



Aproximación a un estado del arte de las tecnologías utilizadas en el tratamiento de aguas residuales del beneficio del café en Colombia y su impacto ambiental.

Diana Marcela Quintero Muñoz

Sergio Alonso Cuartas Mora

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de: Especialización en gestión ambiental

Asesor(a):

Profesor Julio César Saldarriaga Molina, Ing. Sanitario, MsC y Doctor en Ingeniería

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Especialización en Gestión Ambiental
Medellín
2022

APROXIMACIÓN A UN ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL BENEFICIO DEL CAFÉ EN COLOMBIA Y SU IMPACTO AMBIENTAL

Cita	(Cuartas Mora & Quintero Muñoz, 2022)
Referencia Estilo APA 7 (2020)	Cuartas Mora S. A., & Quintero Muñoz D. M. (2022). <i>Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de: Especialización en gestión ambiental</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Especialización en Gestión Ambiental, Cohorte XIV.



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Julio César Saldarriaga Molina

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de Contenido

Resumen	7
Abstract	8
Introducción	9
1. Planteamiento del problema.....	10
2. Marco teórico	11
2.1. Caficultura en Colombia y el mundo, en el proceso de beneficio y lavado de café	11
3. Objetivos	14
3.1 Objetivo general	14
3.2. Objetivos específicos.....	14
4. Metodología	15
4.1. Establecimiento de la información	15
4.2. Análisis de contenido	16
5. Resultados y Análisis	16
5.1. Análisis de los datos bibliográficos.....	16
5.2. Tipos de metodologías utilizadas para el lavado de café	20
5.3. Capacidad de procesamiento y consumo de agua de metodologías utilizadas para el lavado de café.....	25
5.4. Aguas residuales del proceso de lavado de café	26
5.5. Algunas alternativas para el tratamiento de aguas residuales del café (ARL).....	29
5.5.1. Cales:	29
5.5.2. Sistemas modulares de tratamiento (SMTA):	30
5.5.3. Extracto de semilla de moringa Oleifera (MOSE):	31
5.5.4. Semilla de aguacate carbono (ASC):.....	31
5.5.5. Microorganismos eficientes:.....	32
5.6. Adopción de tecnologías en fincas cafeteras para el tratamiento de las aguas residuales de lavado de café (ARL)	32
6. Conclusiones	36
Referencias	37

Lista de tablas

Tabla 1. Ventajas y desventajas de las tecnologías utilizadas para el beneficio de café y para el tratamiento de aguas residuales del lavado de café.....33

Lista de figuras

Figura 1.Composición de un grano de café.....	13
Figura 2.Participación en investigaciones por continentes y países (Fuente: Elaboración propia)	18
Figura 3.Análisis bibliométrico para la coautoría y colaboraciones diferentes países.....	19
Figura 4.Distribución histórica de las publicaciones desarrolladas entre el año 2000 y 2022.....	19
Figura 5. a)Esquema de funcionamiento tecnología Belcosub	21
Figura 5. b) Esquema de funcionamiento tecnología Belcosub	22
Figura 6.Tecnología Ecomill®.....	23
Figura 7.Lavador de flujo horizontal para café con degradación previa del mucílago	24
Figura 8.Esquema de un Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA), para el tratamiento de aguas residuales del lavado de café.....	30

Siglas, acrónimos y abreviaturas

APA	American Psychological Association
Cms.	Centímetros
ERIC	Education Resources Information Center
Esp.	Especialista
MP	Magistrado Ponente
MSc	Magister Scientiae
Párr.	Párrafo
PhD	Philosophiae Doctor
PBQ-SF	Personality Belief Questionnaire Short Form
PostDoc	PostDoctor
UdeA	Universidad de Antioquia

Resumen

Colombia es el mayor productor mundial de café arábigo suave lavado, en el que para el año 2021, se registró una producción de 12,6 millones de sacos de 60 kilos de café (Federación Nacional de Cafeteros, 2022) aportando cerca del 1% del PIB nacional (Bloomberg Línea, 2021), por lo anterior, se convierte en un cultivo de gran importancia para los productores agropecuarios de nuestro país. Las exigencias actuales del mercado, incluyen la producción bajo modelos sostenibles que aseguren el cuidado del medio ambiente, por lo anterior, es importante analizar las tecnologías disponibles para optimizar el consumo de agua durante el proceso de lavado y realizar el tratamiento a las aguas residuales resultantes. En este trabajo se analizaron los contenidos y los alcances que tienen los documentos o la información secundaria y demás libros específicos, así como sus similitudes y diferencias de acuerdo a las tecnologías que se han desarrollado y usado para el tratamiento de aguas residuales del beneficio de café. La búsqueda de información se llevó a cabo en las bases de datos de publicaciones científicas disponibles como SciELO, REDALYC, SCIENCE DIRECT además de consultar los trabajos y publicaciones desarrollados por CENICAFÉ. Se encontraron un total de 513 publicaciones a nivel mundial y se destacaron la participación de países como Asia con el 40% de las investigaciones, seguido con América con el 37%, Europa con el 17% y África con el 6%, Oceanía no contó con investigaciones dentro de la ventana de estudio u observación.

Palabras clave: aguas residuales, beneficio café, impacto ambiental, tecnologías de lavado.

Abstract

Colombia is the world's largest producer of Arabica coffee, in 2021, a production of 12.6 million 60-kilo bags of coffee was increased (Federación Nacional de Cafeteros, 2022) contributing about 1% of the National GDP (Bloomberg Línea, 2021), therefore, becomes a crop of great importance for agricultural producers in our country. The current demands of the market include production under sustainable models that ensure care for the environment, therefore, it is important to analyze the available technologies to optimize water consumption during the washing process and treat the remaining wastewater. In this work, the contents and scope of the documents or secondary information and other specific books were analyzed, as well as their similarities and differences according to the technologies that have been developed and used for the treatment of wastewater from the coffee. The search for information was carried out in the databases of available scientific publications such as SciELO, REDALYC, SCIENCE DIRECT, in addition to consulting the works and publications developed by CENICAFÉ. A total of 513 publications worldwide were found and the participation of countries such as Asia stood out with 40% of the investigations, followed by America with 37%, Europe with 17% and Africa with 6%, Oceania did not count with investigations within the study or observation window.

Key words: coffee processing, environmental impact, washing technologies, wastewater.

Introducción

El café en Colombia ha logrado un nivel de producción que lo ha posicionado como un producto bandera que fortaleció la economía, generando ingresos a las familias cafeteras de pequeños y medianos productores. Es sabido que la mayoría de los productores en Colombia son cafeteros que tienen predios con un área inferior a las 3 has, característica que ocasiona que el proceso en la producción del grano se lleve a cabo de manera artesanal, desarrollándose sin las medidas necesarias para la protección del recurso hídrico y provocando la contaminación del mismo (Rodríguez, 2015).

Durante este proceso no solamente se generan impactos negativos en el ambiente como la afectación a fuentes hídricas, suelos, biodiversidad y ecosistemas, así como también se ve afectado el desarrollo de la sociedad, ya que al no conservar los recursos y dar un manejo inadecuado, el ser humano no podría satisfacer sus necesidades.

Uno de los recursos que más se ve afectado durante el proceso de beneficio de café mencionado anteriormente es el hídrico, pues el agua residual que se genera es vertida sobre fuentes de agua, afectando no solo la disponibilidad para poder usarla nuevamente, además de afectar la vida acuática presente en esta (Rodríguez et al., 2013)

Por lo anterior, sí se requiere del agua para beneficiar el fruto de café y transformarlo en café pergamino seco, el uso del recurso agua, se debe asumir con responsabilidad ambiental y para lograrlo, es importante adoptar tecnologías que enmarquen el producto dentro de un sistema productivo amigable con la naturaleza.

1. Planteamiento del problema

Colombia es el mayor productor mundial de café arábigo suave lavado, en el que para el año 2021, se registró una producción de 12,6 millones de sacos de 60 kilos de café (Federación Nacional de Cafeteros, 2022) aportando cerca del 1% del PIB nacional (Bloomberg Línea, 2021), por lo anterior, se convierte en un cultivo de gran importancia para los productores agropecuarios de nuestro país.

El fruto maduro del café (café cereza), una vez cosechado, debe ser transformado rápidamente a café pergamino seco C.P.S, con el propósito de conservar su calidad ya que es un fruto perecedero. El proceso utilizado para transformarlo se denomina beneficio húmedo, porque se utiliza agua para el lavado de la semilla (Rodríguez, 2015).

Para el año 2021, la producción de café pergamino seco C.P.S en nuestro país alcanzó los 756 millones de kilogramos (Swissinfo, 2022), para la transformación del fruto de café maduro en café pergamino seco (conocido como C.P.S por sus siglas), que se realiza mediante un proceso de separación de la almendra de la pulpa y lavado conocido como beneficio de café. Mediante el beneficio tradicional, el proceso conlleva un alto consumo de agua (cerca a los 40 litros para procesar un 1 kg de C.P.S), además de las aguas residuales las cuales presentan altos contenidos de materia orgánica y bajos valores de pH (Quintero, 2022), disminuyendo la biodiversidad en las fuentes de agua por la disponibilidad de oxígeno.

Las exigencias actuales del mercado, incluyen la producción bajo modelos sostenibles que aseguren el cuidado del medio ambiente, por lo anterior, es importante analizar las

tecnologías disponibles para optimizar el consumo de agua durante el proceso de lavado y realizar el tratamiento a las aguas residuales resultantes.

En Colombia el proceso de beneficio se realiza de tres maneras: a) beneficio convencional del café, b) beneficio ecológico del café y c) beneficio ecológico del café sin vertimientos. El beneficio convencional es el de mayor utilización en nuestro país y el que más impacto ambiental genera, ya que se requieren hasta 40 litros de agua para la obtención de 1 kilogramo de café pergamino seco (C.P.S.), el beneficio ecológico y el beneficio ecológico sin vertimientos se conocen como Becolsub y Ecomill® y fueron tecnologías desarrolladas en Colombia por CENICAFÉ, conocido como El Centro Nacional de Investigaciones del Café, (Oliveros, 2019), que de acuerdo con los expertos, los beneficios secos disminuyen el impacto ambiental del proceso de beneficio y satisfacen las necesidades actuales del mercado de productos con valor agregado que contribuyan al cuidado medio ambiental y garantizan la sostenibilidad del sistema productivo (Gómez, 2019).

2. Marco teórico

2.1. Caficultura en Colombia y el mundo, en el proceso de beneficio y lavado de café

Para la obtención de productos o servicios se emplea el concepto de huella hídrica el cual según Hoekstra citado por Leal, en 2021, este un indicador utilizado para determinar la cantidad de agua utilizada y contaminada de manera directa e indirecta para la producción de un producto o servicio.

Para el caso del café, la huella hídrica presenta una relación inversamente proporcional frente a la productividad del cultivo, es así como Vietnam, país que cuenta con la mayor

productividad del cultivo a nivel mundial es quien presenta una menor huella hídrica en el ranking de los países con mayor producción de café.

En el otro extremo se encuentra Indonesia, país que cuenta con la mayor huella hídrica a nivel mundial en los cultivos de café, debido a la baja productividad de sus cultivos.

En el segundo lugar de mayor huella hídrica se encuentra Brasil, seguido por Perú, Etiopía y Colombia. Por lo anterior, la importancia en la adopción de nuevas tecnologías que generen un menor impacto sobre el agua y que garanticen la sostenibilidad de los sistemas cafeteros tanto para la producción en campo como para el procesamiento del grano.

Con base en lo anterior, el impacto ambiental causado por los sistemas cafeteros y su huella hídrica, ha adquirido gran relevancia en los últimos años, tanto desde el componente productivo como para el proceso de transformación del fruto de café a C.P.S, debido al alto consumo de agua que dichos procesos requieren. De lo anterior, las tecnologías desarrolladas para optimizar el consumo de agua durante el proceso de lavado se han consolidado a nivel mundial debido a la efectividad y ventajas que estas presentan frente a los sistemas convencionales. En el numeral 3.2, se muestran las diferentes alternativas tecnológicas empleadas.

De otro lado, Colombia es conocido como el tercer productor de café en el mundo, y el primero en café suave por su gran calidad, contando con cerca de 1.000.000 de hectáreas sembradas y en las que participan más de 550.000 familias (Federación Nacional de Cafeteros, 2017), aportando cerca del 1% del PIB nacional (Bloomberg Línea, 2021). Sin embargo, se hace necesario evaluar cómo se realiza el proceso de beneficio, lavado del café y el alto impacto que

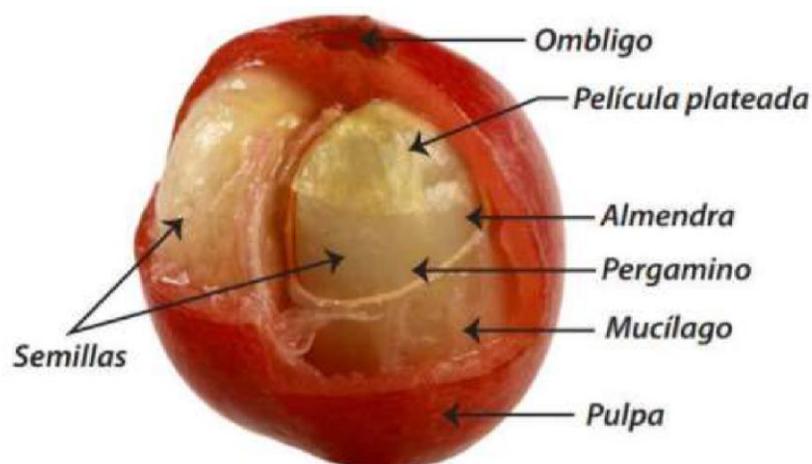
este genera en el medio ambiente, debido a las prácticas realizadas, como: contaminación de fuentes de agua, degradación de suelos, entre otros (Rodríguez, 2015).

Durante años, Colombia ha dado valor agregado a su café siguiendo un proceso semi-industrial conocido como beneficio de café, proceso que es determinante en la producción del grano y que garantiza en el transcurso del tiempo su calidad, ya que la mayoría de los defectos que se presentan en el grano pueden ocurrir debido a inconvenientes en el proceso. (Aristizabal Arias & Duque Orrego, 2005).

Para Oliveros (2019), el proceso de beneficio húmedo del café consiste en retirar de los frutos dos estructuras, la pulpa y el mucílago. En la figura 4., se muestra la composición del grano de café. Para el caso del café colombiano, esta variedad denominada café *Colombia*, tiene una pulpa que representa el 44,8% y un mucílago con el 14,85%, respectivamente; antes de iniciar el proceso de secado, para retirar el mucílago se emplean medios bioquímicos, enzimáticos y mecánicos, principalmente.

Figura 1

Composición de un grano de café



Nota. Fuente Rodríguez, 2015

En la fermentación natural el mucílago se degrada por efecto de enzimas (pectinasas y pectasas) y bacterias pectolíticas que están presentes en los frutos de café. Posteriormente, el mucílago degradado, se retira de los granos mediante el lavado con agua limpia y durante este proceso se genera un impacto ambiental grave, debido a que el agua utilizada y la pulpa obtenida, son dispuestas en muchos casos en fuentes de agua, cañadas o directamente al suelo, afectando o alterando significativamente sus condiciones.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar el uso de las diferentes tecnologías de tratamiento empleadas en la actividad de lavado de café.

3.2. Objetivos específicos

- ✓ Estudiar las diferentes tecnologías empleadas en el proceso de tratamiento de las aguas residuales generadas durante el lavado del café
- ✓ Analizar a partir de información secundaria, los beneficios de las tecnologías empleadas en el tratamiento de aguas residuales.
- ✓ Determinar los aspectos más relevantes que permiten una mejor adopción de las tecnologías de tratamiento en este tipo de industria.

4. Metodología

La metodología que se adoptó en el presente trabajo, incluyó la revisión bibliográfica, en la cual se procedió a analizar los contenidos y los alcances que tienen los documentos o la información secundaria y demás textos o materiales específicos, así como sus similitudes y diferencias. La cual se desarrolló empleando las siguientes fases:

4.1. Establecimiento de la información

Se llevó a cabo una búsqueda de información en las bases de datos de publicaciones científicas disponibles como SciELO, REDALYC, SCIENCE DIRECT además de consultar los trabajos y publicaciones desarrollados por CENICAFÉ. Adicionalmente se incluyeron documentos de investigación que aún no cumplen con los requisitos para ser indexados pero que aun así aportan conocimiento en las tecnologías de lavado de café y tratamiento de aguas residuales en Colombia. La denominada ventana de observación tenida en cuenta, incluye desde la aparición del primer documento (1971), hasta agosto 20 de 2022. En el capítulo 6, se observa como por temas prácticos y de mayor novedad, la ventana de tiempo de estudio, se reduce a los últimos 23 años.

Se tuvieron en cuenta dos ecuaciones de búsqueda mediante operadores booleanos “LAVADO DE CAFÉ AND COLOMBIA”, “AGUAS MIELES DE CAFÉ AND COLOMBIA” y “BENEFICIADO DE CAFÉ AND COLOMBIA”, así mismo, los buscadores para el tema a nivel internacional y local. Para la selección de los documentos se privilegió la relevancia con respecto al tema de investigación, actualización, autenticidad, idioma, origen, accesibilidad y disponibilidad.

4.2. Análisis de contenido

La búsqueda no presentó límites de tiempo ya que se desea abarcar la totalidad de registros, como: artículos, reportes, conferencias y tesis de grado o posgrado encontradas, que se consignarán dentro del gestor bibliográfico Mendeley, en donde posteriormente, para manejar la información de una manera organizada, se creó una base de datos o matriz bibliográfica con

la cual se procedió a clasificar los documentos según su tipología y discriminando: título del trabajo, autor o autores, fuente de información, año de publicación, resumen, objetivos, metodología, resultados y conclusiones.

5. Resultados y Análisis

5.1. Análisis de los datos bibliográficos

Como resultado de la búsqueda de artículos en la base de datos bibliográfica **SCOPUS**, con las palabras claves “wastewater+coffee”, se encontró un total de 513 publicaciones en el mundo, contando con publicaciones desde el año 1971. Sin embargo, el interés del presente trabajo, está orientado en conocer que ha pasado en las últimas dos (2) décadas especialmente, en el tema de aguas residuales de lavado, de allí, que la búsqueda se redujo a un periodo de 23 años (2000 a 2022), disminuyendo el número de estudios a 479.

En la Figura 2, se grafica la respuesta a nivel mundial, sobre la participación en dichas investigaciones, ubicando los resultados por continentes y países. Se identifica una mayor participación de Asia con el 40% de las investigaciones, seguido con América con el 37%,

Europa con el 17% y África con el 6%, Oceanía no contó con investigaciones dentro de la ventana de estudio u observación.

Frente a la participación por países, Brasil encabeza la lista con una participación del 21% a nivel mundial es de recordar que Brasil es el mayor productor de este grano a nivel mundial (Statista, 2022), de allí que se cuente con un gran número de investigaciones en su territorio, seguidamente se encuentra India con un 12%, China con un 7% y Colombia con un 6%.

Por otro lado, la Figura 3 muestra el análisis bibliométrico para la coautoría y colaboraciones de diferentes países para la búsqueda de “wastewater+coffee”, en los que resaltan Brasil, India,

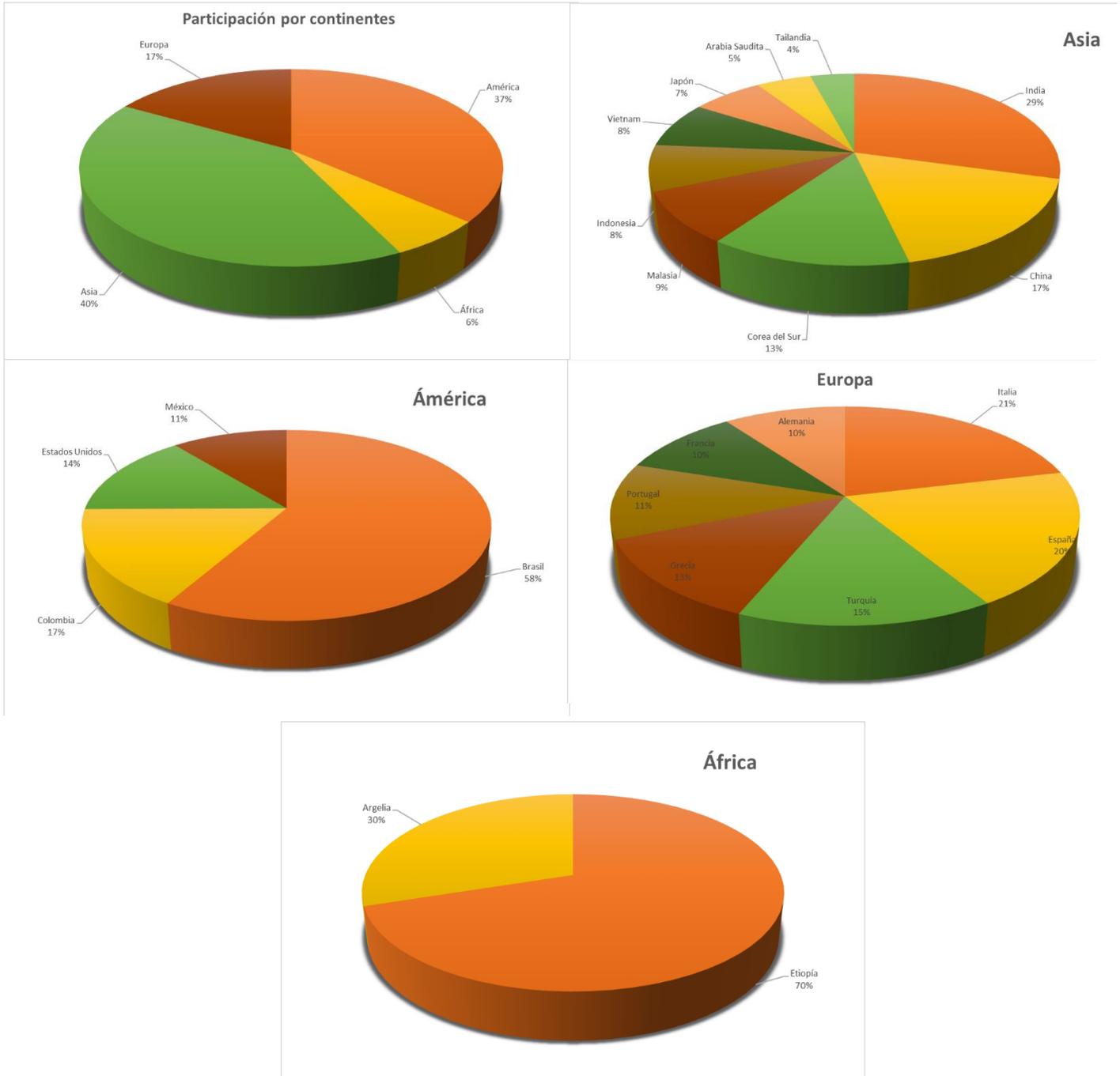
China y Colombia. Sin embargo, en los últimos años Vietnam y Turquía cuentan con mayores autorías y su articulación en la búsqueda de nuevas oportunidades de producción del café, abre nuevas oportunidades de estudio, para sus impactos sobre el ambiente. Esta condición, muestra lo pertinente del tema en el ámbito internacional.

Posteriormente, en la Figura 4 se analizó el número de investigaciones por año dentro de la ventana de observación (2000 – 2022), evidenciando un crecimiento exponencial en los artículos relacionados con las aguas residuales de lavado de café, lo que indica un interés global creciente por el impacto ambiental de esta actividad agrícola. Es importante resaltar, que en el año 2022 se presentó un menor número de publicaciones frente al año 2021, lo anterior debido a que la búsqueda ha sido finalizada en agosto 20 de 2022 (ver Figura 4).

APROXIMACIÓN A UN ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL BENEFICIO DEL CAFÉ EN COLOMBIA Y SU IMPACTO AMBIENTAL

Figura 2

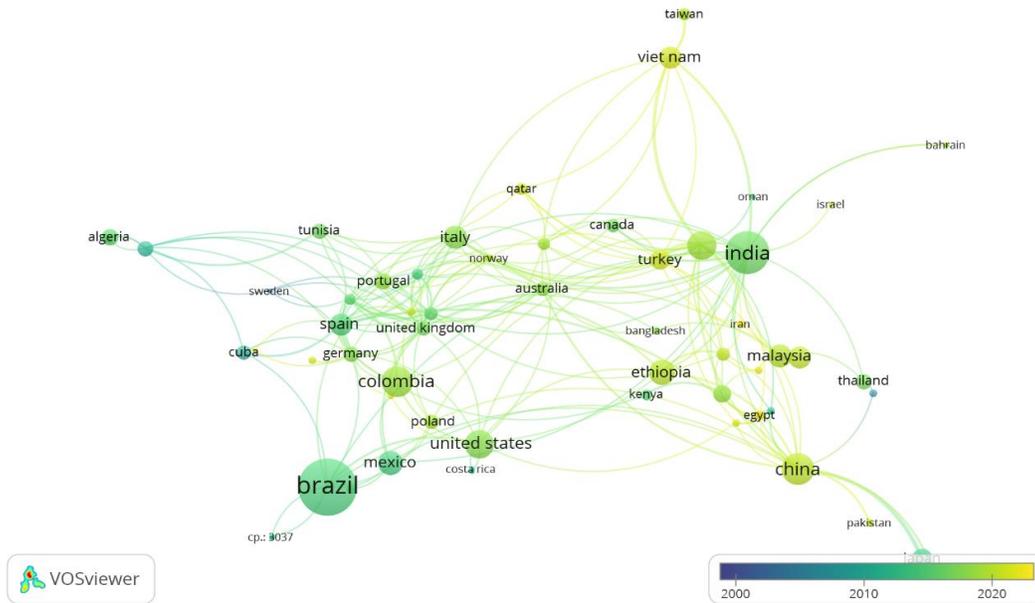
Participación en investigaciones por continentes y países



Nota. Fuente elaboración propia

Figura 3

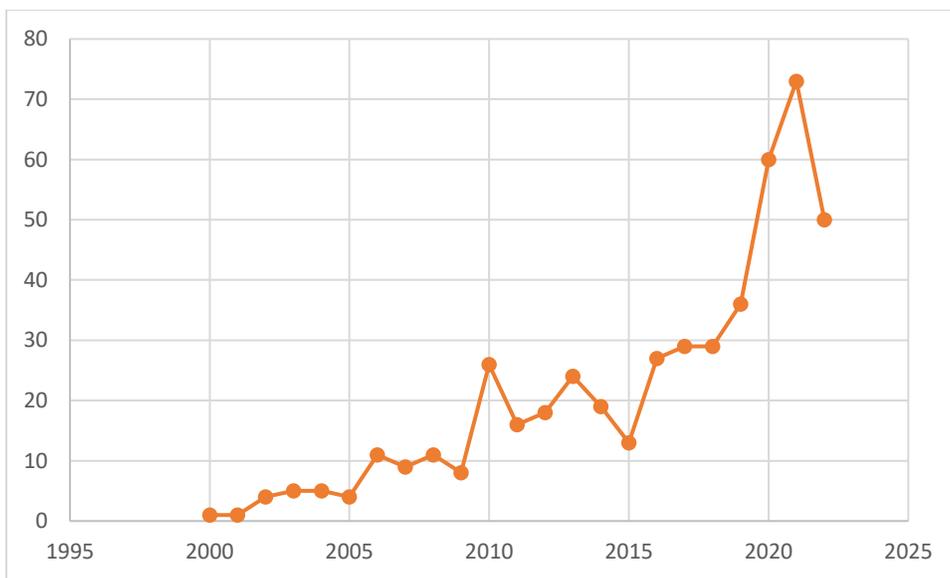
Análisis bibliométrico para la coautoría y colaboraciones diferentes países



Nota. Fuente Voswiever

Figura 4

Distribución histórica de las publicaciones desarrolladas entre el año 2000 y 2022



Nota. Fuente elaboración propia

5.2. Tipos de metodologías utilizadas para el lavado de café

De acuerdo con Rodríguez (2015), actualmente se cuenta con tres (3) metodologías para el beneficio de café a nivel nacional, así: beneficio convencional del café, beneficio ecológico del café y beneficio ecológico del café sin vertimientos.

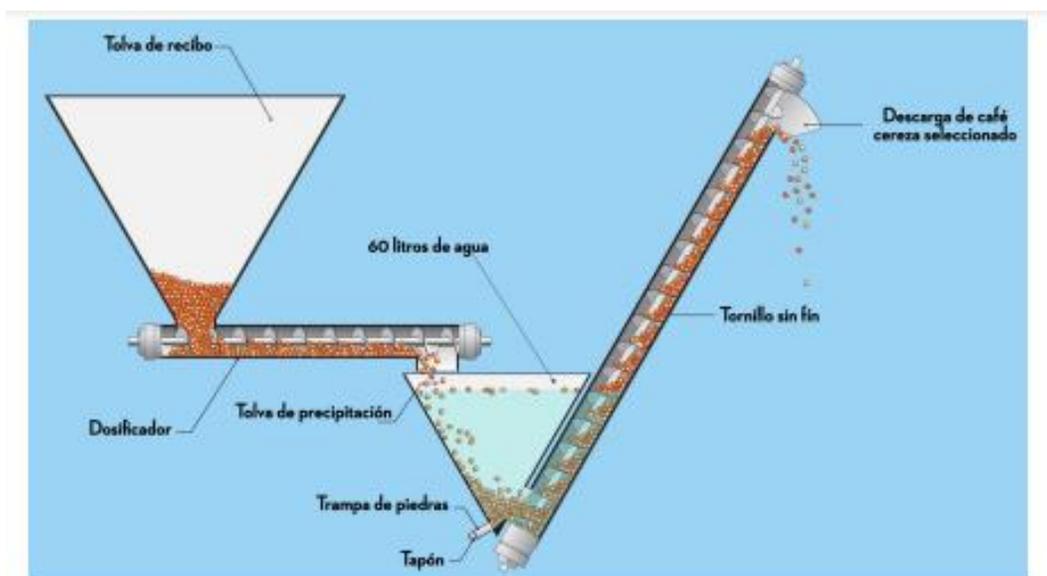
En cuanto al beneficio convencional del café se emplea desde mediados del siglo XIX cuando se inició la caficultura en Colombia (Federación Nacional de Cafeteros, 2004), a lo largo del tiempo se han realizado algunas variaciones a este sistema como el tanque tina que es una adaptación de los tanques tradicionales la cual consiste en redondear sus ángulos y las esquinas (Zambrano, 1993), esta tecnología se caracteriza por un alto consumo de agua, cercano a los 40 litros para obtener 1 kg de C.P.S (Rodríguez, 2015). Con el fin de disminuir el consumo de agua de este tipo de beneficio en el proceso de clasificación del café en cereza, Cenicafe desarrolló el separador hidráulico de tolva y tornillo sinfín (SHTTS), un dispositivo en el cual se combinan, en forma eficiente, las ventajas de la separación hidráulica y el transporte con tornillo sinfín, con bajo consumo específico de agua, permitiendo disminuir el 99,5% del consumo de agua (Rodríguez, 2015).

Ahora, en relación con el beneficio ecológico del café y beneficio ecológico del café sin vertimientos fueron tecnologías desarrolladas por el Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafe y se conocen técnicamente como Becolsub y Ecomill® respectivamente, estas permiten una disminución de la huella hídrica del proceso de un 45,7% y un 99,9% respectivamente (Leal, 2021).

La tecnología Becolsub fue desarrollada por Cenicafé en el año de 1995, y se destaca por ser una tecnología que permite el retiro del mucílago del café recién despulpado al someter los granos a colisiones entre ellos y fricciones con diferentes partes del equipo, en la figura 5, se esquematiza su funcionamiento. Esta tecnología es un dispositivo de flujo vertical ascendente con un consumo de agua inferior al 50% respecto a las tecnologías tradicionales (Oliveros, 2019), cerca del 50% de la producción nacional es procesada por este método y se ha exportado a diferentes países en América, África y Asia (Sanz, 2011).

Figura 5

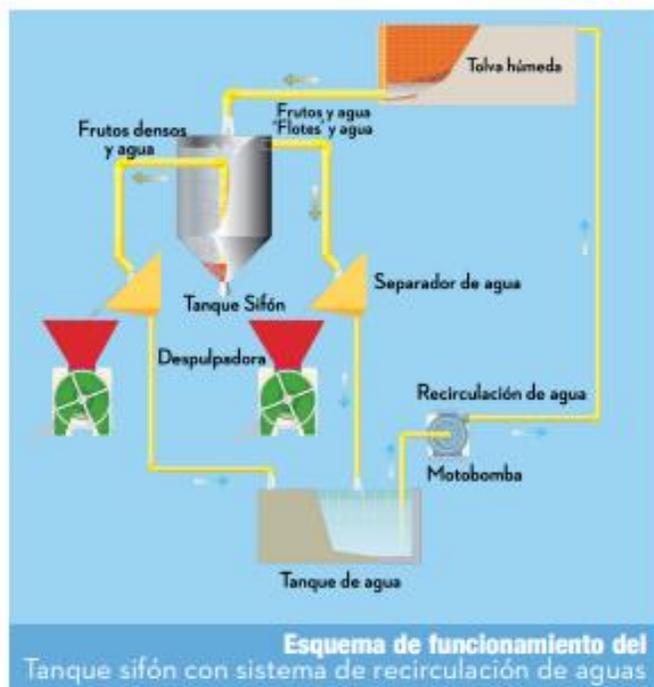
a) Esquema de funcionamiento tecnología Belcosub



Nota. Fuente Rodríguez, 2015

Figura 5

b) Esquema de funcionamiento tecnología Belcosub



Nota. Fuente Rodríguez, 2015

Frente a la tecnología Ecomill®, esta fue desarrollada por Cenicafé y en el año 2012 se realizaron las primeras pruebas en cosechas cafeteras (Oliveros, 2013). La tecnología (ver figura 6), permite una disminución en el consumo de agua cercana al 100% debido a que el proceso de fermentación del café se realiza en tanques diseñados para permitir la descarga del producto cuando esté listo para iniciar el lavado, en ausencia de agua (Oliveros, 2019).

Figura 6*Tecnología Ecomill®*

Nota. Fuente Rodríguez, 2015

Cenicafé desarrolla y evalúa frecuentemente nuevas tecnologías que minimicen el impacto ambiental de los sistemas cafeteros en el proceso de beneficio y lavado, para el año 2019 se evaluó un lavador de flujo horizontal para café con degradación previa del mucílago como se muestra en la figura 7, según los resultados de esta investigación esta tecnología contó con un consumo específico de agua superior a la tecnología Ecomill® (28,5%) e inferior al Becolsub (30%), además se concluyó que las aguas residuales del lavado de café pueden secarse utilizando energía solar o como indica Oliveros (2019), adicionarse a la pulpa de café en proporción 1,5:1 (1,5 kg de café por 1,0 litro de aguas residuales de lavado).

Figura 7

Lavador de flujo horizontal para café con degradación previa del mucílago



Nota. Fuente Oliveros,2019

La tendencia actual del mercado se direcciona a productos que generan el menor impacto ambiental y por ello, el consumidor está dispuesto a pagar un valor adicional. Por lo tanto, para cuantificar el consumo de agua en el proceso de beneficio del café se creó el Índice de Manejo del Agua en el Proceso de Beneficio Húmedo del Café - IMAPBHC. Este indicador considera cada una de las etapas del proceso de beneficio, asignándole una ponderación de acuerdo al consumo tradicional de agua. La escala del indicador oscila en el rango entre cero (0) y uno (1), en la cual un valor de cero (0) es indicador de gran consumo de agua (mayor a 40 L/Kg de C.P.S.), en la medida en que el indicador se aproxime a uno (1), es mayor el ahorro de agua realizado en el proceso de beneficio, con lo cual se indica un uso eficiente del agua en este proceso (Rodríguez, 2015).

5.3. Capacidad de procesamiento y consumo de agua de metodologías utilizadas para el lavado de café

A continuación, se describe la capacidad de procesamiento de las metodologías que según Oliveros (2019), se expresan en kilogramos de C.P.S por hora (kg C.P.S/hora), los litros de agua utilizados para obtener 1 kilogramo de C.P.S y las Aguas Residuales de Lavado(ARL):

➤ **Algunas metodologías destacadas dentro del beneficio convencional del café:**

a) Tanque con agitación manual. El menor consumo específico de agua ($4,17 \text{ L kg}^{-1}$ de café pergamino seco- C.P.S), se obtiene utilizando cuatro enjuagues, en un tanque con bordes redondeados, denominado tanque tina. En el primer enjuague se retira el 66% de la materia orgánica del mucílago y entre el primero y el segundo el 90% (Zambrano e Isaza, 1993).

b) Canal de correteo. El consumo específico de agua es mayor a 20 L kg^{-1} de C.P.S. En el canal de correteo se pueden lavar y clasificar 1.500 kg h^{-1} de café, con consumo de agua de $28 \text{ a } 35 \text{ L kg}^{-1}$ C.P.S . (Wilbaux, 1963) citado por (Oliveros,2019).

c) Canal semi-sumergido. Con esta tecnología se pueden procesar hasta 15.000 kg h^{-1} de café lavado, con consumo de agua de $6,4 \text{ L kg}^{-1}$ de C.P.S. sin recircular (Roa et al., 1997).

d) Beneficio ecológico del café sin vertimientos - Ecomill®. El consumo específico de agua es de $0,35 \text{ a } 0,55 \text{ L kg}^{-1}$ de C.P.S. Las aguas residuales del lavado (ARL) se adicionan a la pulpa, reteniendo el 100% de su volumen y controlando el 100% de la contaminación causada por ellas. Se diseñaron tres modelos con capacidades de $500, 1.500 \text{ y } 3.000 \text{ kg h}^{-1}$ de café lavado (Oliveros, 2019).

e) Beneficio ecológico del café - Becolsub. El consumo específico de agua varía entre $0,7 \text{ y } 1,0 \text{ L kg}^{-1}$ de C.P.S. Las ARL se mezclan con la pulpa, con un promedio de retención del

60% de su volumen y un control del 90% de la contaminación causada por estas (Roa et al., 1997). Se diseñaron modelos con capacidades de 120, 240, 400 y 1.000 kg h⁻¹ de café lavado.

El beneficio ecológico del café sin vertimientos -Ecomill® y el beneficio ecológico del café - Becolsub permiten la mezcla de las ARL con la pulpa de esta, reduciendo su contaminación en un 100% y 90%, respectivamente.

Las diferentes metodologías del beneficio convencional del café como lo son el tanque de agitación manual, el canal de correteo y el canal semi-sumergido, presentan una gran distribución a lo largo del territorio nacional a su bajo costo (Rodríguez, 2015).

5.4. Aguas residuales del proceso de lavado de café

Anualmente se generan más de diez millones de toneladas de residuos sólidos de café a nivel mundial y la mayor cantidad es de agua residual (Echeverría & Nuti, 2017). El agua residual del lavado de café contiene altas concentraciones de materia orgánica con sólidos en suspensión, lo cual le da características altamente ácidas (Sahana et al., 2018), así la eliminación de este residuo sin tratamiento alguno, provoca eutrofización en los cuerpos de agua.

Latinoamérica desarrolla un papel importante en la producción y el comercio internacional del café en el mundo. Esta actividad incrementa los ingresos mediante la generación de empleo en el sector rural, que es donde predomina este cultivo (Zúñiga y Rodríguez 2002). Pero a su vez se ha evidenciado que durante el beneficio de café se generan grandes impactos en el medio ambiente y frente a esta necesidad se han estudiado diferentes alternativas que minimizan estos impactos, como es el caso del tratamiento de aguas residuales o aguas mieles generadas en el proceso de beneficio de café.

De acuerdo con Cárdenas y Vásquez (2013), las aguas mieles conforman el mayor residuo durante el proceso, especialmente por el uso de agua que se mezcla con el mucílago, pues al desecharlas llegan a una fuente hídrica que termina contaminada. Y frente a este panorama se han estudiado alternativas, como por ejemplo usar las aguas mieles para generar biogás o como una fuente de combustible.

Con base en el tratamiento de aguas de beneficio, en Colombia las investigaciones se han realizado desde 1984 por parte de Cenicafé, con la misma tendencia de encontrar la solución más económica para descontaminar. Algunas de las primeras tecnologías que se conocen en la temática, incluyen: filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) empacados con anillos de bambú y también con anillos de polietileno de baja densidad, reactores anaerobios de flujo ascendente y manto de lodos (UASB), tecnologías a las que se han realizado seguimientos y ajustes para mejorar la eficiencia en el tratamiento de este tipo de aguas residuales.

Así, a través del tiempo en el país han ido surgiendo diferentes tecnologías, cada vez más eficientes (principalmente en el uso de agua) y que buscan la disminución de cargas contaminantes generadas por las aguas residuales. Es por ello, que tal como lo mencionan Rodríguez et al. (2015), en la actualidad los beneficiaderos de Colombia se clasifican en cuatro tipos: beneficio convencional, beneficio en transición a ecológico, beneficio ecológico y beneficio ecológico sin vertimientos.

De acuerdo con lo anterior y con el propósito de lograr cero vertimientos en el proceso de beneficio se hace necesario el despulpado sin agua y el transporte de la pulpa y del café despulpado sin el uso de agua. Por lo tanto, de acuerdo con Rodríguez et al. (2009), las

tecnologías Becolsub o Ecomill ayudan al manejo de estas aguas residuales, así como la utilización del secado solar que ayudan la deshidratación de las aguas mieles logrando transformarse en un subproducto con un valor agregado que puede ser utilizado como fuente de materia orgánica o bioabono.

Un ejemplo de los trabajos que se han venido realizando en los últimos años para disminuir el impacto de las aguas mieles en café es el realizado por Campos y Durán (2019), quienes propusieron el diseño de un sistema modular de tratamiento anaerobio (SMTA) y un humedal artificial de flujo superficial (SFS) para las aguas mieles generadas en la finca Buena Vista en Tolima Colombia, el cual tuvo resultados positivos al presentar eficiencia en la remoción de los contaminantes que se encontraban presentes en el agua residual del beneficio de café. Resultados como éstos aportan de manera positiva hacia la búsqueda de tecnologías y tratamientos para las aguas mieles, pues según el reporte del Ministerio de Ambiente de Colombia (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 631 de 2015: “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”., 2015), solamente el 51% de los sistemas de tratamiento de aguas residuales tanto domésticos como industriales instalados en Colombia funcionan de manera aceptable.

De acuerdo con los resultados obtenidos durante la revisión bibliográfica, es importante resaltar la diversidad de tratamientos para el agua residual del beneficio del café, es por esto que según Zambrano y otros (2015), Cenicafé desde hace dos décadas dio a conocer a la población cafetera los primeros diseños de sistemas modulares para tratamiento (SMTA), que se encuentra

constituido por una fase metanogénica, sistema que ha tenido aceptación en las zonas cafeteras de los departamentos del Tolima, Cundinamarca, Magdalena, Quindío, Caldas y Huila, entre otros.

Para el manejo de las aguas residuales de café existen diferentes tratamientos y técnicas, pero actualmente hacen falta investigaciones puntuales sobre la eficiencia de éstas para evitar la afectación al medio ambiente para que su uso sea fácil y masificado.

5.5. Algunas alternativas para el tratamiento de aguas residuales del café (ARL)

Actualmente, se cuenta con una variedad de alternativas para el tratamiento de las aguas residuales provenientes del beneficio del café. Algunas de las alternativas, están integradas a las tecnologías de lavado como Becolsub y Ecomill®, ya que reincorporan las ARL a la pulpa de café en porcentajes hasta del 100%, evitando así la contaminación generada por estas. Dentro de las alternativas para el tratamiento de las aguas residuales de lavado de café (ARL) se encuentran además de Ecomil® y Becolsub las siguientes:

5.5.1. Cales:

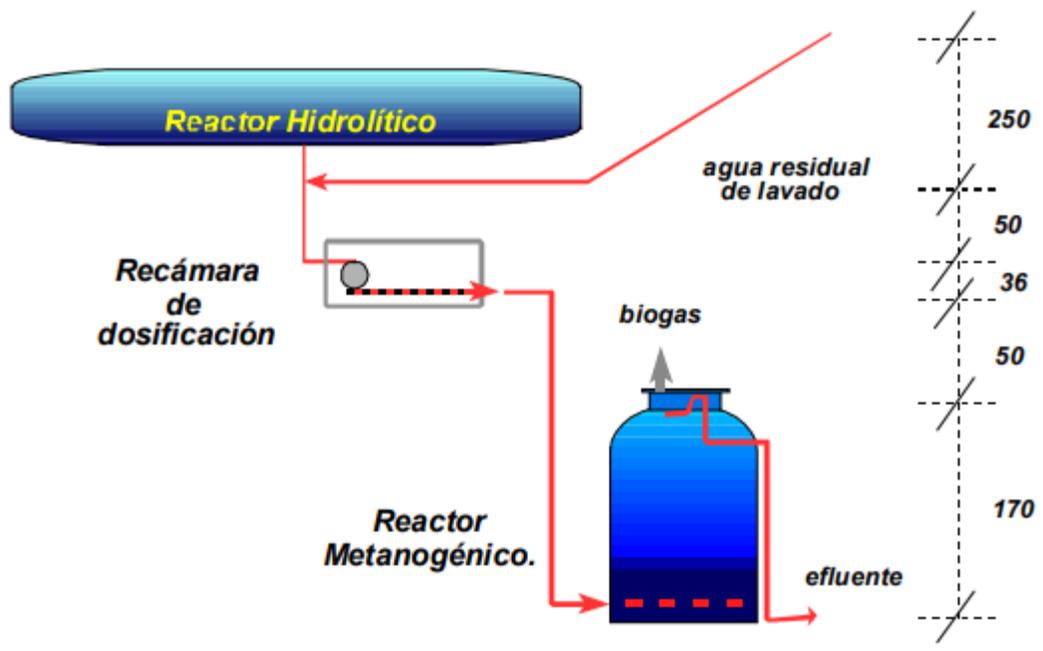
Consiste en la adición de este compuesto, con el propósito de disminuir la turbidez e incrementar el pH como tratamiento primario. Posteriormente, se podrá realizar un tratamiento secundario que consiste en la adición de sales de hierro y aluminio, permitiendo transformar los compuestos que están en forma de sólidos disueltos y coloidales en compuestos estables, y así eliminarlos por sedimentación. Con la adición de las cales se previene la acidificación generada (Quintero, 2022).

5.5.2. Sistemas modulares de tratamiento (SMTA):

Esta tecnología fue desarrollada en CENICAFE (Centro Nacional de Investigaciones de café), con el propósito de implementar un tratamiento anaeróbico de las aguas residuales del lavado que se generan en los predios cafeteros, está compuesto por dos (2) unidades, tal como se muestra en la figura 8., permitiendo así, la separación de fases de la digestión anaeróbica: el reactor hidrolítico/acidogénico (RHA) y el reactor Metanogénico (Zambrano, 1993). Estos tratamientos fueron diseñados para descontaminar las aguas residuales generadas en el lavado del café, en el conocido beneficio tradicional húmedo, donde se retira el mucílago o baba del café por el método de fermentación natural.

Figura 8

Esquema de un Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA), para el tratamiento de aguas residuales del lavado de café



Nota. Fuente Zambrano et al., 1999

5.5.3. Extracto de semilla de moringa Oleifera (MOSE):

Los árboles de Moringa Oleifera pueden ser una opción viable para el tratamiento de aguas residuales ya que las semillas pueden ser usadas como un coagulante natural que permiten aclarar las aguas turbias, eliminar la turbidez y mejorar la potabilidad en aquellas zonas rurales donde no se cuenta con infraestructura para el tratamiento de las aguas residuales. Este tipo de tratamiento ha sido utilizado en diferentes lugares alrededor el mundo y una aplicación específica, ha sido presentada por Gardea et al. (2017). Estos investigadores llevaron a cabo una aplicación de este extracto en Hawai para el tratamiento de aguas residuales en café, arrojando resultados positivos al reducir las concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO), nitritos (NO₂-), nitratos (NO₃-) y pH, así: la remoción de DQO insoluble varió de 26% a 100% y la remoción total de DQO varió de 1% a 25%. La reducción de nitrato y nitrito osciló entre 20% y 100%, respectivamente. Con lo cual, se puede observar la metodología MOSE, como una alternativa promisoría para el tratamiento de aguas residuales.

5.5.4. Semilla de aguacate carbono (ASC):

Estudios como el llevado a cabo por Rani (2010), demostró la eficiencia al usar la semilla de aguacate para reducir la DQO y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), de las aguas residuales del procesamiento de café. Esta alternativa se destaca por ser respetuosa con el medio ambiente y a la vez económicamente viable. En su componente práctica, la metodología con ASC consiste en triturar las semillas para luego ser secadas y mezcladas con ácido sulfúrico concentrado y finalmente trituradas, para luego vertirlas en las aguas residuales.

5.5.5. Microorganismos eficientes:

En los sistemas de tratamiento biológico, las bacterias son los microorganismos más abundantes y resistentes a las variaciones de las condiciones ambientales, como la temperatura y los niveles de oxígeno. Según Ferreira et al. (2021) el uso de microorganismos para el tratamiento de aguas residuales impactó de manera positiva en el tratamiento de aguas residuales, disminuyendo cerca del 85% de la DBO y una disminución del 60% en la DQO, independientemente de las características de las aguas residuales.

5.6. Adopción de tecnologías en fincas cafeteras para el tratamiento de las aguas residuales de lavado de café (ARL)

Duque (2018), menciona que en Colombia la agricultura presenta tres (3) grandes retos cuando se desarrollan nuevas tecnologías, en primer lugar, está la generación de nuevos conocimientos debido a los limitados recursos para investigación en el país, en segundo lugar, la transferencia de este conocimiento y en tercer lugar la adopción de esta tecnología por parte de las comunidades. En el gremio cafetero se cuenta con grandes ventajas como una agremiación fuerte constituida por la Federación Nacional de Cafeteros y el Centro Nacional de Investigaciones del Café (CENICAFÉ) el cual desarrolla nuevas tecnologías. Sin embargo, son varios los factores que limitan la adopción de nuevas tecnologías, tales como: tamaño del predio, incertidumbre frente al éxito de la adopción, educación o capital humano, disponibilidad de mano de obra, acceso a créditos, tenencia de la tierra, restricción para acceso a insumos. Por lo anterior, la adopción de las tecnologías debe considerarse de una manera integral determinando primero los impedimentos para acceder a estas, entender el por qué no de la adopción por parte de los agricultores, la existencia de programas de asistencia técnica y extensión rural

especializados para estas tecnologías y finalmente políticas estatales claras; de no considerarse esta serie de factores la adopción deseada no podrá lograrse Duque (2018).

Otro factor que es importante mencionar es el análisis costo-beneficio que cada una de las tecnologías puede aportar a la industria cafetera. Un ejemplo de ello, es el de analizar los datos obtenidos por Trujillo (2019), donde a partir de la implementación de nuevos procesos en una planta procesadora de café tostado y molido, se pudo tener una mayor utilidad con la implementación de nuevas tecnologías, al dar un valor agregado al producto.

Se conoce que el proceso de beneficio actual cuenta con maquinaria especializada y de alta calidad, pero teniendo en cuenta todas las adversidades que presenta el sector y dificultades en los costos de producción, sí es necesario implementar nueva maquinaria y tecnología que le pueda brindar un valor agregado al producto final al reducir su impacto ambiental.

Tabla 1

Ventajas y desventajas de las tecnologías utilizadas para el beneficio de café y para el tratamiento de aguas residuales del lavado de café

Nombre de la tecnología	Ventajas	Desventajas
Beneficio convencional: Tanque con agitación manual, canal de correteo y canal semisumergido	<ul style="list-style-type: none"> - Materiales económicos para la obra civil - Fácil construcción. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto consumo de agua para procesamiento - Generación ARL -Requerimiento de tecnologías adicionales para el tratamiento de las ARL
Beneficio ecológico: Becolsub	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción en el consumo de agua frente al beneficio convencional - Incorporación de las ARL en la pulpa generada en el proceso - Aprovechamiento de subproductos 	<ul style="list-style-type: none"> - Generación de ARL - Costo - Poca difusión en el territorio nacional - Carencia de programas estatales para su adopción - Poco conocimiento de esta tecnología por los cafeteros.

APROXIMACIÓN A UN ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL BENEFICIO DEL CAFÉ EN COLOMBIA Y SU IMPACTO AMBIENTAL

Beneficio ecológico sin vertimientos: ECOMILL	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo consumo de agua - Bajo consumo de energía - Cero contaminaciones por el vertimiento ARL - Disminución en el consumo de agua frente al beneficio convencional y el beneficio ecológico. - Aprovechamiento de subproductos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo - Poca difusión en el territorio nacional - Carencia de programas estatales para su adopción - Poco conocimiento de esta tecnología por los cafeteros.
Tratamiento primario de aguas residuales de café: Cales	<ul style="list-style-type: none"> - Se alcanzan porcentajes de remoción en la carga orgánica expresada como DQO cercanos al 50% y de los SST superiores a 75%. - producto económico con capacidad de precipitar metales y sólidos que se encuentran disueltos facilitando su remoción. 	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de adopción y uso a gran escala para conocer mejor sus impactos y resultados.
Sistemas biológicos	<ul style="list-style-type: none"> - permiten la eliminación de más del 80% de la contaminación orgánica inicial presente en las mismas. 	<ul style="list-style-type: none"> - altos tiempos de retención hidráulica (aproximadamente de 1 semana). - requieren de monitoreo por parte del usuario de la tecnología para evitar que se presenten sobrecargas orgánicas varios meses (Rodríguez, 2009).
Extracto de semilla de moringa	<ul style="list-style-type: none"> - Aclara las aguas turbias en las zonas rurales que carecen de infraestructura de tratamiento de agua. 	<ul style="list-style-type: none"> - Debe combinarse con otra tecnología para el tratamiento que pueda eliminar el contenido orgánico disuelto presente en aguas residuales.
Semilla de aguacate (ASC)	<ul style="list-style-type: none"> - Eficaz para la reducción de la concentración de DQO y DBO de los efluentes de la planta de procesamiento de café. 	<ul style="list-style-type: none"> - La efectividad depende del tiempo de tratamiento y velocidad de agitación.
Sistemas modulares de tratamiento (SMTA)	<ul style="list-style-type: none"> - descontamina las aguas residuales generadas en el lavado del café y originadas en beneficiaderos húmedos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de reactores inferior a 2.000 litros - Costos elevados

Nota. Fuente elaboración propia

De acuerdo a las tecnologías en mención que el trabajo presenta, se muestra resultados positivos en cuanto a la diversificación de tecnologías que se han implementado con éxito y aquellas que actualmente están en modo piloto. Este panorama indica también que, aunque existan tecnologías muy eficientes como Belcosub y Ecomil, la posibilidad de implementarlas se ve limitada por el alcance económico y el acompañamiento técnico para su adecuado uso a largo plazo. Pero además se destacan aquellos tratamientos biológicos de bajo costo y que permiten ser implementadas en zonas rurales que no cuenten con la infraestructura para el tratamiento de aguas residuales como: el uso del extracto de semilla de moringa, semilla de aguacate y el uso de microorganismos eficientes.

6. Conclusiones

- Las aguas residuales de lavado de café constituyen un punto crítico en la contaminación de fuentes de agua en la zona rural de nuestro país ya que el café es el cultivo con mayor importancia económica en nuestro país, además de que la mayoría de los cafeteros son pequeños y medianos productores.
- Las nuevas tecnologías utilizadas para el lavado de café, pueden reducir considerablemente el impacto ambiental sobre las fuentes de agua y el suelo, además de obtener y dar un valor agrado mayor, como el de un producto de óptima calidad.
- Los programas de promoción de nuevas tecnologías para el sector rural deben tener como objetivo principal el mejoramiento de las condiciones de vida y la protección del medio ambiente, además de una visión holística, solo así, se asegurará el éxito en la adopción de estas y su permanencia en el tiempo.
- Será importante reconocer el papel fundamental que tienen las Corporaciones Autónomas Regiones (CAR's), para generar estrategias de control de contaminación por la actividad de lavado, tanto para la prevención del agua, como del suelo y otros ecosistemas importantes de país.

Referencias

- Aristizabal Arias, C., & Duque Orrego, H. (2005). Caracterización del proceso de beneficio de café en cinco departamentos cafeteros de Colombia. *Cenicafé*, 299-318. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc056\(04\)299-318.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc056(04)299-318.pdf)
- Bloomberg Línea. (30 de noviembre de 2021). El café volvería a aportarle un 1 % al PIB colombiano en 2021. <https://www.bloomberglinea.com/2021/11/30/el-cafe-volveria-a-aportarle-un-1-al-pib-colombiano-en-2021-0verde>
- Campos, L. y Durán, D. (2019) diseño de un sistema de tratamiento para las aguas residuales agrícolas generadas en el beneficio húmedo del café en la finca buena vista; planadas Tolima, 2019. [Tesis de pregrado, Universidad El Bosque]. Universidad El Bosque. <https://repositorio.unbosque.edu.co/handle/20.500.12495/2567>
- Cárdenas Arévalo, J. y Vásquez López, J. (2013). “Análisis del ciclo de vida del procesamiento y la distribución del café del beneficio ecológico en la finca Juancito y convencional en la finca La Montaña, Francisco Morazán, Honduras”. p. 22.
- Duque, H. (2018). La adopción de tecnologías agrícolas, bases para su comprensión. *Cenicafé*. 104 p. https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/libros/publicaciones_la_adopcion_de_tecnologias_agricolas_bases_para_su_comprendio
- Echeverria, M.C. and Nuti, M. (2017) Valorization of the Residues of Coffee Agro-Industry: Perspectives and Limitations M.C. *The Open Waste Management Journal*, 10, 13-22. <https://doi.org/10.2174/1876400201710010013>
- Federación Nacional de Cafeteros. (2004). Historia: Cómo llegó el café a Colombia. <https://www.cafedecolombia.com/particulares/historia-del-cafe-de-colombia/>
- Federación Nacional de Cafeteros. (2017). FNC en cifras. <https://federaciondefcafeteros.org/static/files/FNCCIFRAS2017.pdf>

- Federación Nacional de Cafeteros. (2022). Producción de café de Colombia cierra 2021 en 12,6 millones de sacos. <https://federaciondecafeteros.org/wp/listado-noticias/produccion-de-cafe-de-colombia-cierra-2021-en-126-millones-de-sacos>.
- Ferreira J., Dimitri V., Alves R., Schwan R., & Ferreira C., (2021) Protocol to select efficient microorganisms to treat coffee wastewater, *Journal of Environmental Management*, Volume 278, Part 2, 2021, 111541, ISSN 0301-4797, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720314663>.
- Gardea, W. K., Buchberger, S. G., Wendell, D., & Kupferle, M. J. (2017). Application of Moringa Oleifera seed extract to treat coffee fermentation wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 329, 102-109.
- Gómez, S. (2019). Guía de certificación de café, costes, beneficios y primeros pasos. Quecafe.info 1019. <https://quecafe.info/certificacion-de-cafe-que-significa-el-sello-que-lleva-tu-cafe/>
- Leal, J. & Tobón, C. (2021). The water footprint of coffee production in Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 1–14. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/91461>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 631 de 2015: Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Capítulo VI y Artículo 9., Agroindustria. <http://www.emserchia.gov.co/PDF/Resolucion631.pdf>
- Oliveros, C., Sanz, J., Ramírez, C. y Tibaduiza, C. (2013). ECOMILL® tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 432, 1–8. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/500/1/Avt0432.pdf>
- Oliveros, C., Sanz, J. y Medina, R. (2019). Evaluación de un lavador de flujo horizontal para café con degradación previa del mucílago. *Revista Cenicafé* 70(1):30-43. 2019. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc070%2801%29030-043.pdf>

- Quintero L., Rodríguez N. (2022). Uso de cales para el tratamiento primario de las aguas residuales del café. Programa de investigación científica – Fondo Nacional del café. Cenicafé 2022. https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/avances_tecnicos/article/view/163/129
- Rani (2010). Tecnología innovadora de reducción de DQO y DBO de las aguas residuales del procesamiento del café usando semilla de aguacate Carbono (ASC). *Agua Aire Suelo Contaminación* (2010) 207:299– 306 DOI 10.1007/s11270-009-0137-2
- Roa, G., Oliveros, C., Sanz, J., Álvarez, J., Ramírez, C. y Álvarez, J. (1997). Desarrollo de la tecnología Becolsub para el beneficio ecológico del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 238, 1–8. https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/consultaPDF/YXZ0MDIzOC5wZGY
- Rodríguez V., N (2009). Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas [Tesis doctoral no publicada]. Universidad Politécnica de Valencia. doi:10.4995/Thesis/10251/4342.
- Rodríguez-Valencia, N., Zambrano Franco, D. A., & Ramírez, C. A. (2013). Manejo y disposición de los subproductos y de las aguas residuales del beneficio del café. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (Vol. 3, pp. 111–136). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_31
- Rodríguez, N., Sanz, J., Oliveros, C. y Ramírez, C. (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 pág. https://www.cenicafe.org/es/publications/Final_libro_Beneficio_isbn.pdf
- Sahana, M., Srikantha, H., Mahesh, S., & Mahadeva Swamy, M. (2018). Coffee processing industrial wastewater treatment using batch electrochemical coagulation with stainless steel and Fe electrodes and their combinations, and recovery and reuse of sludge. *Water Science and Technology*, 78(2), 279-289.

- Sanz, J., Oliveros, C., Ramírez, C., López, U. y Velásquez, J. (2011). Controle los flujos de café y agua en el módulo Becolsub. *Avances Técnicos Cenicafé*, 405, 1–8. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0405.pdf>
- Statista. (21 de junio de 2022). Ranking de los 15 principales países productores de café a nivel mundial en 2021. <https://es.statista.com/estadisticas/600243/ranking-de-los-principales-productores-de-cafe-a-nivel-mundial/>
- Swissinfo. (12 de enero de 2022). La producción de café de Colombia bajó en 2021 por segundo año consecutivo. [https://www.swissinfo.ch/spa/colombia-caf%C3%A9_la-producci%C3%B3n-de-caf%C3%A9-de-colombia-baj%C3%B3-en-2021-por-segundo-a%C3%B1o-consecutivo/47256652#:~:text=%2D%20La%20producci%C3%B3n%20de%20caf%C3%A9%20de,Nacional%20de%20Cafeteros%20\(FNC\)](https://www.swissinfo.ch/spa/colombia-caf%C3%A9_la-producci%C3%B3n-de-caf%C3%A9-de-colombia-baj%C3%B3-en-2021-por-segundo-a%C3%B1o-consecutivo/47256652#:~:text=%2D%20La%20producci%C3%B3n%20de%20caf%C3%A9%20de,Nacional%20de%20Cafeteros%20(FNC))
- Trujillo Carmona, M. (2019). Análisis costo-beneficio para el montaje de una planta procesadora de café tostado y molido en el municipio de Chinchiná, Caldas. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/administracion_agronegocios/319/
- Zambrano, F. (1993). Fermente y lave su café en el tanque tina. *Avances Técnicos Cenicafé*, 197, 1–8. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/4253/1/avt0197.pdf>
- Zambrano D., Isaza J., Rodríguez N. (1999). Tratamiento de aguas residuales del lavado del café. *Cenicafé* 1999. <https://www.cenicafe.org/es/publications/bot020.pdf>
- Zambrano, D.A., Rodríguez, N., Orozco, P.A., López, U. (2015). Evaluación de un reactor metanogénico tipo filtro anaeróbico de flujo ascendente para tratar aguas mieles del café. *Revista Cenicafé*, 66 (1): 32-45. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/607/1/arc066%2801%2932-45.pdf>
- Zúñiga. R; Rodríguez. W. (2002). El conglomerado de café en El Salvador: diagnóstico competitivo y recomendaciones. El Salvador. 75 p. <https://docplayer.es/15059294-El-conglomerado-de-cafe-en-el-salvador-diagnostico-competitivo-y-recomendaciones.html>