

Diseño teórico de un sistema automatizado para la producción de miel a partir de residuos del café usando IA e IoT

Robinson Ronaldo Nez Achipiz

Yilber Fernan Landázuri Noriega

Corporación Universitaria ComfacaUCA - UnicomfacaUCA

Facultad de ingeniería

Programa ingeniería mecatrónica

Popayán - Cauca

2024

ÍNDICE

1. RESUMEN.....	3
2. PALABRAS CLAVE	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
3.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	6
4. JUSTIFICACIÓN.....	7
5. OBJETIVOS.....	8
5.1. OBJETIVO GENERAL.....	8
5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
6. MARCO TEÓRICO.....	9
6.1. MARCO CONCEPTUAL	9
6.2. MARCO REFERENCIAL	10
7. METODOLOGÍA	11
8. RESULTADOS ESPERADOS	12
9. CONCLUSIÓN.....	13
10. CITAS BIBLIOGRÁFICAS	14

1. RESUMEN

La producción de café genera aproximadamente el 56% de residuos, como pulpa y mucílago, que a menudo son desechados de manera inadecuada en Colombia, lo que ocasiona impactos ambientales y sociales significativos. Este proyecto propone el diseño teórico de un sistema automatizado basado en inteligencia artificial (IA) e Internet de las Cosas (IoT) para la producción de miel a partir de estos residuos. La implementación de esta solución no solo busca optimizar el aprovechamiento de los subproductos del café, sino también contribuir a la economía circular al reducir la contaminación y generar nuevas oportunidades económicas para los caficultores. Se espera que el diseño teórico no solo mejore la calidad del producto final, sino que también sea replicable en fincas cafeteras, promoviendo así prácticas sostenibles en el sector caficultor.

2. PALABRAS CLAVE

Producción de café, residuos, pulpa, mucílago, miel, inteligencia artificial, Internet de las Cosas, economía circular, sostenibilidad.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el proceso de producción de café, se generan grandes cantidades de residuos que representan aproximadamente el 56% del producto cosechado.[1] Estos residuos, aunque en su mayoría son aprovechables, aún no se utilizan a gran escala en la industria caficultora. El manejo inadecuado de estos residuos generados durante el procesamiento del café, particularmente el mucílago y la pulpa, es un problema persistente en las principales regiones cafeteras de Colombia, como el Eje Cafetero, Antioquia, Tolima, Cauca y Huila.[2] Estos residuos, generados en grandes cantidades, no siempre reciben un tratamiento adecuado, lo que ha llevado a una serie de impactos ambientales, económicos y sociales. Aunque en años recientes se han implementado algunas soluciones como el compostaje y la generación de biogás, muchas fincas aún carecen de los recursos o conocimientos necesarios para adoptar estas prácticas, lo que agrava la situación.

El manejo inadecuado de los residuos del café genera diversas manifestaciones visibles en el entorno. Desde una perspectiva ambiental, uno de los síntomas más notables es la contaminación de cuerpos de agua cercanos, ya que el vertido de estos residuos en ríos y quebradas altera la calidad del agua.[3] Es común la presencia de malos olores alrededor de las áreas donde se acumulan grandes cantidades de estos desechos sin tratamiento, lo que afecta a las comunidades locales. En el ámbito agrícola, la acumulación descontrolada de pulpa de café en las áreas de cultivo genera reduciendo su fertilidad y afectando negativamente la productividad de los cultivos.[4] Desde una perspectiva social, los efectos en la salud de las comunidades cercanas son evidentes, con un incremento de enfermedades relacionadas con la contaminación del agua, así como la proliferación de insectos y plagas que se reproducen en los residuos mal gestionados.[5] Los habitantes reportan más frecuentemente enfermedades producto de la exposición continua a estos subproductos.

Las causas del problema son diversas y tienen raíces profundas en las prácticas tradicionales de la caficultura. Muchos caficultores no cuentan con la información ni los recursos necesarios para implementar prácticas adecuadas de manejo de residuos. En muchas fincas, la costumbre ha sido desechar los residuos de café sin tratamiento adecuado, debido a la falta de opciones accesibles para reciclar o reutilizar estos materiales de forma efectiva y económica. Además, la ausencia de infraestructura adecuada para el tratamiento de residuos, como plantas de compostaje o biodigestores, limita la capacidad de las comunidades para gestionar estos subproductos de manera sostenible.[5] Para muchos productores, la prioridad es maximizar la producción de café y no el manejo de residuos, por lo que invertir en tecnologías de gestión de residuos se percibe como un gasto adicional en lugar de una inversión con beneficios a largo plazo.

Las consecuencias del problema son múltiples y afectan tanto al medio ambiente como a la economía y la salud de las comunidades. La acumulación de residuos sin tratamiento contribuye al deterioro ambiental, con la contaminación de suelos y aguas, afectando la biodiversidad local.

Además, se pierden oportunidades económicas al no aprovechar los residuos del café para generar productos como abono, biogás, o incluso la miel.[1] La mala gestión de residuos también repercute en la salud de las personas, con un aumento en enfermedades gastrointestinales y respiratorias debido a la contaminación y proliferación de plagas. La acumulación de residuos puede alterar las propiedades del suelo, reduciendo su fertilidad y, por ende, la productividad de las fincas, lo que impacta negativamente en la rentabilidad del productor.

Si no se toman medidas para mejorar la gestión de los residuos del café, es probable que los impactos ambientales y sociales continúen empeorando. La contaminación del agua podría volverse irreversible en algunas áreas, comprometiendo el acceso a fuentes hídricas para consumo y riego. La competitividad del café colombiano también podría verse afectada, perdiendo calidad frente a mercados internacionales que valoran la sostenibilidad. Económicamente, los productores seguirán enfrentando altos costos de manejo de residuos, y se perderá la oportunidad de crear empleos a través de la innovación tecnológica. Socialmente, las comunidades rurales continuarán expuestas a problemas de salud y a una disminución en la calidad de vida.

Los datos estadísticos muestran la magnitud del problema. Según la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, por cada tonelada de café producido, se generan aproximadamente 600 kg de residuos orgánicos (pulpa y mucílago), lo que representa más del 50% del peso total del fruto. Estudios indican que, en regiones cafeteras, más del 80% de las fuentes de agua cercanas a los cultivos presentan niveles de contaminación por residuos de café. Se estima que la inadecuada gestión de residuos representa un costo adicional para los productores de hasta el 10% de sus ingresos anuales. En las comunidades cafeteras, se ha documentado un aumento del 25% en enfermedades respiratorias y gastrointestinales debido a la exposición continua a residuos mal gestionados.[2]

Este panorama evidencia la necesidad urgente de adoptar prácticas más sostenibles y tecnológicamente avanzadas para el manejo de los residuos del café. No solo es crucial mitigar los impactos negativos actuales, sino también abrir nuevas oportunidades económicas y mejorar la calidad de vida en las regiones cafeteras de Colombia. Con la misma idea se han creado proyectos los cuales buscan por medio de maquinaria mejorar los procesos relacionados al aprovechamiento y de los residuos de café; por ejemplo: el manejo y aprovechamiento de las aguas residuales del lavado de café, la obtención bioproductos a partir de la pulpa de café y otros, los cuales se desarrolla con la misma idea de reducir las afectaciones ocasionadas por estos residuos y mejorar la productividad del café para su respectivo sector.[6]

En este contexto, surge la necesidad de desarrollar alternativas que brinden un sustento económico y sean confiables para el sector caficultor. Los recursos, como la pulpa y el mucílago del café, han representado un problema significativo para el sector, pero en realidad, ofrecen una alternativa económica y productiva considerable. Por lo tanto, se plantea la idea de utilizar estos recursos de manera efectiva, siendo una opción prometedora la producción de miel a partir del

mucílago y la pulpa de café. Para lograr esto, es fundamental desarrollar un proceso automatizado mediante la construcción de un prototipo que simplifique y optimice el proceso de producción de miel.

3.1.PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo mejorar la sostenibilidad y el uso de residuos del café en las regiones caficultoras mediante un prototipo para la producción de miel a partir de pulpa y mucílago de café, utilizando inteligencia artificial e Internet de las Cosas (IoT)?

4. JUSTIFICACIÓN

La producción de miel a partir de residuos del café contribuye a la economía circular y a reducir significativamente la cantidad de desechos orgánicos que terminan en vertederos o contaminan fuentes hídricas. Los estudios han demostrado que los residuos de café contaminan ríos y quebradas en regiones cafeteras, afectando la biodiversidad y la calidad del agua.[5] Además, al evitar la liberación de metano, un potente gas de efecto invernadero generado durante la descomposición anaeróbica de estos residuos, se mitiga el impacto ambiental.

Desde una perspectiva económica, esta práctica ofrece múltiples beneficios. Genera una nueva fuente de ingresos para los caficultores al diversificar sus actividades y aumentar su rentabilidad.[7] La miel de café, con su creciente demanda en mercados nacionales e internacionales, puede proporcionar mayores ingresos a los productores. Según, los costos del manejo inadecuado de residuos representan una carga significativa para los caficultores.[1]

En términos sociales, la producción de miel fomenta el desarrollo rural y crea empleo en las regiones cafetaleras. Al reducir la contaminación y mejorar la calidad del agua, también contribuye a la salud comunitaria al prevenir enfermedades relacionadas con contaminantes. Además, fortalece las cadenas de valor locales y promueve el desarrollo de nuevos productos y servicios.

La propuesta de desarrollar un prototipo para la producción de miel a partir de residuos de café, utilizando inteligencia artificial e IoT, es altamente relevante. La incorporación de estas tecnologías permite optimizar los procesos de producción, garantizando eficiencia y calidad. Este enfoque no solo es sostenible y ambientalmente responsable, sino que también aborda un problema real relacionado con el manejo de residuos, ofreciendo una solución innovadora y rentable con gran potencial de mercado tanto nacional como internacional.

5. OBJETIVOS

5.1.OBJETIVO GENERAL

Diseñar teóricamente un sistema automatizado basado en inteligencia artificial (IA) e Internet de las Cosas (IoT) para la producción de miel a partir de pulpa y mucílago de café.

5.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los factores clave dentro del proceso de producción de miel a partir de pulpa y mucílago de café.
- Diseñar esquemas eléctricos, electrónicos y de control para un sistema automatizado que aproveche la pulpa y el mucílago del café.
- Integrar conceptos de inteligencia artificial e IoT en el diseño del sistema, contemplando algoritmos de control y arquitectura de monitoreo remoto.
- Evaluar la sostenibilidad y aplicabilidad del diseño propuesto mediante análisis técnico, ambiental y económico.

6. MARCO TEÓRICO

6.1.MARCO CONCEPTUAL

La producción de café, una de las principales actividades económicas en muchos países, genera una gran cantidad de residuos, especialmente pulpa y mucílago, que a menudo son desechados de manera inadecuada. Esto no solo representa un desperdicio de recursos, sino que también contribuye a problemas ambientales significativos, como la contaminación del suelo y el agua, y la generación de olores desagradables. En este contexto, la economía circular se presenta como un enfoque que busca reutilizar y transformar estos residuos en productos de valor, en lugar de desecharlos [8]. Este enfoque es esencial para abordar los problemas ambientales asociados con la caficultura, promoviendo prácticas más sostenibles que beneficien tanto al medio ambiente como a las comunidades productoras.

Un aspecto clave en este estudio es la integración de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial (IA) y el Internet de las Cosas (IoT) en el desarrollo de un prototipo de biorrefinería. Estas tecnologías permitirán un monitoreo y control más precisos de los procesos de producción de miel a partir de los residuos del café. La IA puede optimizar las condiciones de fermentación y mejorar la calidad del producto final, mientras que el IoT facilitará la recolección y transmisión de datos en tiempo real sobre las condiciones ambientales y el estado del proceso de producción [9].

Hipótesis

Se plantea que la implementación de un proceso de producción de miel apoyado en inteligencia artificial e internet de las cosas para aprovechar los residuos que en su normalidad son desechados por el sector de la caficultura, permitirá reducir los volúmenes exagerados de residuos y los olores de los mismos, generar alternativas para la economía del sector caficultor, y mitigar la propagación de plagas. Esto permitirá mejorar la calidad de vida de las personas que están involucradas en este sector productor. Esta hipótesis resalta la importancia de las tecnologías avanzadas no solo para mejorar la eficiencia del proceso, sino también para abordar los problemas ambientales asociados con la producción de café.

6.2.MARCO REFERENCIAL

La producción de café genera aproximadamente 784.000 de toneladas de residuos anuales en Colombia, la mayoría de los cuales son pulpas y mucílago, que a menudo son desechados sin tratamiento adecuado, lo que contribuye a la contaminación ambiental y afecta la calidad de vida de las comunidades cercanas [10]. Este problema ha llevado a un creciente interés en la investigación y desarrollo de métodos sostenibles para el manejo de residuos en la caficultura, resaltando la necesidad de innovaciones que promuevan la sostenibilidad y reduzcan el impacto ambiental [11].

Diversos estudios han demostrado que la pulpa de café puede ser aprovechada mediante procesos de fermentación, transformando estos residuos en productos de valor, como la miel [11]. Sin embargo, pocos proyectos han explorado la integración de tecnologías como la IA y el IoT en estos procesos, a pesar de su potencial para optimizar la producción y mejorar los resultados finales.

Para abordar este desafío, se propone el desarrollo de un prototipo de biorrefinería que utilice IA y IoT para tratar la pulpa y el mucílago del café. Este sistema estará diseñado para monitorizar y controlar en tiempo real las condiciones de fermentación, lo que permitirá optimizar el proceso y mejorar la calidad de la miel producida. Al integrar estos avances tecnológicos, se espera que el prototipo no solo sea eficiente en el aprovechamiento de residuos, sino que también contribuya a mitigar los problemas ambientales asociados con la producción de café, mejorando la sostenibilidad de la industria cafetera y generando nuevas oportunidades económicas para los agricultores.

Además, el marco legal en Colombia regula el manejo de residuos agroindustriales, estableciendo pautas que aseguren la sostenibilidad y la protección del medio ambiente [12]. Este contexto normativo es fundamental para la implementación de proyectos que buscan innovar en el uso de subproductos del café, asegurando que las soluciones propuestas no solo sean viables desde el punto de vista técnico, sino también social y ambientalmente responsables. Este marco referencial ofrece un contexto integral que justifica la investigación y resalta su importancia en un enfoque más amplio de sostenibilidad y desarrollo agrícola.

7. METODOLOGÍA

El primer paso del proyecto será una etapa de investigación documental. En esta fase se recopilará información sobre cómo se pueden aprovechar los residuos del café, como la pulpa y el mucílago, para producir miel, incluyendo los principios de fermentación, composiciones químicas y procesos biotecnológicos asociados. También se identificarán los elementos necesarios para un sistema automatizado teórico, tales como tanques de fermentación, sensores de temperatura y pH, mecanismos de agitación y sistemas de control.

A continuación, en la fase de diseño, se elaborará una propuesta conceptual del sistema mediante diagramas de bloques, flujogramas del proceso y esquemas funcionales. Se utilizarán herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) para modelar en 3D los componentes del sistema, y software de simulación para predecir el comportamiento de variables clave durante la fermentación.

Posteriormente, se desarrollarán los esquemas eléctricos y electrónicos, junto con el pseudocódigo del sistema de control. Se integrarán sensores virtuales y algoritmos de monitoreo usando entornos como Proteus, Fritzing o Tinkercad. También se plantea la integración de inteligencia artificial para optimizar parámetros como el tiempo de fermentación o las condiciones ambientales, basándose en conjuntos de datos simulados.

Finalmente, se evaluará el diseño desde una perspectiva de viabilidad técnica, económica y ambiental. Esta fase incluirá un análisis comparativo entre el modelo teórico propuesto y las prácticas convencionales, identificando fortalezas, limitaciones y recomendaciones para futuras implementaciones físicas en campo.

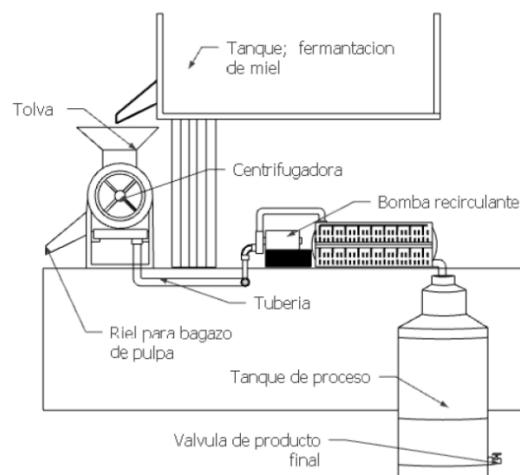
8. RESULTADOS ESPERADOS

Se espera obtener un diseño técnico integral y funcional de un sistema automatizado para la producción de miel a partir de los residuos del café. Este diseño incluirá diagramas estructurales, esquemas eléctricos, simulaciones de sensores y controladores, así como algoritmos de monitoreo inteligente mediante inteligencia artificial.

Entre los resultados teóricos clave se encuentra la validación del proceso propuesto a través de simulaciones, demostrando que el sistema podría automatizar el control de variables críticas como la temperatura y el tiempo de fermentación, asegurando un producto final homogéneo y de calidad.

Además, se prevé una estimación del impacto ambiental positivo que tendría la implementación del sistema en términos de reducción de residuos orgánicos sin tratar. Se proyecta que la miel obtenida a partir de pulpa y mucílago sería viable como producto comercial, generando oportunidades económicas adicionales para los caficultores.

También se anticipa la identificación de oportunidades de mejora tecnológica, como el uso más eficiente de la energía, mejores algoritmos de control o configuraciones alternativas del sistema. Un resultado importante será que el diseño sea replicable y adaptable a distintas condiciones cafetaleras, aportando así a la sostenibilidad del sector.



9. CONCLUSIÓN

El aprovechamiento de los residuos del café para la producción de miel representa una solución innovadora y sostenible ante los desafíos ambientales y económicos que enfrenta la caficultura en Colombia. A través del diseño teórico de un sistema automatizado, que integra tecnologías como la inteligencia artificial y el Internet de las Cosas, es posible optimizar este proceso de forma eficiente y replicable.

Este proyecto no solo contribuye a la economía circular mediante la reducción de residuos orgánicos y la minimización del impacto ambiental, sino que también plantea una alternativa rentable para diversificar las actividades productivas de los caficultores.

El enfoque propuesto, basado en simulación, modelado y análisis técnico, proporciona una base sólida para futuras implementaciones físicas, y demuestra que es posible generar soluciones de alto impacto desde una perspectiva académica y tecnológica.

10. CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Lopez and J. Carlos, “Es 2 712 948 T3,” pp. 1–9, 2006.
- [2] J. C. García L., H. Posada-Suárez, and P. Läderach, “Recommendations for the regionalizing of coffee cultivation in Colombia: A methodological proposal based on agro-climatic indices,” *PLoS One*, vol. 9, no. 12, pp. 1–22, 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0113510.
- [3] V. Ardila Rivero¹, “Impactos ambientales generados en la producción de café pergamino seco Viviana,” *Modul Biokimia Mater. Metab. Lemak, Daur Asam Sitrat, Fosforilasi Oksidatif Dan Jalur Pentosa Fosfat*, no. 5, p. 6, 2021.
- [4] L. S. Johnson, K. R. Poovathingal, and S. Kuttykandy, “Evaluation of the physio-chemical properties and microbial load of the soil polluted with coffee processing wastes,” *Malays. J. Microbiol.*, vol. 16, no. 2, pp. 134–142, 2020, doi: 10.21161/mjm.190519.
- [5] M. G. SALAZAR, N. G. M. VEGA, and S. E. ROZOPERDOMO, “DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES ÓPTIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE MUCÍLAGO DE CAFÉ CON EL PROPÓSITO DE REDUCIR EL VERTIMIENTO DE LOS DESECHOS PROVENIENTES DEL PRETRATAMIENTO DEL CAFÉ EN LAS FUENTES HÍDRICAS DEL MUNICIPIO DE PITALITO.,” *J. Econ. Perspect.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–4, 2022, [Online]. Available: <http://www.ifpri.org/themes/gssp/gssp.htm%0Ahttp://files/171/Cardon - 2008 - Coaching d'équipe.pdf%0Ahttp://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203%0Ahttp://mpoc.org.my/malaysian-palm-oil-industry/%0Ahttps://doi.org/10.1080/23322039.2017>
- [6] C. E. Oliveros Tascón, C. A. Ramírez, N. Rodríguez-Valencia, J. R. Sanz-Urbe, and C. A. Tibaduiza-Vianchá, “Manejo y aprovechamiento de las aguas residuales del lavado del café con la tecnología ECOMILL®,” *Av. Técnicos Cenicafé*, vol. 538, pp. 1–8, 2022, doi: 10.38141/10779/0538.
- [7] Y. F. Cortés, K. D. S. Rodríguez, and L. A. V. Marín, “Environmental impacts from coffee production and to the sustainable use of the waste generated,” *Prod. y Limpia*, vol. 15, no. 1, pp. 93–110, 2020, doi: 10.22507/PML.V15N1A7.
- [8] J. R. Melendez, “Circular agri-food economy: managerial trends for the sustainability of production systems,” *Rev. Venez. Gerenc.*, vol. 28, no. 9, pp. 664–684, 2023, doi: 10.52080/rvgluz.28.e9.41.
- [9] N. N. Misra, Y. Dixit, A. Al-mallahi, M. S. Bhullar, R. Upadhyay, and A. Martynenko, “IoT, big data and artificial intelligence in agriculture and food industry N.N.,” 2024.
- [10] J. P. Jiménez-Ochoa and N. Gutiérrez-Guzmán, “Call to make an adequate use of coffee by-products,” *Erasmus Semilleros Investig.*, no. Extra, pp. 45–49, 2021, [Online]. Available: <https://journalusco.edu.co/index.php/erasmus/article/view/3440>

- [11] Y. G. Lee, E. J. Cho, S. Maskey, D. T. Nguyen, and H. J. Bae, “Value-Added Products from Coffee Waste: A Review,” *Molecules*, vol. 28, no. 8, pp. 1–19, 2023, doi: 10.3390/molecules28083562.
- [12] Justiciaambientalcolombia, “guia-ambiental-para-el-subsector-cafetero,” *Violencia y habitus*, pp. 19–29, 2017, doi: 10.4000/books.sdh.538.