



Review [Revisión]

**TECNOLOGÍAS DEL BENEFICIADO DE CAFÉ Y TRATAMIENTO DE
EFLUENTES LÍQUIDOS †**
[COFFEE PROCESSING TECHNOLOGIES AND TREATMENT OF LIQUID
EFFLUENTS]

**Sergio Sánchez-Hernández^{1*}, José Gervasio Partida-Sedas¹,
Juan Guillermo Cruz-Castillo¹, Edith Cadena Chamorro²,
Esteban Escamilla-Prado¹ and Eduardo Valdés-Velarde³**

¹Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional Universitario Oriente,
Huatusco, Carretera Huatusco -Jalapa Kilómetro 6, Veracruz, México. C.P. 94100.
Email: jpartidas@chapingo.mx; jcruz@chapingo.mx;

² Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Medellín, 64c
63-120, Medellín, Robledo, Antioquia, Colombia. Email:
emcadenac@unal.edu.com

³Universidad Autónoma de Chapingo, Departamento de Fitotecnía, km 38.5 carr.
México - Texcoco, Texcoco, México. CP 56230, Email: evaldesv@chapingo.mx,
ser89nangio@gmail.com

*Corresponding author

SUMMARY

Background. The coffee processing process generates polluting solid and liquid waste. It is possible to reduce its effects through treatments that allow its use. **Objective.** To analyze the alternatives for the management of the effluents and residues generated in the coffee processing process to reduce its effects and to show treatments that have had positive results. **Methodology.** To obtain the information, specialized search engines were used in databases such as: RESEARCHGATE, GOOGLE SCHOLAR, CIRAD, CATIE, IICA, ELSEVIER, SCIENCIE DIRECT, REDALYC, SCOPUS. An exploration and analysis of 100 documents related to the following topics was carried out: 1) history of the use of effluent treatment systems in coffee processing, 2) types of treatments for the management of liquid and solid waste, 3) operation of these technologies, capacity, place where the research was carried out, variables measured, as well as the capacity of these systems. The search period was planned from 1980 to 2023. The history of the beginning of the systems for the treatment of waste generated in coffee processing was also investigated. The key words used for the search were: wet processing, wastewater, solid and liquid waste, coffee by-products, treatment systems, chemical oxygen demand, biological oxygen demand, total solids, turbidity, anaerobic treatments, and aerobic treatments. Approximately 100 documents were reviewed for the writing of the paper. **Main findings.** Research has been reported since 1980. Colombia and Mexico have focused on the development of machinery to mechanize processing operations to reduce water use, as well as anaerobic treatment systems, biodigesters and wetlands. **Implications.** It is necessary to know the main methods of wastewater treatment in the coffee processing process to determine the most suitable in coffee growing regions. **Conclusions.** Anaerobic biodigestion technology is the most used for the treatment of liquid effluents and with the best results. For the solid effluent, different alternatives are used for substrate such as the extraction of substances for industry, composting and biomaterials, among others.

Key words: waste treatment; wastewater; biological and biochemical oxygen requirement; heavy metal pollution load.

RESUMEN

Antecedentes. El proceso del beneficiado de café genera residuos sólidos y líquidos contaminantes. Es posible disminuir sus afectaciones mediante tratamientos que permitan su aprovechamiento. **Objetivo.** Analizar las alternativas de manejo de los efluentes y residuos generados en el beneficiado de café para disminuir sus afectaciones. **Metodología.** Para la obtención de la información se utilizaron buscadores especializados como: RESEARCHGATE, GOOGLE SCHOLAR, CIRAD, CATIE, IICA, ELSEVIER, SCIENCIE DIRECT, REDALYC, SCOPUS. Se realizó una exploración y análisis de información de 100 documentos relacionada con la siguiente temática: 1) historia del uso

† Submitted August 18, 2023 – Accepted March 27, 2024. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5099>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = Sergio Sánchez-Hernández: <https://orcid.org/0009-0000-6317-6669>

de sistemas de tratamiento de efluentes en el beneficiado del café, 2) tipos de tratamientos para manejo de residuos líquidos y sólidos, 3) funcionamiento de estas tecnologías, lugar donde se desarrolló la investigación, variables medidas, así como la capacidad de estos sistemas. El periodo de búsqueda fue de 1980 hasta 2023. Se investigó también la historia del inicio de los sistemas de tratamiento de los residuos generados en el beneficiado del café. Las palabras clave utilizadas para la búsqueda fueron: beneficiado húmedo, aguas residuales, residuos sólidos y líquidos, subproductos del café, sistemas de tratamiento, demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno, sólidos totales, turbidez, tratamientos anaerobios y aerobios. **Hallazgos principales.** En Colombia y México se han enfocado en mecanizar las operaciones del beneficiado para disminuir el agua utilizada, así como sistemas de tratamientos anaerobios, biodigestores y humedales. **Implicaciones.** Es necesario conocer los principales métodos de tratamiento de aguas residuales en el proceso del beneficiado del café, para determinar los más aptos en las regiones cafetaleras. **Conclusiones.** La tecnología de la biodigestión anaerobia es la más utilizada para el tratamiento de los efluentes líquidos y con mejores resultados. Para el efluente sólido, se utilizan diferentes alternativas para sustrato como la extracción de sustancias para la industria, compostaje y biomateriales, entre otros. **Palabras clave:** tratamiento de desechos; aguas residuales; requerimiento biológico y bioquímico de oxígeno; carga contaminante por metales pesados.

INTRODUCCIÓN

El café es el segundo producto agrícola más comercializado en el mundo, cuya industrialización consiste en separar el grano removiendo la cáscara y la parte mucilaginoso del fruto. Lo que genera diferentes subproductos como pulpa y residuos líquidos que constituyen una fuente de contaminación importante que provoca problemas ambientales en regiones cafetaleras (Parra-Huertas, 2015).

Existen diferentes tipos de beneficiado mencionados en la literatura, el método de procesamiento más antiguo utilizado por los productores es secar los frutos al sol para obtener granos de café “natural” beneficiado vía seca. El beneficiado natural o seco (sin agua), se utiliza principalmente en la especie (*Coffea canephora* Pierre ex Froehner) y otras variedades de (*Coffea arabica* L.) cultivadas en Brasil (Duguma and Chewaka, 2019).

Esta agroindustria ha tenido un crecimiento económico destacado en los últimos años, debido al incremento en el consumo del aromático, al igual que productos derivados; por lo tanto, la generación de residuos sólidos y líquidos es inevitable, se reportan tasas de producción de aguas residuales de 110 m³ por cada 100 toneladas de café procesado (Chanakya & Alwis, 2004; Del Real Olvera & Gutiérrez, 2010). En contraste, en Colombia la cantidad de agua que se consume en el beneficiado “ecológico” es de 1 L/kg de café pergamino (Puerta-Quintero, 1999) a diferencia del beneficiado húmedo tradicional en México que llega a consumir hasta 40-45 L/kg de pergamino (**Figura 1**) (Cadena, 2001; Rodríguez, 2015).

Existen diferentes técnicas para tratar los efluentes del beneficiado, se ha observado que el tratamiento para las aguas residuales es la digestión anaerobia con reactores, que presenta resultados positivos, a pesar de los costos que pueda generar, en un contexto de energía circular, estos costos serían retribuidos mediante la reutilización de la energía producida como biogás.

Existen otros como la fitorremediación, coagulación y procesos oxidativos avanzados (Castillo-Jara, 2022).

El objetivo de esta revisión fue analizar las alternativas de manejo de los efluentes y residuos generados en el beneficiado de café para disminuir sus afectaciones y mostrar tratamientos que han tenido los mejores resultados.

METODOLOGÍA

Se propuso una metodología de 3 etapas:

1. Se definió el problema de investigación

La temática de las aguas residuales generadas en el beneficiado del café, así como las tecnologías actuales que se utilizan para disminuir las afectaciones ambientales, ha sido estudiada por diferentes investigadores, sin embargo, al realizar una breve revisión previa a este documento no se encontró artículo o documento que explicara este tema, como se está abordando en esta revisión, por lo cual se decidió hacer el presente trabajo en el que se plantearon 3 preguntas de investigación:

1. ¿Cuál es el estado actual de la investigación en relación con la problemática de las aguas residuales? y ¿Qué han hecho los diferentes países cafetaleros al respecto?
2. ¿Cuáles han sido los resultados encontrados sobre esta temática, es decir qué tecnologías se han usado para menguar estas afectaciones, y qué contaminantes eliminan?
3. ¿Cuáles de estas tecnologías han sido las más eficientes y que posibilidades hay de replicarlas con los productores cafetaleros de los diferentes países productores?

2. Búsqueda de la información

Para la obtención de la información se utilizaron buscadores especializados en base de datos como: RESEARCHGATE, GOOGLE SCHOLAR, CIRAD, CATIE, IICA, ELSEVIER, SCIENCE DIRECT, REDALYC, SCOPUS, con la siguiente temática: 1) historia del uso de sistemas de tratamiento de efluentes en el beneficiado del café, 2) tipos de tratamientos para manejo de residuos líquidos, así como sólidos, 3) el funcionamiento de éstas tecnologías, capacidad, lugar donde se desarrolló la investigación, qué variables se midieron así como la capacidad de éstos sistemas.

Se revisaron artículos científicos en inglés, español y portugués, tesis de licenciatura, maestría, doctorado, y congresos nacionales e internacionales. El periodo de búsqueda contemplo a partir de 1980 hasta 2023, se investigó también la historia del inicio de los sistemas de tratamiento de los residuos generados en el beneficiado del café.

Las palabras clave utilizadas para la búsqueda fueron: beneficiado húmedo, aguas residuales, residuos sólidos y líquidos, subproductos del café, sistemas de tratamiento, demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno, sólidos totales, turbidez, tratamientos anaerobios, tratamientos aerobios. Se revisaron un total de 100 documentos (artículos científicos, en español, inglés y portugués) resultando seleccionados 79 documentos.

3. Análisis de la información.

El análisis de la información se basó primeramente en:

- 1) Descripción del proceso de beneficiado de café.
- 2) Revisión de los métodos de manejo de los residuos del café en México y América Latina, avances y logros.
- 3) Clasificación de los métodos de tratamiento de residuos sólidos y los efluentes líquidos, así como su forma de funcionamiento.
- 4) Identificación de los principales métodos de tratamiento y su impacto dentro de la cafecultura.

Se privilegió la información relacionada con los sistemas de tratamiento que han tenido resultados

positivos, así como su innovación, capacidad y calidad en el manejo de los residuos y su impacto en el medio ambiente y que puedan ser replicables en diferentes regiones cafetaleras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Beneficiado del café en América

En el proceso postcosecha del café existen principalmente dos métodos, el húmedo y el seco (Vincent, 1987; Álvarez *et al.*, 2011). En el húmedo (**Figura 1**) se usa agua para remover la pulpa o exocarpio y llegar a la semilla rodeada con mucílago o mesocarpio. Posteriormente, para alcanzar un grano oro o verde se remueve el mesocarpio con un secado que puede ser directamente al sol o por medio de secadoras de gas, este el último proceso del beneficiado es posible comercializar el grano a humedad del 12 % (Alvarenga *et al.*, 2014; López, 2015).

Caso colombiano

El café colombiano destaca por su alta calidad y reconocimiento internacional. Clasificación que se vincula a un café especial asociado a factores como la variedad cultivada, condiciones ambientales, prácticas de cultivo y beneficio. A través de la etapa fermentativa del café se potencian los sabores y aromas únicos, producto de una complejidad química, bioquímica y física del grano, donde aproximadamente más de 2 000 compuestos químicos orgánicos e inorgánicos (cafeína, minerales, ácidos grasos, aminoácidos, proteínas, polisacáridos, ácidos orgánicos) contribuyen al cuerpo, bouquet y sabor en la bebida. En el proceso de fermentación, la remoción del mucílago se efectúa por acción microbiana, entre los que destacan microorganismos con actividad pectinolítica, que a su vez corresponde a enzimas especializadas capaces de transformar y degradar las sustancias pécticas del mucílago en unidades simples como los ácidos galacturónicos que le confieren diferentes notas aromáticas al grano (Puerta-Quintero, 2013). La fermentación es una etapa esencial para inducir cambios bioquímicos en el grano de café; teóricamente la degradación del mucílago incluye fermentación alcohólica, láctica, acética y butírica; en el proceso, a medida que aumenta la temperatura incrementa la carga microbiana encargada de producir metabolitos primarios y secundarios a partir de polisacáridos presentes en el mucílago (mesocarpio), rico en azúcares y pectinas, que envuelve al pergamino y película plateada que está adherida al grano almendra (endospermo) (Murthy and Madhava, 2012).



Figura 1. Partes del fruto de café y su beneficiado. Elaboración propia 2022.

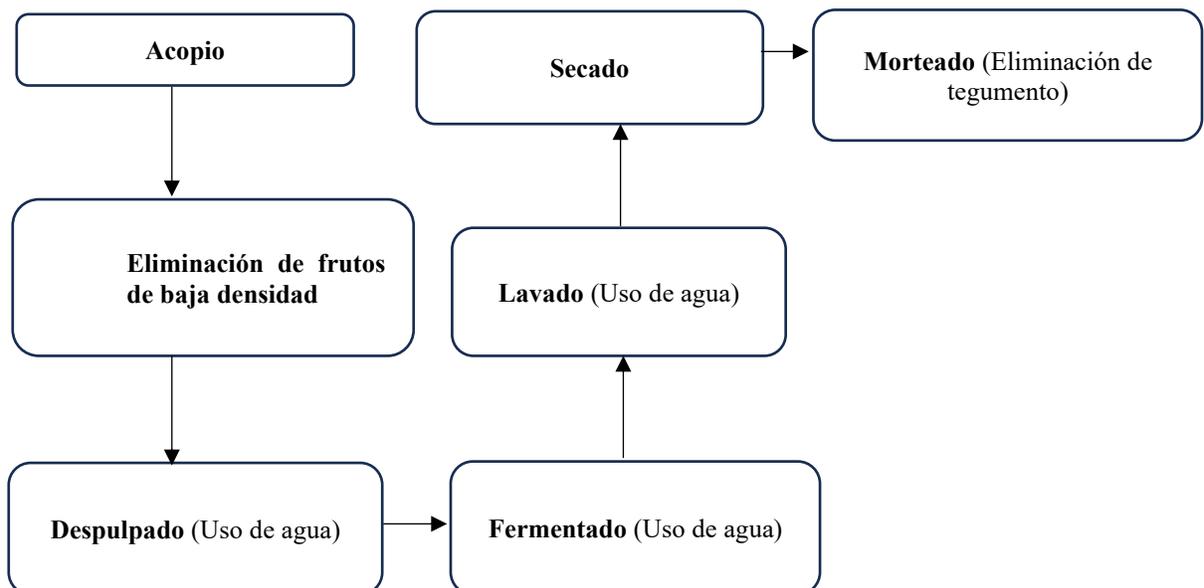


Figura 2. Proceso del beneficiado húmedo. Elaboración propia 2022.

En algunos estudios se han utilizado enzimas extracelulares en el proceso de beneficiado de café (Sheng *et al.*, 2014). Se evaluó el efecto de una poligalacturonasa y una feruloil esterasa de *Aspergillus tubingensis* sobre el proceso de desmucilaginado del café y como influyó en el tiempo de fermentación, se encontró una disminución en el tiempo de desmucilaginado, es decir, las enzimas aceleran la degradación o hidrólisis de moléculas que

conducen a una reducción de carga orgánica; resultados similares han sido indicados tras la aplicación de pectinasas (Peñuela-Martínez *et al.*, 2021).

En Colombia, el desarrollo de la tecnología de beneficiado del grano de café muestra tendencias a disminuir el uso de agua mediante la mecanización de las diferentes operaciones. Se utiliza un alto contenido

de agua para el beneficiado de café (hasta 40 L/kg de café pergamino), y recomiendan la incorporación de una tolva seca, separador hidráulico de tolva, tornillo sin fin, tolvas húmedas y tanque sifón con recirculación para disminuir el uso de agua en la etapa de recepción del café. Con esta disminución en el gasto de agua los productores contribuyen a tener sistemas de beneficiado más sustentables (Mejía-Zuluaga, 2018).

Desde 1986 hasta 1988 el Centro Internacional de Investigación del Café (CENICAFÉ), desarrolló el despulpado sin agua, con despulpadoras horizontales, verticales o de discos. Reporta que el grano obtenido fue de buena calidad, igual que la pulpa, evitando un 72 % de la contaminación generada en el proceso de beneficio. En los años siguientes se perfeccionó la desmucilagadora horizontal, promovida especialmente por cafetaleros de Antioquia, que unió la tolva seca y el desmucilagador mecánico, se agregó una zaranda cilíndrica de varillas para separar el café pergamino, del cereza o guayaba (frutos sin despulpar) y pasilla (más del 50 % de granos defectuosos). Los resultados mostraron que se redujo el 95 % de la contaminación y que la pulpa y mucílago se usaron para producción de lombricomposta y uso en almácigos. De igual manera, esta tecnología redujo el uso de agua de 40 a 8 L/kg (Arango, 1999).

El beneficiado denominado “ecológico” disminuye el consumo de agua en un 98 %, advierten que, trabajando de acuerdo con las recomendaciones, se evita más del 90 % de la contaminación potencial generada por los efluentes del beneficiado húmedo. Enfatizan que un proceso clave es el transporte de la pulpa y el mucílago concentrado con un tornillo sin fin, que en su apreciación disminuye en más del 90 % la contaminación del agua utilizada (Oliveros-Tascón y Sanz-Urbe, 2011).

México y Centroamérica

Para el año 2004, el 40 % de la producción nacional mexicana de café ya no era beneficiada por el pequeño productor. Los beneficios de café tenían entre 3 y 12 trabajadores para llevar a cabo su operación, además, se requería de medianos y altos volúmenes de inversión para asegurar los niveles de acopio del grano de café adecuados para sus mercados y transformación.

Se han reportado 230 comercializadores activos del grano del café entre los que se tiene beneficiadores, exportadores y comercializadores de café (Figueroa-Hernández *et al.*, 2015). Esta información confirma la concentración del procesamiento del café en pocas unidades de beneficiados que generan grandes cantidades de efluentes contaminante. El enfoque predominante ha sido el desarrollo biotecnológico para

tratar los efluentes, en 1989 el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) celebró el Congreso denominado “Seminario Internacional sobre Biotecnología en la Agroindustria Cafetalera” llevado a cabo en Xalapa, Veracruz, México. Desde entonces se ponía en perspectiva la factibilidad económica y tecnológica para desarrollarse a escala industrial, situación que sigue siendo un reto (Zuluaga, 1993).

En México, los pocos sistemas de tratamiento de agua que existían eran del tipo aerobio y que los procesos anaerobios no existían. Los avances presentados colocan a la digestión anaerobia con resultados positivos comparada con los procesos aerobios, se planteó el uso de un diseño de la planta de tratamiento basada en reactor anaerobio con lecho de Iodo (RALL), para el tratamiento de los efluentes del café generó eficiencias de 95 % en remoción de la demanda química de oxígeno, con volúmenes de tanques y requerimientos de equipo limitados con tecnología de bajo costo de operación y mantenimiento (Noyola, 1989).

En 1993, en Coatepec, Veracruz, había cuatro plantas para tratamiento de los residuos del beneficiado húmedo de café, mientras que Chocamán, Veracruz, un beneficio húmedo de café también contaba con una planta para tratamiento fisicoquímico de los residuos del café. Se tenía un sistema de tratamiento por filtración de las aguas residuales y la empresa café Bola de Oro tenía plantas de tratamiento anaerobio de primera generación, la empresa Puerto Rico con tratamientos fisicoquímicos y finalmente, el beneficio Tlapexcatl en Ixhuatlán del café desarrolló un biodigestor anaerobio de 10 m³ para el tratamiento de las aguas residuales en el año 1992 (Castillo *et al.*, 1993).

En México a diferencia de Colombia, se acuñó el concepto denominado “reconversión” de beneficios húmedos tradicionales mediante la optimización del uso de agua en los diferentes procesos del café, mencionan que en el beneficio “La Esmeralda” en Coatepec Veracruz, al utilizar esta tecnología de tratamiento de aguas residuales se disminuye el consumo de agua hasta de 0,5 L/kg de café procesado (Sánchez *et al.*, 2001).

En Costa Rica, en 1977 había 104 beneficios húmedos y solo tres de ellos tenían sistemas de tratamiento de aguas residuales, a pesar de que la ley de salud los obligaba a que los residuos de las industrias fueran tratados (Fernández Urpi, 1977). Los beneficios adoptaron el método de recirculación de agua y también sistemas primarios de tratamiento de aguas como la sedimentación, neutralización con CaOH₂, biocatalizador enzimático y, como tratamiento secundario lagunas de lodos y de oxidación anaerobia. En Costa Rica, se ha implementado la Acción de

Mitigación Nacionalmente Apropiada (NAMA) para generar tecnologías más eficientes y ecológicas en el proceso de beneficiado de café, así como la reutilización de los subproductos generados en los 270 beneficios reportado en el país (Balma, 2018).

En Nicaragua pocos beneficios poseían lagunas o fosas como tratamiento para las aguas residuales del café, con profundidad de 1 m y un área de 30 m² donde se depositan las “aguas mieles”. Dichas lagunas presentaron poca degradación de la materia orgánica debido a que presentan un pH muy bajo, lo que propicia sedimentación. Similarmente, otro tipo de tratamiento que consistía en tanques de evaporación e infiltración a desnivel y puestos en serie, que soportan hasta 756 m³ de agua residual (Molina Gómez, 1999). Estos sistemas de tratamiento son más accesibles económicamente para los productores de café (Salguero-Zeceña 1996; Stewart, 2021).

En México el proceso de lavado “ecológico” utiliza agua en una proporción de 1 a 2 L/kg café cereza procesado a diferencia del tradicional que ocupa 16 L/kg de café procesado o incluso una mayor cantidad de agua, lo cual repercute en el uso indiscriminado del líquido, lo que se hace necesario llevar a cabo manejo de las aguas residuales por su fuerte contaminación (Café, Campo y Ambiente, 2012).

Beneficiado en Brasil

El beneficiado vía seca es popular en Brasil y África. En este proceso el uso del agua es nulo y genera bebidas con más cuerpo, amargor y espesor. Sin embargo, requiere mayores cuidados, debido a que se debe mantener la calidad en taza. El beneficiado seco es una alternativa viable para México. Por ejemplo, en la región de Atoyac de Álvarez, Guerrero, se obtiene cafés naturales o mejor conocidos como “café capulín” con amplia tradición y reconocimiento. Por lo que, es una alternativa tecnológica, en donde el uso del agua es nulo.

Pero requiere mayor cantidad de energía para remover la humedad de todas las partes que constituyen el fruto. La energía requerida es solar, esto es una limitante, ya que las regiones más importantes poseen baja irradiación solar en época de cosecha (Vincent, 1987; Selmar *et al.*, 2008; Puerta-Quintero, 2013; Figueroa-Hernández *et al.*, 2015).

Café despulpado, otra forma de beneficiar

El “café despulpado” consiste en acopiar los frutos maduros, seleccionarlos y despulparlos. Posteriormente, el grano con mesocarpio adherido se seca al sol, en zarandas o pisos de cemento, y el uso de agua es limitado (generalmente en secadores de tipo Guardiola) (Puerta-Quintero, 2008). Los cafés de

especialidad son actualmente reconocidos por su calidad y con sabor diferenciado, además de no utilizar agua en el proceso de beneficiado (Acero-Reyes and Duque Buitra, 2016). Es así como las dos tendencias en el desarrollo tecnológico del beneficiado reportadas convergen en reducir y optimizar el uso del agua, como el caso de México o mediante la mecanización de las operaciones como es en Colombia, también pueden ser una combinación de ambas. A pesar de ello, persiste la generación de efluentes líquidos, semilíquidos y sólidos que requieren de una tecnología para su tratamiento y disposición final.

Efluentes del beneficiado

En Quindío, Colombia las aguas residuales del beneficiado poseen una composición química compleja y deben ser tratadas. El tiempo de fermentación influye en su composición química. Por ejemplo, a un tiempo de fermentación 24 h se elevan los sólidos volátiles, minerales totales, fósforo soluble, en contraste, el O₂ disuelto y conductividad se reducen, así como el pH y cloruros no son afectados ($P \leq 0,05$). También, los efluentes del beneficiado son vertidos en aguas superficiales como arroyos. Asimismo, en dos ríos Chiapas, México, las aguas abajo de los beneficios húmedos con riesgo para actividades agrícolas, pecuarias y consumo humano en áreas cercanas a cuerpos de agua, por lo que es importante monitorear los contaminantes vertidos en las aguas (Ruiz-Nájera *et al.*, 2017; Torres-Valenzuela *et al.*, 2019).

En Chiapas, México, el beneficiado húmedo acidifica el agua y provoca bajos niveles de oxígeno debido a la concentración de materia orgánica. En el agua existen metales pesados a concentraciones por debajo de los límites máximos permitidos para uso general y consumo humano. En el despulpado, varios metales pesados derivados del proceso de beneficiado del café se incrementaron a excepción de Plomo (Pb). El Cadmio (Cd), con 0,25 mg/L, y Arsénico (As) con valores entre 2,9 y 6,4 mg/L fueron permitidos por las normas mexicanas vigentes NOM 127-SSA1, pero, no así para la organización mundial de salud pues se consideran que pueden provocar cáncer (Siu *et al.*, 2007). Se encontró que la calidad del agua del río Jamapa en Veracruz se vio afectada por diferentes agroecosistemas, los efluentes de las descargas de las zonas urbanas y beneficios húmedos de café. Evaluaron parámetros de calidad del agua en la región de Huatusco, y se encontró que 66,4 % oxígeno disuelto, pH de 7,03, nitratos de 19,5 mg/L fosfato total de 0,47 mg/L sólidos disueltos totales de 103,9 mg/L estos parámetros representan un peligro para la salud de la población que habita esta región productora de café (Partida-Sedas, 2018).

Características de los efluentes

En Colombia, se demostró que el consumo de agua fue de 1,8 L/kg café cereza, y por cada kilogramo se obtuvo 108,2 g de subproductos secos (76,8 % de pulpa (P), y 23,2 % de Mucílago (M), de los cuales 1,84 g correspondieron a N (75,4 % de P y 24,6 % de M), que produjeron 115,1 g de DQO (Demanda Química de Oxígeno), (73,7 % de P y 26,3 % de M). Además, la pulpa después de su transporte produjo residuo líquido que contenía 37,2 % de peso seco, generó pulpa lavada con peso correspondiente al 62,8 % restante, equivalentes al 41,4 % y 58,6 % en términos de la (DQO), el mucílago fermentado retirado después del lavado produjo agua residual con materia soluble del 86,6 %, causante del 78,3 % de la DQO (Zambrano-Franco and Isaza-Hinestroza, 1998).

En la India se encontró en las aguas residuales del café sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos tanto disueltas o en suspensión, además de que estas sustancias, también, pueden disminuir la DBO (Demanda Biológica de Oxígeno) y que los microorganismos *Pseudomonas*, *Escherichia*, *Aerobacter*, *Bacillus*, hongos y plancton y así degradar más rápido los residuos del café, la fauna acuática presente en los ríos puede ser un parámetro para medir la contaminación y afectación que tienen las fuentes de agua cercanos a los beneficios por lo que se deben llevar a cabo diferentes tratamientos para disminuir las afectaciones ambientales de los residuos de café (Chanakya and Alwis, 2004).

En Minas Gerais, Brasil, se evaluó si existían alteraciones en las características físicas, químicas y bioquímicas de las aguas residuales provenientes del lavado, despulpado y desmucilaginado del fruto del café. Así, debido a la constitución química del fruto, durante las operaciones de lavado, despulpado y desmucilaginado se incrementó la carga orgánica y componente sólido de las aguas residuales. Establecen que altas concentraciones de nitrógeno y potasio en el agua residual permiten su uso en fertirrigación de cultivos (Prezotti *et al.*, 2008; Rigueira *et al.*, 2009). En países como Nicaragua, Costa Rica, Perú, y Sudáfrica, se hizo un análisis de la calidad del agua que se utiliza para la producción y beneficiado, los resultados mostraron que los residuos generados por la industria del café presentan un potencial peligro de moderado a alto en las áreas de protección de manantiales, siendo una fuente muy importante de recurso en estas regiones, también, para la población humana cercana a los beneficios y para la fauna acuática, insectos, mamíferos pequeños, aves, entre otros (Fernández & Springer, 2008 ; Fluker *et al.*, 2018).

En Perú, después del beneficiado vía húmeda los residuos orgánicos son arrojados a los cursos de agua

o terrenos agrícolas, sin tratamiento alguno, lo que provoca contaminación ambiental, con la generación de gas metano y bióxido de carbono debido a la descomposición aeróbica de los subproductos del café, estos gases son fuente de contaminación atmosférica. La contaminación por DQO y DBO oscila de 831,2 a 7200 mg/L y de 831,2 a 2967 mg/L, respectivamente. La presencia de nitratos en el agua usualmente se eleva y llega hasta 32,7 mg/L (Loaiza and Pari, 2013).

Tecnologías de tratamiento de efluentes líquidos

En Colombia evaluaron una técnica para disminuir la contaminación generada por las aguas producidas en el beneficio del café denominado BECOLSUB, tiene dos etapas: en la primera, se mezclan con la pulpa el 61,23 % de los fluidos resultantes del proceso de desmucilaginado mecánico (mucílago, agua e impurezas), en la segunda etapa se retiran manualmente los insolubles presentes en el flujo no mezclado con la pulpa y se aumenta la concentración de sólidos que usa un evaporador rústico operado con energía de una estufa. Con el evaporador en las condiciones de trabajo de la estufa 15 h/día se logra controlar el 100 % de la contaminación generada por los lixiviados en una finca con producción anual de 240 Qq de café pergamino seco por año. Con el desarrollo de esta tecnología se logra remover el 86,3 % DQO y 89,7 % DBO (Morales *et al.*, 2003; Salas *et al.*, 2013; Oliveros *et al.*, 2014).

Reactores biológicos (biodigestores)

En la región cafetalera de Colombia, se decantan a favor de la adopción del uso de biodigestores para el tratamiento de aguas residuales del café, así como otros desechos generados en las fincas. Reafirma que con el uso de biodigestores se pueden descontaminar las aguas residuales para disminuir la contaminación directa a las fuentes hídricas y obtener una fuente de gas para la cocción de alimentos para zonas donde no hay servicio de gas industrial, mismo caso se propone en Honduras utilizando pulpa de café, estas referencias confirman que la mecanización de operaciones del beneficiado de café en Colombia está complementada con el uso de biodigestores para mitigar el fuerte problema de contaminación de los ríos (Balseca and Cabrera, 2001; Fernández-Pinzón, 2017).

En Perú, y Cuba se removió sólidos volátiles en aguas residuales del beneficiado de café por medio de digestión anaerobia. Para ello, utilizaron tres sustratos; agua residual de café, estiércol vacuno y porcino. La mezcla óptima para mayor producción de metano fue combinando proporciones de agua residual de café, 49 % de estiércol vacuno y 51 % de estiércol porcino ajustado por un modelo cuadrático a 97,3 %; con una producción de metano acumulado de 1,13 g/día y una remoción de sólidos volátiles de 81,6 %, de igual

manera, también se realizó un experimento similar en Santiago de Cuba usando efluentes de una despulpadora “ecológica” (Boizán *et al.*, 2005; Guardia-Puebla *et al.*, 2016; Fuilen and Quipuzco, 2020).

En Brasil, se desarrolló un sistema para filtrar contaminantes presentes en aguas residuales del café con el uso de bacterias proteolíticas las cuales se evaluaron en relación con su eficiencia para remover residuos, se encontró que los microorganismos inmobilizados presentaron mayor capacidad para degradar materia orgánica la cual mejoró con la presencia de bacterias que salen del reactor metanogénico y hubo mayor remoción al emplear carbón activado, con el cual removió materia orgánica en 88,6 % a las 36 h. Con esto se observó que hay otras opciones como lo es el uso de microorganismo para remover los contaminantes de las aguas residuales del beneficiado de café además de los ya conocidos (Algeciras *et al.*, 2002).

La biodigestión anaerobia es la tecnología a la cual se recurre con mayor frecuencia para dar solución al problema de la contaminación de los efluentes de los beneficios. Además de otras. También, se observa que las investigaciones son a escala laboratorio y que falta aún dar el salto a una escala que pueda ser adoptada ampliamente por agroindustria del café. Desde luego se tiene conocimiento de las variables que impactan en la eficiencia de la tecnología como son la carga orgánica, el inóculo, el pH, la temperatura, los compuestos de los efluentes entre otras que todavía son un reto para la investigación científica (Rodríguez *et al.*, 2000).

La digestión anaerobia inicia en 1987 con el uso de reactores (Monroy Hermosillo *et al.*, 1998) de varios tipos: filtros anaerobios ascendentes, reactores híbridos de baja velocidad, chino modificado, de lecho granular (UASB) y de lecho granular expandido (EGSB). Paredes *et al.* (2018), mencionan que, entre las alternativas tecnológicas diseñadas para el tratamiento de aguas residuales, resaltan los procesos oxidativos y los tratamientos biológicos aerobios y anaerobios, esta tecnología propicia la degradación de materia orgánica presente en los efluentes residuales. La digestión anaerobia además del tratamiento del residuo genera compuestos energéticos como el metano CH₄ que potencian el uso de dicha tecnología de remediación. Con diseños que emplean el reactor de

flujo ascendente de manto de lodos (UASB), tanque agitado (CSTR) y filtro anaerobio (UAF) estos diseños potencian la eficiencia del tratamiento anaerobio (Tabla 1).

Otros tratamientos

En Hawaii se llevó a cabo un trabajo sobre las aguas residuales del proceso de beneficiado húmedo del café, se tomaron varias muestras de efluentes, las muestras fueron refrigeradas durante el proceso y almacenamiento, esto en fincas de pequeña escala, después fueron tratadas por medio de dos métodos: aplicación de oxígeno (aireación) y de carbonatos CaCO₃, con el objetivo de reducir la cantidad de DBO y el P. El método de aireación llevado a cabo durante siete días con la aplicación de 1 % de carbonatos redujo el DBO a 300 mg/L y el contenido de P hasta 50 % de igual forma mencionan que los efluentes pueden ser utilizados en riego por el contenido de nutrientes (Hue *et al.* 2006).

Otro estudio similar, tuvo como objetivo evaluar la influencia de la aireación y la vegetación en la remoción de materia orgánica en aguas residuales de procesamiento de café (CPW) tratadas en cuatro humedales construidos (CW), caracterizados de la siguiente manera: (I) sistema cultivado de raigrás (*Lolium multiflorum*) que opera con un sistema aireado afluente; (II) sistema no cultivado que opera con un afluente aireado, (III) sistema cultivado de raigrás operar con un influente no aireado; y (IV) sistema no cultivado operando con un sistema no aireado afluente, estos diferentes pastos y plantas incrementaron la velocidad en la reducción de la contaminación de la DQO y los humedales que usaron las plantas de *Typha latifolia* y a *Colocasia sp* redujeron la DBO a 85 % y la DQO 78 % (Rossmann *et al.*, 2013).

En Cajamarca, Colombia, la implementación de un biosistema o humedal para control de los contaminantes provenientes del beneficiado del café se utilizaron plantas macrófitas acuáticas como *Eichhornia crassipes* o Jacinto acuático. Una vez establecido el sistema y pasados 50 días de operación, el agua que salía del humedal artificial tenía una DBO de 98 mg/L y sólidos totales de 148 mg/L, y un pH de 5; por lo que cumplieron con las normas ambientales. Se concluyó que el biosistema con “jacinto acuático” tuvo una reducción para la DBO de 8,5 % y para sólidos totales de 98,1 % (Garay and Rivero, 2014).

Tabla 1. Tratamientos biológicos de efluentes sólidos y líquidos usados en el manejo de las aguas residuales del café.

Tratamiento	Capacidad	País	Referencia	DBO ₅ (%)	DQO (%)	Sólidos disueltos totales (%)	N (%)	Turbidez (%)	Sólidos Suspendidos Totales (%)	Sólidos Totales (%)	Metano (%)	K (%)
Laguna anaerobia	7000 m ³	Brasil	Texera de Matos <i>et al.</i> (2000)	86	89	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	89
Biodigestor	30-60 m ³	Venezuela	García <i>et al.</i> (1995)	N/D	68-69	N/D	83	N/D	N/D	N/D	80	30
Filtro anaerobio de flujo ascendente	12-20 Kg/m ³	Colombia	Zambrano <i>et al.</i> (2015)	83	80	N/D	N/D	N/D	74	46	75	N/D
Proceso anaerobio de separación por membranas	2000m	Varios países de América	Rojas <i>et al.</i> (2021)	N/D	92	N/D	N/D	N/D	N/D	50	40	N/D
Reactor de biopelícula inmovilizada	0.2-1.9 Kg/m ³	Perú	Espinoza-Alejo and Sedano (2007)	N/D	49.5-89	75	N/D	N/D	N/D	89.7	N/D	N/D
Reactor anaeróbico de flujo ascendente y manto de lodos	50-17000 m ³	Costa Rica	Fuentes Jiménez (2019)	80	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	60	N/D
Reactor de lecho con luido presurizado	55 L/m ³	Perú	Macassi-Allasi, G.C. (2017).	59	88	N/D	N/D	33	N/D	70	N/D	N/D
Sistema Modular de tratamiento anaerobio	2000 m ³	Colombia	Matuk, Puerta and Rodríguez (1998) Zambrano <i>et al.</i> (2006)	80	83	N/D	N/D	N/D	79	45	N/D	N/D
Biorreactor anaeróbico con deflectores con sistema de membrana de microfiltración	1.5 m ³	México	Tacias-Pascacio <i>et al.</i> (2019)	N/D	81	61	N/D	90	100	72.6	N/D	N/D
Reactor anaeróbico con baffles	40 L/m ³	Guatemala	Montes Peña and Pocasangre Collazos (2019)	65	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D

En Colombia se desarrolló un método para el tratamiento de residuos mediante el uso de polvo de moringa (*Moringa oleifera*) que actúa como coagulante y floculante en el tratamiento de aguas residuales del beneficiado húmedo de café. Con esto los sólidos suspendidos se reducen, y se alcanza mejoría en la calidad del agua en un 80 % en relación con los parámetros físicos, químicos y microbiológicos. Con semillas de Moringa como absorbente (Zúñiga *et al.*, 2020) para el tratamiento de aguas residuales del café se disminuyó en 87 % la DQO (Mera-Alegria *et al.*, 2016; Quintero Yepes and Rodríguez-Valencia, 2019).

En Cuba, Se realizó la extracción de pectina de la pulpa de café de la especie a (*Coffea canephora* Pierre ex Froehner) por medio de un secador solar, midieron diferentes parámetros dentro de ellos la influencia de la temperatura y el tiempo de extracción de la pectina, pH y la razón líquido-sólido sobre el rendimiento de la extracción, el pH influyó significativamente en la extracción, donde se alcanzaron los mejores resultados a pH de 1. Tuvieron rendimientos de 5,91 % y 4,99 % para pulpa fresca y seca, respectivamente. Las pectinas extraídas de la pulpa fresca y seca presentaron 82,1 % y 87,8 % de ácido galacturónico y masas molares promedio en número de 10 500 g/mol y 11 600 g/mol. Este estudio permite proponer la extracción de pectina una alternativa atractiva para la valorización de este residual y la reducción de su impacto ambiental (Serrat-Díaz *et al.*, 2018).

El cambio climático genera serios problemas ambientales, por ello, dentro del ámbito cafetalero también se buscan soluciones a estas afectaciones. Por lo que, se han evaluado Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) con mayor utilización en los beneficios de café de Costa Rica, de acuerdo con las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), Heredia (2020). Para esto, se utilizó el lagunaje, reactores anaeróbicos y uso de aspersión sobre pasto estrella. Se observó que los campos de aspersión sobre pasto estrella fueron el sistema de menor emisión de GEI, con valores de 4 kg de CO₂ equivalente por 250 Kg de fruta procesada 14 kg CO₂/400 L de fruta), respecto a las lagunas anaerobias con 14 kg CO₂/400L fruta y los reactores anaerobios con 400 kg de CO₂/400 L de fruta, que su proceso se realiza mediante degradación aerobia.

De igual forma, un tratamiento con biofiltros empacados de dos fases, la primera con piedra pómez que contenían biopelículas de *Saccharomyces cerevisiae* en su superficie porosa y la segunda con biocarbón, el proceso se llevó a cabo durante 7 días. El tratamiento con biofiltro que contenía biopelículas con tiempo de maduración de 48 h y biocarbón como empaque, mostró 100 % de remoción de la carga orgánica inicial. Sugieren someter el agua residual a un tratamiento previo de electrocoagulación y posteriormente al proceso de biofiltración (Hernández, 2021), trabajo similar fue realizado por (Ferrerira *et al.*, 2020).

En Colombia, utilizaron microalgas para depurar las aguas residuales. Las microalgas *Parachlorella kessreli* y *Desodermus aratus* fueron eficientes en la depuración de aguas residuales provenientes del lavado del café. En 15 días las algas disminuyen el contenido de sustancias nitrogenadas y fosfatos en cifras superiores a 50 %, lo cual muestra su potencial para los sistemas rurales de tratamiento del beneficiado húmedo de café (Rojas *et al.*, 2021).

Las aguas residuales generadas en el proceso de beneficio del café son biodegradables, con altos contenidos de materia orgánica. Los procesos fisicoquímicos para el tratamiento primario de aguas residuales del café son una opción viable. En el CENICAFÉ se evaluaron procesos físico-químicos de neutralización y precipitación, mediante la adición de cales como una alternativa para el tratamiento primario de las aguas residuales del café, los resultados positivos en relación con la remoción los mostró la cal apagada (hidróxido de calcio), con una dosis óptima de 4,63 mg/L, que obtuvo los menores valores de absorbancia (0,588 a 0,613) y turbidez (734 a 773), así como valores de pH de 7,89 a 8,09. Con la cal se alcanza una remoción de la DQO del 50 % y de los SST (Sólidos Suspendidos Totales) de 75 % (Quintero-Yepes and Rodríguez-Valencia, 2022).

Se presenta en la (Figura 3) un resumen de lo métodos más utilizados para el tratamiento de efluentes del beneficiado húmedo del café. Existen tecnologías para el tratamiento de los efluentes líquidos, y para el tratamiento de los efluentes sólidos.

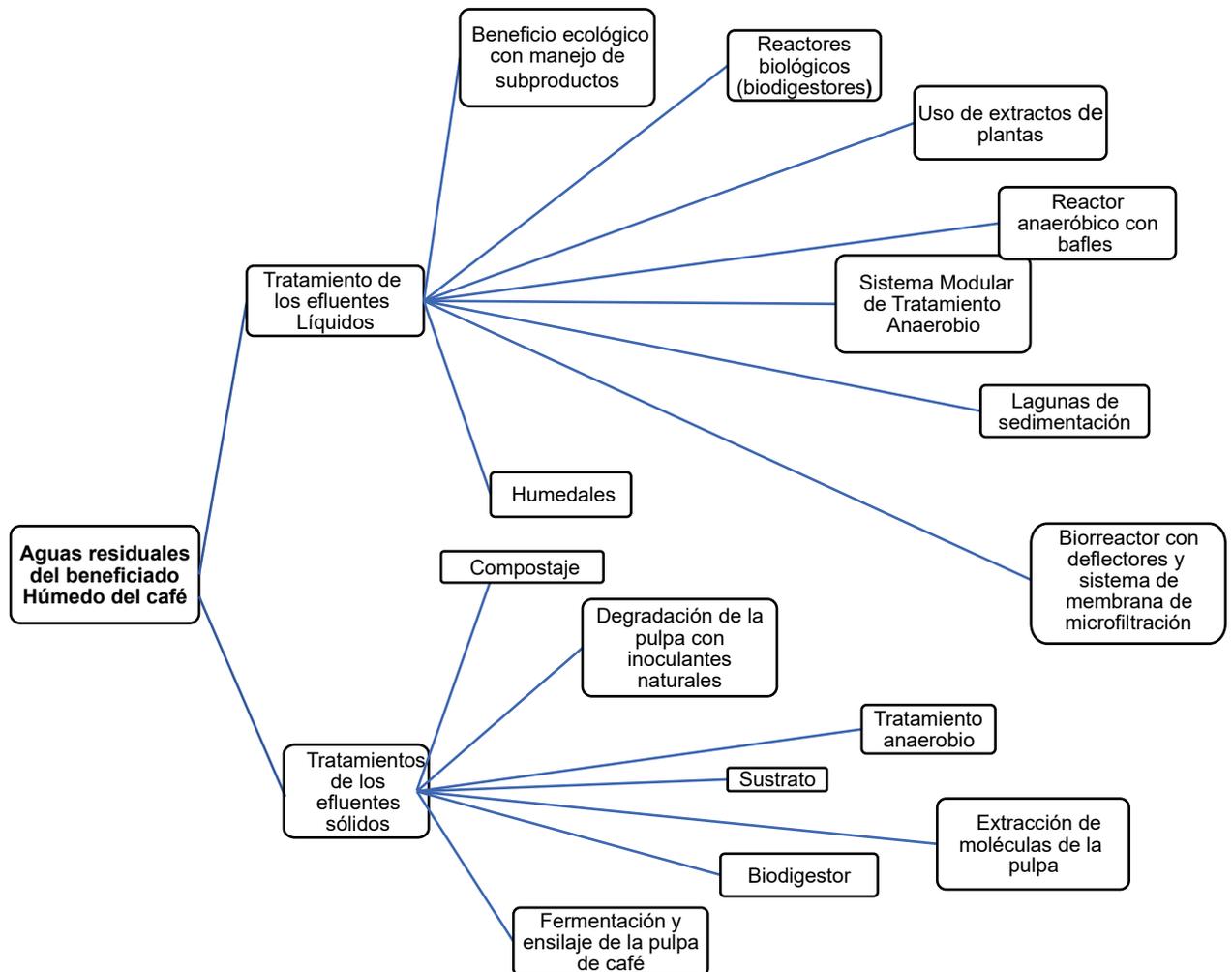


Figura 3. Métodos de tratamiento de aguas residuales del café. Elaboración propia Huatusco, Veracruz, México 2023.

CONCLUSIONES

Las ecotecnologías como los biodigestores, humedales, biofiltros y otros sistemas biotecnológicos se presentan como opciones para manejar los efluentes tanto sólidos como líquidos generados en el beneficiado de café.

El análisis mostró mayores tecnologías para tratar efluentes líquidos, los cuales mostraron una eficiencia de 80 % en la remoción de los diferentes contaminantes, mientras que en los efluentes sólidos como la pulpa alcanzaron eficiencia de 50 % en la remoción de compuestos.

En el parámetro de la DBO_5 la tecnología que mejor resultado mostró en cuanto a la remoción fue la laguna anaerobia con 86 % y la de menor fue el Reactor de Lecho con Fluido Presurizado con 59 %.

De igual forma, en la remoción de la DQO los mejores resultados los mostró el Proceso Anaerobio de

Separación por Membranas con 92 % y el Reactor de Biopelícula Inmovilizada con apenas un 49 %.

En relación con viabilidad enfocada a establecer tecnologías para la disminución del uso de agua o tratamiento de efluentes, los beneficios ecológicos y los sistemas modulares de tratamiento anaerobio resultan más costosos económicamente que el uso de otros métodos como lo es el compostaje, ensilaje, humedales o biodigestores.

La digestión anaerobia con reactores para el tratamiento de aguas residuales del beneficiado húmedo del café es la opción tecnológica con resultados positivos. A pesar de que estos prototipos muestran buenos resultados, removiendo la DBO_5 , SST, contenido de N y P, turbidez entre otros parámetros; la mayoría son escala de laboratorio o planta piloto.

En Colombia y México se han desarrollado tecnologías ecológicas centradas en la mecanización

de las operaciones para reducir el uso de agua, que permite un ahorro de agua de 10 L/kg de café pergamino seco, comparado con los 40 L usados en el beneficiado húmedo tradicional.

Funding. No support was received for this study.

Conflict of interest statement. The authors declare that there is not conflict of interest.

Compliance with ethical standards. Do not apply.

Data availability. Data is available upon reasonable request with the corresponding author (ser89nangio@gmail.com).

Author contribution statement (CRediT). S. Sánchez-Hernández: fieldwork, writing, analysis of the information, and editing. J.G. Partida-Sedas: methodology writing, review, and editing. J.G. Cruz-Castillo: planning, supervision, writing, review, and editing. E. Escamilla-Prado: review and edition. E. Valdés-Velarde: review and edition.

REFERENCES

- Acero-Reyes, N.L. and Duque-Buitrago, L.F., 2016. Fermentación de café por vía semi-húmeda para la obtención de café de especialidad "Honey", *Vitae*, 23, pp. 656-660. <https://search.proquest.com/openview/59659171e5fd46fb5902e52652843792/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1806352>
- Algeciras, N., Barrera, R., Martínez, M.M., Pedroza, A., Reyes, C., Rodríguez, E. and Rojas, S., 2002. Desarrollo de un sistema de biofiltración con bacterias proteolíticas y amilolíticas inmovilizadas utilizando subproductos del beneficio de café. *Revista de la Sociedad Química de México*, 46(3), pp. 271-276. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_serial&pid=05837693&lng=es&nrm=iso
- Arango, Restrepo, M. 1999. El beneficio ecológico del café en Colombia. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 42, pp. 117-143. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6583540>
- Alvarenga, A.A., Quezada, Viay, M.Y., Fernández, Ríos, D., Moreno, Martínez, E. and Flores, Olivas, A., 2014. La Incidencia y distribución de hongos filamentosos durante el proceso de beneficio húmedo del café. *Steviana*, 6, pp.13-19. <https://revistascientificas.una.py/ojs/index.php/stevia/issue/view/137>
- Álvarez, J., Smeltekop, H., Cuba, N. and Loza-Murguía, M., 2011. Evaluation of a treatment system wastewater prebeneficiado of coffee (*Coffea arabica*) implemented in the community Carmen Pampa province of Nort Yungas of La Paz Department. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 2(1), pp. 34-42. <http://ucbconocimiento.cba.ucb.edu.bo/index.php/JSARS>.
- Balma, M.C., 2018. Comparaciones de las emisiones de gases efecto invernadero para dos tecnologías de tratamiento de residuos de pulpa de café en Costa Rica. [Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional, Facultad de las Ciencias de la Tierra y el Mar. Heredia. <https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/14192/Proyecto%20de%20graduaci%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Balseca, de la Cadena, D. and Cabrera, Bastidas., J.A., 2001. Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café. Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente [Tesis de Licenciatura. Escuela Agrícola Panamericana] Zamorano. Honduras. Repositorio de la Universidad el Zamorano. <https://biblioteca.zamorano.edu/>
- Boizán, M.F., Pérez, S.R., Savón, R.B., Brown, A.T. and Rey, Y.T., 2005. Evaluación de la biodegradabilidad anaerobia de los residuales líquidos de una despulpadora ecológica. *Revista Cubana de Química*, 17(1), 200-205. <https://www.redalyc.org/pdf/4435/443543685082.pdf>
- Cadena, Gómez. G. 2001. La Sostenibilidad de la Caficultura en Colombia. *Ensayos de Economía Cafetera*, 1(17), pp. 147-151. <https://federaciondecafeteros.org/app/uploads/2020/06/Revista-Ensayos-de-Econom%C3%ADaCafetera-Nos.-16-17.pdf>
- Café, Campo y Ambiente. 2012. (jueves 16 de agosto de 2012). Beneficio ecológico de café. <http://cafecampoambiente.blogspot.mx/2012/08/beneficio-ecologico-decafe.html>
- Castillo Jara, W. 2022. Tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria del café. Revisión sistemática. [Tesis de Ingeniería. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental] Lima,

- Perú, pp. 33-64.
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/92480>
- Castillo, M., Bailly, H., Violle, P., Pommares, P. and Sallée, B., 1993. Tratamiento de aguas residuales de café en la cuenca de Coatepec, Veracruz, México. *Turrialba* 2(43), pp. 143-150.
https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=398420
- Chanakya, H.N. and De Alwis, A.A.P., 2004. Environmental issues and management in primary coffee processing. *Process Safety and Environmental Protection*, 82(4), pp. 291-300.
<https://doi.org/10.1205/095758204323162319>
- Del Real Olvera, J. and Islas, Gutiérrez, J., 2010. Biodegradación anaerobia de las aguas generadas en el despulpado del café. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 12(2), pp. 230-239.
<https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote>
- Duguma, H. and Chewaka, M., 2019. Review on coffee (*Coffea arabica* L.) wet processing more focus in Ethiopia. *Acta Científica Agriculture*, 3(11), pp. 11-15.
<https://doi.org/10.31080/ASAG.2019.03.0676>
- Espinoza Alejo, G. and Sedano Guillermo, E., 2007. Evaluación de la biodegradación anaerobia de la materia orgánica de las aguas residuales de la planta de procesamiento del café de la cooperativa La Florida de Chanchamayo. [Tesis de Ingeniería. Universidad Nacional del Centro de Perú].
<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/3693>
- Fernández, L. and Springer, M., 2008. El efecto del beneficiado del café sobre los insectos acuáticos en tres ríos del Valle Central (Alajuela) de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 56(4), pp. 237-256.
<https://doi.org/10.15517/rbt.v56i4.27230>
- Fernández, Pinzón, C.A. 2017. Implementación de biodigestores para el mejoramiento de la calidad de vida de las familias campesinas. *Revista de Investigaciones Agroempresariales*, 3, pp. 88-96.
<https://doi.org/10.23850/25004468.1438>
- Fernández Urpí, M. 1977. Evaluación de los sistemas para las aguas residuales del beneficiado de café. San José, Costa Rica. Cléves y Faith.
<https://catalogosiidca.csuca.org/Search/Results?lookfor=Evaluaci%C3%B3n+de+los+sistemas+para+tratar+las+aguas+residuales+del+beneficiado+de+Caf%C3%A9+%2F&type=AllFields>
- Ferrerira Pires, J., Campos Viana, D., Alves Braga Jr, R., Freitas Schwan, R. and Ferreira Silva, C., 2020. Protocol to select efficient microorganisms to treat coffee wastewater. *Journal of Environmental Management*, 278, pp. 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111541>
- Figueroa Hernández, E., Pérez, S.F. and Godínez, M.L., 2015. Importancia de la comercialización del café en México, en: Ciencias Sociales: Economía y Humanidades. Handbook T-I, F. Pérez, E. Figueroa, L. Godínez (eds.). 20pp.
<http://hdl.handle.net/20.500.11799/41277>
- Fluker Puscan, R.S., Meléndez Mori, J.B., Leiva Tafur, D., Chávez Ortiz, J. and Rascón, J., 2018. Impacto del vertimiento de aguas mieles sobre la quebrada El Mito en el caserío El Mito, Distrito San Nicolás (Rodríguez de Mendoza–Amazonas). *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 2(1), pp. 57-64.
<http://doi.org/10.5281/zenodo.3946741>
- Fuilen Acarley, F. and Lawrence Quipuzco, U., 2020. Producción de metano mediante digestión anaerobia de aguamiel, subproducto del beneficio húmedo del café. *Agroindustrial Science*, 10(1), pp. 7-16
<http://dx.doi.org/10.17268/agroind.sci.2020.01.01>
- Fuentes Jiménez, N., 2019. Evaluación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en beneficios de café en términos de sus emisiones de gases de efecto invernadero. [Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Costa Rica].
<https://repositorio.una.ac.cr/handle/11056/18152>
- Garay Román, J. and Rivero Méndez, J., 2014. Biosistema para purificar aguas residuales del beneficio húmedo de café, distrito La Coipa, departamento de Cajamarca. *Manglar*, 11(1), pp. 43-50.
<http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2014.006>

- García, S., Herrera, M., Behling, E., Gutiérrez, E., Chacín, E. and Fernández, N., 1995. Inhibidor natural de las aguas residuales de procesamiento de café en el tratamiento anaerobio. *Ciencia*, 3(3), pp. 241-246. <https://elibro.net/ereader/unanmanagua/16352>
- Guardia-Puebla, Y., Jiménez-Hernández, J., Pacheco-Gamboa, R.F., Rodríguez-Pérez, S. and Sánchez-Girón, V., 2016. Optimización múltiple de respuestas en la codigestión anaerobia de aguas residuales de café con estiércoles. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3), pp. 54-64. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.32441.16483>
- Heredia Araya, C.H.R., 2020. Evaluación de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en sistemas de tratamiento de las aguas residuales del Beneficiado de café. *Boletín Promecafé*, 163, pp. 3-6. <https://promecafe.net/wp-content/uploads/2021/03/Bolet%C3%ADn-163.pdf>
- Hernández, I., Santiago, C., Limón, R., López, V. and Aguilar, F., 2021. Tratamiento de agua residual de beneficio de café mediante un biofiltro de bajo costo. *Revista Ingeniantes*, año 8, 1(1), pp. 60-66. <https://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes8no1v01/8%20Biofitro%20cafe.pdf>
- Hue, N.V., Bittenbender, H.C. and Ortiz-Escobar, M.E., 2006. Managing coffee processing water in Hawaii. *Journal Hawaiian Pacific Agriculture*, 13, pp. 15-21. <https://hilo.hawaii.edu/panr/writing.php?id=171>
- López, Pantoja, C.F.L., Gutiérrez, P.A.R., Macías, L.O.M., Quinayás, E.S.T., Ome, R., Arcos, C.A. and Vega, G.A., 2015. Estudio de algunas variables en el proceso de fermentación de café y su relación con la calidad de taza en el sur de Colombia. *Agroecología: Ciencia y Tecnología*, 3(1), pp. 22-33. <https://hdl.handle.net/11404/6735>
- Macassi Allasi, G.C. 2017. Comportamiento del sistema de nanoburbujeo en el tratamiento para reducir los niveles de contaminación de aguas residuales domésticas de la provincia de Concepción. [Tesis de Ingeniería. Universidad Nacional del Centro de Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/3777>
- Matuk-Velasco, V., Puerta-Quintero, G.I. and Rodríguez-Valencia, N., 1998. Impacto biológico de los efluentes del beneficio húmedo del café. *Cenicafé*, 48(4), pp. 234-252. <http://hdl.handle.net/10778/67>
- Mejía Zuluaga, S.Z., 2018. Manejo de aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café en la zona cafetera central de Colombia. [Tesis de Licenciatura. Escuela de Ciencias Agrícolas y Pecuarias y del Medio Ambiente. Medellín, Colombia]. pp. 25-29. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/21180/42683065.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mera-Alegria, C.F., Gutiérrez-Salamanca, M.L., Montes-Rojas, C. and Paz-Concha, J.P., 2016. Efecto de la *moringa oleifera* L en el tratamiento de aguas residuales en el Cauca, Colombia. *Bioteología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), pp. 100-109. <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/bioteologia/article/view/483>
- Molina Gómez, L.V. 1999. Gastos defensivos por beneficiado de café en zona Pacífica central de Nicaragua. [Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba]. Costa Rica. Pp.112. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9909>
- Monroy, H.O., Famá Bottini, G., Meraz Rodríguez, M., López Montoya, L., Macarie, H., 1998. Digestión anaerobia en México: "Estado de la Tecnología". *Ingeniería y Ciencias Ambientales*, 39, pp. 4-12. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010017415>
- Montes Peña, A.G. and Pocasangre Collazos, A., 2019. Evaluación de un reactor anaeróbico con baffles (ABR) para el tratamiento de las aguas residuales de un beneficio húmedo de café. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 14(1), pp. 61-69. <https://revistas.usac.edu.gt/index.php/asa/article/view/1172>
- Morales, L.H.N., Gómez, C.A.R., Tascón, C.E.O. and Mejía, F.Á., 2003. Manejo de las mieles generadas en la tecnología Becolsub para eliminar el impacto ambiental ocasionado por los lixiviados de café. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 56(2), 1969-1981.

- <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/24605/25188>
- Murthy, Pushpa. S. and Madhava Naidu, M., 2012. Sustainable management of coffee industry by-products and value addition A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, pp. 45–58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005>
- Noyola Robles, A. 1989. Los Procesos Anaerobios en el tratamiento de Aguas Residuales. Primer Congreso Internacional Sobre Biotecnología Aplicada a la Agroindustria Cafetalera. Xalapa. México. pp. 93-110. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/carton01/34376.pdf
- Oliveros-Tascón, C.E. and Sanz-Urbe, J.R., 2011. Ingeniería y café en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 33, pp. 99-114. <https://revistas.uniandes.edu.co/doi/pdf/10.16924/revinge.33.10>
- Oliveros, C., Sanz, J., Ramírez, C. and Tibaduiza C., 2014. ECOMILL: Tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café. Centro Nacional de Investigaciones de Café (*Cenicafé*). *Avances Técnicos*, 432, p.8. <http://hdl.handle.net/10778/500>
- Paredes, C.A.M., Mendoza, B.F.R. and Moreira, S.E.G., 2018. Digestión anaerobia de las aguas residuales de la industria del café instantáneo. *Revista ESPAMCIENCIA*, 9(1), pp. 23-31. http://190.15.136.171/index.php/Revista_ESPAMCIENCIA/article/view/152.
- Parra Huertas, R.A. 2015. Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción limpia*, 10(2), pp. 142-159. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5746937>
- Partida Sedas, S. 2018. Valoración de la sustentabilidad en la microcuenca del río Aguacapa en el municipio de Huatusco, Veracruz. [Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados]. Veracruz México. Pp. 111-115. http://193.122.196.39:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/3022/Partida_Sedas_S_DC_Agroecosistemas_Tr_opicales_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Peñuela-Martínez, A.E., Tibaduiza-Vianchá, C.A., Morcillo, C.A. and Restrepo-Rivera, M.V., 2021. Degradación enzimática de mucílago de *Coffea arabica* L., para la producción de café suave lavado. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19(2), pp. 170-183. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1848>
- Prezotti, L.C., da Rocha, A.C., Soares, S.F., Guarçoni, A. and Morelli, A.P., 2008. Caracterização de águas residuárias da despolpa de frutos de café e de solos receptores no estado do Espírito Santo. In Embrapa Café Artigo em anais de congresso (ALICE). In: Congresso Brasileiro de Pesquisa Cafeeiras, 34. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/5106>
- Puerta-Quintero, G.I., 2008. Riesgos para la calidad por la comercialización de café pergamino húmedo. *Cenicafé*. 371, pp. 1-4. http://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivos_mos_cafe/comercializacion/cultivemos_cafe_cafe_pergamino_humedo
- Puerta, Quintero, G.I., 2013. Fundamentos del proceso de fermentación en el beneficio del café. *Centro Nacional de Investigaciones de Café. Avances técnicos*. (*Cenicafé*). 414, 12p. https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/avances_tecnicos/article/view/163.
- Quintero-Yepes, L. and Rodríguez-Valencia, N., 2019. Extractos vegetales para el tratamiento de las aguas residuales del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, pp. 1-8. https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/avances_tecnicos/article/view/137
- Quintero-Yepes, L. and Rodríguez-Valencia, N., 2022. Uso de cales para el tratamiento primario de las aguas residuales del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, pp. 1-8. <https://doi.org/10.38141/10779/0537>
- Rigueira, R.J.D.A., Lacerda Filho, A.F.D. and Matos, A.T., 2009. Alteração nas características físicas, químicas e bioquímicas da água no processo de lavagem, despolpa e desmucilagem de frutos do cafeeiro. *Engenharia na Agricultura, Viçosa - MG*, 8(2), pp. 131-139. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/1961>

- Rodríguez, S., Pérez, R.M. and Fernández, M., 2000. Estudio de la biodegradabilidad anaerobia de las aguas residuales del beneficio húmedo del café. *Interciencia*, 25(8), pp. 386-390. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33905005.pdf>
- Rodríguez Valencia, N., Sanz Uribe, J.R., Oliveros Tascón, C.E. and Ramírez Gómez, C.A., 2015. Beneficio del café en Colombia. Prácticas y estrategias para el ahorro, uso eficiente del agua y el control de la contaminación hídrica en el proceso de beneficio húmedo del café. *Cenicafé*, 37. <http://hdl.handle.net/10778/659>
- Rojas, E.M., Cruz, S.M.O., Barrios, J.R., Pino, M.E.M., Rivas, D.A.V. and Quintana, S.G.C., 2020. Sistemas de tratamiento de aguas mieles de café en la Provincia de Rodríguez de Mendoza, Perú. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 7(1), 84-96.
- Rojas, E.M., Burga, R.H., Quintana, S.C., Silva, E.M.C. and Santillan, T.S., 2021. Sistemas de tratamiento y reutilización de aguas mieles de café: Un enfoque de desarrollo sustentable para los caficultores de países en desarrollo. *Revista Científica Pakamuros*, 9(2), pp. 97-110. <http://revistas.unj.edu.pe/index.php/pakamuros/article/view/185/223>
- Rossmann, M., Teixeira, Matos, A., Carneiro, Abreu, E., Fonseca, Silva, F. and Carraro, Borges, A., 2013. Effect of influent aeration on removal of organic matter from coffee processing wastewater in constructed wetlands. *Journal of Environmental Management*, 128, pp. 912-919. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.045>
- Ruiz-Nájera, R.E., Medina-Meléndez, J.A., Carmona-de la Torre J., Rincón-Enríquez, G., Sánchez-Yáñez, J.M. and Raj-Aryal, D., 2021. Efecto de la disposición de los residuos resultantes del beneficiado húmedo del café sobre las características físicas y química del agua de corriente natural. *Terra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.884>
- Salas, L.A.S., Mateus, R.Y.Q., Rojas, L.F.C. and Serrano, H.A.V., 2013. Diagnóstico del tratamiento de aguas residuales mediante los sistemas Cenicafé y Majavita del beneficio ecológico del café con módulo Becolsub en la Hacienda Majavita. *Innovando en la U*, 5, pp. 33-48. <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/innovando/article/view/3846>
- Salguero-Zeceña, E.R.T. 1996. Valoración económica de la contaminación de las fuentes de agua por los desechos de la industria del beneficiado húmedo del café: el uso del concepto de costo defensivo. [Tesis de Maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza] CATIE]. Turrialba, Costa Rica. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/10472>
- Sánchez, G., Mercado, G. and Marini, H., 2005. Transferencia a Productores de Estrategias y Tecnologías Limpias para el Manejo Sostenible del Agua en Agroindustrias Tropicales pp. 4-9. https://cursos.clavjero.edu.mx/cursos/124_e cds/modulo7/tareas/documentos/Manejo_Sustentable_del_Agua_en_Agroindustrias.pdf
- Selmar, D., Bitof, G. and Knopp, S.E., 2008. The storage of green coffee (*Coffea arabica*): decrease of viability and changes of potential aroma precursors. *Annals of Botany*, 101, pp. 31-38. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm277>
- Serrat-Díaz, M., de la Fé-Isaac, A.D., de la Fé-Isaac, J.A. and Montero-Cabrera, C., 2018. Extracción y caracterización de pectina de pulpa de café de la variedad Robusta. *Revista Cubana de Química*, 30(3), pp. 522-538. <https://cubanaquimica.uo.edu.cu/index.php/cq/article/view/4182>
- Sheng, Tai, E., Chuan, Hsieh, P. and Chewn, Sheu, S., 2014. Effect of polygalacturonase and feruloyl esterase from *Aspergillus tubingensis* on demucilage and quality of coffee beans. *Process Biochemistry*, 49(8), pp. 1274-1280. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2014.05.001>
- Siu, Y., Mejia, G., Mejia-Saavedra, J., Pohlen, J. and Sokolov, M., 2007. Heavy metals in wet method coffee processing wastewater in Soconusco, Chiapas, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 78(5), pp. 400-404. <https://doi.org/10.1007/s00128-007-9094-x>
- Stewart Pineda, V.M., 2021. Calidad del agua residual producida en las diferentes etapas del proceso de beneficiado de café húmedo. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 16(2), pp. 19-26.

- <https://revistas.usac.edu.gt/index.php/asa/article/view/1324>
- Tacias-Pascacio, V.G., Cruz-Salomón, A., Castañón-González, J.H. and Torrestiana-Sánchez, B., 2019. Tratamiento de aguas residuales del beneficio húmedo del café en un biorreactor anaeróbico con deflectores acoplado a un sistema de microfiltración. *Ingeniería Ambiental Actual*, 6(1), pp. 45-54. <https://doi.org/10.37787/pakamurosunj.v9i2.185>
- Texeira de Matos., A. Fia, R., Bachetti, Pinto, A., Rodrigues, Gomes Filho R. and Passos, Rezende, A.A., 2000. Qualidade das águas superficial e subterranea em área alagada usada para tratamento de águas residuárias da lavagem e despolpa de frutos de cafeeiro. *Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil*. <http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/spcbanais/simposio1/Irriga50.pdf>
- Torres-Valenzuela, L.S., Sanín-Villarrea, A., Arango-Ramírez, A. and Serna-Jiménez, J.A., 2019. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café, *Revista Ion*, 32(2), pp. 59-66. <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v32n2-2019006>
- Vincent J.C. 1987. Green coffee processing. In: Clarke R.J., Macrae R. (eds) *Coffee*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3417-7_1
- Zambrano-Franco, D.A. and Isaza-Hinestroza, J.D., 1998. Demanda química de oxígeno y nitrógeno total, de los subproductos del proceso tradicional de beneficio húmedo del café. *Cenicafé*, 49(4), pp. 279-289. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc049\(04\)279-289.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc049(04)279-289.pdf)
- Zambrano-Franco D.A., Rodríguez-Valencia, N., López-Posada, U., Orozco, P.A. and Zambrano-Giraldo A., 2006. Tratamiento anaerobio de las aguas mieles del café. *Manizalez Cenicafe*, 29p. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/584>
- Zambrano-Franco, D.A., Rodríguez, Valencia N., Orozco, Restrepo, P.A. and López Posada, U., 2015. Evaluación de un reactor metanogénico tipo filtro anaeróbico de flujo ascendente para tratar aguas mieles del café. *Revista Cenicafé*, 66(1), pp. 32-45. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/607/1/arc066%2801%2932-45.pdf>
- Zuluaga-Vasco, J. and Zambrano-Franco, D., 1993. Manejo del agua en el proceso de beneficio húmedo del café para el control de la contaminación. *Avances Técnicos. Cenicafé*, 187, pp. 1-4. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4254>
- Zúñiga, J.C.B., Lizcano, P.T. and Amaya, A.O., 2020. Sistema de tratamiento para aguas mieles producto del beneficio húmedo del café con moringa *Oleifera lam* como bioadsorbente para el pequeño caficultor colombiano. *Ingeniería y Región*, 24, pp- 105-114. <https://doi.org/10.25054/22161325.1849>