en la reducción o eliminación de patógenos como se pudo evidenciar en la muestra de compostaje sin voltear, denominada blanco, la cual presentó mayor contenido de patógenos respecto a las demás pruebas de compostaje.

Metales pesados y parámetros microbiológicos en material biotransformado

El proceso de biotransformación demostró ser efectivo en la reducción de metales como Cd, Cu, Hg, Pb, Se y Zn (figuras 35 y 36), pero de igual manera, solo se cumple con clasificación tipo B, debido a la concentración de As en ambos municipios. Esto podría sugerir el desarrollo de investigaciones hacia la reducción del As para lograr la clasificación tipo A.

En términos de parámetros microbiológicos (tabla 23) la biotransformación tiene como ventaja sobre el compostaje, la completa eliminación de los parámetros Huevos de Helmintos y Salmonella, sin embargo, tiene como desventaja que los Coliformes Fecales no presentan mayores reducciones y, por lo tanto, las muestras analizadas se clasificaron de manera definitiva como biosólidos tipo B.

Aplicación de biosólidos en cultivos

En este trabajo se puede concluir que el biosólido biotransformado presentó un mejor rendimiento en el cultivo de lechugas realizado en la ONG. En este sentido es importante resaltar que los valores de UFC en los tres tratamientos se mantuvieron a lo largo de todo el proceso.

Conclusiones

Se concluye que es pertinente proponer que los diferentes procesos utilizados en el manejo y disposición de lodos no son excluyentes, por el contrario, son complementarios. El proceso ideal sería, en primer lugar, llevarlos a los lechos de secado, para que pierdan la mayor parte de la humedad y facilitar su manejo (proceso preliminar), posteriormente, pasarlo a las pilas de compostaje para eliminar patógenos. El proceso de vermicompostaje, aunque logró remoción de metales podría ser reemplazado por un proceso que permita la degradación del As y para llevar al biosólido a una categoría A. Sin embargo, la dupla lechos de secado y compostaje es una excelente estrategia para el manejo ambientalmente sostenible de los biosólidos, porque logra ubicarlos en la categoría B para su aprovechamiento.

La caracterización de los lodos de cada PTAR es muy necesaria para proponer las mezclas óptimas dentro del compostaje, por ejemplo, para los lodos de Floridablanca la mezcla ideal es 90/10 y para Tunja corresponde a 70/30.

El compostaje es un método efectivo para el manejo de los lodos y favorece la incorporación de los biosólidos al suelo, bien sea como productos acondicionadores del suelo o para remediación de suelos contaminados. Esto se evidencia tanto en la disminución del contenido de metales respecto a los lodos crudos. Río Frío 90/10 (As 3%, Cd 27%), Tunja 70/30 (Cd 3%, Cu 4%, Cr 32%, Hg 47%, Ni 52%, Pb 18%, Zn 8%) como en la reducción de patógenos como salmonella (100%) y coliformes (67.2%).

Es importante seleccionar y caracterizar el material de enmienda para eliminar interferencias dentro del proceso de compostaje, ya que estas cuando están cerca de fuentes de móviles pueden tener concentraciones de metales pesados que afectarían la clasificación de los biosólidos.

El manejo de cubrir los lodos con capas de tierra puede ser efectivo en su deshidratación y control de olores, pero reduce significativamente el contenido de M.O. entre 39 y 54%, y mantiene los patógenos, condición que representa un riesgo biológico que seguiría latente en el residuo, con lo que se invalida como estrategia de manejo al no cumplir las características requeridas por la normatividad.

La aplicación de biosólidos en cultivos arrojó resultados positivos, tanto para el material compostado como el biotransformado, aunque el mejor rendimiento resultó para el último, sin embargo, en términos de sostenibilidad el compostaje resulta una mejor alternativa por requerir menos tiempo, capital humano, ahorros económicos en la obtención de los animales detritívoros.

Se sugiere que las empresas operadoras de las PTAR, hagan campañas para la concienciación a sus usuarios, entorno a la importancia de no generar vertimientos con características peligrosas, así como disminuir el consumo del agua, ya que esto impacta directamente en las características del agua y lodo por tratar. Esto en el marco del objetivo de desarrollo

sostenible No. 12, Consumo y producción responsable, que también podrían promover en las empresas ubicadas en sus municipios.

Referencias

- Colombia. (10 de julio de 2014). Sistema Único de Información Normativa. *Diario Oficial*. AÑO CL. N. 49208. 10, p. 18. <http://www.suin-juriscal.gov.co/viewDocument.asp?id=1259502>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC. (2011). *Productos para la industria agrícola. productos orgánicos usados como abonos, fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*. (Segunda actualización ed.). ICONTEC. [https://www.cali.gov.co/dagma/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=31838#:~:text=El%20Instituto%20Colombiano%20de%20Normas%20T%C3%A9cnicas%20y%20Certificaci%C3%B3n%2C%20ICONTEC%2C%20es,productor%20y%20protecci%C3%B3n%20al%](https://www.cali.gov.co/dagma/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=31838#:~:text=El%20Instituto%20Colombiano%20de%20Normas%20T%C3%A9cnicas%20y%20Certificaci%C3%B3n%2C%20ICONTEC%2C%20es,productor%20y%20protecci%C3%B3n%20al%20)
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (5 de julio de 2020). Agua/Evaluación del Recurso Hídrico. <http://www.ideam.gov.co/documents/24277/76321271/Cartilla+ENA+2018+WEB+actualizada.pdf/ba353c39-b15d-4a76-8ed4-3814c4c35239>
- Lozada, P., Escobar, J., Vidal, A., Nates, P., Sánchez, G., Sánchez, M., y Bermúdez, A. (2005). Influencia del material de enmienda en el compostaje de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería e Investigación*, 25, 54-61.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2014). Decreto 1287 del 10 de julio de 2014. <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2014/Documents/JULIO/10/DECRETO%201287%20DEL%2010%20DE%20JULIO%20DE%202014.pdf>
- Moran, M. (5 de julio de 2020). Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Moreno, A., Hernández, J. L., Álvarez, V. P., Ogaz, A., y Aguilar, E. M. (2010). *Libro Científico Anual Agricultura, Ganadería y Ciencia Forestal UAAA-N-2009*. Coahuila, México: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. https://www.researchgate.net/publication/293531008_Modificacion_de_las_Propiedades_Quimicas_de_Lodos_Residuales_de_Met-Mex_Penoles_con_Lombrices_Eisenia_fetida

- Procuraduría General de la Nación. (30 de enero de 2003). *Informe de seguimiento gestión de residuos sólidos en Colombia*. https://www.paho.org/col/index.php?option=com_docman&view=download&category_slug=publicaciones-ops-oms-colombia&alias=1380-inf-seguimiento-gestion-recursos-solidos&Itemid=688
- Román, P., Martínez, M., y Pantoja, A. (1 de marzo de 2013). *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO. <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (7 de febrero de 2018). https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2019/Ene/informe_sectorial-cuatrenio_2014-2017_.pdf
- U.S. Environmental Protection Agency - US EPA. (September de 1999). *Biosolids Generation, Use, and Disposal*. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-12/documents/biosolids-generation-use-disposal-us.pdf>
- Vanguardia Liberal. (19 de mayo de 2020). Cerca de \$15 mil millones costarían estudios y diseños para la Ptar de Bucaramanga. <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/cerca-de-15-mil-millones-costarian-estudios-y-disenos-para-la-ptar-de-bucaramanga-AH2382031>

Aceites esenciales como potenciales antimicrobianos orales naturales.

Estudios *In Vitro*

Martha Cervantes Díaz, Facultad de Química Ambiental,
grupo de Investigaciones Ambientales para el Desarrollo Sostenible – GIADS,
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia
Correo electrónico: martha.cervantes@ustabuca.edu.co

Ciro Eduardo Rozo Correa, Facultad de Química Ambiental,
grupo de Investigaciones Ambientales para el Desarrollo Sostenible - GIADS,
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia
Correo electrónico: ciro.rozo@ustabuca.edu.co

Laura Viviana Herrera, Facultad de Odontología,
grupo de Investigación Sistema Estomatognático y Morfofisiología - SEMF,
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia
Correo electrónico: laura.herrera01@ustabuca.edu.co

Laura Valentina Duarte Velandia, Facultad de Química Ambiental,
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia
Correo electrónico: laura.duarte@ustabuca.edu.co

Mabel Gricelda Céspedes, Facultad de Química Ambiental,
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia
Correo electrónico: mabelgricelda@ustabuca.edu.co

Silvia Fernanda Parra, Facultad de Química Ambiental,
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia
Correo electrónico: silvia.parra01@ustabuca.edu.co

Liz Anyela González Herreño, Departamento de Ciencias Básicas,
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia
Correo electrónico: cobasicas@ustabuca.edu.co

Introducción

La importancia de los estudios de la actividad antimicrobiana a nivel científico puede medirse por el número de publicaciones indexadas en las bases de datos en un periodo determinado de tiempo. Consultando en *Scopus* (Elsevier, B.V, 2020), se encuentra que alrededor del término *antibacterial* desde el año 2000 se registran 119.093 documentos relacionados con el tema, con tendencia creciente, pues cada año se presentan más de 10.000 artículos. Un comportamiento similar se evidencia para el término *antimicrobial*, actualmente se tienen 194.735 registros; para el 2020 ya se encuentran 12.132 documentos en la base de datos de Scopus. Con la finalidad de identificar de manera general los diferentes aspectos de este campo de investigación se estructuraron las siguientes ecuaciones de búsqueda (tabla 24) en la cual se relaciona la disminución en la cantidad de registros en cuanto se vuelve más específica la consulta. Se encontraron pocos trabajos de investigación que relacionan los aceites esenciales evaluados en este proyecto frente a los patógenos orales de interés; sin embargo, sí se aprecia un fuerte interés en la evaluación de la actividad antimicrobial o antibacterial de los productos naturales.

Tabla 24. *Dinámica científica general del estudio de la actividad biológica de los aceites esenciales frente patógenos orales. base de datos Scopus (Elsevier, B.V. 2020).*

Ecuación de búsqueda	Número de registros
(TITLE-ABS-KEY (antimicrobial OR antibacterial) AND TITLE-ABS-KEY (“essential oil*” OR “natural product*” OR “medicinal aromatic plant*” OR “medicinal plant*” OR “volatile oil*”) AND DOCTYPE (ar) AND PUBYEAR > 1999.	13.606
(TITLE-ABS-KEY (“Streptococcus mutans” OR “Porphyromonas gingivalis”) AND TITLE-ABS-KEY (“essential oil*” OR “natural product*” OR “medicinal aromatic plant*” OR “medicinal plant*” OR “volatile oil*”) AND DOCTYPE (ar) AND PUBYEAR > 1999.	389
(TITLE-ABS-KEY (“Streptococcus mutans” OR “Porphyromonas gingivalis”) AND TITLE-ABS-KEY (“Cymbopogon nardus” OR “Cymbopogon martinii” OR “Pimpinella anisum” OR “Rosmarinus officinalis” OR “Elettaria cardamomum” OR “Thymus vulgaris”) AND DOCTYPE (ar) AND PUBYEAR > 1999.	48

Fuente: Elaboración propia.

En concordancia con lo anterior, el creciente interés por el estudio de productos naturales como potenciales antimicrobianos se relaciona también con el fenómeno de Resistencia Antimicrobiana (RA). Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la RA es un problema de salud pública que se define como el cambio en el patrón de respuesta (feno y genotipo) de cualquier tipo de microorganismos (bacterias, virus, hongos y parásitos) ante un antimicrobiano al que han sido expuestos; por tanto, la sustancia se torna ineficiente para controlar su crecimiento. Según la entidad esto se traduce en permanencia de los microorganismos en los ambientes, así como en hospedadores portadores y enfermos y por tanto procesos infecciosos persistentes y su consecuente riesgo de propagación no controlable (Organización Mundial de la Salud, 2018). Desde estos entes de control en salud, se hace un llamado, entre otros, a los sectores científicos, con el fin de generar nuevas opciones para el tratamiento de infecciones por microorganismos resistentes y mitigar así el impacto social que el fenómeno de RA tiene.

La cavidad bucal tiene un complejo microbiota compuesto por cerca de 700 especies o filotipos que incluyen bacterias, hongos, virus y protozoos, la mayoría de ellas residen permanentemente en la boca como especies autóctonas o nativas. Por las complejas dinámicas ambientales (fuentes de nutrientes, hábitos higiénicos, respuesta inmune, condiciones de salud general) de la boca y sus nichos variables (superficies dentales, espacios interdentes, lengua, mejillas, entre otros) la microbiota oral logra mantenerse estable a través de comunidades, las cuales interactúan por diversas estrategias incluyendo principalmente consorcios y *biofilms* (Zhang y otros, 2018). Por otra parte, la microbiota oral es diferente entre individuo e individuo y su estabilidad está asociada con estado de salud bucal y general, al respecto numerosos estudios han demostrado el papel determinantes de este grupo de microorganismos como fuente de infecciones sistémicas y el alto perfil de microorganismos resistentes a los antimicrobianos que la componen (Oberoi, Dhingra, Sharma y Sardana, 2015), (Zhang y otros, 2018).

En lo que respecta a la salud bucal, el creciente conocimiento en la fisiopatología de algunas de las enfermedades bucales más prevalentes como Caries y Enfermedad Periodontal las ha considerado en un mo-

delo de enfermedades multifactoriales en el que géneros o especies de la microbiota desempeñan el rol de iniciadores o activadores de procesos biológicos como destrucción de superficies dentales o inflamación (Zhang y otros, 2018). Este reconocimiento más integral del concepto de enfermedades orales plantea retos importantes para la ciencia, puesto que se requiere una modulación mucho más natural de la microbiota, a través de estrategias alternativas como la terapia fotodinámica y el uso de sustancias con poder antimicrobiano naturales más compatible con los tejidos, entre otros (Sajjan, 2013), (Plonka, 2013).

La caries dental, según la OMS, es la patología bucal más frecuente en el mundo y es la primera causa de dolor y pérdida dental; panorama que es muy similar en América Latina y en países en vía de desarrollo (Ismail y otros, 2008). En Colombia, según el último Estudio Nacional de Salud Bucal (ENSAB IV) más del 90% de la población adulta mayor ha presentado antecedente de caries a lo largo de su vida y su prevalencia se estableció en 55,82% (Ministerio de Salud y Protección Social, 2015). Se considera que es una enfermedad multifactorial caracterizada por la desmineralización de los tejidos duros del diente, como resultado de una compleja interacción entre bacterias productoras de ácidos y los carbohidratos fermentables presentes en las superficies dentales (Pitts, Zero, Marsh et al., 2017). El inicio del proceso de desmineralización está asociado a complejas comunidades de microorganismos más que a uno específico, actualmente la evidencia científica describe entre otras especies de *Veillonella*, *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Propionibacterium*, *Actinomyces spp.*, and *Atopobium sp.* Sin embargo, *Lactobacillus spp* y *Streptococcus mutans* han sido ampliamente estudiados y se conocen con mayor detalle sus posibles atributos de virulencia en la patogénesis de la caries (Teng y otros, 2015).

Como aspectos relevantes sobre el complejo *Streptococcus mutans* se destaca que pertenece al grupo *Streptococcus Viridans* (GSV), son cocos Gram-positivos, dispuestos en cadena, anaerobios facultativos, habitantes nativos y colonizadores primarios del *biofilm* supragingival. Como atributos de virulencia se conocen su capacidad para metabolizar un amplio rango de carbohidratos, la formación de *biofilms* estables que incluyen las conocidas Glucosiltransferasas (Gtfs), adhesinas y los fenómenos de

agregación y coagregación, tolerancia a condiciones de stress entre otros (Lemos, Palmer, Zeng et al., 2019).

Actualmente, se acepta que no existe un tratamiento para la caries y que la promoción y prevención de la salud bucal son la estrategia con mayor impacto en la reducción de los índices; entre otros abordajes novedosos se encuentran el uso de pre y probióticos en alimentos de los infantes, las cremas dentales con sustancias inhibidoras de la adhesión particularmente de *S. mutans* (Pitts, Zero, Marsh et al., 2017). El control de su permanencia en la cavidad bucal como un grupo de patógenos oportunistas es actualmente un punto crítico, principalmente en personas con inmunocompromiso, por su relación con bacteriemia y consecuentemente en endocarditis bacteriana (Goldsmith, Hara, Sato et al., 2015). Con el fin de controlar las bacteriemias y prevenir las infecciones causadas por *GSV*, se utilizan antimicrobianos principalmente Beta-lactámicos como penicilina, amoxicilina y clindamicina, así como Vancomicina, además de componentes activos de amplio espectro de enjuagues bucales como clorhexidina. Sin embargo, cada vez son mayores los reportes de resistencia de los SGV a los antibióticos de uso clínico en frecuencias entre 20-40% según el origen geográfico (Suzuk, Kaskatepe & Cetin, 2016) lo que da cuenta de la necesidad de nuevas opciones y blancos terapéuticos para este grupo de patógenos emergentes.

Por otra parte, la Periodontitis es considerada un problema de salud pública en el mundo, particularmente porque se acepta que una persona presentará esta condición por el resto de su vida. Según la OMS, la prevalencia de Periodontitis en adultos en el mundo se encuentra entre 10-15% (Petersen y Ogawa, 2012)). En el último Estudio Nacional de Salud Bucal (ENSAB IV) en Colombia, la prevalencia de Periodontitis oscila entre 20 a 62,5% según el grupo edad, siendo los adultos mayores de 30 años los más afectados (Ministerio de Salud y Protección Social, 2015). Especial atención se requiere en el control de esta patología, dado que existe evidencia científica de su asociación y papel coadyuvante en enfermedades sistémicas, entre ellas las enfermedades cardiovasculares y la artritis reumatoide (Hajishengallis, 2015)

La periodontitis ha sido definida como un grupo de enfermedades asociada con alteraciones en el *biofilm* subgingival, que produce destrucción de los tejidos de soporte de los dientes y que puede llevar a pérdida dental. Aunque el *biofilm* subgingival tiene una complejidad en su composición y estructura, se considera que al igual que la caries ciertas especies de la microbiota de este espacio se comportan como patobiontes o disbioses; estos rompen el sano equilibrio con los tejidos del huésped bajo múltiples condiciones e inician el proceso de gingivitis si no se controla el daño a los tejidos periodontales (Caton y otros, 2018).

En este abordaje, microorganismos como: *A. actinomycetemcomitans*, *Porphyromonas gingivalis*, *Tannerella Forshytia* and *Prevotella intermedia* se han estudiado ampliamente y se conocen sus atributos de virulencia en la patogénesis de la enfermedad periodontal (Papapanou y otros, 2018). Profundizando, *Porphyromonas gingivalis* es un cocobacilo Gram-negativo, anaerobio, asacarolítico, que requiere de hemina como fuente de hierro (Moreno y Contreras, 2013). Se conocen a la fecha componentes que aportan a la virulencia de *P. gingivalis* y que son determinantes en el daño tisular de los tejidos de soporte, tales como: Lipolisacáridos (LPS), gingipainas, fimbrias/pili, colagenasas, entre otros (Jia y otros, 2019).

Para el manejo clínico primario de las diversas formas de periodontitis, se considera en la mayoría de los casos la terapia mecánica para remoción del *biofilm* (Raspado y Alisado Radicular -RAR). De acuerdo con los resultados y el tipo de paciente se combina con terapia antimicrobiana con regímenes de amoxicilina, ácido clavulánico, amoxicilina+metronizadol, metronidazol y azitromicina. Esta opción está indicada en pacientes mayores de 35 años, con pobre respuesta al tratamiento mecánico y según reportes se presentan mejorías con respecto a la terapia mecánica. Al respecto, consensos científicos sugieren farmacovigilancia, dada la naturaleza aún empírica de esta terapia, las variaciones y amplia resistencia de la microbiota oral, según la exposición previa y los efectos adversos que una antibioterapia sistémica genera sobre todo en personas con enfermedades crónicas de base (Pretzl, Salzer, Ehmke et al., 2019). Para *P. gingivalis* en nuestro medio, las resistencias a estos esquemas alcanzan hasta 20% (Ardila y Bedoya, 2020).

Con el anterior panorama, las investigaciones en esta área asumen el reto de proponer estrategias para la prevención y opciones de sustancias químicas nuevas o mejoradas que usando diversos blancos puedan inhibir mecanismos de los patógenos orales claves, pero también que sean menos tóxicos a los tejidos a nivel local y sistémico. Numerosos estudios sugieren que las plantas y sus productos son eficaces para inhibir a los microorganismos y los *biofilms*, sin embargo, mayores estudios son requeridos (Fortich, 2018) (Karygianni, 2015).

Considerando que la necesidad de nuevas opciones para eliminar los microorganismos patógenos y *biofilms* bucales es perentoria. Los productos naturales, como fuente de compuestos antimicrobianos, derivados de plantas medicinales y aromáticas, se presentan como una alternativa eficaz para reemplazar los antibióticos y los compuestos comerciales disponibles actualmente, cuya eficacia y eficiencia es cuestionada ante los efectos colaterales que presentan.

Actividad antimicrobiana de aceites esenciales

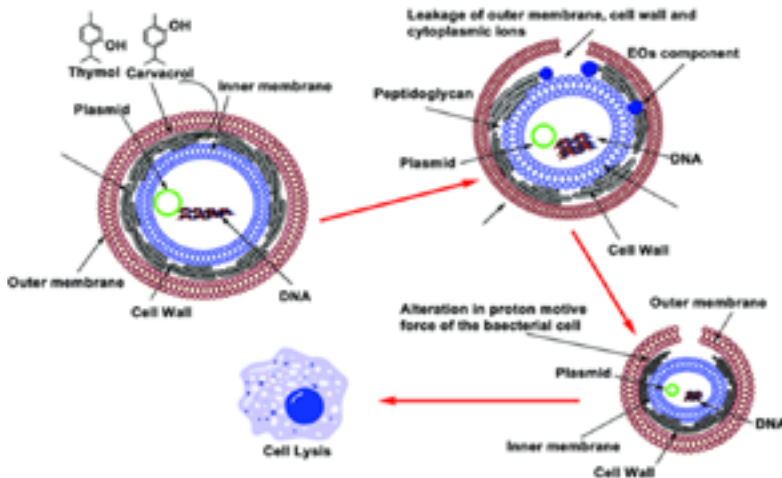
Los AE son metabolitos secundarios que se obtienen de partes de las plantas como flores, tallos, hojas, semillas, madera, entre otros. Se almacenan en cavidades, células secretoras, células epidérmicas, canales o tricomas glandulares. Estos metabolitos exhiben propiedades biológicas especiales asociadas con su composición química, la cual está conformada en algunos casos por terpenos y fenilpropanoides, compuestos fenólicos y aldehídos, lo que los hace promisorios para su aplicación en biomedicina, ya que eliminan adecuadamente muchos patógenos virales, fúngicos y bacterianos (Tariq y otros, 2019).

La actividad antimicrobiana de los aceites esenciales tiene gran aplicación en el sector farmacéutico, nutracéutico, cosmético, perfumería, entre otros. En la actualidad, la problemática generada a partir de la resistencia a los medicamentos antimicrobianos ha incentivado la búsqueda para desarrollar moléculas que sean capaces de controlar patógenos humanos, sin embargo, el uso de compuestos sintéticos para el control de estos microorganismos se ve afectado debido a los efectos secundarios, como toxicidad aguda, potencial cancerígeno y el impacto ambiental, entre

otros. Es aquí donde los aceites esenciales se consideran una alternativa interesante y promisoría para inhibir el crecimiento microbiano de cepas resistentes a medicamentos (Tariq y otros, 2019).

En cuanto al mecanismo de acción de la actividad antibacteriana se ha asociado con la reducción del potencial de membrana, la interrupción de las bombas de protones y el agotamiento de ATP. Algunos estudios asocian esta bioactividad de los compuestos timol, mentol y acetato de linalilo contra *S. aureus* y *E. coli* como el resultado de una alteración de las fracciones lipídicas de las membranas plasmáticas bacterianas (figura 39). La permeabilidad de la membrana se ve afectada, lo que conduce al escape de materiales intracelulares. Además, se ha encontrado que las bacterias gramnegativas muestran menos sensibilidad a los aceites esenciales que las bacterias grampositivas, debido a sus estructuras hidrofílicas de la pared celular que obstruyen a la penetración de compuestos hidrófobos a través de la membrana celular (Sharmeen, Suroowan, Kannan y Fawzi, 2020).

Figura 39. Mecanismo de acción de compuestos tipo fenólicos presentes en aceites esenciales



Fuente: Rajinder, Abhilash y Vikas (2019).

La búsqueda de nuevos antimicrobianos, requiere a su vez del desarrollo de novedosos métodos de bioensayos, los cuales sean sensibles para

detectar pequeñas cantidades de compuestos químicos biológicamente activos. La investigación en etnofarmacología el ensayo de susceptibilidad antimicrobiana (AST, por sus siglas en inglés) es empleado para determinar la eficacia de antimicrobianos potenciales de extractos biológicos contra un número de diferentes especies microbianas. Los métodos AST son empleados para realizar un *screening* de actividad antimicrobiana de extractos de plantas, pero también son ampliamente usados para determinar la utilidad de un compuesto antimicrobiano para combatir infecciones, determinando la concentración mínima inhibitoria (MIC, por su significado en inglés) (Pandey y Shashank, 2013).

Diseño metodológico

El desarrollo experimental de este proyecto consideró las siguientes etapas: la obtención y caracterización de los aceites esenciales de Anís (*Pimpinella anisum*), Romero (*Rosmarinus officinalis*), Citronela (*Cymbopogon nardus*), Palmarosa (*Cymbopogon martinii*), Tomillo (*Thymus vulgaris*) y Cardamomo (*Elettaria cardamomum*), cuya descripción general, composición química y propiedades biológicas se presentan en la tabla 25, posteriormente, se llevó a cabo la determinación de la CMI y la CBM para establecer la actividad antibacteriana frente a *Streptococcus mutans* (ATCC 25175) y *Porphyromonas gingivalis* (ATCC 33277).

Tabla 25. *Composición química y propiedades biológicas de los aceites esenciales bajo estudio*

Nombre científico	Nombre común	Familia	Origen	Propiedades biológicas	Composición química (% Cantidad relativa)
<i>Cymbopogon martinii</i>	Palmarosa	Poaceae	Sur y sudeste de Asia, especialmente India	Propiedades antisépticas, antibacterianas, antioxidantes y antiinflamatorias (Pinzón et al., 2014)	Geraniol (69.7%) Acetato de geraniol (14.8%) Linalool (3.71%).
<i>Cymbopogon nardus</i>	Citronela	Poaceae	Regiones subtropicales y tropicales de Asia	Actividades antivirales, antibacterianas, antifúngica	Citronelal (45.7%), Geraniol (20.04%), Elemol (4.4%).

Nombre científico	Nombre común	Familia	Origen	Propiedades biológicas	Composición química (% Cantidad relativa)
<i>Rosmarinus officinalis</i>	Romero	Lamiaceae	Noroeste de África y el sur de España	Aleloquímico, antibacterial, herbicida, pesticida, insecticida, fungicida	α -pineno (7,9-25%) Eucaliptol (14,5-15,3%) Alcanfor (1,8-9,3%), Mirceno(17,9-29,5%).
<i>Pimpinella anisum</i>	Anís	Apiaceae	Asia sudoccidental y la cuenca Mediterránea Oriental	Antigenotóxico, antioxidante, antibacterial, insecticida, antimutagénica, fungicida, pesticida	Trans-anetol (80-95%), Metil-chavicol (2,4%), Anisaldehído (0,1%).
<i>Elettaria cardamomum</i>	Cardamomo	Zingiberaceae	Sudeste de Asia, Sri Lanka, Malasia e Indonesia	Analgésicos, antiinflamatorios, antibacteriano, antialérgico, anticariogénico, antihistamínico	α -terpenilo (28,6-50%), linalol (5-10%), limoneno (2,5%), 1,8-cineol (55%).
<i>Thymus vulgaris</i>	Tomillo	Lamiaceae	Europa Central y meridional	Antibacterial, anestésico, antiespasmódico, antioxidante, antidiurético, fungicida, insecticida	Timol (20-55%), p-cimeno (14-45%), Carvacrol (1-10%), gamma-terpineno (5-10%), borneol (8%), linalol (8%).

Fuente: Elaboración propia.

Obtención y caracterización de los aceites esenciales (AE)

Los aceites esenciales de Citronela (*Cymbopogon nardus*), Palmarosa (*Cymbopogon martinii*) y Cardamomo (*Elettaria cardamomum*) fueron obtenidos mediante una destilación por arrastre por vapor en el Laboratorio de Cromatografía y Espectrometría de Masas (CROM-MASS) de la Universidad Industrial de Santander. En tanto que los aceites de Anís (*Pimpinella anisum*), Romero (*Rosmarinus officinalis*) y Tomillo (*Thymus vulgaris*) se obtuvieron mediante el método de hidrodestilación asistida por microondas, implementado en el Laboratorio de Investigaciones Ambientales de la Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga (Céspedes, 2020; Duarte, 2020; Parra, 2020) figura 40.

De igual manera, el estudio de la composición química de los AE se realizó en el Laboratorio de Cromatografía y Espectrometría de Masas (CROM-MASS) de la Universidad Industrial de Santander, mediante el método analítico de cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas (CG-EM), documento normativo: Norma ISO 7609-1985 (E): *Essential oils - Analysis by gas chromatography on capillary columns - general method*; empleando como material de referencia la mezcla certificada de hidrocarburos $C_6 - C_{25}$ (AccuStandard, New Haven, CT). La preparación de las muestras se hizo mediante dilución e inyección directa de los aceites esenciales al equipo cromatográfico. El análisis cromatográfico se realizó en un cromatógrafo de gases AT 6890 Series plus (Agilent Technologies, Palo Alto, California, EE. UU.), acoplado a un detector selectivo de masas (Agilent Technologies, MSD 5975) operado en el modo de barrido completo de radiofrecuencia (*full scan*). La columna empleada en el análisis fue DB-5MS (J & W Scientific, Folsom, CA, EE. UU.) [5%-fenil-poli(dimetil-siloxano), 60m x 0,25 mm x 0,25 μ m]. La inyección se realizó en modo *Split* (30:1), $V_{iny} = 2 \mu$ L.

Figura 40. *Métodos de obtención de los aceites esenciales estudiados en este proyecto de investigación.*



Fuente: Céspedes, 2020; Duarte, 2020; Parra, 2020.

En la tabla 26 se relacionan los componentes mayoritarios presentes en los aceites esenciales estudiados. Para el aceite de citronela se destaca la presencia del citronelal (19,4%) y el citronelol (14,9%). En el de palmarosa, el componente mayoritario es el geraniol (64,0%), en el aceite de anís se encuentra el *trans*-anetol (92,1%), en el de romero, el eucaliptol

(10,7%) y el α -Pino (14,3%). En el aceite de tomillo se destaca el timol (21,2%) y p-cimeno (20,2%), en el de cardamomo se encuentra el acetato de α -terpinilo (40,0%) (Céspedes, 2020; Duarte, 2020; Parra, 2020).

Tabla 26. *Compuestos mayoritarios presentes en los aceites esenciales estudiados*

Aceite Esencial	Compuestos químicos	% Cantidad relativa
Citronela (<i>Cymbopogon nardus</i>)	Limoneno	2,3
	Linalol	0,8
	Citronelal	19,4
	Citronelol	14,9
	Neral	4,7
Palmarosa (<i>Cymbopogon martinii</i>),	Limoneno	0,2
	trans- β -ocimeno	3,2
	Linalol	4,7
	Nerol	0,6
	Geraniol	64,0
Anís (<i>Pimpinella anisum</i>),	Estragol	1,9
	p-Anisaldehído	1,8
	trans-Anetol	92,1
	γ -Himachaleno	1,0
	Metilbutirato de trans-pseudoisoeugenilo	1,4
Romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>)	α -Pino	14,3
	Eucaliptol	24,7
	Linalool	5,0
	Borneol	5,7
	Verbenona	10,7
	Geraniol	6,6

Aceite Esencial	Compuestos químicos	% Cantidad relativa
Tomillo (<i>Thymus vulgaris</i>)	p-Cimeno	20,2
	γ-Terpineno	10,5
	Timol	21,2
Cardamomo (<i>Elettaria cardamomum</i>),	1,8-Cineol	10,5
	Linalool	8,0
	Acetato de linalilo	10,3
	Acetato de α-terpinilo	40,0

Fuente: Céspedes, 2020; Duarte, 2020; Parra, 2020.

Actividad antibacteriana de los AE evaluados

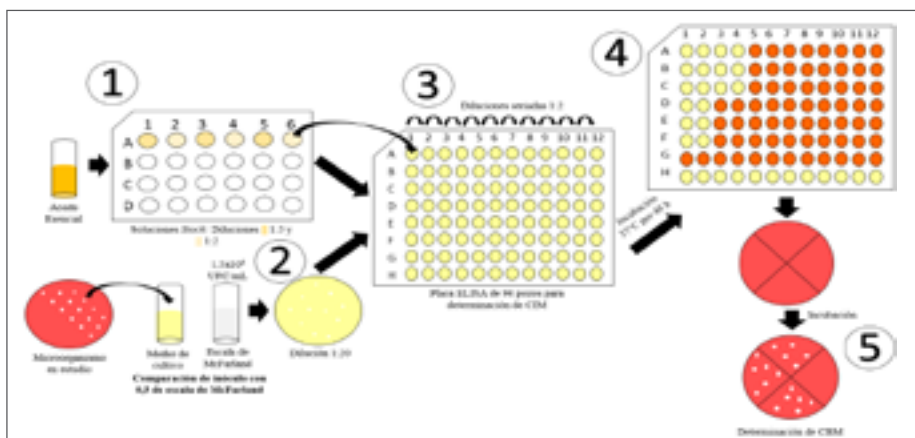
La determinación de la actividad antibacteriana de los aceites esenciales se hizo a través de una adaptación en el Laboratorio de Investigación y Ciencias Básicas (LICB) de los protocolos para pruebas de susceptibilidad M7-A10 para microorganismos con crecimiento aerobios o microaerófilos y protocolo M11-A8 de *Clinical and Laboratory Standards Institute* (CLSI: 2012; CLSI: 2015) para las bacterias *S. mutans* (ATCC 25175) y *P. gingivalis* (ATCC 33277), respectivamente y se resume en la figura 41. Debido a la cantidad disponible, no fue posible evaluar los AE de *Citronela* (*Cymbopogon nardus*) y *Palmarosa* (*Cymbopogon martinii*) frente a *S. mutans*. Los microorganismos fueron utilizados en el mismo pase para todos los experimentos (máximo pase cuatro). Los inóculos se prepararon ajustando turbidez a 0,5 en la escala de McFarland a partir de cultivos puros en medio sólido en condiciones particulares para cada microorganismo conforme se describe en la tabla 27.

Como compuestos de referencia (figura 42) se utilizaron para los ensayos de *S. mutans*: Vancomicina (Sigma-Aldrich, 99,9% de pureza, Saint Louis, EE. UU.) en concentraciones entre 512 a 0,25 µg/mL y para ensayos de *P. gingivalis* el metronidazol (comercial- purificado en LICB) 256-0,12 µg/mL, en concordancia con la guía CLSI.

Tabla 27. Condiciones de cultivo de microorganismos de *Porphyromonas gingivalis* y *Streptococcus mutans*

Microorganismo	Porphyromonas gingivalis	Streptococcus mutans
Medio de cultivo	Agar Sangre (OXOID) - Agar Columbia (OXOID)	Agar Mitis Salivarius (Becton and Dickinson, BD) - Agar Sangre
Atmósfera de incubación	Anaerobia: 80% N ₂ , 10% CO ₂ y 10% H ₂	Anaerobia: 95% N ₂ y 5% CO ₂
Tiempo de incubación	7-14 días	24-48 h
Temperatura de incubación (°C)	37	37

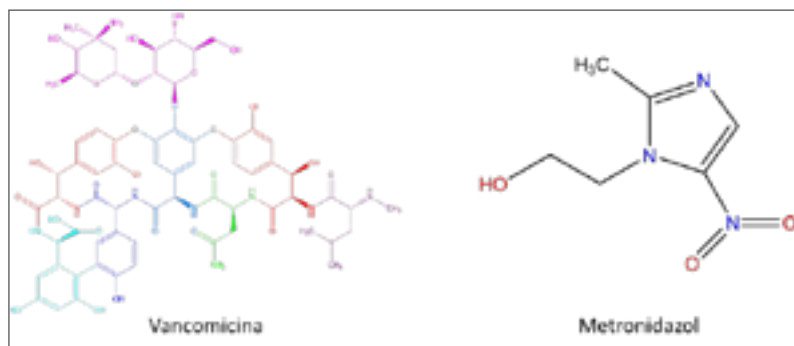
Fuente: Elaboración propia.

Figura 41. Determinación de la CIM y la CBM de los aceites esenciales bajo estudio

Fuente: Céspedes, 2020; Duarte, 2020; Parra, 2020.

Nota: Esquema de etapas realizadas para la determinación de la actividad antibacteriana de los aceites esenciales. 1. Preparación de soluciones stock de aceites esenciales, mediante diluciones 1:5 y 1:2 de cada uno, en placa de 24 pozos; 2. preparación del inóculo, teniendo en cuenta la escala de McFarland y posterior dilución 1:20; 3. microdilución en placa de 96 pozos estériles mediante diluciones seriadas 1:2, iniciando a partir de la solución stock; 4. Determinación de CIM e inoculación de pozos en agares selectivos y no selectivos; 5. Determinación de CBM de los aceites esenciales.

Figura 42. Compuestos de referencia vancomicina (Sigma-Aldrich, 99,9% de pureza, Saint Louis, EE. UU.); y metronidazol (comercial- purificado en LICB).



Fuente: Céspedes, 2020; Duarte, 2020; Parra, 2020.

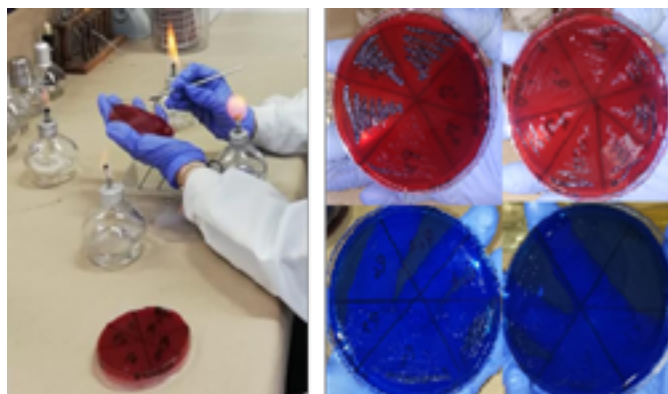
Las soluciones stock y finales se prepararon en los medios de cultivo respectivos (CLSI: 2012; CLSI: 2015). Las concentraciones de los AE por evaluar fueron para *S. mutans* 2000-0,98 µg/mL y para *P. gingivalis* 3000-1,46 µg/mL; lo anterior, como producto de ensayos de solubilidad, revisión bibliográfica y resultados previos del grupo de investigación (Quintero y Rangel, 2016; Torres y Torres, 2018). Las soluciones *stock* se prepararon en DMSO 99% (concentración final DMSO: 0,38%, concentración no tóxica) y, posteriormente, se diluyeron en el medio de cultivo.

Los ensayos de CIM se realizaron por el método de microdilución en placas estériles de 96 pozos. Cada pozo contenía 50 µL caldo BHI + 1% de sacarosa con suplemento de cationes para *S. mutans*. Y caldo BHI suplementado con Hemina para *P. gingivalis*, adicionalmente 50 µL de aceite esencial en la concentración correspondiente. Además, se añadieron 50 µL de inóculo a una concentración de $1,5 \times 10^8$ microorganismos/mL. Las placas se incubaron teniendo en cuenta las condiciones establecidas en la tabla 27 durante 46-48 horas.

Se incluyeron controles de crecimiento positivo (microorganismo en medio de cultivo) y negativos (medio de cultivo). La CIM se determinó de manera visual, teniendo en cuenta los puntos de corte recomendados por la CLSI y reportando la menor concentración del AE en la que no se observó crecimiento bacteriano. Por otra parte, la determinación de la

CBM se llevó a cabo mediante siembra en medio sólido con asa calibrada, la inoculación de pozos cercanos a la MIC (mayores y menores concentraciones) de cada AE en agares selectivos y no selectivos incubados en las condiciones establecidas para cada microorganismo. Se consideró la CBM como la menor concentración de cada solución en la que no evidenció el crecimiento de colonias bacterianas (figura 43). Todos los experimentos se realizaron por triplicado en ensayos independientes, y se validaron a partir de los resultados obtenidos en CIM y CBM de los compuestos de referencia.

Figura 43. *Determinación de la CBM por el método de siembra en medio sólido con asa calibrada*



Fuente: Céspedes, 2020; Duarte, 2020; Parra, 2020.

A continuación, se presentan en la tabla 28 los resultados de actividad antimicrobiana, en la que se evidencia que *P. gingivalis*, fue inhibida por los AE evaluados en concentraciones entre 2000 a 250 $\mu\text{g/mL}$; sin embargo, según los criterios de CLSI mostró perfil de resistencia al metronizadol ($\text{CIM} \geq 32 \mu\text{g/mL}$). Por otra parte, *S. mutans* fue menos sensible a la acción de los aceites, siendo inhibido solo por el aceite esencial de Tomillo, y su perfil frente al compuesto de referencia fue sensible ($\leq 4 \mu\text{g/mL}$). Respecto a los AE, Tomillo mostró ser el más activo, pues inhibió el crecimiento de los dos microorganismos evaluados, frente a *Streptococcus mutans* con CIM: 500 $\mu\text{g/mL}$; CBM 1000 $\mu\text{g/mL}$) y *Porphyromonas gingivalis* (CIM :250 $\mu\text{g/mL}$; CBM 500 $\mu\text{g/mL}$). Por otra parte, los AE de Citronela

y Palmarosa (MIC de 250 µg/mL;CBM de 500 µg/mL), Cardamomo (CIM y CBM 500 µg/mL), Romero (CIM de 750 µg/mL; CBM de 375 µg/mL) y Anís (CIM 2000 µg/mL; CBM de 1500 µg/mL) fueron activos frente a *P. gingivalis*.

Tabla 28. Actividad antibacteriana de aceites esenciales evaluados en el presente estudio frente a *S. Mutans* (ATCC 25175) y *P. gingivalis* (ATCC 33277)

AEs/ Compuestos de referencia	Actividad antimicrobiana (µg/mL)			
	<i>S. mutans</i> (ATCC 25175)		<i>P. gingivalis</i> (ATCC 33277)	
	MIC	CBM	MIC	CBM
Citronela (<i>Cymbopogon nardus</i>)	ND	ND	250	500
Palmarosa (<i>Cymbopogon martinii</i>),	ND	ND	250	500
Anís (<i>Pimpinella anisum</i>),	≥2000	≥2000	750	375
Romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>)	≥2000	≥2000	2000	1500
Tomillo (<i>Thymus vulgaris</i>)	500	1000	250	500
Cardamomo (<i>Elettaria cardamomum</i>),	≥2000	≥2000	500	500
Vancomicina	4	2	NA	NA
Metronidazol	NA	NA	128	128

Fuente: Céspedes, 2020; Duarte, 2020; Parra, 2020.

Nota: NA (No Aplica), ND (No Determinado).

Discusión y Conclusiones

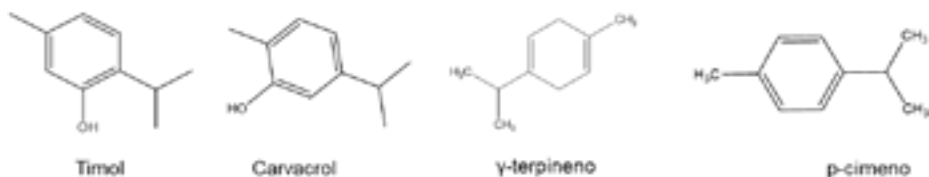
Dentro de los aceites esenciales evaluados se encontró que el de tomillo mostró ser el más activo al inhibir el crecimiento de los microorganismos evaluados. Fani y Kohanteb en 2017 reportaron resultados similares en los que AE de tomillo mostró actividad frente a patógenos orales, entre ellos aislados nativos de *S. mutans* y *P. gingivalis* mostrando una CIM de 1,9 y 32 µg/mL, respectivamente (Fani y Kohanteb, 2017). Con base en su efecto promisorio en el presente trabajo y los reportes previos sobre el evidente efecto del AE de tomillo en patógenos orales,

se avanza en la caracterización de otras propiedades biológicas para su desarrollo farmacológico.

Diferentes autores en sus estudios han relacionado las diversas actividades biológicas que exhiben los productos naturales con la composición y estructura química, especialmente, por la presencia de compuestos de naturaleza fenólica como el timol y carvacrol (figura 44). En el caso del aceite de tomillo evaluado en este trabajo, el timol se encuentra presente en un 21,2% de área relativa. Este componente ha sido reportado como potente agente antimicrobiano, capaz de desintegrar la membrana externa de las bacterias, ya que se une a la membrana bacteriana de forma hidrofóbica, lo cual genera perturbaciones en la membrana, incrementado así la permeabilidad que conlleva la pérdida de iones de potasio y ATP intracelular causando finalmente la muerte celular (López, Ruiz y Delgado, 2016).

Los AE de citronela y palmarosa presentaron también inhibición al *P. gingivalis* (MIC de 250 µg/mL; CBM de 500 µg/mL). Los hallazgos del presente trabajo son concordantes con hallazgos previos de Ocheng y colaboradores en el 2015 quienes encontraron que el AE de citronela fue efectivo desde concentraciones de 0,01% frente a varios patógenos orales, incluyendo *P. gingivalis* (Ocheng y otros, 2015). El efecto reportado podría estar relacionado con la presencia de los siguientes compuestos: el citronelal, cuyo mecanismo de acción se basa en la participación en disrupción de la membrana por compuestos lipofílicos (Maguna, Romero, Garro y Okulik, 2006).

Figura 44. Principales compuestos presentes en el aceite esencial de tomillo (*Thymus Vulgaris*)



Fuente: Elaboración propia.

La presencia del citronelol, el geraniol y el eugenol ocasionan la disrupción de la membrana celular bacteriana mediante tres posibles vías: aumentando la permeabilidad de la membrana a iones pequeños, afectando la estabilidad estructural de la membrana y desestabilizando el empaquetamiento de la bicapa lipídica, cualquiera de estos efectos produce la muerte en la célula bacteriana.

El linalol actúa rompiendo los lípidos de la membrana, favoreciendo el flujo de electrones y de otros contenidos celulares. La pérdida prolongada de estas partículas y compuestos conduce a la muerte del microorganismo (Gómez y López, 2009).

Los resultados de esta investigación representan un importante avance en la búsqueda de nuevas sustancias con efecto antimicrobiano y, particularmente, frente a patógenos orales, dada su alta prevalencia en la población y los inconvenientes con los tratamientos antimicrobianos disponibles. Actualmente, se desarrollan pruebas de cito y genotoxicidad de los mejores AE y sus componentes y se iniciará su evaluación en modelos de *biofilms*.

Referencias

- Ardila, C.M., y Bedoya-García, J. (2020). Antimicrobial resistance of *Aggregatibacter actinomycetemcomitans*, *Porphyromonas gingivalis* and *Tannerella forsythia* in periodontitis patients. *J Glob Antimicrob Resist*, 22, 215-218. doi:10.1016/j.jgar.2020.02.024
- Bakht, H. F. (2015). Recent trends and methods in antimicrobial drug discovery from plant sources. *Austin Journal of Microbiology*, 1(1), 12.
- Caton, G., Armitage, G., Berglundh, T., Chapple, I., Jepsen, S., Kornman, K., . . . Tonetti, M. (2018). A new classification scheme for periodontal and peri-implant diseases, conditions-Introduction, and key changes from the 1999 classification. *J Clin Periodontol*, 45(20), S1-S8.
- Céspedes, M. (2020). *Perfil químico y biológico de los aceites esenciales de Cymbopogon Nardus y Cymbopogon Martinii*. Trabajo de Grado, Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga, Facultad de Química Ambiental.
- de Oliveira JR. et al. (2013). Cytotoxicity of Brazilian plant extracts against oral microorganisms of interest to dentistry. *BMC Complement Altern Med*, 13, p. 208.

- D'Souza, A. B. (2013). The Pomegranate: Effects on Bacteria and Viruses That Influence Human Health. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2013, 606212.
- Duarte, L. (2020). *Determinación de la actividad antibacteriana y fitotoxicidad de los aceites esenciales de anís (Pimpinella Anisum) y romero (Rosmarinus Officinalis)*. Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga, Facultad de Química Ambiental.
- Fani M., y Kohanteb, J. (2012). Inhibitory activity of Aloe vera gel on some clinically isolated cariogenic and periodontopathic. *J Oral Sci.*, 54(1),15-21.
- Fani, M., y Kohanteb, J. (2017). In Vitro Antimicrobial Activity of Thymus vulgaris Essential Oil Against Major Oral Pathogens. *Journal of Evidence-Based Complementary & Alternative Medicine*, 22(4), 660-666. doi: 10.1177/2156587217700772
- Fortich, N. (2018). Tendencias actuales de Caries Dental en Colombia y su comportamiento Epidemiológico. *Cienc Sal Virt*, 1-3. doi:https://doi.org/10.22519/21455333.1131
- Goldsmith, C., Hara, Y., Sato, T. et, al. (2015). Comparison of antibiotic susceptibility in viridans group streptococci in low and high antibiotic-prescribing General Practices. *J. Clin. Pharm. Ther*, 40, 204-207.
- Gómez, A., y López, A. (2009). Potencial antimicrobiano de los aceites esenciales de orégano (*Origanum vulgare*) y canela (*Cinnamomum zeylanicum*). *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 3(1), 33-45.
- Haffajee, S. S. (2002). Dental biofilms: difficult therapeutic targets. *Periodontology*, 28(1), 12- 55.
- Hajishengallis, G. (2015). Periodontitis: from microbial immune subversion to systemic inflammation. *Nat Rev Immunol*, 15(1), 30-44.
- Hotwani, K., Baliga, S., y Sharma, K. (2014). Phytodentistry: use of medicinal plants. *J. Complement Integr Med.*, 11(4), 233-251.
- Ismail, A., Sohn, W., Tellez, M., Willem, J., Betz, J., y Lepkowski, J. (2008). Risk indicators for dental caries using the International Caries Detection and Assessment System (ICDAS). *Commun Dent Oral Epidemiol*, 36(1), 55-68.
- Jia, L., Han, N., Du, J., Guo, L., Luo, Z., y Liu, Y. (2019). Pathogenesis of Important Virulence Factors of Porphyromonas gingivalis via Toll-Like Receptors. *Front Cell Infect Microbiol*, 9, 262. doi:10.3389/fcimb.2019.00262
- Franca, J.R., y De Luca, M.P. (2014). Propolis-based chitosan varnish: drug delivery, controlled release and antimicrobial activity against oral pathogen bacteria. *BMC Complementary and Alternat*, 14-478.

- Karygianni, L., Al-Ahmad, A., Argyropoulou, A., Hellwig, E., Anderson, A.C., y Skaltsounis, A.L. (2015). Natural Antimicrobials and Oral Microorganisms: A Systematic Review on Herbal Interventions for the Eradication of Multispecies Oral Biofilms. *Front. Microbio*, 6, 1529.
- Karygianni, L., Cecere, M. et, al. (2014). High-Level Antimicrobial Efficacy of Representative Mediterranean Natural Plant Extracts against Oral Microorganisms. *BioMed Research International*, Article ID 839019, 8 pages.
- Lemos, J., Palmer, S., Zeng, L., et, al. (2019). The Biology of Streptococcus mutans. *Microbiol Spectr*, 7(1). doi:10.1128/microbiolspec.GPP3-0051-2018
- López, R. M., Ruiz, L., y Delgadillo, J. (2016). Anti-microbial activity of thyme essential oil (*Thymus vulgaris L.*). *Agroproductividad*, 9(11), 78-82.
- Maguna, F., Romero, A., Garro, O., y Okulik, N. (2006). *Actividad antimicrobiana de un grupo de Terpenoides*. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1028-47962012000200005
- Miller AB, C. R. (2015). The antibacterial and antifungal activity of essential oils extracted from Guatemalan medicinal plants. *Pharm Biol.*, 53(4), 548-54.
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2015). *Estudio Nacional de Salud Bucal IV, 2013-2014*.
- Moromi, H. (2004). Bacterias orales y enfermedades sistémicas: Una revisión. *Odontol. sanmarquina*, 8(1), 30-34.
- Oberoi, S., Dhingra, C., Sharma, G., y Sardana, D. (2015). Antibiotics in dental practice: how. *Int. Dent. J*, 4-10.
- Ocheng, F., Bwanga, F., Joloba, M., Sofrata, A., Azeem, M., Putsep, K., ... Gustatsson, A. (2015). *Essential Oils from Ugandan Aromatic Medicinal Plants: Chemical Composition and Growth Inhibitory Effects on Oral Pathogens. Evidence-based complementary and alternative medicine*. doi:<https://doi.org/10.1155/2015/230832>
- Oliveira SA, Z. J. (2014). The antimicrobial effects of Citrus limonum and Citrus aurantium essential oils on multi-species biofilms. *Braz Oral Res.*, 28, 22-7.
- Organización Mundial de la Salud. (2018). *Nota descriptiva: Resistencia a los Antimicrobianos*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/resistencia-a-los-antimicrobianos>
- Pandey, A., y Shashank, K. (2013). Perspective on plant products as antimicrobials agent: *Review. Pharmacologia*, 469-480.
- Papapanou, P., Sanz, M., Buduneli, N., Dietrich, T., Feres, M., Fine, D., ... Tonetti, M. (2018). Periodontitis: Consensus report of workgroup 2 of the 2017 World Workshop on the Classification of Periodontal and Peri-Implant Diseases and Conditions. *J Periodontol*, 89(1), S173 - S182.

- Parra, S. (2020). *Estudio de la composición química y actividad biológica de aceites esenciales de cardamomo (Elettaria Cardamomum) y tomillo (thymus vulgaris)*. Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga, Facultad de Química Ambiental.
- Peña, M., Calzado, M., González, M., Cordero, S., y Azahares, H. (2012). Periodontal pathogens and their relationships with systemic diseases. *Medisan*, 16(7), 1047 -1058.
- Pereira JV, B. D.-S. (2005). Antimicrobial activity of *Arctium lappa* constituents against microorganisms commonly found in endodontic infections. *Braz Dent J*, 16(3), 192-6.
- Perricone, M., Arace, E., Corbo, M., Sinigaglia, M., y Bevilacqua, A. (2015). Bioactivity of essential oils: a review on their interaction with food components. *Frontiers in Microbiology*, 6, 7.
- Petersen, P., y Ogawa, H. (2012). The global burden of periodontal disease: towards integration with chronic disease prevention and control. *Periodontol 2000*, 60(1), 15-39.
- Pitts, N., Zero, D., Marsh, P. et, al. (2017). Dental caries. *Nat. Rev. Dis Primers*, 17030. doi:doi:10.1038/nrdp.2017.30
- Plonka KA, P. M. (2013). Randomized controlled trial: a randomized controlled clinical trial comparing a remineralizing paste with an antibacterial gel to prevent early childhood caries. *Pediatr Dent*, 35:8-1.
- Pretzl, B., Salzer, S., Ehmke, B. et, al. (2019). Administration of systemic antibiotics during non-surgical periodontal therapy—a consensus report. *Clin. Oral Invest*, 3073-3085. doi:https://doi.org/10.1007/s00784-018-2727-0
- Quintero, A., y Rangel, K. (2016). Determinación de la actividad antimicrobiana de aceites esenciales frente a *Enterococcus faecalis*, *Staphylococcus aureus* y *Candida albicans*. Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga, Facultad de Química Ambiental, <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/9419>
- Rajinder, M., Abhilash, R., y Vikas, J. (2019). Essential Oils: An Impending Substitute of Synthetic Antimicrobial Agents to Overcome Antimicrobial Resistance. *Current Drug Targets*, 20, 605-624.
- Sajjan, N. L. (2013). Comparative evaluation of chlorhexidine varnish and fluoride varnish on plaque *Streptococcus mutans* count-an in vivo study. *Int J Dent Hyg*, 11, 191-197.
- Sánchez, L., y Sáenz, E. (2005). Antisépticos y desinfectantes. *Dermatología Peruana*, 15(2), 82-103.

- Sharmeen, B., Suroowan, S., Kannan, R., y Fawzi, M. (2020). Chemistry, bioactivities, mode of action and industrial applications of essential oils. *Trends in Food Science & Technology*, 89-105. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.04.025>
- Süntar I, O. O. (2016). Antimicrobial effect of the extracts from *Hypericum perforatum* against oral bacteria and biofilm formation. *Pharm Biol.*, 54(6),1065-70.
- Suzuk, S., Kaskatepe, B., y Cetin, M. (2016). Antimicrobial susceptibility against penicillin, ampicillin and vancomycin of viridans group Streptococcus in oral microbiota of patients at risk of infective endocarditis. *Le infezioni in medicina*, 24(3), 190-193.
- Tariq, S., Wani, S., Rasool, W., Shafi, K., AhmadBhat, M., Prabhakar, A., ... Rather, M. (2019). A comprehensive review of the antibacterial, antifungal and antiviral potential of essential oils and their chemical constituents against drug-resistant microbial pathogens. *Microbial Pathogenesis*, 134. doi:<https://doi-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/10.1016/j.micpath.2019.103580>
- Teng, F., Yang, F., Huang, S., Bo, C., Xu, Z., Amir, A., Xu, J. (2015). Prediction of early childhood caries via spatial-temporal variations of oral microbiota. *Cell Hosts Microbe*, 18(3), 296-306.
- Torres, K., y Torres, M. (2018). *Obtención, caracterización y evaluación de la actividad antibacmicrobiana de aceites esenciales de diversa familias frente a enterobacterias y candida albincas*. Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga, Facultad de Química Ambiental. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/16824>
- World Health Organization. (2014, abril). Antimicrobial resistance: global report on surveillance 2014. Obtenido de <http://www.who.int/drugresistance/documents/surveillancereport/en/>
- Yamanaka A, K. T. (2007). Inhibitory effect of cranberry polyphenol on biofilm formation and cysteine proteases of *Porphyromonas gingivalis*. *J Periodontol Res*, 589-92.
- Youravong, N., Teanpaisan, R., y Chongsuivatwong, V. (2013). Salivary lead in relation to caries, salivary factors and cariogenic bacteria in children. *Int Dent*, 123-129.
- Zhang, Y., Wang, X., Li, H., Ni, C., Du, Z., y Yan, F. (2018). Human oral microbiota and its modulation for oral health. *Biomed Pharmacother*, 883-893. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.01.146>

Estudio de las propiedades de diferentes aceites residuales de cocina para la producción de biodiésel

Deyanira Ferreira-Beltrán,

Escuela de Química,

grupo de Investigación en Tecnologías de Valorización de Residuos y Fuentes Agrícolas e Industriales para la Sustentabilidad Energética - INTERFASE, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
Correo electrónico: deya.ferbe@hotmail.com

Vladimir Plata,

Departamento de Ciencias Básicas,

grupo de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas - GICIBAYA, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia
Correo electrónico: vladimir.plata@ustabuca.edu.co

María Paola Maradei García,

Escuela de Química,

grupo de Investigación en Tecnologías de Valorización de Residuos y Fuentes Agrícolas e Industriales para la Sustentabilidad Energética - INTERFASE, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
Correo electrónico: mapaomar@uis.edu.co

Introducción

El biodiésel es un combustible alternativo que se caracteriza por ser renovable, biodegradable y no tóxico (Plata et al., 2020). Se produce principalmente mediante la transesterificación de aceites vegetales con alcoholes de cadena corta en presencia de catalizadores básicos (Al-Hammamre et al., 2014). Los aceites comestibles, como la soya, la canola y la palma, son los más usados en este proceso. Sin embargo, el alto costo de

estos aceites ha representado una barrera para la mayor consolidación de la industria del biodiésel (Fonseca et al., 2019).

El uso de aceites residuales de cocina como materia prima del biodiésel no solo contribuye a reducir su costo de producción, sino también el impacto ambiental ocasionado cuando este residuo es arrojado a través del desagüe o en los rellenos sanitarios (Lam et al., 2016). Sin embargo, los aceites residuales contienen impurezas que al superar ciertos límites provocan reacciones que reducen la conversión de los aceites en biodiésel (e.g., saponificación, hidrólisis) (Yaakob et al., 2013).

Las condiciones de cocción (e.g., tipo de aceite, tiempo de uso, tiempo de reuso, temperatura y alimentos cocidos) afectan las propiedades de los aceites y pueden diferir notablemente entre establecimientos gastronómicos que ofrecen menús distintos (Wyse-Mason y Beckles, 2012, Carmona-Cabello et al., 2018). Debido a esto, los aceites residuales pueden constituir una materia prima muy heterogénea (Knothe y Steidley, 2009), y las propiedades del biodiésel producido a partir de ellos pueden diferir notablemente (Wyse-Mason y Beckles, 2012, Dogan, 2016). Por lo tanto, determinar qué tipo de establecimiento genera los aceites más apropiados para la producción de biodiésel sería muy beneficioso. Este fue el objetivo principal del presente estudio. Un objetivo relacionado fue examinar el efecto de las condiciones de cocción sobre las propiedades de los aceites residuales y el rendimiento de biodiésel.

Metodología

Muestreo

Se identificaron los establecimientos gastronómicos con mayor tradición en el área metropolitana de Bucaramanga y se clasificaron en cuatro categorías diferentes: asaderos de pollo (A), restaurantes de comidas rápidas (CR), productores de pasabocas (P) y restaurantes tradicionales (RT). En total se identificaron 42 establecimientos, los cuales se visitaron para aplicar una encuesta sobre el proceso de cocción y solicitar una muestra de aceite residual.

Acondicionamiento de las muestras

Las muestras de aceite residual se acondicionaron mediante filtración al vacío a través de un tamiz de tela seguida de centrifugación a 5800 rpm durante 20 minutos. Los aceites acondicionados se almacenaron en botellas ámbar a 25°C bajo atmósfera de nitrógeno para evitar su degradación.

Caracterización de los aceites residuales

Los aceites acondicionados se caracterizaron mediante el índice de acidez, el índice de peróxidos y la viscosidad dinámica, siguiendo las normas AOAC 940.28, AOAC 965.33 y ASTM D2196, respectivamente. El contenido de humedad se determinó midiendo la pérdida de masa al calentar los aceites (~ 5 g) desde 25 hasta 120°C en un analizador de humedad (MX-50).

Producción del biodiésel

Los aceites acondicionados se transesterificaron utilizando las siguientes condiciones: relación molar metanol:aceite 6:1, 1 % en peso de KOH, 65°C, 1 h. Una vez separado el biodiésel de la glicerina por decantación, se purificó mediante lavados sucesivos con agua destilada (relación volumétrica agua:biodiésel 1:1) a 50°C hasta alcanzar un pH neutro. Posteriormente, se removió el metanol y la humedad remanente del biodiésel mediante calentamiento a 110°C durante 20 min. El biodiésel purificado se almacenó en botellas ámbar a 25°C bajo atmósfera de nitrógeno para evitar su degradación, y se calculó el rendimiento de biodiésel mediante la Ecuación (1):

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{Masa de biodiesel producido}}{\text{Masa inicial de aceite residual}} \times 100 \quad (1)$$

Análisis estadístico

Los datos, obtenidos por duplicado, se analizaron mediante ANOVA seguido de la prueba de comparación múltiple LSD utilizando el *software* Statgraphics Centurion *software* (versión de prueba gratuita, StatPoint

Technologies, Inc., Warrenton, VA, USA). Se consideró un valor- $p < 0.05$ como estadísticamente significativo.

Resultados

Muestreo

En más del 70% de los establecimientos visitados se negaron a participar en el estudio (31). En algunos de esos establecimientos respondieron inmediatamente, pero en la mayoría respondieron después de varias visitas. Incluso, hubo establecimientos donde nunca respondieron (13). Quienes no aceptaron participar arguyeron que la información que iban a suministrar era confidencial. Al final, en solo 11 establecimientos aceptaron responder la encuesta y entregar la muestra de aceite residual.

Se encontró una amplia variedad de condiciones de cocción en los establecimientos visitados (tabla 29), evidenciándose que las prácticas culinarias difieren notablemente incluso entre establecimientos pertenecientes a la misma categoría. Esto es contrario a lo reportado por otros autores, quienes afirman que las prácticas culinarias son parecidas en los establecimientos donde se ofrece el mismo menú (Wyse-Mason y Beckles, 2012).

Tabla 29. *Condiciones de cocción utilizadas en los establecimientos visitados*

Establecimiento*	Tipo de aceite	Tiempo de uso (h/día)	Tiempo de reuso (días)	Temperatura de cocción (°C)	Alimentos cocidos
A1	Palma	> 8	3-7	150-200	Carnes, tubérculos
A2	Mezcla	3-5	3-7	> 350	Carnes, tubérculos
A3	Palma	> 8	1-3	> 300	Carnes, tubérculos
CR1	Palma	12	6	> 250	Tubérculos
CR2	Palma	5-8	3-7	200-250	Tubérculos, embutidos
P1	Mezcla	5-8	1	150-200	Harinas, tubérculos

Establecimiento^a	Tipo de aceite	Tiempo de uso (h/día)	Tiempo de reuso (días)	Temperatura de cocción (°C)	Alimentos cocidos
P2	Palma	16	4-5	115-170	Carnes, harinas, tubérculos
P3	Palma	6	1-3	< 150	Harinas
RT1	Mezcla	5-8	4-5	230	Carnes, tubérculos
RT2	Mezcla	3-5	1-3	< 150	Carnes, tubérculos
RT3	Mezcla	> 8	1-3	<150	Carnes, tubérculos

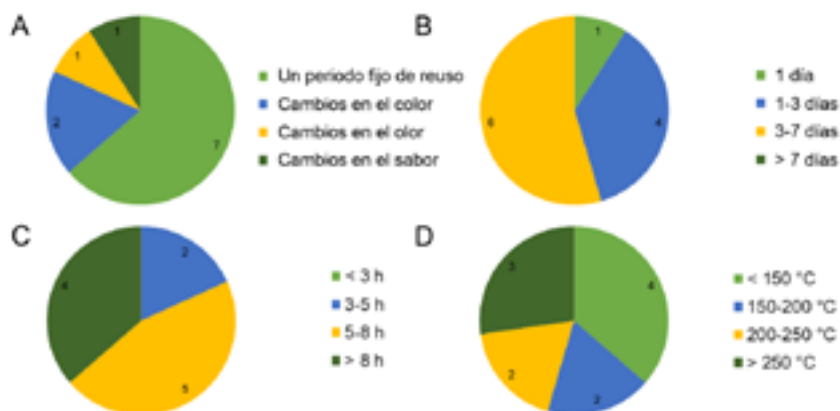
a A1 denota asadero de pollo 1; A2, asadero de pollo 2; A3, asadero de pollo 3; CR1, restaurante de comidas rápidas 1; CR2, restaurante de comidas rápidas 2; CR3, restaurante de comidas rápidas 3; P1, productor de pasabocas 1; P2, productor de pasabocas 2; P3, productor de pasabocas 3; RT1, restaurante tradicional 1; RT2, restaurante tradicional 2; RT3: restaurante tradicional 3.

Fuente: Elaboración propia.

En seis establecimientos se utiliza aceite de palma, mientras que en el resto se utiliza una mezcla de aceites compuesta principalmente de oleína de palma (tabla 29). El aceite de palma se caracteriza por tener un alto contenido de ácidos grasos saturados, al igual que la oleína de palma (50,74 y 45,94 %, respectivamente) (Che Man et al., 1999). Esto, junto con la presencia de antioxidantes naturales (tocoferoles, tocotrienoles y β -caroteno), hace que los aceites a base de palma sean más estables durante la cocción que otros aceites (Mba et al., 2015).

Diferentes criterios son utilizados para desechar los aceites residuales. En siete establecimientos los aceites se desechan después de un período fijo de reuso, mientras que en el resto se desechan con base en características sensoriales (color, olor o sabor) (figura 45A). Debido a esto, los tiempos de reuso varían entre 1 día y 1 semana, aunque en más de la mitad de los establecimientos los aceites se reusan más de tres días (figura 45B).

Figura 45. Prácticas culinarias utilizadas en los establecimientos visitados (a: criterio para desechar los aceites residuales, b: tiempo de reuso, c: tiempo de uso, d: temperatura de cocción)



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al tiempo de uso, los aceites son sometidos a uso prolongado (> 8 h) en cuatro establecimientos (figura 45C). Esto es de interés, ya que el tiempo de uso es uno de los factores más influyentes sobre las propiedades de los aceites residuales (Choe y Min, 2007). La temperatura de cocción es otro factor influyente; sin embargo, en cuatro establecimientos los aceites son sometidos a temperaturas relativamente bajas (< 150 °C) (figura 45D).

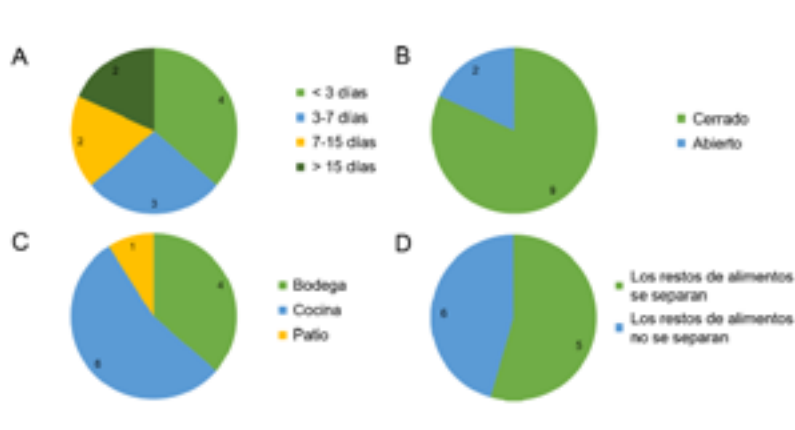
Durante la cocción, los aceites son expuestos generalmente a altas temperaturas en presencia de humedad, oxígeno y alimentos. Este proceso ocasiona una serie de reacciones químicas como la hidrólisis, la oxidación y la polimerización que afectan las propiedades de los aceites (Canakci, 2007). La hidrólisis es causada por la humedad presente en los aceites y los alimentos y provoca la formación de diglicéridos, monoglicéridos, glicerina y ácidos grasos libres (Choe y Min, 2007). Los ácidos grasos contribuyen a incrementar el índice de acidez y la viscosidad de los aceites residuales.

La oxidación es causada por el contacto de los aceites con el oxígeno del aire y produce hidroperóxidos (Monyem et al., 2000). Los hidroperóxidos son muy inestables y pueden descomponerse para producir

una variedad de compuestos, incluyendo ácidos grasos libres, dímeros y polímeros de triglicéridos (Kulkarni y Dalai, 2006). Estos compuestos contribuyen a incrementar la viscosidad de los aceites residuales, por lo cual, los aceites con un alto grado de oxidación pueden tener un alto índice de acidez y ser muy viscosos (Knothe y Steidley, 2009).

No solo las prácticas culinarias influyen en las propiedades de los aceites residuales, sino también las condiciones de almacenamiento. Por lo tanto, se incluyeron algunas preguntas al respecto en la encuesta. Se encontró que más de la mitad de los aceites se almacenan durante menos de una semana, mientras que en algunos establecimientos el almacenamiento puede durar más de 15 días (figura 46A).

Figura 46. Condiciones de almacenamiento de los aceites residuales utilizados en los establecimientos visitados (a: tiempo de almacenamiento, b: tipo de contenedor, c: lugar de almacenamiento, d: separación de los restos de alimentos)



Fuente: Elaboración propia.

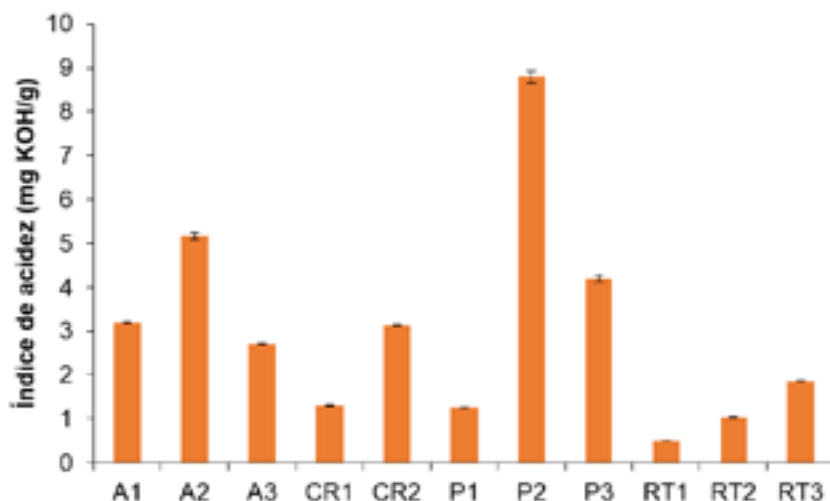
Aunque la mayoría de los aceites residuales se almacenan en recipientes cerrados, en algunos establecimientos se utilizan contenedores abiertos (figura 46B). Además, en solo cuatro establecimientos los aceites son protegidos del calor y la luz directa hasta que son desechados definitivamente (figura 46C). En el resto, los aceites son almacenados en la cocina o en un patio, expuestos al calor de la cocción o a los rayos solares. Estas prácticas son perjudiciales, ya que los aceites se oxidan mediante un mecanismo de radicales libres (Monyem et al., 2000), y el calor y la luz directa facilitan la formación de radicales en la etapa inicial de la oxidación (Choe y Min 2007).

Los restos de alimentos no se separan de más de la mitad de los aceites residuales (figura 46D). Esto también es de interés, ya que los restos de alimentos pueden limitar el uso de estos aceites para la producción de biodiésel incluso si están presentes en bajas concentraciones (Casallas et al., 2018).

Caracterización de los aceites residuales

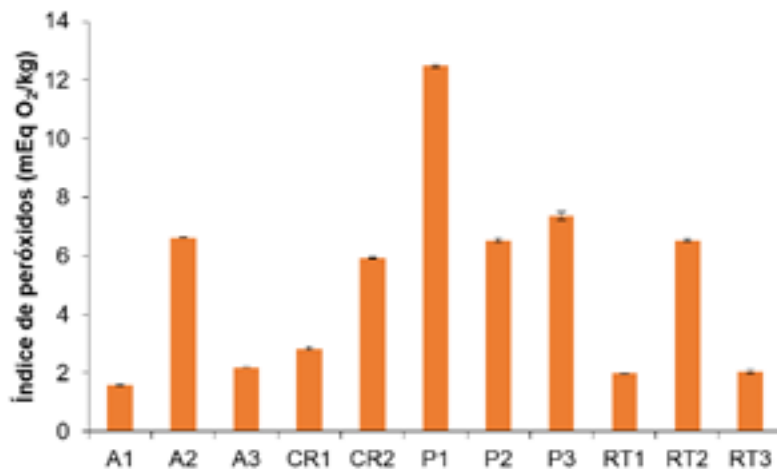
Al igual que con las prácticas culinarias, se encontró una amplia variedad de aceites residuales (figuras 47-50). Se midieron índices de acidez e índices de peróxidos tan bajos como $0,51 \pm 0,01$ mg KOH/g y $1,59 \pm 0,01$ mEq O₂/kg, y tan altos como $8,79 \pm 0,13$ mg KOH/g y $22,53 \pm 0,27$ mEq O₂/kg, respectivamente. La variabilidad del contenido de humedad y la viscosidad dinámica fue mucho menor, indicando que son menos sensibles a las condiciones de cocción. Sin embargo, algunos valores de la viscosidad fueron especialmente altos (P2 y P3). Todo esto es consistente con la amplia variedad de condiciones de cocción utilizadas en los diferentes establecimientos (tabla 29). De esta forma, se confirma que los aceites residuales son una materia prima muy heterogénea.

Figura 47. Índice de acidez de los aceites residuales por establecimiento. Las barras de error muestran la desviación estándar de las réplicas



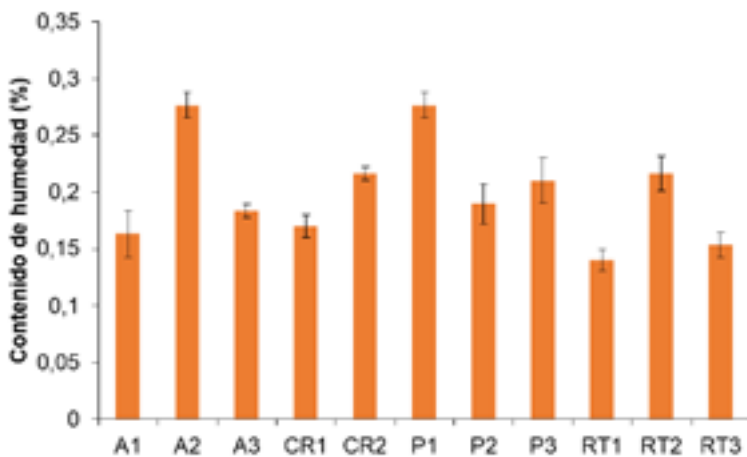
Fuente: Elaboración propia.

Figura 48. Índice de peróxidos de los aceites residuales por establecimiento. Las barras de error muestran la desviación estándar de las réplicas



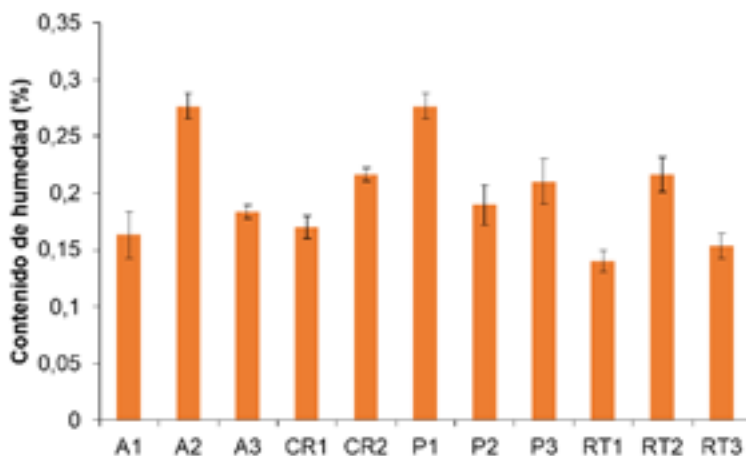
Fuente: Elaboración propia.

Figura 49. Contenido de humedad de los aceites residuales por establecimiento. Las barras de error muestran la desviación estándar de las réplicas



Fuente: Elaboración propia.

Figura 50. Viscosidad dinámica de los aceites residuales por establecimiento. Las barras de error muestran la desviación estándar de las réplicas



Fuente: Elaboración propia.

También se confirma el gran impacto que tiene el proceso de cocción sobre las propiedades de los aceites residuales. En términos generales, todas las propiedades se incrementaron significativamente después de la cocción (valor- $p < 0,05$) (tabla 30). Este aumento es consecuencia de las reacciones que tienen lugar durante la cocción (Canakci, 2007). Sin embargo, el índice de acidez y el índice de peróxidos se incrementaron en mayor medida (2591 and 393%, respectivamente), indicando que son más sensibles al proceso de cocción que el contenido de humedad y la viscosidad dinámica.

Tabla 30. Propiedades de los aceites residuales en comparación con las propiedades de los aceites vírgenes

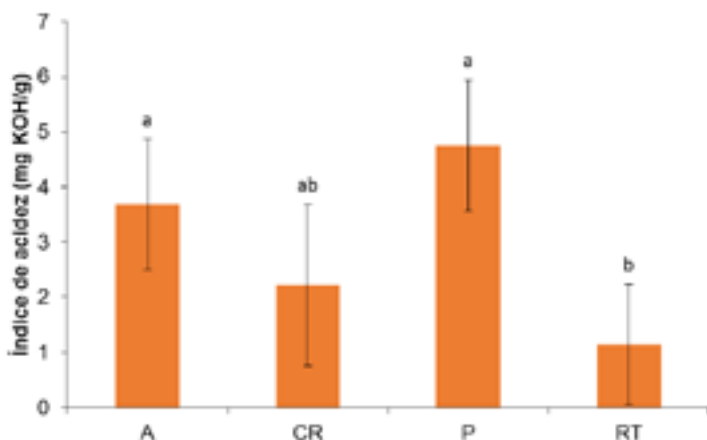
Propiedad	Unidad	Aceites vírgenes	Aceites residuales	Valor- p
Índice de acidez	mg KOH/g	0,13 ^a ± 0,06	3,02 ± 2,32	< 0,0001
Índice de peróxidos	mEq O ₂ /kg	2,61 ± 3,58	5,09 ± 3,26	0,0057
Contenido de humedad	%	0,146 ± 0,027	0,201 ± 0,046	< 0,0001
Viscosidad dinámica	cP	38,4 ± 2,8	46,9 ± 10,7	0,0005

^a Valor promedio calculado para todos los aceites ± desviación estándar.

Fuente: Elaboración propia.

El mayor índice de acidez correspondió a P2 (figura 47). A2 también tuvo un alto índice de acidez. Esto se puede atribuir a que en esos establecimientos los aceites se utilizan de forma prolongada a altas temperaturas (tabla 29). Durante la cocción, la humedad presente en los aceites y los alimentos hidroliza los triglicéridos, y el contacto prolongado de los aceites con la humedad a altas temperaturas incrementa la hidrólisis (Choe y Min, 2007). Debido a esto, los productores de pasabocas y los asaderos de pollo generan los aceites residuales con los mayores índices de acidez en promedio, mientras que los restaurantes tradicionales generan los aceites con los menores índices de acidez (valor- $p = 0,0279$) (figura 51).

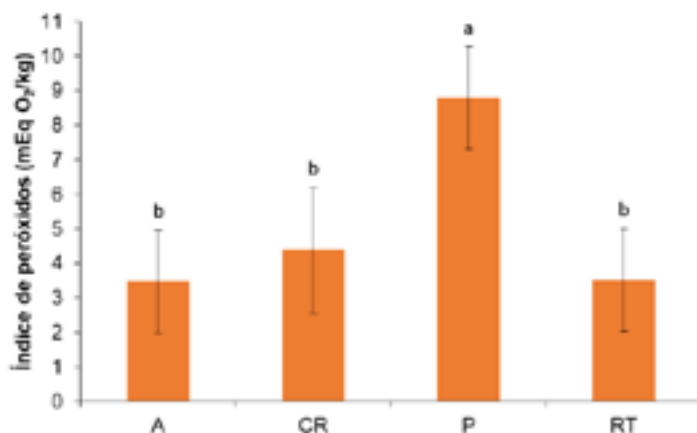
Figura 51. Índice de acidez de los aceites residuales por categoría. Las barras de error muestran los intervalos de diferencia mínima significativa al 95%. Las categorías que tienen letras diferentes son estadísticamente diferentes según la prueba de comparación múltiple LSD



Fuente: Elaboración propia.

El mayor índice de peróxidos correspondió a P1 (figura 48). P3 también tuvo un alto índice de peróxidos. Esto puede atribuirse a que los alimentos que se cuecen en esos establecimientos (harinas) poseen un alto contenido de almidón (tabla 29). El almidón promueve la oxidación de los aceites (Choe y Min, 2007), por lo cual, los productores de pasabocas generan los aceites residuales con los mayores índices de peróxidos en promedio (valor- $p = 0,0040$) (figura 52).

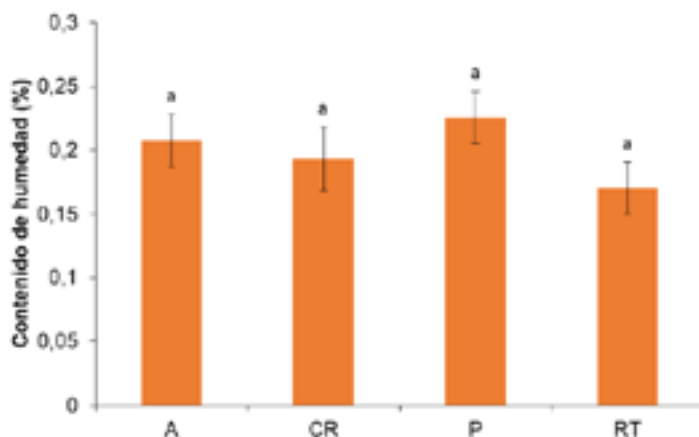
Figura 52. Índice de peróxidos de los aceites residuales por categoría. Las barras de error muestran los intervalos de diferencia mínima significativa al 95%. Las categorías que tienen letras diferentes son estadísticamente diferentes según la prueba de comparación múltiple lsd



Fuente: Elaboración propia.

El mayor contenido de humedad correspondió a P1 (figura 49). La humedad se transfiere de los alimentos a los aceites durante la cocción, y una parte de ella puede permanecer en ellos, especialmente si la cocción se hace en recipientes cerrados (Dogan, 2016). Sin embargo, otros aceites también tuvieron un alto contenido de humedad (A2, CR2, P3 y T2), ocasionando que no exista una diferencia estadísticamente significativa en esta propiedad entre las categorías de establecimientos (valor- $p = 0,0598$) (figura 53).

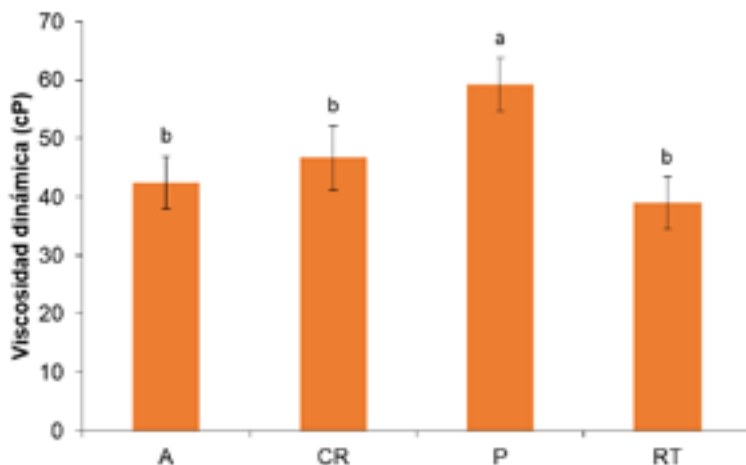
Figura 53. Contenido de humedad de los aceites residuales por categoría. Las barras de error muestran los intervalos de diferencia mínima significativa al 95%. Las categorías que tienen letras diferentes son estadísticamente diferentes según la prueba de comparación múltiple Lsd



Fuente: Elaboración propia.

La mayor viscosidad dinámica correspondió a P2 (figura 50). P3 también tuvo una alta viscosidad dinámica. Esto puede atribuirse a la presencia de compuestos de alta masa molar provenientes de la polimerización de los triglicéridos (Canakci et al., 2007) y es consistente con el alto índice de acidez de esos aceites (figura 47) (Knothe y Steidley, 2009). La polimerización, al igual que la hidrólisis, se incrementa cuando los aceites se utilizan de forma prolongada como en P2 (tabla 29) (Choe y Min, 2007). Debido a esto, los productores de pasabocas generan los aceites residuales más viscosos en promedio (valor- $p = 0,0009$) (figura 54).

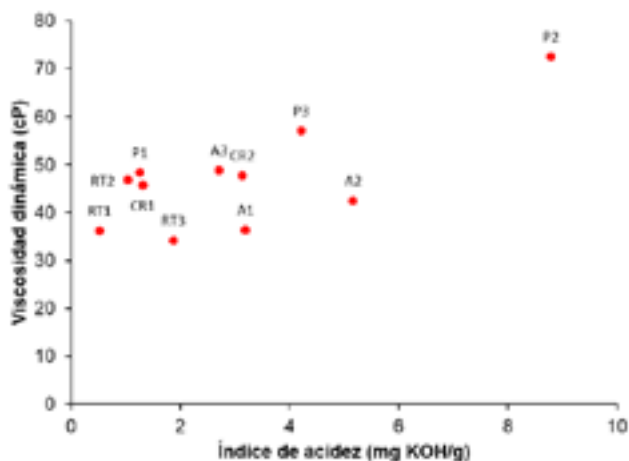
Figura 54. *Viscosidad dinámica de los aceites residuales por categoría.*
Las barras de error muestran los intervalos de diferencia mínima significativa al 95%. Las categorías que tienen letras diferentes son estadísticamente diferentes según la prueba de comparación múltiple lsd



Fuente: Elaboración propia.

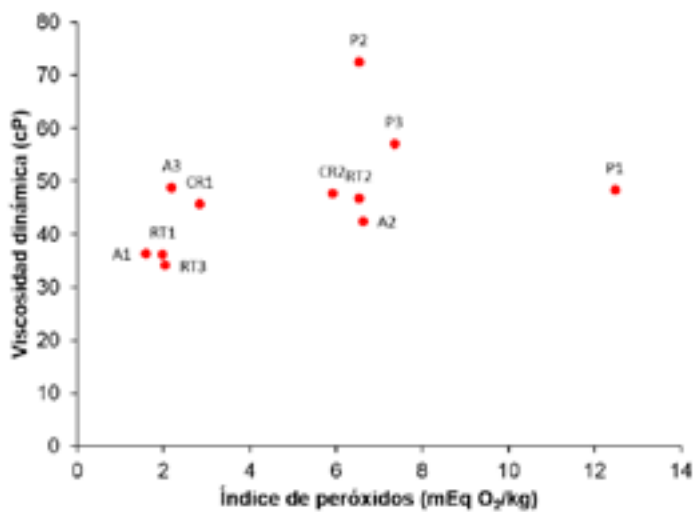
No todos los aceites con viscosidades altas correspondieron a aceites con altos índices de acidez y viceversa. La dispersión de puntos mostrada en la figura 55 revela la falta de correlación entre estas dos propiedades. Esta situación también se evidencia para las demás propiedades que se midieron (figuras 56 y 57). De esta forma, se confirma que la cocción es un proceso complejo (Knothe y Steidley, 2009), en el cual las reacciones que tienen lugar no proceden de forma aislada, sino que interactúan entre sí para contribuir a la degradación de los aceites (Frega et al., 1999).

Figura 55. Índice de acidez de los aceites residuales vs. viscosidad dinámica



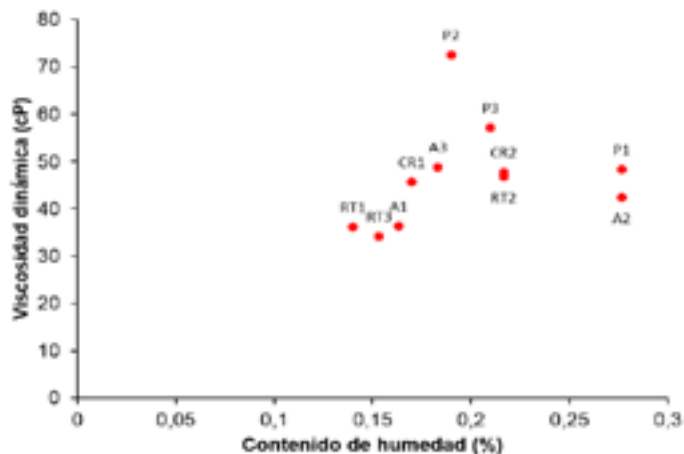
Fuente: Elaboración propia.

Figura 56. Índice de peróxidos de los aceites residuales vs. viscosidad dinámica



Fuente: Elaboración propia.

Figura 57. *Contenido de humedad de los aceites residuales vs. viscosidad dinámica*



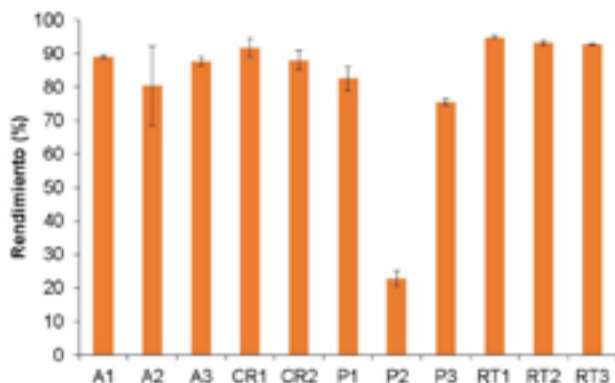
Fuente: Elaboración propia.

Producción del biodiésel

Prácticamente, con todos los aceites residuales se obtuvo un rendimiento superior al 80% (figura 58). La excepción fue P2, cuyo rendimiento fue inferior al 23%. Esto es consistente con el alto índice de acidez de este aceite (figura 47). Durante la transesterificación en medio básico, la presencia de ácidos grasos libres disminuye el rendimiento debido a la desactivación del catalizador (Mendoza et al., 2018). Un resultado similar fue reportado por Wyse-Mason y Beckles (2012), quienes transesterificaron diferentes aceites residuales y obtuvieron un rendimiento inferior al 25% con los aceites cuyo índice de acidez era mayor a 8 mg KOH/g.

Figura 58. Rendimiento obtenido a partir de la transesterificación en medio básico de los aceites residuales.

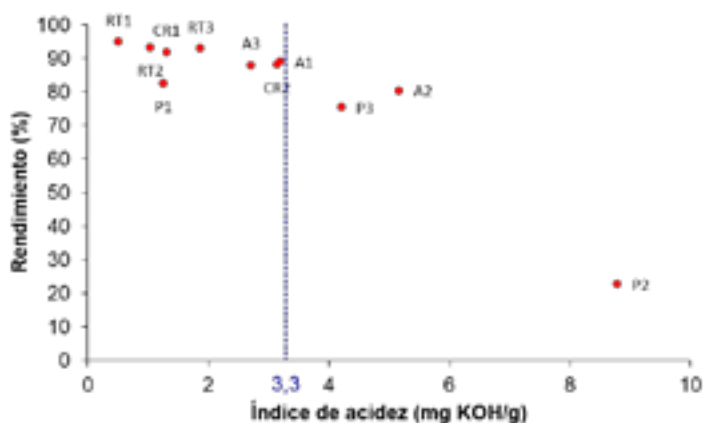
Las barras de error muestran la desviación estándar de las réplicas



Fuente: Elaboración propia.

Los rendimientos superiores al 80% se obtuvieron incluso con aceites cuyo índice de acidez era mayor a 3 mg KOH/g (figura 59). Esto establece un nuevo límite máximo permisible alrededor de 3,3 mg KOH/g para la transesterificación en medio básico de aceites residuales a base de palma. Este valor es menos conservador que el recomendado para otros aceites (2 mg KOH/g) (Hajjari et al., 2017, Verma y Sharma, 2016), posibilitando el uso de una mayor variedad de aceites residuales para la producción de biodiésel.

Figura 59. Índice de acidez de los aceites residuales vs. rendimiento

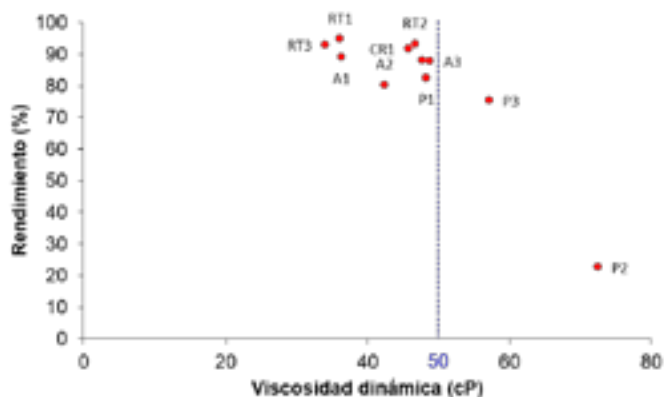


Fuente: Elaboración propia.

La presencia de humedad también disminuye el rendimiento debido a que promueve la hidrólisis de los triglicéridos en vez de su transesterificación (Atadashi, 2015). Sin embargo, con RT2 se obtuvo un rendimiento superior al 93%, a pesar de que su contenido de humedad era mayor que el doble del límite máximo recomendado en la literatura (0,1%) (Sharma y Singh, 2009). Esto revela que el rendimiento es menos sensible al contenido de humedad que al índice de acidez.

No solo la presencia de ácidos grasos libres y de humedad afecta el rendimiento, sino también la viscosidad de los aceites. Una alta viscosidad puede limitar el entremezclado de los reactivos durante la transesterificación de los aceites, reduciendo el rendimiento (Al-Hamamre y Yamin, 2014). Por lo tanto, conviene establecer una viscosidad máxima permisible para la transesterificación en medio básico de aceites residuales a base de palma. Ese valor está alrededor de los 50 cP (figura 60).

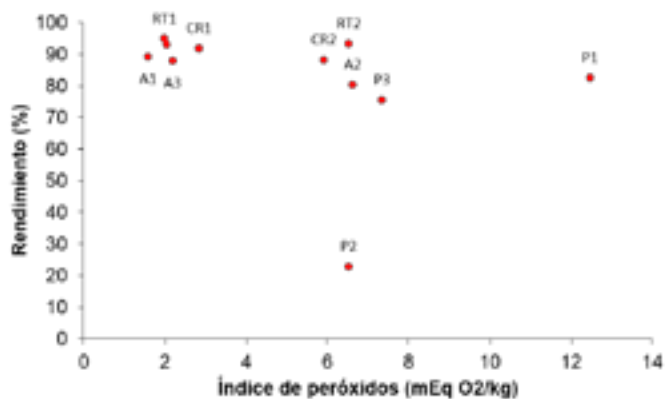
Figura 60. Viscosidad dinámica de los aceites residuales vs. rendimiento



Fuente: Elaboración propia.

No se puede establecer un límite semejante para el índice de peróxidos, ya que se puede obtener un rendimiento superior al 80%, tanto si el índice de peróxidos es bajo como alto (figura 61). Sin embargo, la presencia de hidroperóxidos en el biodiésel se ha asociado con el no cumplimiento de requerimientos relacionados con su estabilidad (Cremonez et al., 2016). Por lo tanto, el índice de peróxidos debería ser lo más bajo posible.

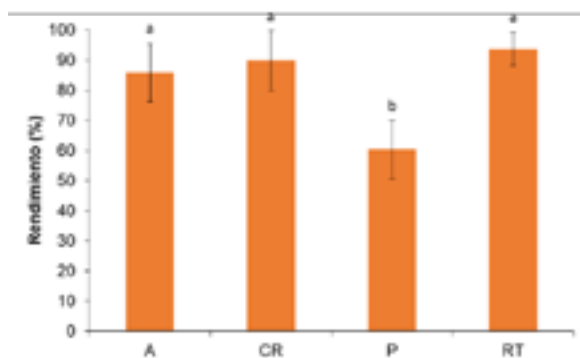
Figura 61. Índice de peróxidos de los aceites residuales vs. rendimiento



Fuente: Elaboración propia.

Como se esperaba, de acuerdo con la caracterización previa, los aceites residuales generados por los restaurantes tradicionales son los más apropiados para la producción de biodiésel mediante transesterificación en medio básico. El rendimiento obtenido con estos aceites es el mayor de todos en promedio (figura 62), lo cual es consistente con su menor índice de acidez (figura 7) y su menor viscosidad dinámica (figura 10), y es el que tiene el menor coeficiente de variación (tabla 31).

Figura 62. Rendimiento obtenido a partir de la transesterificación en medio básico de los aceites residuales por categoría. Las barras de error muestran los intervalos de diferencia mínima significativa al 95%. Las categorías que tienen letras diferentes son estadísticamente diferentes según la prueba de comparación múltiple LSD



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31. *Coefficiente de variación del rendimiento obtenido a partir de la transesterificación en medio básico de los aceites residuales por categoría*

Categoría	Coefficiente de variación (CV)^a
Asaderos de pollo	5,47
Restaurantes de comida rápidas	2,91
Productores de pasabocas	54,25
Restaurantes tradicionales	1,13

$${}^a CV = \frac{\text{Desviación estándar}}{\text{Valor promedio}} \times 100$$

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Se confirmó el gran impacto que tiene el proceso de cocción sobre las propiedades de los aceites residuales, especialmente el índice de acidez y el índice de peróxidos, los cuales se incrementaron 2591 and 393%, respectivamente, con respecto a los aceites vírgenes. Los aceites que se utilizan de forma prolongada a altas temperaturas (> 8 h, > 300°C) son, en general, los de mayor índice de acidez y también los más viscosos, mientras que aquellos que se utilizan para la cocción de alimentos con un alto contenido de almidón (harinas) son los de mayor índice de peróxidos.

Se encontró que los aceites residuales generados por los restaurantes tradicionales son los más apropiados para la producción de biodiésel mediante transesterificación en medio básico. El rendimiento obtenido con estos aceites es el mayor de todos en promedio (> 93%), lo cual es consistente con su menor índice de acidez (~ 1 mg KOH/g) y su menor viscosidad dinámica (~ 40 cP), y es el que tiene el menor coeficiente de variación (1,13%).

Se estableció un nuevo índice de acidez máximo permisible y una viscosidad máxima permisible alrededor de 3,3 mg KOH/g y 50 cP, respectivamente, para la transesterificación en medio básico de aceites residuales a base de palma. Estos valores posibilitan el uso de una mayor

variedad de aceites residuales para este proceso. No se pudo establecer un límite semejante para el índice de peróxidos, pero se recomienda que sea lo más bajo posible para evitar el no cumplimiento de requerimientos relacionados con la estabilidad del biodiésel.

Referencias

- Al-Hamamre, Z., y Yamin, J. (2014). Parametric study of the alkali catalyzed transesterification of waste frying oil for biodiesel production. *Energy Conversion and Management*, 79, 246-254.
- Atadashi, I.M. (2015). Purification of crude biodiesel using dry washing and membrane technologies. *Alexandria Engineering Journal*, 54, 1265-1272.
- Canakci, M. (2007). The potential of restaurant waste lipids as biodiesel feedstocks. *Bioresource Technology*, 98, 183-190.
- Carmona-Cabello, M., Leiva-Candia, D., Castro-Cantarero, J.L., Pinzi, S., y Dorado, M.P. (2018). Valorization of food waste from restaurants by transesterification of the lipid fraction. *Fuel*, 215, 492-498.
- Casallas, I.D., Carvajal, E., Mahecha, E., Castrillón, C., Gómez, H., López, C., y Malagón-Romero, D. (2018). Pre-treatment of waste cooking oils for biodiesel production. *Chemical Engineering Transactions*, 65.
- Che Man, Y.B., Haryati, T., Ghazali, H.M., y Asbi, B.A. (1999). Composition and thermal profile of crude palm oil and its products. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76, 237-242.
- Choe, E., y Min, D.B. (2007). Chemistry of deep-fat frying oils. *Journal of Food Science*, 72, R77-R86.
- Cremonez, P.A., Feroldi, M., De Oliveira, C.J., Teleken, J.G., Meier, T.W., Dieter, J., Sampaio, S.C., y Borsatto, D. (2016). Oxidative stability of biodiesel blends derived from different fatty materials. *Industrial Crops and Products*, 89, 135-140.
- Dogan, T.H. (2016). The testing of the effects of cooking conditions on the quality of biodiesel produced from waste cooking oils. *Renewable Energy*, 94, 466-473.
- Fonseca, J.M., Teleken, J.G., Almeida, V.C., Da Silva, C. (2019). Biodiesel from waste frying oils: Methods of production and purification. *Energy Conversion and Management*, 184, 205-218.
- Frega, N., Mozzon, M., y Lercker, G. (1999). Effects of free fatty acids on oxidative stability of vegetable oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76, 325-329.

- Hajjari, M., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., y Ghanavati, H. (2017). A review on the prospects of sustainable biodiesel production: A global scenario with an emphasis on waste-oil biodiesel utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 445-464.
- Knothe, G., y Steidley, K. R. (2009). A comparison of used cooking oils: A very heterogeneous feedstock for biodiesel. *Bioresource Technology*, 100, 5796-5801.
- Kulkarni, M.G., y Dalai, A.K. (2006). Waste cooking oils - An economical source for biodiesel: A review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45, 2901-2913.
- Lam, S.S., Liew, R.K., Jusoh, A., Chong, C.T., Ani, F.N., Chase, H.A. (2016). Progress in waste oil to sustainable energy, with emphasis on pyrolysis techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 741-753.
- Mba, O. I., Dumont, M. J., y Ngadi, M. (2015). Palm oil: Processing, characterization and utilization in the food industry: A review. *Food Bioscience*, 10, 26-41.
- Mendoza, L., Plata, V., Gauthier-Maradei, P. (2018). Effect of minor components on chemical composition, thermal behavior, and morphology of biodiesel precipitate. *Fuel*, 228, 323-331.
- Monyem, A., Canakci, M., y Van Gerpen, J. H. (2000). Investigation of biodiesel thermal stability under simulated in-use conditions. *Applied Engineering in Agriculture*, 16, 373-378.
- Plata, V., Rojas, O., Gauthier-Maradei, P. (2020). Improvement of palm oil biodiesel filterability by treatment with reactivated. *Fuel*, 260, 116198.
- Sharma, Y. C., y Singh, B. (2009). Development of biodiesel: Current scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1646-1651.
- Verma, P., y Sharma, M.P. (2016). Review of process parameters for biodiesel production from different feedstocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1063-1071.
- Wyse-Mason, R.R., Beckles, D.M. (2012). An investigation of restaurant waste oil characteristics for biodiesel production in Trinidad and Tobago. *Energy for Sustainable Development* 16, 515-519.
- Yaakob, Z., Mohammad, M., Alherbawi, M., Alam, Z., Sopian, K. (2013). Overview of the production of biodiesel from waste cooking oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 184-193.

Conversión de azúcares fermentables presentes en la biomasa lignocelulósica pretratada con peróxido de hidrógeno

Olga Lucía Bayona Ayala,
Facultad de Química Ambiental,
grupo de investigación en Nuevos Materiales y Energías Alternativas - GLNMEA,
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: olgabayona@ustabuca.edu.co

Lizeth Johanna Alvarado Rueda,
Departamento de Ciencias Básicas,
grupo de investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas - GICIBAYA,
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: lizeth.alvarado@ustabuca.edu.co

Angélica María Candela Soto,
Facultad de Química Ambiental,
grupo de investigación en Nuevos Materiales y Energías Alternativas - GLNMEA,
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: Angelica.candela01@ustabuca.edu.co

Introducción

El Acuerdo de París, COP21 realizado en el 2015, estableció como objetivo principal reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, planificando economías más eficientes y menos dependientes de los combustibles fósiles, para lograr limitar el aumento de la temperatura global en 2°C. Sin embargo, con la situación actual, se ve lejano el cumplimiento de dicho objetivo alcanzado en París, ya que en la COP25 realizado en

Chile en el 2019, se indicó que las emisiones de gases de efecto invernadero siguen en aumento la brecha entre las tendencias actuales y los objetivos climáticos acordados se han ampliado (Conferencia de la ONU sobre cambio climático, 2019) (Eichler et al., 2015). En el transcurso de los años la explotación de los combustibles fósiles se ha incrementado significativamente, presentando un aumento en la demanda y baja disponibilidad futura de este material energético.

Según la agencia internacional de energía (AIE), las emisiones de CO₂ que se emiten a la atmósfera son procedentes un 44% de emisiones de carbón, 36% de petróleo y el 20% son emisiones de gas natural (Da y Lignocelulósica, 2012). El mayor número de emisiones de CO₂ en la atmósfera a nivel mundial es aquel que se producen de actividades como el transporte y electricidad (En y Qu, 2015). La agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA) para el 2014 reportó una concentración de dióxido de carbono de 81% sobre el total de emisiones de gases de efecto invernadero.

El bioetanol es generado a partir de material celulósico, pero se busca implementar metodologías de investigación y desarrollo mundial, para la producción de bioetanol, de fuentes vegetales que no generen una competencia con los insumos alimenticios, utilizando como materia prima residuos agroindustriales (Sánchez, Gutiérrez, Muñoz y Rivera, 2010).

Actualmente Estados Unidos y Brasil se destacan por ser los mayores productores de bioetanol en el mundo. Principalmente la materia prima para la obtención de etanol de segunda generación es la biomasa lignocelulósica, En Colombia se producen cerca de 12 millones de toneladas en residuos, de los cuales el 53% de estos son residuos orgánicos, es por esto por lo que la producción de etanol celulósico ha ganado una especial atención en el sector industrial gracias a la alta disponibilidad de biomasa lignocelulósica de las actividades agrícolas y forestales (Sun et al., 2018).

La biomasa lignocelulósica es el componente mayoritario de la corteza terrestre, se encuentra en materiales vegetales, como el bagazo de caña de azúcar, maderas, cascarilla de café, raquis de palma, cascara de plátano, aserrín, hojarasca, pericarpio de maracuyá, cáscara de yuca y otros residuos vegetales (Fernandes, Pereira, Serafim y Evtuguin, 2012).

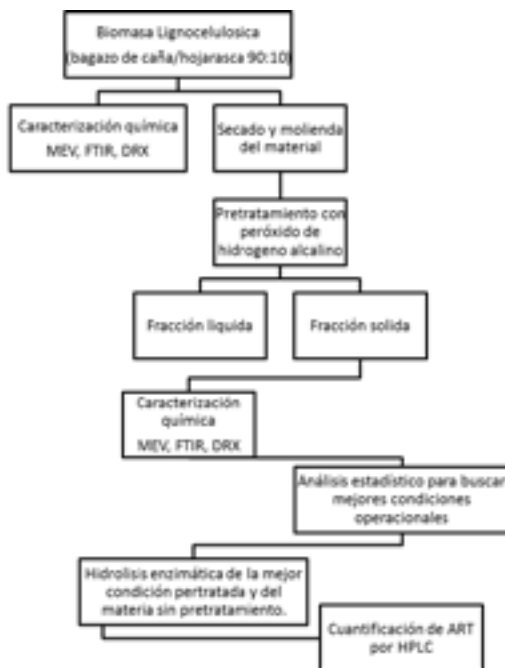
La etapa más importante en la producción de bioetanol es la evaluación de pretratamientos, la cual permite el aumento de la accesibilidad de la celulosa, deslignificación, eliminación de hemicelulosa, y disminución de la cristalinidad de la celulosa, también maximizar el rendimiento de azúcar y disminuir la formación de compuestos inhibidores en la etapa de hidrólisis y fermentación (Sánchez et al., 2010). Los pretratamientos pueden ser físicos, químicos, biológicos o una mezcla de ellos (Taherzadeh y Karimi, 2007). Los pretratamientos oxidativos tienen como objetivo acelerar la hidrólisis enzimática y biodegradación del material, además de disolver los componentes de la matriz lignocelulósica (Bayona, 2012).

Se ha demostrado que el peróxido de hidrógeno alcalino conduce a altos rendimientos de la glucosa y puede utilizarse en condiciones de temperatura y presión moderadas sin ácidos, conduciendo a la formación de inhibidores menores. Además, el peróxido de hidrógeno es un agente amigable con el medio ambiente, y no deja residuos en la biomasa. (Rabelo, Andrade, Filho y Costa, 2014). Debido a la dependencia de los combustibles fósiles, además de brindar una solución a la disposición final del bagazo de caña generado en la industria de la caña de azúcar y las hojas de hojarasca generadas en el campus de la Universidad Santo Tomás de Floridablanca, Santander, se planteó el siguiente trabajo de investigación, en el cual se realizó un pretratamiento con peróxido de hidrógeno al bagazo de caña y hojarasca en proporción 90:10, realizando una hidrólisis enzimática a dicha biomasa lignocelulósica y evaluando tres variables independientes durante la hidrólisis enzimática (porcentaje de sólidos, carga enzimática y tamaño de partícula) para determinar la influencia de estas en la obtención de etanol de segunda generación, calculando la cantidad de celulosa, hemicelulosa durante la etapa de hidrólisis.

Metodología

Para esto se siguió el diagrama de flujo presentado en la figura 63.

Figura 63. Diagrama de flujo de trabajo para el desarrollo de la investigación



Fuente: Elaboración propia.

La metodología planteada en este trabajo se basó en los protocolos establecidos por la NREL que se encuentran en la tabla 32.

Tabla 32. Protocolos NREL

Procedimiento	Protocolo
Determinación de humedad	NREL/TP-510-42621
Determinación de cenizas	NREL/TP-510-42622
Extractivos con agua y etanol	NREL/TP-510-42621
Lignina soluble e insoluble	NREL/TP-150-42618
Celulosa y hemicelulosa	NREL/TP-510-42618

Fuente: Elaboración propia.

Todos los procedimientos planteados en la metodología del presente trabajo se realizaron por triplicado con el fin de obtener resultados más confiables.

Determinación de la humedad

Contenido de humedad: el material lignocelulósico se analizó mediante la técnica de NREL/TP-510-42621, la cual permite el análisis del contenido de humedad de un material; se pesó la muestra inicialmente de 0,5 a 3g, y pasaron de 3 a 5 horas en la mufla a 105°C, posteriormente a un desecador durante una hora y, nuevamente, a la mufla durante dos horas hasta un peso constante.

Finalmente se pesaron las muestras y se aplicó la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Determinación de humedad

$$\% \text{ humedad} = \frac{(M - Ps)}{M} * 100$$

Donde:

M: peso inicial de la muestra.

Ps: peso seco de la muestra.

Contenido de cenizas: se realizó mediante la metodología de NREL/TP-510-42622 “Standard Method For the determination of the Ash in Biomass”, aplicando la siguiente ecuación. Este método se realizó partiendo del material lignocelulósico previamente seco, y determinada su humedad, se pesaron 2g de muestra en crisoles, los cuales se introdujeron en una mufla para realizar una rampa de temperatura como la siguiente rampa de temperatura presentada en la tabla 33.

Tabla 33. *Rampa de temperaturas*

Temperatura	Tiempo
105 °c	12 min
250 °c	30 min

Temperatura	Tiempo
575 °c	180 min
105 ° c	240 min
desecador	60 min

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se determinó el porcentaje de cenizas mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Determinación de cenizas

$$\%Ceniza = \frac{Mc - Ma}{Mb - Ma} * 100$$

Donde:

Ma: masa del crisol vacío calcinado en g.

Mb: masa del crisol más peso del material seco en g.

Mc: crisol con la masa de cenizas en g.

Determinación de lignina soluble, insoluble

Se hizo el tratamiento previo a las muestras, pesando 300 mg de muestra y se añadieron 4 ml de ácido sulfúrico a 72% mezclados durante un minuto, posteriormente las muestras se colocaron en un baño térmico durante 60 min y se agitaron cada 5 min para asegurar la penetración del ácido en el material lignocelulósico.

Posteriormente, las muestras se diluyeron con 84 ml de agua destilada. Finalmente, las muestras se pasan por una autoclave durante 60 min a 121°C.

Para el análisis de lignina soluble e insoluble se filtraron las muestras, posteriormente se tomó alícuotas de 50 ml en un frasco de almacenamiento de muestras filtrando las soluciones al vacío, y se tomaron los sólidos suspendidos después de enjugados con 50 ml de agua desionizada.

Finalmente, se secaron los crisoles a 105°C hasta alcanzar un peso constante, se retiraron las muestras y se dejaron en el desecador. La cantidad de ceniza insoluble en ácido no es igual al total de ceniza de biomasa, se aplicó el siguiente cálculo:

Ecuación 3. Determinación de lignina insoluble.

$$\% \text{ lignina insoluble} = \frac{Mkla - Mp}{Mb} * 100 - \% \text{ cenizas}$$

Donde:

Mb= masa del material seco g.

Mp= masa del papel filtro pesado g.

Mkla= masa del papel filtro más masa de lignina insoluble g.

Las muestras de lignina soluble en ácido se analizaron por espectrofotómetro UV-vis, usando la alícuota de disolución de ácido de hidrólisis se determinó la absorbancia de 0,7 a 1 nm de las muestras, haciendo disoluciones con el siguiente cálculo:

Ecuación 4. Determinación de lignina soluble.

$$Clig = \frac{(A_{270nm} - 3,2 * 10^{-2})}{E * muestra * ODW}$$

Donde:

Clig = concentración de lignina soluble en el hidrolizado (gL)

A_{270nm} = absorbancia del hidrolizado en 270 nm

Finalmente se realizó la determinación de lignina total con la siguiente ecuación:

Ecuación 5. Lignina total

$$\% \text{ LIGNINA} = \% \text{ LIGA} + \% \text{ LIGSA}$$

Determinación de carbohidratos por HPLC

La fracción líquida fue empleada también para la determinación de los carbohidratos estructurales. Se tomaron alícuotas de 50 mL de la solución y se refrigeraron hasta el momento del análisis de carbohidratos. Se llevó un pH de 5-6, empleando carbonato de calcio. Se centrifugaron y filtraron para ser analizadas por HPLC para xilosa y glucosa, arabinosa y celobiosa, utilizando una columna sugar pack, un flujo de 0,8mL/min, como fase móvil se usó acetonitrilo – agua en proporción 75-25% y como detector se empleó el índice de refracción.

Se prepararon las respectivas curvas de calibración por triplicado para la determinación de cada azúcar por medio de la ecuación de la recta. Una vez obtenidos estos valores se pasaron las muestras y a partir de la Ecuación 10 se calculó la concentración de los azúcares poliméricos por medio de la concentración de los correspondientes azúcares monoméricos, usando una corrección anhidra de 0.88 o 132/150 para los azúcares C-5 (Xilosa y arabinosa), una corrección de 0.9 o 162/180 para los azúcares C-6 (Glucosa, galactosa y manosa).

Se determinaron los carbohidratos por medio de la metodología descrita por NRELL/TP-510-42623 (2008). Para calcular el porcentaje de azúcares, se empleó la siguiente ecuación

$$\% \text{ azúcares} = \left(\frac{C_{HPLC} * C_A * V_{filtrado}}{M_b} \right) * 100$$

Donde:

C_{HPLC} = Concentración de azúcar cuantificado por HPLC g/L; C_A = Corrección anhidra (0,88 o 0,9)

$V_{filtrado}$ = Volumen hidrolizado del filtrado;

M_b = Peso de la muestra seca (g)

Resultados y discusión

El bagazo de caña de azúcar usado en este trabajo fue tomado de la finca Bore Sur, ubicada en el municipio de Piedecuesta, Santander, la cual tiene una cosecha de caña de azúcar panelera (figura 64). La hojarasca fue recolectada en la Universidad Santo Tomás, campus Floridablanca.

Figura 64. *Cultivo de caña de azúcar y almacenamiento de bagazo de caña de azúcar, finca Bore Sur*



Fuente: Elaboración propia.

Para este trabajo se usó una única mezcla de bagazo de caña de azúcar y hojarasca en relación 90:10, tendiendo en mayor proporción el bagazo, dado los buenos resultados reportados en la literatura para su uso en la obtención de etanol de segunda generación.

Determinación física del porcentaje de cenizas y humedad en biomasa lignocelulósica natural

La determinación del contenido de humedad y cenizas se realizó al material en base seco, mediante un horno y una mufla de calentamiento como lo indica la normativa de NREL TP-510-42621 y NREL TP-510-42622, se pesaron 2 gramos de la mezcla (90:10) bagazo de caña de azúcar y hojarasca, la tabla 34 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 34. Resultados contenido de humedad y cenizas

Parámetro	%
Humedad	8,92% ± 0,59
Cenizas	3,40% ± 0,32

Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje de humedad en base seca del bagazo de caña de azúcar reportado en la literatura oscila entre 7,5-9,43% (Farias et al., 2016). En los resultados obtenidos se reporta una humedad de 8,92%, la cual corresponde a la mezcla (90:10), se obtuvo un porcentaje en el rango reportado en la literatura, pero se debe tener en cuenta la humedad presente en la hojarasca para la cual no hay reportes de caracterización del material.

Respecto al contenido de cenizas se conoce como el material inorgánico presente en la biomasa lignocelulósica en el cual se presentan algunos componentes como el magnesio, hierro, calcio, silicio, sodio y potasio. Se reporta en la literatura un contenido de 1,5-2,5% de cenizas para el bagazo de caña de azúcar (Farias et al., 2016). En los resultados obtenidos para la mezcla (90:10) de bagazo de caña de azúcar y hojarasca se reporta un contenido de cenizas de 3,40%, debido a la exposición mineral que sufre la hojarasca al caer naturalmente de los árboles y el contacto que tiene con el suelo y rocas, además se debe tener en cuenta el proceso de colecta del bagazo de caña de azúcar y la exposición de la biomasa a los elementos de la naturaleza, sin embargo, la mezcla de la biomasa no supera el nivel máximo de cenizas de 10%.

Determinación del porcentaje de lignina soluble e insoluble celulosa y hemicelulosa de la biomasa lignocelulósica natural

Inicialmente se trataron las muestras de bagazo de caña de azúcar y hojarasca mezcla (90:10) con ácido sulfúrico (72%) realizando la debida hidrólisis acida requerida para la determinación de lignina soluble e insoluble según la normativa NREL TP-150-42618.

En la tabla 35 se presentan los resultados obtenidos del porcentaje de lignina para la mezcla de bagazo de caña de azúcar y hojarasca, donde se obtuvo un resultado de 32,83% para la lignina total, debido a la influencia de la hojarasca como biomasa leñosa, aunque el resultado obtenido se encuentra en el rango de porcentaje de lignina se presenta un elevado contenido debido a la naturaleza del material lignocelulósico especialmente a la hojarasca.

Tabla 35. *Resultados porcentaje de lignina soluble e insoluble celulosa y hemicelulosa*

Parámetro	%
Celulosa	32.57 ± 0,59
Hemicelulosa	25.33 ± 0,60
Lignina total	32.83% ± 0,60

Fuente: Elaboración propia.

La lignina es el material exterior de la pared celular, una macromolécula aromática que otorga propiedades de rigidez e impermeabilidad a la planta, la cual impide la accesibilidad a la celulosa. La lignina puede aislarse de la celulosa y la hemicelulosa a partir de métodos químicos de solubilización de la lignina, mediante la hidrólisis y oxidación de la lignina se pueden producir compuestos fenólicos como la vainillina, cresoles, catecoles y el guayacol (Behaviour, 2012).

El bagazo de caña de azúcar reporta un porcentaje de lignina de 20-35% (*CELULOSE Neumara Luci Conceição Silva*, 2010). En otras investigaciones se reporta el contenido de lignina en el bagazo de caña de azúcar de 25,2%, 23,38%, 14%, 25,82%, respectivamente (Menezes, 2016). La lignina que compone las maderas duras y blandas se presenta en la literatura en un rango de 20-40%.

De lo anterior se puede concluir que los valores determinados experimentalmente para el contenido de celulosa no son muy lejanos con los reportados en la literatura. Se encuentran en un rango de 32-36% de celulosa en peso seco de la muestra.

Pretratamiento químico con peróxido de hidrógeno

Para la etapa de pretratamiento se implementó un diseño factorial 2^3 con triplicado en el punto central en los ensayos (2, 5, 11) con el objetivo de evaluar las variables significativas (tiempo, temperatura, concentración) para el diseño. La tabla 36 presenta las condiciones de reacción del diseño experimental.

Tabla 36. *Condiciones de reacción*

Ensayo	Tiempo (min)	Temperatura (°c)	Concentración (%)
1	80	65	3
2*	60	45	5
3	40	65	7
4	80	25	7
5*	60	45	5
6	40	25	7
7	40	65	3
8	80	25	3
9	80	65	7
10	40	25	3
11*	60	45	5

Fuente: Elaboración propia.

Este procedimiento se realizó en condiciones controladas de temperatura, concentración de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y tiempo mediante un montaje experimental, con el objetivo de remover la lignina presente en la biomasa lignocelulósica.

Inicialmente se pesaron 15 gramos de la mezcla bagazo de caña y hojarasca, se elaboraron 11 ensayos bajo las condiciones indicadas por el planteamiento factorial 2^3 , las muestras se pretrataron con 100 mL de peróxido de hidrógeno alcalino (H_2O_2) ajustando el pH en 11.5 con

hidróxido de sodio (NaOH), posteriormente, al terminar la reacción las muestras se lavaron con abundante agua en un tamiz, hasta tener un pH neutro, se exprimieron manualmente para eliminar restos del peróxido de hidrógeno y exceso de agua, finalmente se secaron a 105°C durante 2 horas hasta peso constante y se almacenaron en bolsas herméticas para conservar el material para la posterior hidrólisis ácida (determinación de lignina).

Para finalizar se determinó el porcentaje de rendimiento de la reacción de oxidación con peróxido de hidrógeno alcalino, al finalizar la etapa de pretratamiento químico con peróxido de hidrógeno se caracterizó la biomasa para determinar el contenido de lignina y hemicelulosa y calcular así el porcentaje de remoción y la modificación estructural que sufrió el material en esta etapa. Como se puede observar en la tabla 37.

Tabla 37. *Remoción de lignina de la biomasa pretratada con peróxido de hidrógeno*

Ensayo	Condiciones de reacción			Resultados del pretratamiento		
	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Concentración (%)	% lignina soluble removida	% lignina insoluble removida	%hemicelulosa removida
1	80	65	3	43.636	72.912	26,62
2*	60	45	5	62.667	72.696	23,37
3	40	65	7	55.834	37.264	21,04
4	80	25	7	58.839	88.557	21,76
5*	60	45	5	60.283	74.888	27,46
6	40	25	7	61.672	60.716	24,87
7	40	65	3	54.500	78.692	25,52
8	80	25	3	53.957	78.550	28,11
9	80	65	7	51.194	72.820	22,69
10	40	25	3	45.502	79.515	30,25
11*	60	45	5	52.918	74.571	23,45

Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos en la remoción de la lignina presente en el material lignocelulósico después de la etapa de pretratamiento químico, se obtuvo un alto porcentaje de remoción de la lignina insoluble

en ácido, en el ensayo 4 una remoción de (88,5%) y de hemicelulosa el (21,76%) con condiciones de reacción de (80 min, 25°C, 7%) y en el ensayo 10 una remoción del (79,5%) y de hemicelulosa de (30,25%) con condiciones de reacción de (40 min, 25°C, 3%). Respecto a la lignina soluble en la tabla 37 se evidencia una alta remoción para el triplicado en el punto central además de los ensayos 4 con una remoción de (58,83%) y el ensayo 6 una remoción de (61.67%) con condiciones de reacción de (40 min, 25°C, 7%).

En los ensayos 4 y 10 para el % de remoción de lignina insoluble se puede observar la concentración más alta y baja de peróxido de hidrógeno alcalino de (7 y 3%) respectivamente y a su vez el más alto nivel de remoción de lignina lo indicaría que la concentración podría no ser una variable significativa en el diseño experimental que se evidenciaría bajo el análisis estadístico.

Hidrólisis enzimática

Las condiciones de pretratamiento fueron fijadas en 6,6% de peróxido de hidrógeno 50°C y una hora de tiempo de pretratamiento, se mantuvo el pH a 11-12 con NaOH. (Bayona Ayala, 2012) (Suárez-Forero, Candela-Soto, Henao-Martínez, & Bayona-Ayala, 2019)(Raele et al., 2014).

Para la hidrólisis enzimática, previamente se realizó un diseño experimental 2^3 con triplicado en el punto central, para un total de 11 experimentos. Se establecieron 3 variables: porcentaje de sólido, carga enzimática y tamaño de partícula como se indica en la tabla 38. Todas las muestras obtenidas del pretratamiento se sometieron a hidrólisis enzimática, con el fin de evaluar la influencia de las condiciones del pretratamiento y del tamaño de partícula.

En la tabla 38 se puede observar las variables utilizadas en el diseño experimental a lo largo de la investigación.

Tabla 38. *Diseño experimental para la hidrólisis enzimática*

Experimento	Porcentaje de sólidos (%)	Carga enzimática (µm)	Tamaño de partícula (mm)
1	65	350	2,0
2	25	1550	0,5
3*	45	950	1,3
4*	45	950	1,3
5	25	1550	2,0
6	25	350	0,5
7	65	350	0,5
8*	45	950	1,3
9	65	1550	0,5
10	65	1550	2,0
11	25	350	2,0

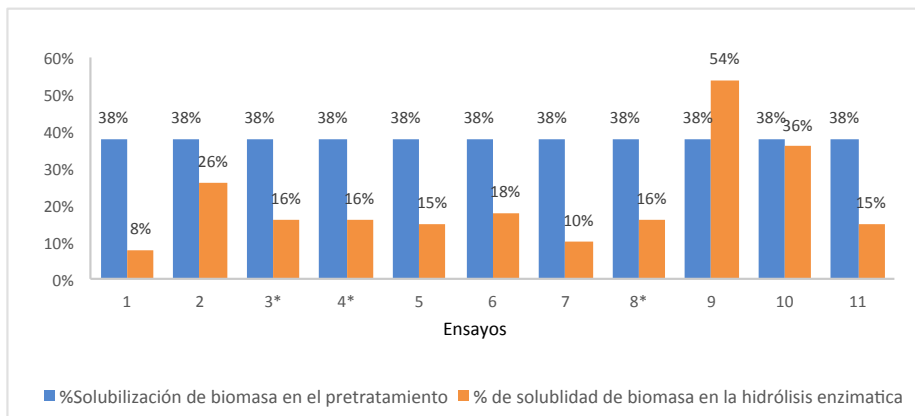
(*) experimentos de variables del punto central.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis estadístico del diseño experimental para mostrar los efectos principales de las variables considerando el error puro se realizó a través de *software* estadístico en un nivel de confianza referenciado para este tipo de análisis entre el 90 y 95% de confianza.

Las variables independientes analizadas en el estudio para la hidrólisis enzimática se denotan en la tabla 38. Luego de realizar el diseño de experimentos se calculó el rendimiento de la etapa de la hidrólisis enzimática, los resultados se muestran en la en la figura 65, se presenta el porcentaje de solubilización de la biomasa de los 11 ensayos durante el pretratamiento y el porcentaje de solubilidad de la biomasa durante la hidrólisis enzimática.

Figura 65. *Porcentaje de solubilización de biomasa en el pretratamiento y en la hidrólisis enzimática*



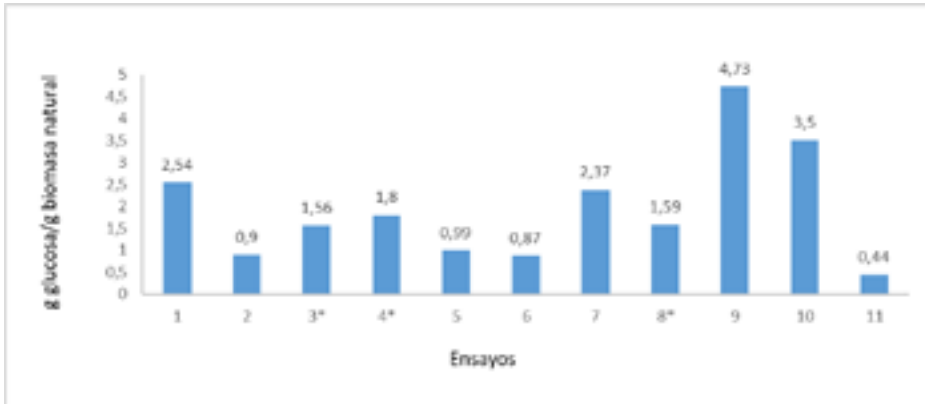
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 65 se observa un porcentaje de solubilización del 16% en el ensayo del punto central 45% de sólidos, 950 microlitros de carga de enzima, y un tamaño de partícula de 1,3 mm. Los ensayos 9 y 10 (65% de sólidos, 1550 microlitros de carga de enzima con los dos tamaños de partícula) presentaron el mejor porcentaje de solubilización donde se observa que la carga enzimática estuvo ubicada en el nivel +1 y el porcentaje de sólidos en el nivel +1 y donde el tamaño de partícula estuvieron en +1 y -1, lo cual permite establecer que el tamaño de partícula podría ser una variable no significativa en el proceso.

De acuerdo con la figura 65, el ensayo de mayor porcentaje de solubilización en la etapa de la sacarificación fue el ensayo 9, el cual tiene un porcentaje sólidos grande (54%) pero la carga enzimática fue de 1550 μm y tamaño de partícula de 0,5 mm. Conforme a lo mencionado anteriormente, dicho ensayo es el que nos da un mejor acceso para la hidrólisis enzimática de la celulosa, evitando la formación de inhibidores para las enzimas.

En la figura 66 se denotan los gramos de glucosa sobre los gramos biomasa natural utilizados en los 11 ensayos.

Figura 66. Gramos de glucosa / gramos de biomasa natural a 72h de la hidrólisis enzimática

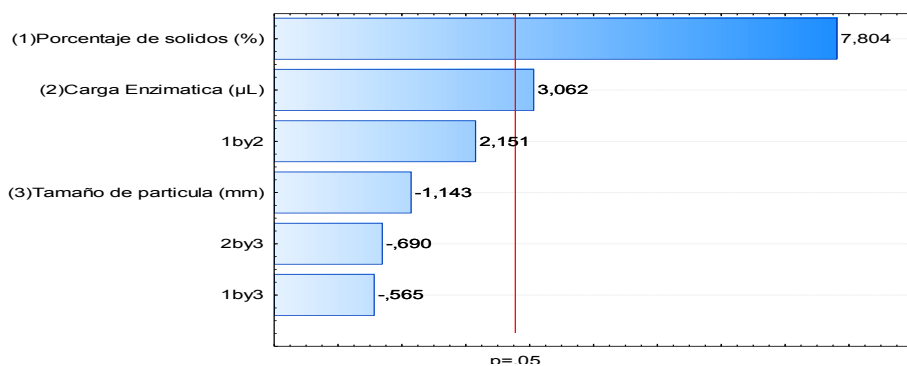


Fuente: Elaboración propia.

El ensayo que mejor relación presentó de gramos de glucosa / gramos de biomasa natural en las 72h de la hidrólisis enzimática, fue el ensayo 9, seguido del ensayo 10, lo cual nos permite corroborar o sentenciar que estos dos ensayos dentro de los 11 expuestos en esta investigación, son los que mejor conversión de glucosa tuvieron a lo largo de la hidrólisis enzimática.

Análisis estadístico de la producción de glucosa (g/g) de biomasa lignocelulósica en estado natural utilizando un diseño de experimentos 2³⁺ triplicado en el punto central

En la figura 67 se presenta el gráfico de Pareto donde se puede observar que el mayor efecto lo muestra el porcentaje de sólidos seguido de la carga enzimática en la etapa de la hidrólisis enzimática, también se observa que la interacción de las variables no presenta significancia estadística en el rango estudiado y que el tamaño de partícula en los niveles evaluados no presenta significancia estadística al 95% de confianza. Por tal motivo no sería necesario moler el material luego de la etapa del pretratamiento.

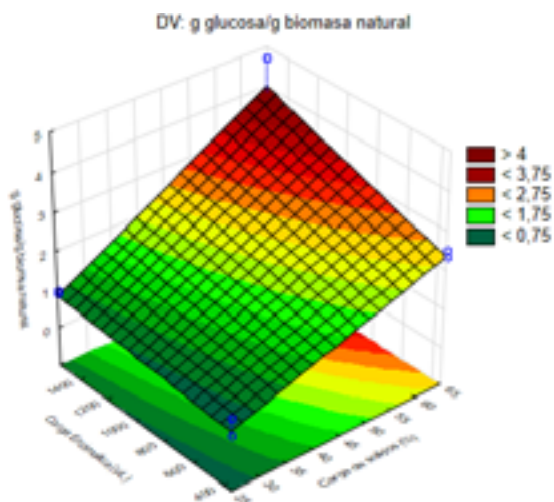
Figura 67. Gráfico de Pareto

Fuente: Elaboración propia.

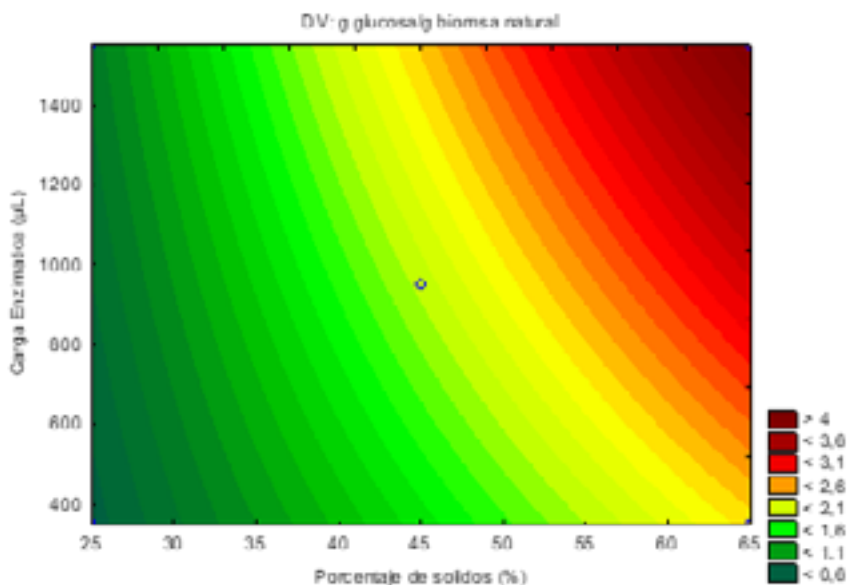
Análisis de las superficies de respuestas de glucosa del diseño de experimentos 2^3 triplicado en el punto central

Fueron trazadas las superficies de respuesta para analizar las mejores condiciones de trabajo más favorables como se observa en la figura 68.

Figura 68. Superficies de respuesta para la producción de glucosa manteniendo el tamaño de partícula en el punto central



a

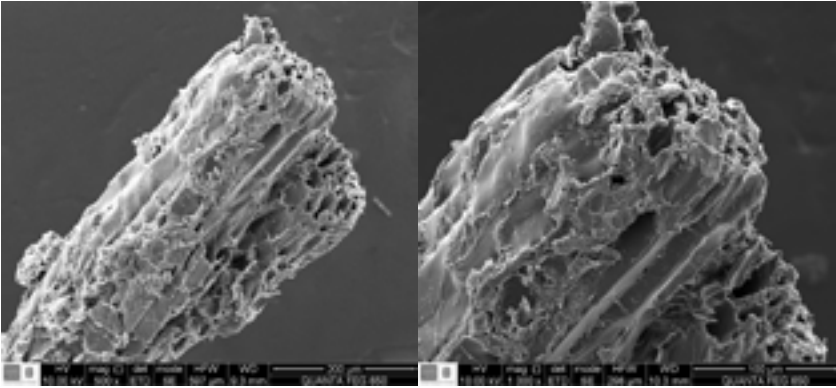


b

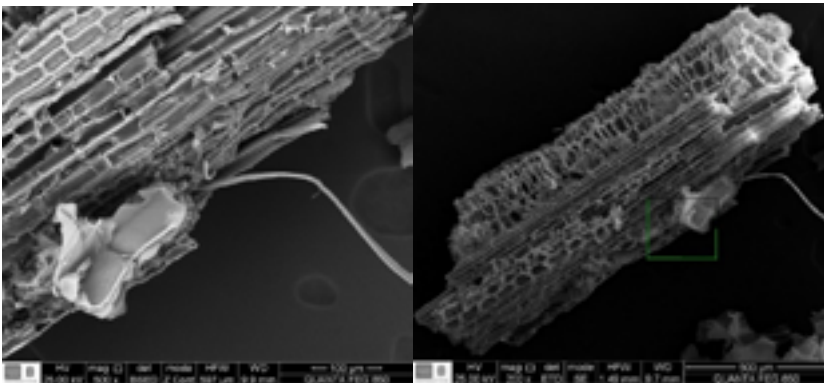
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 68 (a-b) la superficie de respuesta y de contorno se observa una tendencia creciente en la medida que el porcentaje de sólidos es alto con cargas enzimáticas bajas y altas, lo que evidencia que es posible trabajar con altas cargas de sustrato y bajas cargas del cóctel enzimático.

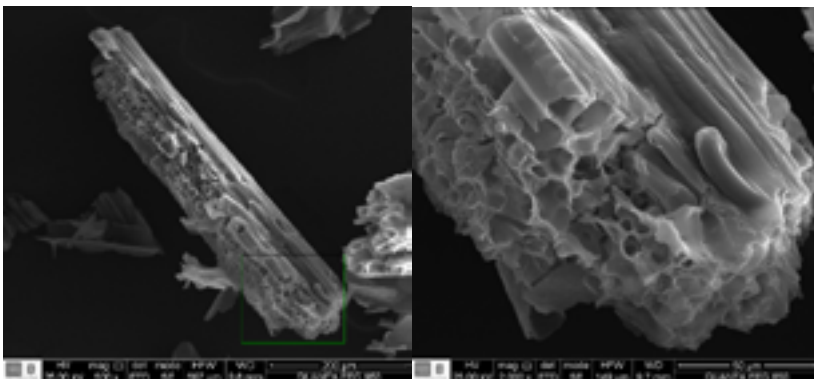
Se realizaron análisis de la morfología del material utilizando microscopía electrónica de barrido para ver los cambios en la pared celular y visualizar la disposición de la celulosa para el ataque enzimático y la conversión a azúcares simples, como se observa en las microfotografías de la figura 69.

Figura 69. *Microfotografías sem para análisis morfológico*

a. Biomasa en estado natural.



b. Biomasa pretratada con peróxido de hidrógeno.



c. Biomasa lignocelulósica hidrolizada HE.

Fuente: Elaboración propia.

Conversión de azúcares fermentables presentes en la biomasa lignocelulósica pretratada con peróxido de hidrógeno

En la figura 69a. las microfotografías de la biomasa lignocelulósica en estado natural evidencian la rigidez de la pared celular lo que impide el acceso a la celulosa en la ruta de obtención de etanol de segunda generación por vía fermentativa. Las microfotografías de la figura 69b, se observa la biomasa lignocelulósica luego de ser sometida al pretratamiento con peróxido de hidrógeno, evidenciando que la etapa del pretratamiento provoca la remoción en la pared celular de la hemicelulosa y la lignina, lo que favorece el acceso a la celulosa en la etapa de la posterior hidrólisis enzimática. Haciendo un análisis comparativo entre las microfotografías de la figura 69 (a-b) se observa cómo gran parte de la pared vegetal que corresponde a las células parénquimas (células de forma achatada y flóculos formando una capa sobre las fibras celulolíticas) es removida además de elementos de vasos (células alargadas con diferentes perforaciones) (Binod et al., 2010). Estas modificaciones muestran que el pretratamiento con peróxido de hidrógeno sobre la biomasa lignocelulósica mejora la disponibilidad de las fibras celulolíticas para el proceso siguiente de la hidrólisis enzimática. La microfotografía 69c la biomasa pretratada con peróxido de hidrogeno fue sometida a hidrólisis enzimática.

Conclusiones

Se determinó la composición inicial de la mezcla de la biomasa lignocelulósica bagazo de caña de azúcar y hojarasca en proporción (90:10) determinando el contenido de lignina soluble de 10,72% y de lignina insoluble de 22,11% las cuales están en los rangos reportados en la literatura.

Se evaluaron las variables temperatura, concentración y tiempo usando un diseño experimental 2^3 con triplicado en el punto central, según el análisis estadístico las variables más significativas fueron, temperatura, tiempo y la interacción (1*3) que corresponde al tiempo y la concentración, en el proceso de pretratamiento con peróxido de hidrógeno.

Se estudió la conversión de azúcares fermentables para la producción de etanol de segunda generación a partir de la biomasa lignocelulósica del bagazo de caña de azúcar y hojarasca, en proporción 90:10, en la que se evaluaron tres variables en la etapa de la hidrólisis enzimática, las cuales fueron, tamaño de partícula, carga enzimática y porcentaje de sólidos.

El desempeño de la etapa del pretratamiento con peróxido de hidrógeno, que promueve la remoción de hemicelulosa y lignina, es un factor clave para el procesamiento de biomasa, aumentando la conversión a azúcares fermentables en la etapa de hidrólisis, ya que se disminuye el porcentaje de lignina, evitando la recalcitrancia de la biomasa lignocelulósica.

Las variables que presentaron mayor significancia estadística al 95% de confianza en el rango estudiado fueron el porcentaje de sólidos y la carga enzimática en la etapa de la sacarificación.

El ensayo 9 cuyas condiciones fueron 65% de sólidos, 1550 μ L de carga enzimática y 0.5mAm de tamaño de partícula, presentó un rendimiento de 4,73 g glucosa/g biomasa en estado natural y en el ensayo 10 las condiciones fueron 65% de sólidos, 1550 μ L de carga enzimática y 2.0mm de tamaño de partícula con un rendimiento de 3,5 g glucosa/g biomasa en estado natural.

Referencias

- Bayona, O. L. (2012). Avaliação de pré-tratamentos para a hidrólise enzimática de palha de cana-de-açúcar considerando a produção de etanol, Vol. 7. Universidad Estadual de Campinas. <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/266816>
- Binod, P., Sindhu, R., Singhanian, R. R., Vikram, S., Devi, L., Nagalakshmi, S., Pandey, A. (2010). Bioethanol production from rice straw: An overview. *Bioresource Technology* 101(13), 4767-4774. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.079>
- D. Fernandes, S., Pereira, L., Serafim, D., y Evtuguin, a. X. (2012). Bioethanol. *Bioethanol*, 124-152. <https://doi.org/10.5772/850>
- Eichler, P., Santos, F., Toledo, M., Zerbin, P., Schmitz, G., Alves, C., y Ries, L. (2015). *Quím. Nova*, 38(6), 828-835.
- En, D., y Qu, C. (2015). *Hidrólisis ácida de celulosa y biomasa lignocelulósica asistida con líquidos iónicos*.
- Farias, F., Menezes, D., Henrique, R., Jackson, G., Rocha, D. M., y Maciel, R. (2016). Physicochemical characterization of residue from the enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse in a cellulosic ethanol process at pilot scale. *Industrial Crops & Products*, 94, 463-470. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.014>

- Rabelo, S. C. (2007). *Avaliação de Desempenho de Pré-Tratamento com Peróxido de Hidrogênio Alcalino para a Hidrólise Enzimática de Bagaço de Cana-de-Açúcar*. Universidade Estadual de Campinas.
- Raele, R., Boaventura, J. M. G., Fischmann, A. A., y Sarturi, G. (2014). Scenarios for the second generation ethanol in Brazil. *Technological Forecasting and Social Change*, 87, 205-223. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.12.010>
- Sánchez, A. M., Gutiérrez, A. I., Muñoz, J. A., y Rivera, C. A. (2010). Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos Bioethanol Production from agroindustrial lignocellulosic byproducts. *Tumbaga*, 5, 61-91. <http://revistas.ut.edu.co/index.php/tumbaga/article/view/194/163>
- Silva, N. L. C., Betancur, G. J. V., Vásquez, M. P., de Barros Gomes, E., y Pereira, N. (2011). Ethanol Production from Residual Wood Chips of Cellulose Industry: Acid Pretreatment Investigation, Hemicellulosic Hydrolysate Fermentation, and Remaining Solid Fraction Fermentation by SSF Process. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 163(7), 928-936. <https://doi.org/10.1007/s12010-010-9096-8>
- Suárez-Forero, S. J., Candela-Soto, A. M., Henao-Martínez, J. A., y Bayona-Ayala, O. L. (2019). Evaluación del desempeño del pretratamiento con peróxido de hidrógeno sobre bagazo de caña de azúcar para remoción de lignina. *Iteckne*, 16, 21-28.
- Sun, J., Tian, K., Wang, J., Dong, Z., Liu, X., Permaul, K., Wang, Z. (2018). Improved ethanol productivity from lignocellulosic hydrolysates by *Escherichia coli* with regulated glucose utilization. *Microbial Cell Factories*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0915-x>
- Taherzadeh, M. J., y Karimi, K. (2007). Enzyme-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: A review. *BioResources*. <https://doi.org/10.15376/biores.2.4.707-738>

Esta obra se editó
en la Universidad Santo Tomás
Seccional Bucaramanga, 2020.