



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**DOCTORADO EN CIENCIAS EN AGRICULTURA
MULTIFUNCIONAL**

**TECNOLOGÍAS DEL BENEFICIADO, MEDICIÓN DE HUELLA
HÍDRICA Y CALIDAD DE CAFÉ EN VERACRUZ**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS EN AGRICULTURA MULTIFUNCIONAL PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

Presenta:

SERGIO SÁNCHEZ HERNÁNDEZ

Bajo la supervisión de:

Dr. JUAN GUILLERMO CRUZ CASTILLO



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2023

**TECNOLOGÍAS DEL BENEFICIADO, MEDICIÓN DE HUELLA HÍDRICA Y
CALIDAD DE CAFÉ EN VERACRUZ**

Tesis realizada por **SERGIO SÁNCHEZ HERNÁNDEZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS EN AGRICULTURA MULTIFUNCIONAL PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

DIRECTOR:



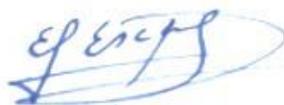
Dr. JUAN GUILLERMOCRUZ CASTILLO

ASESOR:



Dr. JOSÉ GERVACIO PARTIDA SEDAS

ASESOR:



Dr. ESTEBAN ESCAMILLA PRADO

ASESOR:



Dr. EDUARDO VALDÉS VELARDE

LECTOR



EXTERNO

Dr. HUMBERTO MATA ALEJANDRO

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
DEDICATORIA.....	viii
AGRADECIMIENTOS.....	ix
DATOS BIOGRÁFICOS	x
RESUMEN GENERAL.....	xi
GENERAL ABSTRACT	xiii
1.- INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1.- Objetivo general	2
1.2.1.- Objetivos específicos.....	3
1.3.- Hipótesis general.....	3
1.3.1.- Hipótesis específicas	3
1.4.- Estructura de las tesis	4
1.5.- Literatura citada.....	5
2.- MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO	6
2.1.- Beneficiado del café	8
2.2.- Métodos de beneficiado	8
2.2.1.- Beneficiado húmedo.....	8
2.2.2.- Beneficiado vía seca y/o natural	8
2.2.3.- Beneficiado vía semihúmedo o despulpado.....	9
2.3.- Huella hídrica.....	9
2.3.- Agua virtual o huella hídrica	9
2.4.- Calidad del café.....	10
2.4.1.- Calidad del grano	11
2.4.2.- Calidad física.....	11
2.4.3.- Calidad sensorial de la bebida	11
25.- Área de estudio	13

3.- TECNOLOGÍAS DEL BENEFICIADO DE CAFÉ Y TRATAMIENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS EN AMÉRICA: RETOS Y PERSPECTIVAS	17
3.1.- Resumen	17
3.2.- Abstract	18
3.3.- Introducción	19
3.4.- Metodología.....	20
3.5.- Beneficiado del café en América	21
3.6.- Caso colombiano.....	23
3.7.- México y Centroamérica.....	24
3.8.- Beneficiado en Brasil.....	27
3.9.- Café despulpado otra forma de beneficiar.....	27
3.10.- Efluentes del beneficiado	28
3.11.- Características de los afluentes.....	29
3.12.- Tecnologías de tratamientos de efluentes líquidos	30
3.13.- Reactores biológicos (biodigestores).....	30
3.14.- Otros tratamientos	34
3.15.- Conclusiones	38
3.16.- Literatura citada.....	39
4.- LA HUELLA HÍDRICA EN EL CULTIVO Y BENEFICIADO DE CAFÉ EN HUATUSCO, MÉXICO: UNA APROXIMACIÓN	54
4.1.- Resumen	54
4.2.- Abstract	55
4.3.- Introducción	56
4.4.- Materiales y métodos	57
4.5.- Resultados y discusión.....	60
4.5.- Discusión.....	64
4.6.- Conclusiones	68
4.7.- Literatura citada.....	68

5.- EVALUACIÓN FÍSICA Y SENSORIAL DE TRES TIPOS DE BENEFICIADO DE CAFÉ Y SU EFECTO EN LA CALIDAD EN TAZA EN LA REGIÓN CENTRO DE VERACRUZ.....	77
5.2.- Resumen	77
5.3.- Abstract	78
5.4.- Introducción	79
5.5.- Materiales y métodos	80
5.5.- Datos de producción, beneficiado y determinación de propiedades físicas y organolépticas	81
5.6.- Variables físicas del café	82
5.6.- Variables sensoriales del café	82
5.7.- Resultados y discusión.....	83
5.7.1.- Calidad física de café almendra	83
5.7.2.- Calidad organoléptica de las muestras de café.....	87
5.8.- Conclusiones.....	91
5.9.- Literatura citada.....	91
6.- CONCLUSIONES GENERALES	96

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Tratamientos de biológicos de efluentes sólidos y líquidos usado en el manejo de las aguas residuales del café.	32
Cuadro 2. Cálculo de la evapotranspiración potencial del cultivo de café en la región centro de Huatusco, Veracruz.	60
Cuadro 3. Cálculo de la precipitación efectiva	61
Cuadro 4. Cálculo del uso de agua en el beneficiado en la región de Huatusco Veracruz, 2023.....	63
Cuadro 5. Procedencia de las muestras de café ciclo 2021-2022.	80
Cuadro 6. Estadística descriptiva de la calidad física de las muestras de café ciclo 2021-2022.....	84
Cuadro 7. Cantidad de defectos de 300 g de muestra de café en tres diferentes beneficios de café en tres municipios de Veracruz	86
Cuadro 8. Características organolépticas de 27 muestras de café en relación con tres métodos de beneficiado en tres municipios de Veracruz.	87
Cuadro 9. Evaluación sensorial de café obtenido por los diferentes métodos de beneficiado (Natural, Húmedo y Honey o semihúmedo).....	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio.....	14
Figura 2. Partes de fruto de café. Elaboración propia. Huatusco, Veracruz, México, 2023.....	22
Figura 3. Proceso del beneficiado húmedo. Elaboración propia. Huatusco, Veracruz, México, 2023.	22
Figura 4. Métodos de tratamientos de aguas residuales del café. Elaboración propia. Huatusco, Veracruz, México, 2023.	38
Figura 1. Información general del cultivo de café introducida en el programa CROPWAT 8.0.	61
Figura 6. Tipos de beneficiado en el estudio. Fuente: Elaboración propia, 2023.	81
Figura 7. Frecuencia de los granos de café de las muestras obtenidas con humedad por debajo de 10%, entre 10 y 12% y por encima de 12%. Fuente: Elaboración propia, 2023.	84
Figura 8. Valores de los componentes 1 (CP 1) Y 2 (CP 2) que identifica las variables postcosechas.....	85
Figura 9. Análisis estadístico de los atributos de la calidad sensorial de los tres diferentes beneficios de café.	89

DEDICATORIA

- ❖ A mi esposa **Nancy Nazario Lezama** por todo el apoyo que me ofreció en todo este proceso de formación.
- ❖ A mi hermoso hijo **Kalet Enrique Sánchez Nazario** por alegrar cada uno de mis días desde que llegó a este mundo.
- ❖ A mi padre **Ciro Sánchez Suárez** y mis hermanos por darme palabras de aliento para terminar este proceso en vida.
- ❖ A todos **los productores de café** de la región de Huatusco, Veracruz y de México, cuales día con día están realizando alguna labor de suma importancia dentro de sus cafetales y contribuyen a que todavía a pesar de todo siga habiendo café mexicano en muchos lugares del mundo, son unos verdaderos héroes, que no ha recibido el honor que merecen.

AGRADECIMIENTOS

- ❖ A mis asesores por toda la paciencia que tuvieron para seguir en este proceso hasta el final.
- ❖ A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado de Fitotecnia por el espacio y apoyo recibido durante estos cuatro años de estudio.
- ❖ Al CONAHCYT por el apoyo ofrecido para poder estudiar un posgrado y por las facilidades ofrecidas.
- ❖ A todos los amigos que en algún momento estuvieron cerca para ofrecer un apoyo moral en este camino que no ha sido fácil de alcanzar.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Sergio Sánchez Hernández
Fecha de nacimiento	20 de febrero de 1984
Lugar de nacimiento	Huatusco, Veracruz
CURP	SAHS840220HVZNR08
Cedula profesional	11789426

Desarrollo Académico

Maestría (2014-2016) Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz

Licenciatura (2006-2011) Departamento de Agroecología, Universidad Autónoma Chapingo

RESUMEN GENERAL

TECNOLOGÍAS DEL BENEFICIADO, MEDICIÓN DE HUELLA HÍDRICA Y CALIDAD DE CAFÉ EN LA REGIÓN MONTAÑOSA DE VERACRUZ

El siguiente trabajo fue realizado en la región de Huatusco, Veracruz, México, la cual es una región dedicada principalmente al cultivo de café y su beneficiado. El estudio fue llevado a cabo con el apoyo de productores de café, así como con beneficiadores del grano que tuvieron a bien apoyar en el proceso del trabajo de investigación que se realizó entre los años 2019- 2023. El documento consta del Capítulo 1 que es la introducción general, Capítulo 2 que es el marco teórico objetivos y sitio de estudio y metodología, Capítulo 3: revisión de literatura sobre el uso de agua en el proceso de beneficiado húmedo del café y sus perspectivas, Capítulo 4: cálculo de huella hídrica verde y gris en cultivo y beneficiado del café, Capítulo 5: análisis de calidad físico y sensorial de café y finalmente, conclusiones generales de la investigación. Para llevar a cabo la investigación en primer lugar se consultó información de artículos científicos para la elaboración de la revisión bibliográfica, para realizar el análisis de gasto de agua y cálculo de huella hídrica se platicó y extendió un documento en cinco beneficios húmedos de café de la región de Huatusco, los cuales permitieron realizar las mediciones para la recolección de datos y poder hacer el cálculo de huella hídrica y gris. Para el análisis de calidad física y sensorial del grano se obtuvieron muestras de nueve productores de café, tres productores por municipio: Tlaltetela, Totutla y Huatusco. Posteriormente el análisis se llevó a cabo en las instalaciones de Centro Regional Universitario de Oriente, perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo. Con el capítulo de revisión se encontró que actualmente existen diferentes opciones de manejo de las aguas residuales en el beneficiado de café y en todo América latina se están llevando a la práctica, en el caso de la huella hídrica verde y gris evaluadas se halló que se trata de una huella baja pero

que se puede incrementar en cualquier momento y en el caso de la huella gris esta es la que se debe atender mayormente, ya que se trata de agua con presencia de contaminantes. En el caso de la calidad física y sensorial encontrada en las muestras de café los resultados mostraron cafés de especialidad con puntajes de 85 y 86 los cuales son considerados de excelente calidad para mercados diferenciados.

Palabras clave: calidad de café, huella hídrica, beneficiado, aguas residuales, cafés de especialidad.

GENERAL ABSTRACT

COFFEE PROCESSING TECHNOLOGIES, WATER FOOTPRINT MEASUREMENT, AND COFFEE QUALITY IN THE MOUNTAINOUS REGION OF VERACRUZ

The following study was conducted in the region of Huatusco, Veracruz, Mexico, which is primarily dedicated to coffee cultivation and processing. The research was conducted with the support of coffee producers and bean processors who kindly assisted in the research process conducted between the years 2019-2023. The document consists of a chapter that serves as the general introduction, chapter two which covers the theoretical framework, objectives, study site, and methodology, chapter three: a review of water usage in wet coffee processing and its perspectives, chapter four: estimation of green and grey water footprint in coffee cultivation and processing, chapter five: physical and sensory analysis of coffee quality, and lastly, general conclusions. To conduct the research, scientific articles were consulted initially for the literature review. To conduct the analysis of water consumption and water footprint calculation, discussions and documentation were conducted at five wet coffee processing facilities in the Huatusco region, which allowed data collection and water footprint calculation. For the physical and sensory quality of coffee beans analysis, samples were obtained from nine coffee producers, three producers from each of the municipalities: Tlaltetela, Totutla, and Huatusco. Subsequently, the analysis was conducted at the facilities of the Centro Regional Universitario de Oriente, affiliated with the Universidad Autónoma Chapingo. From the review chapter, it was found that different options for wastewater management in coffee processing are currently being practiced in Latin America. Regarding the green and grey water footprints evaluated, it was determined that they are relatively low but could

increase at any time. As for the greywater footprint, it requires more attention as it contains contaminants. In terms of the physical and sensory quality found in the coffee samples, the results showed that specialty coffees with scores of 85 and 86 were obtained, which are considered excellent quality for differentiated markets.

Keywords: Coffee quality, Water footprint, processing, Wastewater, Specialty coffees

1.- INTRODUCCIÓN GENERAL

La producción de café (*Coffea arabica* L.) es una actividad de importancia económica que se realiza en más de 52 países, se trata de productores minifundistas quienes deben sortear principalmente los altibajos en los precios de mercado, mismos que fluctúan de acuerdo con la oferta y demanda internacional (Rivera Rojo, 2022).

Los países que producen la mayor cantidad de café son Brasil, Vietnam y Colombia; México ocupa el décimo primer lugar en el mundo. Su producción tiene importancia socioambiental y económica, ocupa una superficie de aproximadamente 700 mil has y aporta al Producto Interno Bruto el 0.66 % y por los beneficios agroindustriales con un 1.3 %. Los principales productores en el país son; Chiapas con el 41 %, Veracruz con el 25 % y Puebla con el 15 % (SADER, 2018, Escamilla-Prado et al., 2021).

De acuerdo con el United States Department of Agriculture (2023) se espera que la producción mundial de café para este año 2023 tenga un incremento en 5.3 millones de sacos de café verde en comparación con el año anterior, sumando un total de 178.6 millones de sacos. Dichos pronósticos resultan alentadores para los 170 países que participan en esta actividad económica alrededor del mundo.

En Veracruz se tienen 143 mil ha sembradas y con una presencia de aproximadamente 40 mil productores que se ubican sobre todo en la zona de las altas montañas, así también los Tuxtlas y la Huasteca, para las altas montañas se mencionan los municipios de Coscomatepec, Coatepec, Huatusco, Ixhuatlán del Café, Zentla y, también Córdoba, Tezonapa y Zongolica (SADER, 2018; Sánchez Hernández et al., 2019; Vargas-Aroyave et al., 2020) con una producción enfocada en el mercado internacional 80 % como son los Estados Unidos de Norteamérica, Alemania, Bélgica y España (Mestries, 2006).

Sin embargo, la cafeticultura actualmente está pasando por diversos problemas: socioeconómicos, ambientales y técnicos, que podrían provocar serias afectaciones económicas al sector, dentro los que de destacan los bajos precios, la calidad del aromático, problemas fitosanitarios como roya (*Hemileia vastatrix* Berkeley y Broom), y un mal manejo agroecológico del cultivo. Todo esto ha empobrecido a las regiones cafetaleras del país, por lo que se han generado diversas acciones desde las comunidades, dentro de ellas el abandono de los cafetales, migración, sustitución del cultivo, pérdida de biodiversidad, y bajos niveles de ingreso familiar, en donde el cafetalero tiene que emplearse en otros trabajos ajenos a dicha labor.

A partir de este panorama resulta necesario analizar la sostenibilidad en la cadena productiva de estos sistemas agroforestales de café, incluyendo la sostenibilidad del beneficiado, calidad del grano y su huella hídrica de beneficiado que dichos sistemas están generando en relación con el aromático, con lo cual es posible generar acciones que apoyen al pequeño productor manteniendo sus sistemas de producción obteniendo otros ingresos y además, poder comercializar un café diferenciado a partir de un manejo de la producción y un mejor beneficiado. El presente estudio pretende coadyuvar a que esto sea posible por medio del análisis de la sostenibilidad de los tipos de beneficiado y la calidad física y sensorial, con lo cual sería posible generar opciones de mercado de especialidad, los cuales actualmente se manejan por el tipo de variedad y su establecimiento en microlotes, forma de beneficiado y calidad física y sensorial, con este estudio se aportará información robusta para cafeticultores y tomadores de decisiones de toda la cadena de valor del aromático.

Por tales motivos, en esta investigación se planteó un objetivo general y tres objetivos particulares.

1.1.- Objetivo general

- Evaluar las tecnologías del proceso de beneficiado del café, la huella hídrica, así como la calidad física y sensorial del grano de productores en la región de Huatusco, Veracruz.

1.2.1.- Objetivos específicos

- Evaluar el uso y la calidad del agua en los métodos de beneficiado utilizados por los productores cafetaleros de la región de Huatusco, Veracruz. México.
- Valorar la huella hídrica de la producción y beneficiado de café de la región de Huatusco, Veracruz, México.
- Determinar la calidad física y sensorial del grano de café en tres tipos beneficiado, en los agroecosistemas de café en la región de Huatusco, Veracruz. México.

1.3.- Hipótesis general

- Las tecnologías utilizadas en los procesos de beneficiado, así como la huella hídrica y la calidad físico-sensorial del grano de café, permitirán a los productores tomar decisiones en cuanto a un nuevo modelo de cafecultura sostenible en la región de Huatusco, Veracruz, México.

1.3.1.- Hipótesis específicas

- Al identificar las alternativas tecnológicas para disminuir las afectaciones causadas por los métodos de beneficiado del café al medio ambiente y la salud humana, se puede transitar a una cafecultura más sostenible.
- Los tres métodos de beneficiado del café presentan la misma huella hídrica verde, gris, así como en el manejo del agua generados en la industria cafetalera, lo que podría repercutir en una cafecultura más sostenible en la región de Huatusco, Veracruz.

- La calidad física y sensorial del grano de café es diferente entre ellas y está relacionada con los métodos de beneficiado que realizan los productores de café en la región centro de Veracruz.

1.4.- Estructura de las tesis

El manuscrito se encuentra estructura de la siguiente forma: Capítulo 2 se ubica el marco teórico y metodológico, en el cual se plasman los criterios para cumplir con los objetivos planteados.

En el Capítulo 3 se realizó una revisión de literatura para identificar el uso y manejo del agua en el beneficiado de café, en el que se identificaron los principales tratamientos de efluentes del beneficiado, y se identificaron tipos de tratamientos para manejo de residuos sólidos y líquidos, su funcionamiento, capacidad y país donde se desarrolló, la búsqueda se realizó en un periodo de 1980 hasta 2023. Esto con el propósito de analizar algunas alternativas del manejo de los efluentes generados en el beneficiado del café para mostrar aquellos tratamientos que ha resultado positivos.

El Capítulo 4 se realizó una mediación de la huella hídrica verde y gris generada en el beneficiado del café, así como el gasto de agua que se genera en dicho proceso, en la zona centro de Veracruz. Actualmente se desconoce la huella hídrica en la producción de café en la región de Huatusco, la cual es una de las zonas de mayor importancia en la producción y exportación de café en dicho estado. Con esto se pretende dar a conocer una aproximación sobre la medición de la huella hídrica para tomar decisiones futuras.

En el Capítulo 5 se determinó la calidad física y sensorial del grano en tres métodos beneficiado, en los agroecosistemas de café en la zona centro del Veracruz, México. Y finalmente conclusiones y algunas recomendaciones sobre lo encontrado.

1.5.- Literatura citada

Escamilla-Prado, E., Tinoco-Rueda., JA., Pérez-Villatoro., HA., Aguilar-Calvo., A. de J., Sánchez-Hernández., R. & Ayala-Montejo, D (2021). Transformación socioecológica en el agroecosistema café afectado por roya en Chiapas, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 44(4). 643-653. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.4.643>

Mestries B. F (2006). Migración internacional y campesinado cafetalero en México. Fases circuitos y trayectorias migratorias. *Análisis Económico XXI*, (46), 263-289. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41304612>

Rivera-Rojas., CR (2022). Competitividad del café mexicano en el comercio internacional: un análisis comparativo con Brasil, Colombia y Perú (2000-2019). *Análisis económico*, 37(94), 181-199. <https://doi.org/10.24275/uam/azc/dcsh/ae/2022v37n94/rivera>

Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. (2018). México, onceavo productor mundial de café. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/mexico-onceavo-productor-mundial-decafe?idiom=es>

Sánchez-Hernández., M. de la L., Martínez S., CE., Alarcón P., SA & Cabrera NA (2019). Economía agroalimentaria: Análisis de la producción, comercialización y problemática del cultivo del café. *Biológico Agropecuario Tuxpan*, 7(2), 79–86. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v7i2.33>.

United States Department of Agriculture (2022-2023). Coffee: World Markets and Trade. Foreign agricultural Service. <https://fas.usda.gov/data/coffee-world-markets-and-trade>.

Vargas-Aroyave., LP., Bernal-calderón., LV & Torrente-rocha, JJ (2020). Empoderamiento de la mujer y capacidad de agencia en la caficultura:

el caso de la asociación Ingemur. *Veritas & Research*, 2(1), 60–68.
<https://n9.cl/png5f>

2.- MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

La agricultura multifuncional como concepto empezó a tener importancia debido a la Unión Europea, esto, a partir de las conferencias de Helsinki donde se tocaron temáticas relacionadas con la importancia ambiental de la agricultura, en 1997, y en Maastricht en el año 1999 con las temáticas de agricultura, suelo y multifuncionalidad. En estas reuniones que se realizaron principalmente en Europa, se afirmaba que la agricultura tiene diferentes funciones, además de las ya reconocidas en ese tiempo e incluyendo las dimensiones sociales y ambientales. Las características de la agricultura desde el punto de vista económico y productivo son bastante conocidas. Es común mencionar que el sector agrícola provee materias primas para la agroindustria, que generan ganancias debido a las exportaciones de diferentes productos, y a su vez hacer crecer económicamente diferentes regiones y las economías regionales. (Gudynas, 2001).

En los ecosistemas y agroecosistemas se ha estado utilizando el término “sostenible” desde hace ya varios años. En el ámbito de la pesca, por ejemplo, se utiliza hace mucho tiempo la frase de “producción sostenible a largo plazo”, desde 1972 se ha tenido presente el planteamiento del crecimiento y desarrollo sostenible a nivel global. A partir de la Conferencia de las Naciones en relación con el Medio Ambiente que se llevó a cabo en Suecia, fue presentado el estudio sobre los límites del crecimiento de la humanidad: que fue un informe desarrollado por el Club de Roma, en dicho estudio, se habló sobre la sobreexplotación de los recursos, lo que se vería reflejado en un colapso de la humanidad, por lo que era necesario tomar acuerdos para no llegar a terminar con los recursos del planeta y culminar generando un posible debacle de la raza humana. El autor menciona entonces que: la visión actual del mundo debe tener

un enfoque no sólo sostenible sino también holístico, tomando en cuenta los ámbitos relacionados con las actividades económicas, protección de ambiente y el bienestar de la sociedad. Los puntos planteados por desarrollo sostenible (ODS) están enfocados a ser socialmente incluyentes y sostenibles y resilientes en el largo plazo (Sachs & Vernis, 2015).

Posteriormente, en la Agenda 21 que fue realizada en la Cumbre de Rio de Janeiro en 1992 se retomó la temática de la multifuncionalidad en la agricultura enfatizando la importancia de este nuevo concepto mucho más completo (CNUMAD, 1992) y para el año 1998 fue nuevamente analizado el concepto por la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (Gerritsen & Mastache, 2020).

La multifuncionalidad en la agricultura presenta diferentes temáticas de suma importancia desde el punto de vista ambiental, genera servicios ecosistémicos, está relacionada con el contexto social y económico de los campesinos y sus familias. En este sentido métodos de cultivo como la agroforestería proveen estas funciones, algunos ejemplos que se mencionan son: su función como sumideros de carbono, conservar biodiversidad, y son capaces de retener más agua en el mismo, mayor diversidad para atracción de insectos polinizadores, poseen belleza escénica promoviendo el turismo rural el cual genera mayor bienestar económico a las comunidades que tienen estos sistemas de producción los cuales resultan ser mucho más resilientes (Holguin, 2017).

Los cafetales tradicionales con sombra diversificada de café tienden a ser más multifuncionales, pues proveen servicios agro-ecosistémicos, y en este sentido, se puede mencionar la regulación de la temperatura debido a la sombra, la generación de interacciones sociales, culturales y económicas que los cafetales sin sombra no proveen. Los árboles y demás estratos de los sistemas agroforestales de café proveen los recursos adecuados para la producción y desarrollo de sinergias multifuncionales (Soto-Pinto, 2020).

Zuluaga (2015) menciona que se tienen especies dentro del sistema agroforestal de café, las cuales suelen ser empleadas como alimento en las comunidades

cafetaleras o para alimentar animales, en curación de algunas afecciones, material de construcción e incluso ceremoniales como es el caso de algunas especies de orquídeas, así como también menciona el maíz, frijol, yuca, plátano y aguacate como alimento. Esto pone de manifiesto los vínculos de la diversidad existente, con prácticas y conocimientos locales lo que determina que estos sistemas de producción los cuales presenta bondades económicas, sociales y sobre todo ambientales ya que se protege el capital natural biodiverso que existe en estas regiones cafetaleras.

2.1-. Beneficiado del café

Beneficiar el café consta de diferentes etapas lo cual permite llevar el fruto maduro desde la cereza hasta café pergamino seco, en este proceso se van eliminando las diferentes capas que presenta el fruto y que finalmente puede ser secado al sol o mediante máquinas secadoras para su conservación a humedad del 12 % (Puerta, 2000).

2.2-. Métodos de beneficiado

2.2.1-. Beneficiado húmedo

Consiste en las siguientes etapas: recolección del café en cereza, despulpado, remoción del mucílago, al eliminar la pulpa y también el mucílago que puede ser por medio de máquinas se procede a fermentar los granos de café en tanques de cemento o tinas con agua limpia, posteriormente sigue el secado hasta obtener café pergamino seco, que luego se trilla para producir café almendra (café verde) para exportación (Puerta, 1999; Evangelista et al., 2014).

2.2.2-. Beneficiado vía seca y/o natural

El proceso por vía seca consiste en el secado del grano de café cereza y por lo regular el secado se realiza con exposición al sol en plataformas de madera y/o cemento. La cáscara compuesta por la pulpa, el mucílago y el pergamino se retira por medio de una máquina (Puerta, 1999).

2.2.3.- Beneficiado vía semihúmedo o despulpado

Se trata de un método de relativamente reciente que consiste en eliminar la pulpa o cáscara del café y sin eliminar el mucílago, una vez retirado este se pone a secar inmediatamente al sol, en zarandas o incluso secadoras mecánicas, el resultado de este proceso son tres diferentes coloraciones en el pergamino: puede ser amarillo, rojo o negro; que fue provocado por las diferentes enzimas del mucílago que fueron oxidadas por el aire y generan una bebida que tiene características organolépticas fuertes (Untiveros, 2021).

2.3.- Huella hídrica

2.3.- Agua virtual o huella hídrica

De acuerdo con Parada-Puig (2012) el agua virtual y la huella hídrica son conceptos que surgen en la década de los noventa. El concepto de huella hídrica aplicada a diferentes productos tanto agrícolas como industriales consiste en medir el agua que se consume desde la producción hasta el productor final, en el caso de café es la contabilización de agua utilizada desde el desarrollo de la planta hasta la preparación de la bebida, contrario a otros métodos de medición en donde el uso del agua no es contabilizado en el bien final. Con esta metodología es posible conocer que productos agrícolas o industriales son los que utilizan una mayor cantidad de agua, cuales presentan mayor eficiencia y en donde están ubicados geográficamente para poder tomar decisiones en relación con el uso del recurso hídrico y también generar información al consumidor sobre el uso del agua en la producción de distintos productos.

El método de medición denominado huella hídrica tiene la capacidad de medir el volumen de agua total de un determinado producto, empresa, ciudad e incluso un país determinado. A su vez, este método divide la huella hídrica total en tres subcomponentes que son la huella hídrica azul, verde y gris, estas se utilizan para hacer la medición total de un bien o servicio. (Schneir, 2015).

Por otro lado, una persona también genera huella hídrica y puede ser medida, pero se deben tomar en cuenta no sólo su rutina de vida sino también el agua que consume diariamente (Fonseca, Ariza & Ortega, 2016).

Chapagain & Hoekstra (2007) mencionan que la huella de agua está relacionada con el uso en la producción y transformación de bienes o servicios de los diferentes países. Estos autores consideran el agua interna requerida para producir un bien, por ejemplo, caña de azúcar, trigo y café en un sistema de producción y también, toman en cuenta el agua usada por el país importador de este bien y el agua que usa en el proceso de transformación de esa materia prima. Países como Estados Unidos y China son los que presentan una huella hídrica más alta a nivel mundial entre 700 a 2430 m³ de uso anual principalmente en la agricultura y la producción de carne.

2.4-. Calidad del café

Un café de calidad está relacionado con un manejo adecuado de la producción y postcosecha del producto hasta la preparación de una bebida, que ofrezca características organolépticas sobresalientes. En este sentido, los diferentes atributos que contenga un grano de café como el origen, suelo, manejo y los componentes químicos, microbiológicos, físicos y sensoriales pueden colocar este producto con un mejor precio en el mercado lo que beneficia toda la cadena productiva y al consumidor. La calidad del café se puede medir por medio de un análisis físico sensorial, para esto, se necesitan saber las cualidades del grano, el análisis que se realiza, y donde se miden estas características, esto genera información relevante en cuanto al café que se cultiva en un determinado lugar. Para esto se toma en cuenta defectos en el grano como son: granos negros, avinagrados, dañados por hongo, dañados por insectos y también los granos sanos y cualidades al preparar y analizar la bebida como es el aroma, cuerpo, acidez y notas (Osorio, 2021).

2.4.1-. Calidad del grano

En el café se identifica la calidad del grano por medio de las cualidades físicas y organolépticas que contenga, y es analizado por un panel de expertos antes de ser comercializado, en el mundo los consumidores de café buscan que la bebida tenga excelente sabor, acidez, aroma y un contenido regular de cafeína (Puerta, 2013).

2.4.2-. Calidad física

Los defectos de la almendra no apreciados dañan el aspecto físico del grano, así mismo, producen bebidas con aromas y sabores desagradables o puede llegar hasta la pérdida de su inocuidad. En este sentido, los granos brocados, vinagres, negros, decolorados, mordidos, y mohosos, son los defectos del café que tienen mayor efecto negativo en la calidad de la bebida. (Puerta-Quintero, 2016).

2.4.3-. Calidad sensorial de la bebida

La calidad del grano del café se observa por su apariencia sana y la madurez, en el caso del grano pergamino este debe tener un color amarillo regular, el olor del grano debe ser agradable y con humedad adecuada. Al retirar el pergamino y sólo queda la almendra esta debe ser de color azulado, el tamaño de la almendra difiere dependiendo de la variedad y puede ser calculado a partir del paso de la almendra por mallas de distintos tamaños (Puerta, 2013). La metodología para medir la calidad sensorial del café se explica con los siguientes atributos del grano:

Aroma: En el momento del tostado de café se presenta la fragancia y al ser preparada la bebida se llama aroma. Si se realizó un adecuado proceso de cosecha y postcosecha del grano de café se presentará una intensidad y aromas agradables reflejo de un excelente trabajo del productor y torrefactor del café (Puerta, 2013; Osorio, 2021).

Acidez: Es un atributo de la bebida del café inducido por los ácidos que están presentes en el grano. En los cafés arábigos que se procesan por el método húmedo se presenta esta cualidad (Puerta, 2013; Osorio, 2021).

Amargor: Se trata de un componente natural de la bebida que es generado por la presencia de trigonelina y la cafeína, los fenoles y ácidos, el grado de presencia de este atributo dependerá del torrefactor y las distintas formas de preparación de la infusión de café (Osorio, 2021).

Cuerpo: Este atributo es posible reconocerlo por medio del tacto, los catadores de café lo realizan de esta forma. La mayor o menor sensación que la bebida presente está relacionada con los sólidos solubles que a su vez depende de la calidad del grano, el tostado, el agua, la temperatura y la forma de preparar la infusión (Osorio, 2021).

Dulzor: Los cafés arábigos presentan este atributo debido a la suavidad y los azúcares que contienen, a diferencia del café robusta que tiende a ser más amargos por el contenido de cafeína (Osorio, 2021).

Sabor: Este atributo se conoce cuando el catador a través de los sentidos prueba la bebida de café, en ese momento logra identificar el dulzor, la acidez, el amargor y las demás particularidades del café preparado y esto lo conjunta también con el tacto identificando la astringencia y cuerpo, y lo logran a través de muchas sesiones de catación de la bebida (Osorio, 2021).

Sabor residual: Es el remante que se prolonga en la boca del catador, posterior a degustar y escupir la infusión, de tal manera que, el catador puede identificar sensaciones agradables, sabores dulces y afrutados y una taza limpia o por el contrario impresiones poco agradables como es una taza sucia, agria, etc (Osorio, 2021).

Impresión global: Se trata de la evaluación general de la calidad de la bebida de café emitida por el catador y es la sumatoria de todos los atributos que se han mencionado y descrito anteriormente (Osorio, 2021).

25.- Área de estudio

La región de Huatusco se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas $19^{\circ} 04'$ y $19^{\circ} 13'$ de latitud N; y a los $96^{\circ} 41'$ y $97^{\circ} 04'$ de longitud W en relación con la altitud se tiene que se ubica desde los 400 hasta los 2000 msnm. Tiene colindancia norte con el estado de Puebla y los también con el municipio de Totutla, Sochiapa y Comapa; al este colinda con Comapa y Zentla; y por la parte sur con Zentla, Tepatlaxco, Ixhuatlán del Café y Coscomatepec. El clima presente es: Semicálido húmedo y con presencia de lluvia en todo el año, también se tiene la presencia del del clima Semicálido húmedo con mucha lluvia en el verano y subhúmedo con lluvias en verano y mayor humedad (INEGI, 2010). El municipio de Tlaltetela se encuentra ubicado a los $19^{\circ} 12'$ y $19^{\circ} 23'$ de latitud N y las coordenadas $96^{\circ} 36'$ y $97^{\circ} 02'$ de longitud W; presenta una altitud que va desde los 100 hasta los 1 600 msnm. Por su parte Totutla se ubica a los $19^{\circ} 11'$ y $19^{\circ} 17'$ de latitud N; y a los $96^{\circ} 49'$ y $96^{\circ} 59'$ de longitud W; se presenta en una altitud que va desde los entre 700 hasta los 1500 msnm (INEGI, 2010).

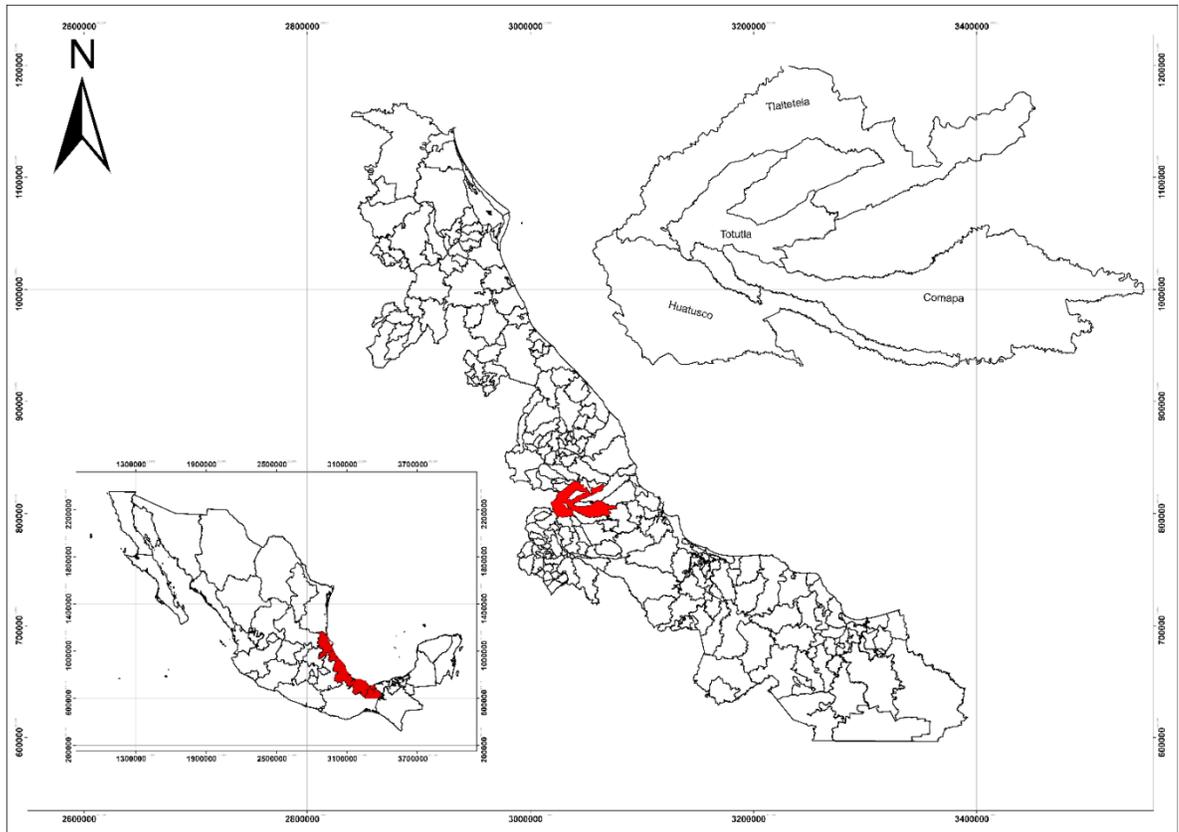


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

2.6-. Literatura citada

Chapagain., AK. & Hoekstra., AY. (2007). The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands. *Ecological Economics*, 64(1), 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.022>

Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. (1992). Organización de las Naciones Unidas. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>

Evangelista., SR., da Cruz Pedrozo Miguel., MG., de Souza Cordeiro., C., Silva, C F., Marques Pinheiro, A C., & Schwan, RF. (2014). Inoculation of starter cultures in aseme-dry coffee (*Coffea arabica*) fermentation process. *Food Microbiology*, (44), 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.05.013>.

- Fonseca, O., DD., Ariza, J., AL., & Ortega, J., AT. (2016). Determinación de la Huella Hídrica. *Publicaciones e Investigación*, 10, 39-46. <https://doi.org/10.22490/25394088.1586>
- Gerritsen, P., & Mastache., A. (2020). Introducción al estudio de la multifuncionalidad en la agricultura. Guadalajara, México. Fondo editorial CUCOSTASUR GRANA. http://www.cucsur.udg.mx/sites/default/files/introduccion_al_estudio_de_la_multifuncionalidad_en_la_agricultura.pdf
- Gudynas, E. (2001). Multifuncionalidad y desarrollo agropecuario sustentable. *Nueva Sociedad*, (174), 95-106. https://static.nuso.org/media/articles/downloads/2980_1.pdf
- Holguín, VA. (2017). Multifuncionalidad y resiliencia en sistemas agroforestales. *Agroforestería neotropical*, 7. <https://core.ac.uk/download/pdf/229557159.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Compendio de información geográfica municipal del estado de Veracruz Llave. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/30/30193.pdf
- Osorio, V (2021). La calidad del Café. En Centro Nacional de Investigaciones de Café. Cenicafé (Eds.), *En guía más agronomía, más productividad, más calidad* (3ª ed., págs. 219–234) Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0014_12
- Parada, PD. (2012). El agua virtual: conceptos e implicaciones. *Orinoquia*, 16(1), 69-76. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-37092012000100008&script=scj_arttext
- Puerta, GI. (1999). Influencia del proceso de beneficio en la calidad del café. *Cenicafé*, 50(1), 78-88. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/58>

- Puerta, G. I. (2000). Beneficie correctamente su café y conserve la calidad de la bebida. Centro Nacional de Investigaciones de Café. *Cenicafé*, (276), 1-8. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10778/561>
- Puerta, Gl. (2013). Calidad del café. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura. *Cenicafé*, (3), 81–110. https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_30
- Puerta-Quintero., Gl. (2016). Calidad física del café de varias regiones de Colombia según altitud, suelo y buenas prácticas de beneficio. *Revista Cenicafé*, 67(1), 7-40. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/676>
- Sachs, JD., & Vernis, RV. (2015). *La era del desarrollo sostenible*. Deusto editorial de Centro Libros PAFP, S.L.U. https://static0planetadelibroscommx.cdnstatics.com/libros_contenido_extra/31/30978_La_era_del_desarrollo_sostenible.pdf.
- Schneir, ER. (2015). La huella hídrica como un indicador d sustentabilidad y su aplicación en el Perú. *Saber y Hacer*, 2(1), 34-47. <https://revistas.usil.edu.pe/index.php/syh/article/view/40>
- Soto-Pinto, L. (2020). Importancia de la sombra en territorios cafetaleros. os Sistemas Agroforestales de México: Avances, experiencias, acciones y temas emergentes. 111-1121. <https://doi.org/10.22201/enesmorelia.9786073040761e.2020>
- Untiveros Soldevilla, C. M. (2021). Métodos de beneficio (Honey, lavado y natural) sobre la calidad organoléptica de Coffea arábica L. Variedad Catimor. Tesis de Ingeniería. Universidad Nacional del Centro del Perú. Abierto. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/7069/T010_46577449_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Zuluaga, GP., & Gómez, N. (2015). *Multifuncionalidad de los cafetales bajo sombra, en el municipio de Caramanta, Colombia*. En el V Congreso

3.- TECNOLOGÍAS DEL BENEFICIADO DE CAFÉ Y TRATAMIENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS EN AMÉRICA: RETOS Y PERSPECTIVAS

3.1.- Resumen

La bebida del café es muy popular en el mundo. Sin embargo, el procesamiento de los granos genera residuos contaminantes. Es posible disminuir sus afectaciones mediante su aprovechamiento y a su vez generar subproductos. El objetivo fue analizar las alternativas de manejo de los efluentes generados en el beneficiado de café para disminuir sus afectaciones y mostrar tratamientos que han resultado positivos. Se utilizaron buscadores especializados con base de datos como: Researchgate, Google scholar, CIRAD, ACATIE, IICA, Elsevier, Science direct, Redalyc, Scopus. Se realizó una exploración de información relacionada 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 y sólidos, 3) funcionamiento de estas tecnologías, capacidad, lugar donde se desarrolló la investigación, variables medidas, así como la capacidad de estos sistemas. El periodo de búsqueda estaba planteado del año 2010 hasta 2023, pero se decidió ampliar la búsqueda a partir del 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 tratamientos aerobios. Se revisaron alrededor de 100 documentos para la realización del escrito.

Se reportan investigaciones desde el año 1980. Colombia y México se han enfocado en el desarrollo de maquinaria para mecanizar las operaciones del beneficiado para disminuir el agua utilizada, así como sistemas de tratamientos anaerobios, biodigestores y humedales. 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. Se encontró que la tecnología de la biodigestión anaerobia es la que más se utiliza para el tratamiento de los efluentes líquidos y con mejores resultados. Para el efluente sólido, se utilizan diferentes alternativas para sustrato como lo son extracción de sustancias para la industria, compostaje, biomateriales, etc.

Palabras clave: tratamiento de desechos, aguas residuales, requerimiento biológico y bioquímico de oxígeno, carga contaminante por metales pesados.

3.2-. Abstract

Background. The coffee drink is extremely popular in the world. However, grain processing generates polluting waste. It is possible to reduce their impact by exploiting them and in turn generating by-products. Analyze the alternatives of managing the effluents generated in the beneficiary of coffee to reduce their impacts and show treatments that have been positive. Specialized database search engines such as: Researchgate, Google scholar, CIRAD, CATIE, IICA, Elsevier, Science direct, Redalyc, Scopus were used to obtain the information. An information survey was carried out on the following topics: 1) history of the use of effluent treatment systems in the beneficiary of coffee, 2) types of treatment for liquid and solid waste management, 3) operation of these technologies, capacity, location where the research was developed, variable measurements, as well as the capacity of these systems. The search period was proposed from 2010 to 2023, but it was decided to extend the search from 1980 to 2023. The history of starting systems for the treatment of waste generated in the beneficiary of coffee was also investigated. The keywords used for the search were: humid benefited, wastewater, solid and liquid waste, coffee by-products, treatment systems, chemical oxygen demand, biological oxygen demand, total solids, turbidity, anaerobic and aerobic treatments. Around 100 documents were reviewed for writing. Investigations have been since 1980. Colombia and Mexico have focused on the development of machinery to mechanize the beneficiary's operations to reduce the water used, as well as anaerobic, biodigester and

wetland treatment systems. Implications. It is necessary to know the main methods of treatment of wastewater in the process of the beneficiary of coffee, to determine the most suitable in the coffee-growing regions. It was found that anaerobic biodigestion technology is the most widely used for the treatment of liquid effluents and with better results. For solid effluent, different alternatives for substrate are used such as extraction of substances for industry, compost, biomaterials, etc.

Keywords: waste treatment, wastewater, biological and biochemical oxygen requirement, heavy metal pollutant loa.

3.3- Introducción

El café es el segundo producto más comercializado en el mundo y genera diferentes subproductos y residuos. En este sentido, el proceso industrial del café consiste en separar el grano removiendo la cáscara y la parte mucilaginosa del fruto. Esto genera gran cantidad de cáscara (pulpa) que constituye el primer subproducto, los residuos de café y subproductos generados durante el procesamiento constituyen una fuente alta de contaminación que provoca problemas ambientales en regiones cafetaleras (Parra-Huertas, 2015).

Existen diferentes tipos de beneficiado los cuáles son mencionados en la literatura, por ejemplo, el método de procesamiento del café más antiguo utilizado por los productores es secar los frutos al sol para obtener granos de café “natural” (beneficiado vía seca). En Etiopía y Brasil, los productores procesan el café por este método. De esta manera, 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).

La industria del café 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 m⁻³ por cada 100 toneladas de café procesado (Chanakya & Alwis, 2004; Del Real Olvera

& Gutiérrez, 2010; Morales et al., 2018; Certimex, 2020). En contraste, en Colombia la cantidad de agua que se consume en el beneficiado “ecológico” es de 1 L kg de café pergamino Figura 1 (Puerta-Quintero, 1999) a diferencia del beneficiado húmedo tradicional en México que llega a consumir hasta 40-45 L Kg de café pergamino (Cadena, 2001; Rodríguez, 2015).

Existen diferentes técnicas para tratar los efluentes del beneficiado del café, se ha observado que el tratamiento para las aguas residuales del café es la digestión anaerobia con reactores presenta resultados positivos y tomando en cuenta los costos generados por esta tecnología. Desde el punto de vista de la sostenibilidad estos costos pueden ser devueltos mediante la creación de energía renovable como puede ser biogás. Existen otros como la fitorremediación, coagulación y procesos oxidativos avanzados (Castillo-Jara, 2022).

Por lo tanto, el objetivo de esta revisión fue analizar las alternativas de manejo de los efluentes generados en el beneficiado de café para disminuir sus afectaciones y mostrar tratamientos que han tenido buenos y excelentes resultados.

3.4-. Metodología

Para la obtención de la información se utilizaron buscadores especializados en base de datos como: Researchgate, Google scholar, CIRAD, ACATIE, IICA, Elsevier, Sciece 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.

De manera preliminar se planteó únicamente la revisión en el idioma inglés y particularmente de artículos científicos; posteriormente, se decidió incluir artículos en español y portugués, al igual que la inclusión de tesis tanto de licenciatura, maestría, doctorado y congresos nacionales e internacionales. El periodo de búsqueda estaba planteado del año 2010 hasta 2023, pero se decidió

ampliar la búsqueda a partir del 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 alrededor de 100 documentos para la realización del escrito.

El análisis de la información se basó primeramente en:

- 1) Descripción del proceso de beneficiado de café y la utilización del agua
- 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 en sólidos y 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 cafetalera.

De los documentos seleccionados se leyó y analizó el resumen, resultados y conclusiones y a partir de la obtención de la información a detalle se procedió a la elaboración del escrito, tomando en cuenta el objetivo de la investigación.

3.5.- Beneficiado del café en América

En el proceso postcosecha del café existen principalmente dos métodos, el húmedo y el seco (Vincent, 1987 y Álvarez et al., 2011). En el húmedo (Figura 2) 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).



Figura 2. Partes de fruto de café. Elaboración propia. Huatusco, Veracruz, México, 2023.

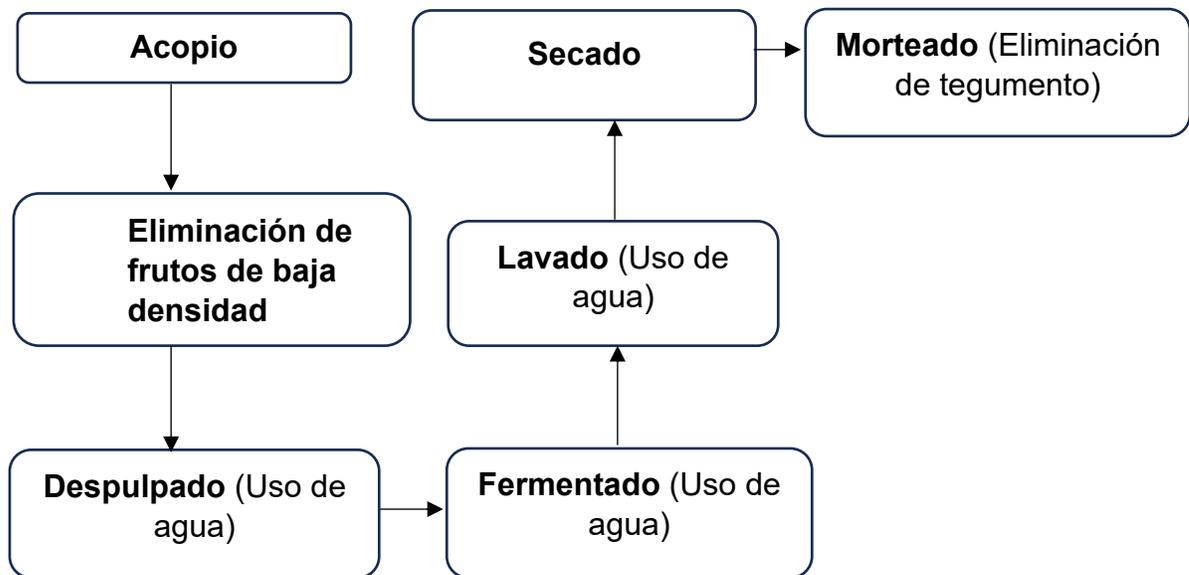


Figura 3. Proceso del beneficiado húmedo. Elaboración propia. Huatusco, Veracruz, México, 2023.

3.6-. Caso colombiano

El café colombiano se destaca por su alta calidad y su 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 2000 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).

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 en el beneficiado 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 están contribuyendo a tener sistemas de beneficiado más sustentables (Mejía-Zuluaga, 2018).

Desde 1986 hasta 1988 CENICAFÉ, desarrolló el despulpado sin agua, con despulpadoras horizontales, verticales o de discos. Se reporta que obtuvieron granos de calidad regular, y en el caso de la pulpa, la contaminación disminuyó hasta un 72 %. Posteriormente fue finalizada y perfeccionando la desmucilagadora de forma horizontal, utilizada por productores de café de Antioquia, Colombia. En donde se enlazó la tolva seca y el desmucilagador de origen mecánico, se agregó al equipo una zaranda cilíndrica con varillas cuya función era separar el café pergamino seco, del café (frutos sin despulpar).

Los resultados mostraron que se redujo el 95 % de la contaminación y que la pulpa y mucílago se usaron para producción de lumbricultura y uso en almácigos. De igual manera, el uso de agua de 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 and Sanz-Urbe, 2011).

3.7-. 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 encontró un total de 1962 beneficios húmedos y 443 secos distribuidos en los diferentes estados productores de café en México. Actualmente, en México se reportan 160 beneficios húmedos en las regiones cafetaleras (webscomercio.com., 2022). 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, 1988).

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 lodo (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 m^3 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 CaOH_2 , biocatalizador enzimático y, como tratamiento secundario lagunas de lodos y de oxidación anaerobia.

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 m^2 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 m^3 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).

3.8.- Beneficiado en Brasil

El beneficiado vía seca es popular en Brasil y África. En este proceso el uso del agua es nula 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 gran 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; Puerta-Quintero, 2000; Selmar et al., 2008).

3.9.- 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 de café 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.

3.10.- Efluentes del beneficiado

En Quindío, Colombia las aguas residuales del beneficiado del café 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 ($P \leq 0,05$) por el tiempo de fermentación. 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 de café 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 29 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 está 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 y 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).

3.11.- Características de los afluentes

En Colombia, se demostró que el consumo de agua fue de 1.8 L kg café cereza, y por kg se obtuvo 108.2 g de residuos secos 76.8 % de cascarilla P, y 23.2 % y de Mucílago (M), y de N se obtuvo 1.84 g 75.4 % de P y 24.6 % de M, los cuales generaron 115.1 g de DQO (Demanda Química de Oxígeno), 737 % de P y 263 % de M. Además, la pulpa después de su transporte produjo residuo líquido que contenía 37.2 % en peso, la cascarilla ya limpia tuvo un peso del 62.8 % final, equivalentes al 41.4 % y 58.6 % en la DQO, el mucílago después de que se fermentó y lavado generó materia soluble de 86.6 %, y un 78.3 % contaminación química (Zambrano-Franco & Isaza-Hinestroza, 1998),

En la India se encontró que 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. Así, debido a la constitución química del mismo, 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 del café, 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, etc (Fernández & Springer, 2008; Espinoza & Monserrat, 2013; ; Fluker et al., 2018; Fonseca Sánchez et al., 2019).

En Perú en el método de beneficiado húmedo de café las aguas residuales suelen ser drenada a ríos o arroyos y también a suelos de uso agrícola sin haber sido tratadas lo que provoca contaminación ambiental, de igual manera, se presenta contaminación debido a la generación de gases por la pudrición de los residuos orgánicos sin ningún método de tratamiento. 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).

3.12.- Tecnologías de tratamientos 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 un par de etapas: primeramente, se mezclan la cascarilla 61-23 % con los azúcares del mucílago el agua y otros fluidos que salieron del proceso de eliminación mecánica, en una segunda fase se eliminan agentes insolubles por medio de un evaporador rústico. Con el evaporador trabajando a 15 h día se alcanza a eliminar el 100 % de la contaminación emitida en el proceso de beneficiado, para un sistema de producción cafetalero de con producción 240 Qq de pergamino seco. Con el desarrollo de esta tecnología se logra remover el 86.3 % DQO y 89.7 % DBO (Morales et al., 2003, Salazar et al., 2013; Oliveros et al., 2014).

3.13.- 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 en Colombia está complementada con el uso de biodigestores para mitigar el fuerte problema de contaminación de los ríos (Balseca and Cabrera, 2001; Fernández, 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. El óptimo de subproductos mezclados del café para mayor incremento de gas fue usar agua residual, 49 % de excremento vacuno y 51 % de excremento de cerdo medido por un de prueba cuadrática al 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 realizó un experimento similar en Santiago de Cuba usando efluentes de una despulpadora “ecológica” (Boizán et al., 2005; Guardia-Puebla et al., 2016; Fuilen & 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 y se identificó que los microorganismos paralizados degradaron mayor cantidad de materia orgánica y que a su vez, mejoró con la colocación de bacterias provenientes de un sistema metanogénico y con el uso de 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 reactores (Monroy Hermosillo et al., 1998) de diferentes tipos: destacando los filtros anaerobios elevados, sistemas híbridos de velocidad baja, con cama normal (UASB) y de cama granulada en expansión (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. La digestión anaerobia además del tratamiento del residuo genera compuestos energéticos como el metano CH₄ que potencian el uso de dicha tecnología de remediación. A partir de prototipos que usan el método de flujo elevado de cama de limos (UASB), piscina alterada (CSTR) y de tamiz anaerobio (UAF) estos diseños potencian la eficiencia del tratamiento anaerobio Cuadro 1.

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

Tratamiento	Capacidad	País	Referencia	DB O ₅	D Q O	Sólidos disueltos totales	N	Turbidez	Sólidos Suspendedos Totales	Sólidos Totales	Metano	K
Laguna Anaerobia	7000 m ⁻³	Brasil	Texera de Matos et al., (2000)	86 %	89 %	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	89 %

Biodigestor	30-60 m ³	Venezuela	García et al., (1995)	N/D	68 - 6 9 %	N/D	8 3 %	N/D	N/D	N/D	80 %	3 0 %
Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente Proceso	12-20 Kg m ⁻³	Colombia	Zambrano et al., (2015)	83 %	80 %	N/D	N/D	N/D	74 %	46 %	75 %	N/D
Anaerobio de separación por Membranas	2000 m	Varios países de América	Rojas et al., (2020)	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 & Sedano (2007)	N/D	49. 5 89 %	75 %	N/D	N/D	N/D	89,7 0 %	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 Fluído Presurizado	55 L m ⁻³	Perú	Macasig - Allasi, G. C. (2017)	59 %	88 %	N/D	N/D	33 %	N/D	70 %	N/D	N/D
Sistema Modular de	2000 m ³	Colombia	Matuk, Puerta & Rodríguez	80 %	83 %	N/D	N/D	N/D	79 %	45 %	N/D	N/D

Tratamiento Anaerobio			(1998) y Zambrano et al., (2006)										
Biorreactor anaeróbico con deflectores con sistema de membrana de microfiltración	1.5 m ³	México	Tacias - Pascacio et al., (2019)	N/D	81 %	61 %	N/D	90 %	100 %	72,60 %	N/D	N/D	
Reactor anaeróbico con baffles	40 L m ⁻³	Guatemala	Montes Peña & Pocasangre Collazos (2019)	65 %	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	

3.14-. 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, evaluaron 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* Lam.) que opera con un sistema aireado afluyente; (II) sistema no cultivado que opera con un afluyente aireado, (III) sistema cultivado de raigrás operar con un influente no aireado; y (IV) sistema no cultivado operando con un sistema no aireado afluyente, 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* L, y a *Colacasia 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* Mart. Solms) o Jacinto acuático. Una vez establecido el sistema y pasados 50 días de operación, el líquido que fluía del pantano de lodo con una DBO de 98 mg L y sólidos totales con 148 mg L, y un pH medido de 5; por lo que cumplieron con la normativa ambiental vigente. 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 & Rivero, 2014).

En Colombia se desarrolló un método para el tratamiento de residuos mediante el uso de polvo de moringa (*Moringa oleífera* Lam.) 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-Alegría et al., 2016; Quintero Yepes and Rodríguez-Valencia, 2019).

En Cuba, se realizaron la extracción de pectina de la pulpa de la especie (*Coffea canephora* Pierre ex Froehner) por medio de un secador solar, midieron diferentes parámetros como fue la del tiempo de la extracción de pectina y la temperatura, pH y la combinación líquido-sólido, el grado de pH influyó

significativamente en la extracción, donde se alcanzaron los mejores resultados a pH de 1. Para la pula en fresco el beneficio fue de 5.91 % y para la seca un beneficio de 4.99 %. Las pectinas que fueron separadas tuvieron datos de 82.1 % y 87.8 %. A partir de este trabajo es posible utilizar la separación de pectinas como una opción para su posible uso en otras industrias ya que los residuos de pulpa en café son abundantes y pueden emplearse para este fin (Serrat-Diaz 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 prototipos de aguas para limpiar aguas de origen residual (STAR) los cuales han sido establecidos y probados en países como Costa Rica, buscando apoyar con la reducción de gases de efecto invernadero. Para esto, empleó lagunas sedimentadoras, prototipo anaerobio y uso de riego en pasto estrella. Se observó que los campos de riego sobre el pasto fue el que tuvo menor emisión de gases que afectan la temperatura de la atmósfera, con valores de 4 kg de CO₂ equivalente por 250 Kg de fruta procesado, de igual forma, se tuvo el valor del tratamiento con lagunas con sedimentadores que fue de 400 kg de CO₂ por 400 L de fruta, donde el proceso se realiza mediante degradación aerobia. (Heredia, 2020)

De igual forma, un método de filtros biológicos acomodados en dos etapas, la primera etapa utilizó rocas denominadas pómez que contenían biofilm del microorganismo (*Saccharomyces cerevisiae* Meyen ex E.C. Hansen) en un espacio con alta porosidad y la segunda etapa utilizó carbón vegetal, 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* Chodat) 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 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 los 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.

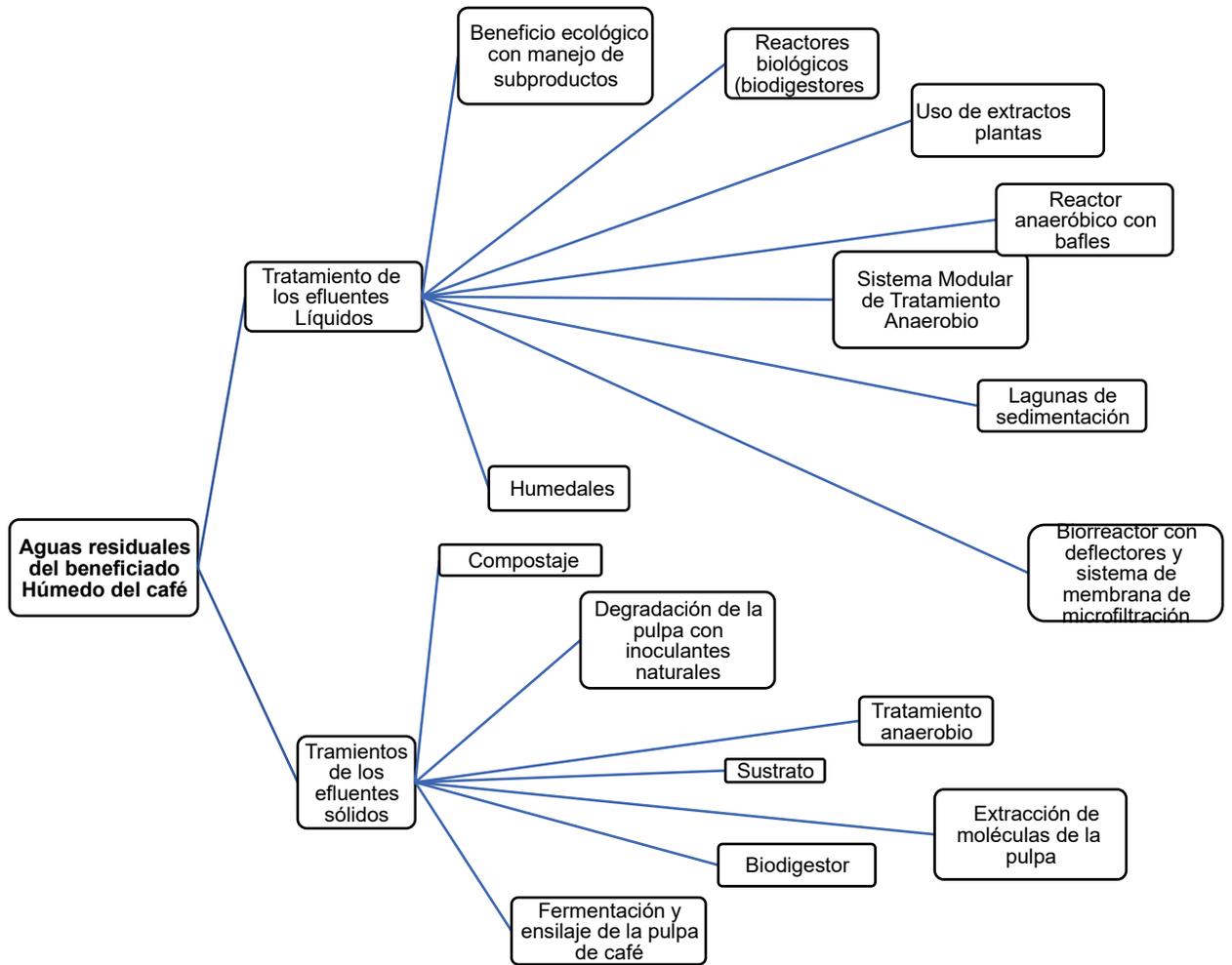


Figura 4. Métodos de tratamientos de aguas residuales del café. Elaboración propia. Huatusco, Veracruz, México, 2023.

3.15-. 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. La digestión anaerobia con reactores para el tratamiento de aguas residuales del beneficio húmedo es la opción tecnológica con resultados positivos. A pesar de que estos prototipos muestran buenos resultados, removiendo la DBO, SST, contenido de N y P, turbidez entre otros parámetros; la mayoría son escala de

laboratorio o planta piloto. Una ventaja es que los materiales para su elaboración suelen ser accesibles y con una vida útil larga. 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 kg usados en el beneficiado húmedo tradicional.

3.16-. Literatura citada

Acero-Reyes, NL., & Duque-Buitrago., LF. (2016). Fermentación de café por vía semi-húmeda para la obtención de café de especialidad "Honey", *Vitae*, 23, 656-660.

<https://search.proquest.com/openview/59659171e5fd46fb5902e52652843792/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1806352>

Algeciras, N., Barrera, R., Martínez, MM., Pedroza, A., Reyes, C., Rodríguez, E., & 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), 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), 117-143. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6583540>

Arrúa-Alvarenga, A., Quezada-Viay, MY., Fernández-Ríos, D., Moreno-Martínez, E., & Flores, Olivas, A. (2014). La Incidencia y distribución de hongos filamentosos durante el proceso de beneficio húmedo del café. *Steviana*, (6), 13-19. <https://revistascientificas.una.py/ojs/index.php/stevia/issue/view/137>

Álvarez, J., Smeltekop, H., Cuba, N., & 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), 34-42. <http://ucbconocimiento.cba.ucb.edu.bo/indexphp/JSARS>

Balseca, de la Cadena, DA., & Cabrera B., 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/>

Barreto, Zúñiga, J.C., Tovar, Lizcano, P., & Olaya, Amaya., A. (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), 105-114. <https://doi.org/10.25054/22161325.1849>

Boizán, MF., Pérez, SR., Savón, RB., Brown, AT., & Rey., YT. (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), 147-151. <https://federaciondecafeteros.org/app/uploads/2020/06/Revista-Ensayos-de-Econom%C3%ADaCafetera-Nos.-16-17.pdf>

Café, Campo y Ambiente (2021, agosto 16). 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, Per. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/92480>

- Castillo, M., Bailly, H., Violle, P., Pommères, P., & Sallée, B. (1993). Tratamiento de aguas residuales de café en la cuenca de Coatepec, Veracruz, México. *Turrialba Volumen*, 2(43), 143-150. https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=398420
- Certificadora Mexicana de Productos y Procesos Ecológicos. S.C. (2020, septiembre). Normas para la producción, el procesamiento y la comercialización de productos ecológicos. <https://certimexsc.com/cm/wp-content/uploads/2021/04/Normas-CERTIMEX-2020.pdf>
- Chanakya, H, N., & De Alwis, A., AP. (2004). Environmental issues and management in primary coffee processing. *Process safety and environmental protection*, 82(4), 291-300. <https://doi.org/10.1205/095758204323162319>
- Del Real Olvera, J., e Islas, Gutiérrez, J. (2010). Biodegradación anaerobia de las aguas generadas en el despulpado del café. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 12(2), 230-239. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote>
- Duguma, H., & Chewaka, M. (2019). Review on coffee (*Coffea arabica* L.) wet processing more focus in Ethiopia. *Acta Científica Agriculture*, 3(11), 11-15. doi: <https://doi.org/10.31080/ASAG.2019.03.0676>
- Espinoza, Ruguma, M. I., & Monserrat, Save., R. (2013). Efecto vertido aguas mieles en calidad físico-química del agua microcuenca Rio Cuspire Yalí, Nicaragua. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 2(7), 43-53. <https://core.ac.uk/reader/267026750>
- Espinoza Alejo, G., & 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, Boizán, M., Rodríguez, Pérez, S., Savón, Bermúdez, R. C., Brown, Terry, A., & Treto, Rey, Y. (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>
- Fernández, Michelena, ES., & Mejía, Espinosa., F. (2007). Modelo de administración para la operación sustentable y gestión de la calidad en las agroindustrias de café: estudio de caso. *Ingeniería Industrial*, 28(3), 14-24. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4786834>
- Fernández, L., & 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), 237-256. <https://doi.org/10.15517/rbt.v56i4.27230>
- Fernández, Pinzón., CA. (2017). Implementación de biodigestores para el mejoramiento de la calidad de vida de las familias campesinas. *Revista de Investigaciones Agroempresariales*, (3), 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. Oficinas del café. San José Costa Rica. <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., & Ferrerira, Silva, C. (2020). Protocol to select efficient microorganisms to treat coffee wastewater. *Journal of Environmental Management*, (278), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111541>
- Fluker, Puscan., RS., Meléndez, Mori, JB., Leiva, Tafur, D., Chávez Ortiz, J., & 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), 57-64. doi:10.5281/zenodo.3946741

Fuilen, Acarley., F., & Lawrence, Quipuzco, U. (2020). Producción de metano mediante digestión anaerobia de aguamiel, subproducto del beneficio húmedo del café. *Agroindustrial Science*, 10(1), 7-16
<http://dx.doi.org/10.17268/agroind.sci.2020.01.01>

Fonseca-Sánchez, A., Madrigal-Solís., H., Núñez-Solís, C., Calderón-Sánchez, H., Moraga-López, G., & Gómez-Cruz, A. (2019). *Uniciencia*, 33(2), 76-97. <http://dx.doi.org/10.15359/ru.33-2.6>

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., & Rivero, Méndez., J. (2016). Biosistema para purificar aguas residuales del beneficio húmedo de café, distrito La Coipa, departamento de Cajamarca, 2014. *Manglar*, 11(1), 43-50.
<http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2014.006>

García, S., Herrera, M., Behling, E., Gutiérrez, E., Chacín, E., & Fernández., N. (1995). Inhibidor natural de las aguas residuales de procesado de café en el tratamiento anaerobio. *Ciencia*, 3(3), 241-246.
<https://elibro.net/ereader/unanmanagua/16352>

Guardia-Puebla., Y., Jiménez-Hernández., J., Pacheco-Gamboa, R. F., Rodríguez-Pérez, S., & 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), 54-64.
<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.32441.16483>

Heredia, Araya., CHR. (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), 3-6.
<https://promecafe.net/wp-content/uploads/2021/03/Bolet%C3%ADn-163.pdf>
- Hue, N. V., Bittenbender, H. C., & Ortiz-Escobar, M. E. (2006). Managing coffee processing water in Hawaii. *Journal Hawaiian Pacific Agriculture*, (13), 15-21. <https://hilo.hawaii.edu/panr/writing.php?id=171>
- Loaiza, RR., & Pari, R., HM. (2013). Obtención de biogás como fuente de energía renovable a partir de los subproductos del café. *Revista Investigaciones Altoandinas*, 15(2), 241-252.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5893937>
- López Pantoja, CF., Rojas Gutiérrez, PA., Montaña Macias, LO., Tovar Quinayás, E. S., Rojas Ome, Y., Arcos, CA., Mercedes, O, C., & 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. *Agroecol. Cienc. Tecnol.* 3(1), 7-12. <https://hdl.handle.net/11404/6735>
- Monroy, Hermosillo, OF., Bottini, Meraz, G., Rodríguez, M., López Montoya, López L., & Macarie, Olivier., H. (1998). Digestión anaerobia en México: "Estado de la Tecnología". *Ingeniería y Ciencias Ambientales*. (39), 4-12.
<https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010017415>
- Macassi Allasi, GC. (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>
- Mejía-Lotero, A., Acero-Reyes, L., Duque-Buitrago, LF., & Serna-Jiménez JA. (2016). Fermentación de café por vía semi-húmeda para la obtención de café de especialidad "Honey", *Vitae*, 23(1), 656-660.
<https://www.proquest.com/docview/1783660599>

- Matuk-Velasco, V., Puerta-Quintero., G.I., & Rodríguez-Valencia., N. (1998). Impacto biológico de los efluentes del beneficio húmedo del café. *Cenicafé* 48(4), 234-252. <http://hdl.handle.net/10778/67>
- Mejía Zuluaga., 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]. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/21180/42683065.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Mera-Alegría, C F., Gutiérrez-Salamanca, M, L., Montes-Rojas, C, & Paz-Concha, JP. (2016). Efecto de la *moringa oleífera* L en el tratamiento de aguas residuales en el Cauca, Colombia. *Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*, (2), 100-109. <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/483>
- Molina Gómez., LV. (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. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9909>
- Montes Peña., AG., & 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 y Ambiente*, 14(1), 61–69. <https://revistas.usac.edu.gt/index.php/asa/article/view/1172>
- Morales, L, HN., Gómez, CR., Tascón, C, EO., & Mejía, FÁ. (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://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/36837>

Morales, Rojas, E., Hurtado, Burga, R., Chavez, Quintanta, S., Collazos, Silva, E. M., & Sánchez, Santillan., T. (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), 97-110.

<http://revistas.unj.edu.pe/index.php/pakamuros/article/view/185/223>

Morales, Paredes, A., Rivadeneira, Mendoza, BF., & García, Moreira., SE. (2018). Digestión anaerobia de las aguas residuales de la industria del café instantáneo. *Revista ESPAMCIENCIA* 9(1), 23-31.

[http://190.15.136.171/index.php/Revista ESPAMCIENCIA/article/view/152](http://190.15.136.171/index.php/Revista_ESPAMCIENCIA/article/view/152)

Murthy, Pushpa S., & Madhava Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition A review. *Resources, Conservation and Recycling*, (66), 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.

<https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/tratamiento-de-aguas-residuales-con-tecnologia-anaerobia-en-el-sector-de-conservasvegetales-ventajas-del-sistema-biotimuasb-frente-alic#:~:text=Los%20procesos%20anaerobios%20son%20id%C3%B3nes,de%20productos%20de%20origen%20vegetal>

Olguin, E., Sánchez, G., & Mercado., G. (2005). Transferencia a Productores de Estrategias y Tecnologías Limpias para el Manejo Sostenible del Agua en Agroindustrias Tropicales. [Presentación] 1^{er} Congreso Internacional de Casos de Éxito de Desarrollo Sostenible del Trópico. Boca del Río, Veracruz México.

<https://www.uv.mx/universo-hemeroteca/177/vinculacion/vinculacion01.htm>

- Oliveros-Tascón, C. E., & Sanz-Uribe, J. R. (2011). Ingeniería y café en Colombia. *Revista de Ingeniería*, (33), 99-114. <https://revistas.uniandes.edu.co/doi/pdf/10.16924/revinge.33.10>
- Oliveros, C., Sanz, J., Ramírez, C., & Tibaduiza, C. (2014). ECOMILL: Tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café. Centro Nacional de Investigaciones de Café. *Cenicafe*, (Avances Técnicos 432) <http://hdl.handle.net/10778/500>
- Paredes, C, AM., Mendoza, B, R., & Moreira, S., EG. (2018). Digestión anaerobia de las aguas residuales de la industria del café instantáneo. *Revista ESPAMCIENCIA* 9(1), 23-31. http://190.15.136.171/index.php/Revista_ESPAMCIENCIA/article/view/152.
- Parra, Huertas, RA. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción limpia*, 10(2), 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. http://193.122.196.39:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/3022/Partida_Sedas_S_DC_Agroecosistemas_Tropicales_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Peñuela-Martínez, E., Tibaduiza-Vianchá, CA., Morcillo, C A., & Restrepo-Rivera, MV. (2021). Degradación enzimática de mucilago de *Coffea arábica L.*, para la producción de café suave lavado. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19(2), 170-183. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1848>.
- Prezotti, L, C., da Rocha, AC., Soares, S. F., Guarçoni, A., & Morelli., AP. (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,. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/5106>

Puerta-Quintero, Gl. 1999). Influencia del proceso de beneficio en la calidad del café. *Cenicafé*, 50(1), 78-88. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/4254/1/avt0187.pdf>

Puerta-Quintero, G. I. (2000). Beneficie correctamente su café y conserve la calidad de la bebida. Centro Nacional de Investigaciones de Café. *Cenicafé*, (276), 8. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/561/1/avt0276.pdf>

Puerta-Quintero., Gl. (2008). Riesgos para la calidad por la comercialización de café pergamino húmedo. *Cenicafé*, (371), 1-4. http://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/comercializacion/cultivemos_cafe_cafe_pergamino_humedo.

Puerta, Quintero., Gl. (2013). Fundamentos del proceso de fermentación en el beneficio del café. *Centro Nacional de Investigaciones de Café. Avances técnicos*. *Cenicafé* (414), 12. https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/avances_tecnicos/article/view/163 .

Quintana, SG. (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. <https://doi.org/10.23850/24220582.2918>

Quintero-Yepes, L., & Rodríguez-Valencia., N. (2019). Extractos vegetales para el tratamiento de las aguas residuales del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 1-8. https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/avances_tecnicos/article/view/137

- Quintero-Yepes, L., & Rodríguez-Valencia, N. (2022). Uso de cales para el tratamiento primario de las aguas residuales del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, (537), 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0537>
- Rigueira, R. JDA., Lacerda Filho, A. F. D., & Matos, AT. (2009). Alteração nas características físicas, químicas e bioquímicas da água no processo de lavagem, despulpa e desmucilagem de frutos do cafeeiro. *Engenharia na agricultura, viçosa - mg*, (8)2, 131-139. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/1961>
- Rodríguez, Suyen., Pérez, Rosa, M., & Fernández, Maikel. (2000). Estudio de la biodegradabilidad anaerobia de las aguas residuales del beneficio húmedo del café. *Interciencia*, 25(8), 386-390. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33905005.pdf>
- Rodríguez-Valencia, N., & Zambrano-Franco, D.A. (2011). Producción de alcohol a partir d mucílago de café. *Cenicafé*, 62(1), 56-69. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/496/1/arc062%2801%295669.pdf>
- Rodríguez, Valencia, N., Sanz, Uribe, JR., Oliveros, Tascón, CE., & Ramírez, Gómez CA. (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, AV., & Quintana, S., GC. (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. <https://www.researchgate.net/publication/347739812>.
- Rojas, E, M., Burga, RH., Quintanta, S, C., Silva, E. M. C., & Santillan, TS. (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), 97-110.
<http://revistas.unj.edu.pe/index.php/pakamuros/article/view/185/223>
- Romero, Loaiza, R., & Mamani, Pari., RH. (2013). Obtención de biogás como fuente de energía renovable a partir de los subproductos del café. *Revista Investigaciones Altoandinas*, 15(2), 241-252.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5893937>
- Rossmann, M., Teixeira, Matos, A., Carneiro, Abreu, E., Fonseca, Silva, F., & 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), 912-919.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.045>
- Ruiz-Nájera, R, E., Medina-Meléndez, JA., Carmona-de la Torre J., Rincón-Enríquez, G., Sánchez-Yáñez, J, M., & 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), 1-11. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.884>
- Salazar, Salas, LA., Quiroga, Mateus, RY., Castillo, Rojas, FCL., & Vega, Serrano, H., AV. (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), 33-48.
<https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/innovando/article/view/3846>.
- Salguero-Zeceña, ERT. (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., & Marini, H. (2004, mayo 2-4). Transferencia a Productores de Estrategias y Tecnologías Limpias para el Manejo Sostenible del Agua en Agroindustrias Tropicales. Primer Congreso

Internacional de Casos de Éxito de Desarrollo Sostenible del Trópico. Boca del Río, Veracruz México.
[https://cursos.clavijero.edu.mx/cursos/124_ecds/modulo7/tareas/documentos/Manejo Sustentable del Agua en Agroindustrias.pdf](https://cursos.clavijero.edu.mx/cursos/124_ecds/modulo7/tareas/documentos/Manejo_Sustentable_del_Agua_en_Agroindustrias.pdf).

Selmar, D. Bitof, G. & Knopp. S., E. (2008). The storage of green coffee (*Coffea arabica*): decrease of viability and changes of potential aroma precursors. *Annals of Botany*, (101), 31-38. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm277>.

Serrat-Díaz, M., la Fé-Isaac, D., Daniel, Á, Alberto, J., & Montero-Cabrales., C. (2018). Extracción y caracterización de pectina de pulpa de café de la variedad Robusta. *Revista Cubana de Química*, 30(3), 522-538. <https://cubanaquimica.uo.edu.cu/index.php/cq/article/view/4182>

Sheng,Tai, E., Chuan, Hsieh, P., & Chewn, Sheu., S. (2014). Effect of polygalacturonase and feruloyl esterase from *Aspergillus tubingensis* on demucilage and quality of coffee beans. *Process Biochemistry*, 49(8), 1274–1280. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2014.05.001>

Siu, Y., Mejia, G., Mejia-Saavedra, J., Pohlen, J., & Sokolov, M. (2007). Heavy metals in wet method coffee processing wastewater in Soconusco, Chiapas, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 78(5), 400-404. <https://doi.org/10.1007/s00128-007-9094-x>

Stewart, Pineda, VM. (2021). Calidad del agua residual producida en las diferentes etapas del proceso de beneficiado de café húmedo. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 16(2), 19-26. <https://revistas.usac.edu.gt/index.php/asa/article/view/1324>.

Tacias-Pascacio, VG, Cruz-Salomón, A., Castañón-González., JH, & 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*, (1), 45-54. <https://doi.org/10.37787/pakamurosunj.v9i2.185>

- Texeira de Matos., A. Fia, R., Bachetti, Pinto, A., Rodrigues, Gomes Filho, R., y Passos, Rezende., AA. (2000, septiembre 26-29). 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*. Minas Gerais. Brasil. <http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/spcbanais/simposio1/Irriga50.pdf>
- Torres-Valenzuela, L. S., Sanín-Villarrea, A., Arango-Ramírez, A., & Serna-Jiménez., JA. (2019). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café, *Revista Ion*, 32(2), 59-66. <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v32n2-2019006>
- Vincent, JC. (1987). Green coffee processing. In: Clarke R.J., Macrae R. (eds) *Coffee*. Springer, Dordrecht. (1ª ed., págs. 1-33). https://doi.org/10.1007/978-94-009-3417-7_1.
- Webs Comercio, Conecta con Industrias, Empresas y Comercios*. (2021, septiembre). <https://site.webscomercio.com/>.
- Zambrano-Franco, DA., & Isaza-Hinestroza., JD. (1998). Demanda química de oxígeno y nitrógeno total, de los subproductos del proceso tradicional de beneficio húmedo del café. *Cenicafé*, 49(4), 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, DA., Isaza-Hinestroza, JD., Rodríguez-Valencia, N., & López-Posada., U. (1999). Tratamiento de aguas residuales del lavado del café. *Cenicafé*. (31), 1-26. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4212>.
- Zambrano-Franco D. A., & Cárdenas-Cárdenas, J. (2000). Manejo y tratamiento primario de lixiviados producidos en la tecnología BECOLSUB. *Avances Técnicos Cenicafé*. (280) 1-8. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/4207/1/avt0280.pdf>.
- Zambrano-Franco, DA., Rodríguez-Valencia, N., López-Posada, U., Orozco, PA., & Zambrano-Giraldo., A. (2006). Tratamiento anaerobio de las aguas

mieles del café. *Cenicafe*, 29.
<https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/584> .

Zambrano-Franco, DA., Rodríguez, Valencia N., Orozco, Restrepo, PA., & 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), 32-45.
<https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/607/1/arc066%2801%2932-45.pdf>.

Zuluaga-Vasco, J., & Zambrano-Franco., D. (1993). Manejo del agua en el proceso de beneficio húmedo del café para el control de la contaminación. *Avances Técnicos. Cenicafé*, 1(87), 1-4.
<https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4254>.

4.- LA HUELLA HÍDRICA EN EL CULTIVO Y BENEFICIADO DE CAFÉ EN HUATUSCO, MÉXICO: UNA APROXIMACIÓN

4.1.- Resumen

Se realizó un análisis de la huella hídrica verde y gris del cultivo de café y el gasto de agua en el beneficiado del grano en la región de Huatusco, Veracruz ya que actualmente no se tiene datos al respecto en dicha región de estudio. El objetivo fue realizar el cálculo de la huella hídrica por medio del programa de FAO CROPWAT 8.0. y el cálculo del gasto de agua en beneficios de la región de Huatusco, Ver. Se obtuvo el programa de la página de FAO nombrado CROPWAT 8.0 y se revisaron normales climatológicas para la obtención de datos y poder realizar los cálculos para obtener a huella hídrica, posteriormente se midió el gasto de agua en cinco beneficios húmedos de café durante el periodo de cosecha. Se encontró una huella hídrica verde y gris total de $977.61 \text{ m}^3 \text{ Kg}$ agua por café producido. En relación con la cantidad de agua utilizada para beneficiar café se obtuvieron los siguientes datos: beneficio uno se estimó un consumo de $566 \text{ m}^3 \text{ Kg}$ de café cereza procesado y en el beneficio dos de $162 \text{ m}^3 \text{ Kg}$ de café cereza procesado. En total, la huella hídrica obtenida: verde, gris y gasto de agua en el proceso de beneficiado se estimó en $1132.73 \text{ m}^3 \text{ Kg}$ de café cereza producido. Los datos encontrados pueden ser utilizados para tomar conciencia sobre el gasto enorme de agua que se genera en el proceso de beneficiado de café y proponer alternativas para un mejor uso del vital líquido. La huella hídrica obtenida resultó ser alta en la región de estudio y similar con trabajos realizados en otros países lo que indica que hay una conciencia por saber cuánto se gasta de agua en la producción y beneficiado del café, así como su impacto a corto media y largo plazo.

Palabras clave: sustentabilidad, agua, huella hídrica, beneficiado húmedo

4.2-. Abstract

An analysis was conducted of the green and gray water footprint of coffee cultivation and the water consumption in the grain beneficiary in the Huatusco Veracruz region since there is currently no data in this regard in said study region Objective: it was performing the calculation of the water footprint using the FAO CROPWAT 8.0 program. and the calculation of water expenditure in benefits of the Huatusco region, See. Firstly, the program was obtained from the FAO website named CROPWAT 8.0 and climatological normals were reviewed to obtain data and be able to perform the calculations. To obtain a water footprint, the water consumption was subsequently measured in five wet coffee mills. To do this, the mills were visited during the harvest season to conduct the measurements. A total green and gray water footprint of 977.61 m³ kg of coffee produced in the coffee production process was found. In relation to water consumption in the wet coffee mills: in two of the five mills analyzed the following data was obtained: Cruxtitla mill reached a cost of 566 m³ kg of processed cherry coffee and in the Coordinating mill the It had the amount of 162 m³ kg of processed cherry coffee and an average of 155.13 m³ kg of processed coffee. In total, the water footprint obtained: green, gray and water consumption in the processing process was 1132.73 m³ kg of cherry coffee produced. The data found can be used to raise awareness about the enormous waste of water generated in the coffee processing process and propose alternatives for better use of the vital liquid. The water footprint obtained turned out to be high in the study region and like works conducted in other countries, which indicates that there is an awareness of knowing how much water is spent in the production and processing of coffee, as well as its short-term impact. long term.

Keywords: sustainability, water, water footprint, wet process

4.3.- Introducción

La huella hídrica es un valioso indicador usado para cuantificar los consumos de agua en los procesos productivos agrícolas, y su determinación ofrece una noción de los impactos ambientales que las actividades productivas están ejerciendo sobre los recursos hídricos (Forero & Silva, 2014). Con la huella hídrica se puede evaluar el consumo de agua ya sea generado por una ciudad, país, individuos o una empresa, esta metodología nos permitirá conocer el total de agua dulce utilizada. Dentro de la metodología utilizada tres módulos: si el agua empleada proviene de mantos superficiales, se denomina huella azul, si proviene de la lluvia es se trata de la huella verde y en el tercer módulo está el agua que se contamina por alguna sustancia utilizada en el proceso de producción de algún producto y que demerita la calidad del agua debido a la contaminación generada (Schneir, 2015).

El disminuir el volumen del agua en procesos de producción agrícola ha sido un reto. En Tailandia, con buenas prácticas de manejo (BPM) se redujo el uso del agua para producir café. En dicho estudio se obtuvieron valores de 10 m^3 de agua por Kg de café cereza, y 27 m^3 de agua por Kg de café tostado y molido. Las aguas residuales provenientes fermentación, despulpado y lavado del café representaron el 68 % del consumo total de agua. La aplicación óptima de fertilizantes, el uso de quemadores de alta eficiencia energética durante el tostado, el sombreado con árboles frutales y el rejuvenecimiento de las plantaciones se sugirieron como medidas de mitigación para la reducción de la huella hídrica en el cultivo de café Robusta (Ratchawat, 2020).

Los principales productos agrícolas en México con mayor huella hídrica azul son: carne, trigo, caña de azúcar, cultivos forrajeros, maíz y aguacate (Hoekstra & Mekonnen, 2012). En cuanto al consumo nacional, la huella hídrica de México fue de 197.425 hm^3 año, esto equivale a un 2.3 % de la huella a nivel mundial, y siendo el país número ocho en este rubro con el 92 % en agricultura, el 3 % en el sector industrial y el 5 % fue doméstica (Vázquez & Lambarri, 2017). El cálculo

de la huella hídrica se debiera llevar a cabo en los sistemas de producción agrícola en México. Por ejemplo, la huella hídrica del aguacate alcanza un valor de 4.945 m³ de agua por tonelada de fruta (Naranjo & Reyes, 2022).

Se desconoce la huella hídrica en la producción de café en la región de Huatusco que es una de las zonas de mayor importancia en la producción y exportación de café en Veracruz, México. Esta región, aporta el 80 % de la producción total de café en el Estado de Veracruz. En la región cafetalera de Huatusco, Veracruz, hay hasta 10 beneficios de café que trabajan cada año, generando contaminación de aguas residuales y no se han hecho evaluaciones del gasto de agua (Suazo, 2023).

El objetivo del presente estudio fue llevar a cabo un cálculo aproximado de las huellas hídricas, verde y gris en la producción de café en la región cafetalera de Huatusco, Veracruz, para ello se utilizó el software CROPWAT 8.0 de la FAO.

4.4-. Materiales y métodos

La región de Huatusco se encuentra en la zona montañosa del estado de Veracruz con una precipitación de 750 a 3.000 mm, y temperaturas entre 16°C y 22°C. La mayor producción de café en esta región se lleva a cabo en una altitud de 900 hasta 1450 msnm, y mayormente es bajo sombra. El presente trabajo se llevó a cabo en esta región calculando las huellas hídricas verde, y gris utilizando el software CROPWAT 8.0 (<https://www.fao.org/sustainable-development-goals-helpdesk/champion/article-detail/cropwat/en>) de la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Se identificaron etapas agronómicas para el proceso productivo del café: Selección de la semilla, siembra en vivero, fertilización, control de plagas en vivero, siembra en campo incluyendo el manejo de la fertilización, monitoreo de plagas y enfermedades, y manejo de arvenses. También, labores de cosecha y postcosecha.

Los datos climatológicos fueron obtenidos de la estación de meteorológica de Totutla, Veracruz (Altitud: 1446 m, Latitud: 19°12'45", Longitud: 96°57'50" w) utilizando el programa de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), Power Data Access Viewer. La temperatura, la velocidad del viento, la evaporación, el brillo solar, la radiación solar, la humedad relativa y la precipitación fueron considerados.

Con el software CROPWAT 8.0, utilizando las variables indicadas, se obtuvo la evapotranspiración potencial o de referencia. Se trata de la medición del máximo obtenido en cantidad de agua dulce que una superficie completamente envuelta por la vegetación y no adolece de humedad se puede enviar a la atmósfera en condiciones adecuadas al momento de calcularla (Sánchez & Carvacho, 2006). La precipitación efectiva se trata de la que se podría utilizar directamente por las plantas y cultivos, donde se menciona que parte de la precipitación no está disponible para los diferentes cultivos, ya que una parte se pierde por escorrentía y percolación al interior del suelo (Allen, 1989), también fue calculada. Esto considerando fechas de siembra y las etapas de crecimiento del café, cuyos valores fueron tomados (Allen *et al.*, 2006; Cisneros *et al.*, 2015).

El coeficiente del cultivo (K_c) se obtuvo con CROPWAT 8.0 y se define como la relación entre las necesidades hídricas del cultivo (ET_c) y la evapotranspiración de una superficie de referencia (ET_o). La superficie de referencia es un cultivo hipotético de pasto que se caracteriza por poseer una apariencia uniforme y cubrir completamente la superficie del suelo (Torres *et al.*, 2016).

Se utilizó un suelo franco-arenoso para determinar la disponibilidad de agua del café ya que se trata de la textura presente en la región de estudio donde se realizó el trabajo (Fernández-Ojeda *et al.*, 2016).

Se obtuvo la huella hídrica verde a partir de la división del agua obtenida de la lluvia y los rendimientos de la siembra del cultivo. El cultivo en este caso de café aprovecha el agua de lluvia y a partir de ella se calcula por medio del programa CROPWAT la precipitación efectiva, entonces, la huella verde es la división entre

el agua efectiva usada por el cultivo en un sitio determinado y rendimiento que este tiene.

La estimación de la huella hídrica gris depende de la tasa de aplicación de productos químicos por ha^{-1} , la fracción de lixiviación, el rendimiento del cultivo, la concentración máxima permisible y la concentración natural de los contaminantes en el cuerpo de agua receptor. La huella hídrica gris se calcula a partir de la multiplicación de la tasa de aplicación de los productos químicos por la fracción de lixiviación, dividido entre la diferencia de concentraciones, es decir, la concentración máxima menos la concentración natural (la presente en el ambiente) de la fuente receptora, todo lo anterior dividido entre el rendimiento del cultivo de café.

El cálculo de la tasa de aplicación de productos químicos se realizó con el N de la fórmula química NPK de 10-20-20. Este es el tipo de fertilizante más usado en la región de estudio. También, se obtuvo la concentración de N en el agua que fue de 2.6 mg (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2006). El rendimiento utilizado fue de 5.5 ton ha de café, este dato se tomó de la cosecha 2018- 2019 de producción de café en la región de estudio (Partida-Sedas, et al., 2021).

Con los valores de los componentes de la huella hídrica (azul, verde y gris) se obtiene la huella hídrica total ($\text{m}^{-3}/\text{ton}^{-1}$):

$$HH_{total} = HH_{azul} + HH_{verde} + HH_{gris}$$

Conocer la cantidad de agua utilizada a través de la medición de huella hídrica necesaria para tener óptimo desarrollo del cultivo por cada una de las fases fenológicas resulta información sumamente importante y necesaria para el desarrollo del cultivo de café (Viveros-Garza, 2022).

También, se evaluó el gasto de agua en el proceso de beneficiado húmedo (despulpado y lavado) en la región de Huatusco Veracruz. Se incluyeron datos de cinco beneficios, dos de ellos trabajan con modelos de beneficio ecológico. Para la medición del gasto de agua, en cada beneficio se tomaron 20 datos de

tiempo de llenado de agua en un recipiente de 20L y posteriormente se obtuvo un promedio del gasto, esto fue tanto en el área de despulpe como en el área de lavado y fermentado del café, después, se obtuvieron tos de la cantidad de café procesado en todo el ciclo de cosecha para obtener el dato de agua total utilizado en cada beneficio.

4.5- Resultados y discusión

Con el apoyo del software POWER Data Access Viewer de la NASA se obtuvo la evapotranspiración efectiva (el cual aportó datos para ser utilizados en CROPWAT) Cuadro 1. Valor necesario para calcular la precipitación efectiva.

Cuadro 2. Cálculo de la evapotranspiración potencial del cultivo de café en la región centro de Huatusco, Veracruz.

Mes	Tem p min °C	Tem p max °C	Humeda d %	Vient o Km día	Insolació n Horas	Radicaci ón MJ m ⁻² día	Evapotranspiración de referencia Mm/día
Enero	12.5	22.1	10	3	3.5	11.3	1.46
Febrero	15.1	27.4	11	3	4.3	13.6	1.93
Marzo	14.8	27.1	10	3	4.9	16.0	2.38
Abril	16.8	31.4	10	3	5.3	17.6	2.75
Mayo	20.4	33.2	13	2	5.6	18.3	3.13
Junio	20.3	28.6	15	2	5.6	18.2	3.17
Julio	18.9	27.4	14	2	5.6	18.2	3.02
Agosto	19.9	28.6	15	2	5.4	17.7	2.96
Septiembre	19.0	26.9	15	2	4.7	15.9	2.63
Octubre	18.3	25.5	15	2	4.5	14.2	2.23
Noviembre	15.5	23.4	12	2	3.9	12.0	1.72
Diciembre	13.4	23.0	10	2	3.4	10.7	1.45
Promedio	17.1	27.1	13	2	4.7	15.3	2.40

Posteriormente, utilizaron datos de temperatura media y mínima, humedad, insolación y velocidad del viento del programa POWER Data Access Viewer de la NASA, se obtuvo la precipitación efectiva mensual y anual con CROPWAT. La precipitación efectiva anual fue de 1050.1 mm Cuadro 2.

Cuadro 3. Cálculo de la precipitación efectiva. Elaboración propia, 2021

Meses	Precipitación mm	Precipitación efectiva mm
Enero	13.8	13.5
Febrero	27.1	25.9
Marzo	66.5	59.4
Abril	49.6	45.7
Mayo	113.8	93.1
Junio	221.2	142.9
Julio	233.9	146.4
Agosto	299.8	155.0
Septiembre	393.0	164.
Octubre	219.3	142.4
Noviembre	35.1	33.1
Diciembre	29.9	28.5
Total	1703.0	1050.1

Las etapas de desarrollo del cultivo de café en la región de Huatusco, Veracruz, que fueron consideradas Figura 1. Estas son las fases del cultivo desde desarrollo, floración hasta maduración del fruto en días, profundidad radicular 45 cm: se refiere a lo profundo de la raíz del cafeto, Agotamiento crítico: agotamiento inicial de humedad en el suelo. F: respuesta de rendimiento del cultivo y altura del cultivo: se refiere a la altura del cafeto, referencia ofrecida por Allen et al., 2006).

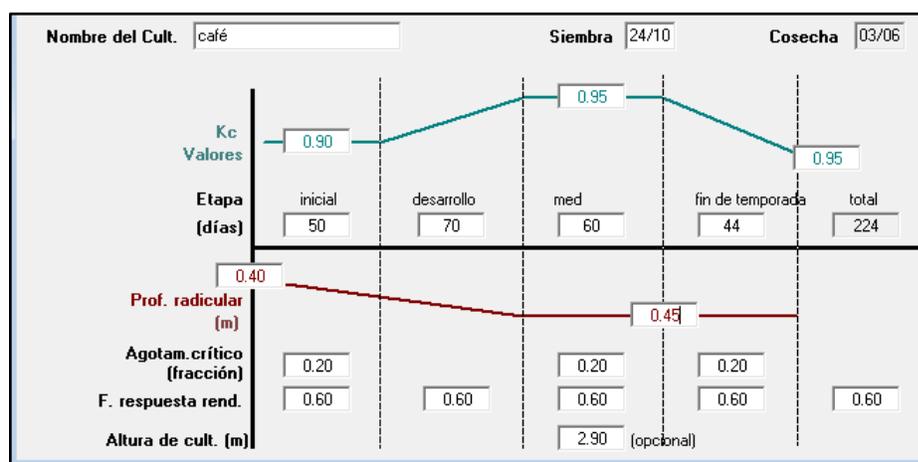


Figura 1. Información general del cultivo de café introducida en el programa CROPWAT 8.0.

Con la obtención del dato del coeficiente de cultivo (K_c) y junto con la evapotranspiración de referencia (E_{To}), las cuales se utilizan para calcular las tasas de evapotranspiración del cultivo del cafeto, la importancia del cálculo del dato es que se usó para conocer, la evapotranspiración del cultivo en la región de estudio.

Posteriormente, se utilizó el programa con toda la información del suelo presentes en la región cafetalera del centro de Veracruz, el cual es considerado franco-arenoso. Estos datos se obtuvieron de Escamilla-Prado. (2007), Fernández-Ojeda et al., (2016) y Álvarez-Sánchez et al., (2020) para realizar el balance hídrico y calcular el requerimiento de agua en el cultivo.

Los resultados para el cálculo de huella de hídrica fueron los siguientes:

La huella hídrica verde que se obtuvo fue la siguiente

$$HH \text{ verde} = 1050.1/4.5 = 190.92 \text{ m}^3 \text{ Kg de café producido}$$

La huella hídrica gris fue de:

$$HH \text{ gris} = 786.24 \text{ m}^3 \text{ Kg de café producido}$$

Finalmente, la huella hídrica total fue:

$$HH \text{ total verde y gris fue de} = 977.61 \text{ m}^3 \text{ Kg de café producido}$$

A esto le sumamos el gasto de agua en el beneficiado de café de la región, Cuadro 4 y se tiene un total de huella hídrica de:

HH total: $977.61 + 155.13 = 1132.74 \text{ m}^3 \text{ Kg de café producido}$ que es la suma de la huella hídrica verde, más suma gris, más el promedio de gasto de agua de los beneficios que se midieron.

En cuanto a los beneficios de café, en el Cuadro 4 se muestra el cálculo del gasto de agua en todo el proceso de beneficiado de café en cinco beneficios de la región de Huatusco, los volúmenes más altos están relacionados con un mayor número de toneladas de café que se procesan en estas instalaciones, en el caso del beneficio 1 se estimó un consumo de $566 \text{ m}^3 \text{ Kg de fruto}$, beneficio 2 de $162 \text{ m}^3 \text{ Kg}$, beneficio 3 $4.02 \text{ m}^3 \text{ Kg}$, beneficio 4 $32.04 \text{ m}^3 \text{ Kg}$ y beneficio 5 $10.77 \text{ m}^3 \text{ Kg}$.

³ Kg. El gasto de agua total encontrado sumando la huella hídrica verde, gris y el gasto en beneficio fue de 1132.74 m⁻³ Kg de fruto.

Cuadro 4. Cálculo del uso de agua en el beneficiado en la región de Huatusco Veracruz, 2023.

Beneficios	Localización	Fuente de agua	Kg de café cereza	Agua Utilizada m⁻³	Huella Hídrica total m⁻³ Kg de fruto
Beneficio 4	Huatusco-Totutla. Ver.	Arroyo	70000	30.84	32.04
Beneficio 5	Chocaman. Ver.	Arroyo	70000	9.57	10.77
Beneficio 1	Huatusco. Ver.	Arroyo	4 050 000	565.05	566.02
Beneficio 3	Tepetzingo Huatusco. Ver.	Arroyo y agua colectada	360 000	2.80	4.02
Beneficio 2	Sábanas, Huatusco. Ver.	Arroyo	630 450	161.64	162.84
Promedio					155.14

4.5.- Discusión

En el estudio de Tarazona et al., (2023) quienes obtuvieron la huella hídrica en cultivos de café a nivel de microcuenca reportan que la huella hídrica total en el cultivo de café fue de 3 759 663.2 m³ para el año 2017 y de 4 132333.1 m³ para el año 2020. Asimismo, López (2018) encontró que en cultivos: maíz, plátano, café y caña de azúcar suman el 50 % de la huella hídrica en la cuenca de Boyacá, Colombia, con un total de 23744 m³ t. Siendo el café el que mayor consumo de agua genera 18.809 m³ t, datos mayores a los obtenidos en este trabajo.

En un estudio de Arcos (2012) se encontró que en el caso del café la huella hídrica verde es fue mayor, lo que significa que usa más el agua de las precipitaciones que del riego y también usa más agua, que los cultivos de caña de azúcar y tomate, su trabajó lo desarrolló en cuatro años, el café está entre los 2000 m³ t de huella. Al igual que el estudio que se realizó en la región de Huatusco, donde la huella hídrica verde es menor, de 190.92 m³ t de café cereza y donde no hay presencia del uso de riego.

En otro estudio desarrollado por Ortiz-Caballero (2014) los datos de ambas huellas (verde y gris) la primera con 19,966.3 m³ t y la segunda con 1,666.7 m³ t son mucho más altos, mencionando que el café 92 % de agua que es el que requiere más para su desarrollo y crecimiento, en comparación con el maíz 59 % de agua y huella de 3554 m³ t, caña para panela también 85% con 2 779 m³ t y yuca 85 % también y huella de 682 m³ t. Como se observa, el café es el de mayor porcentaje en consumo de agua en este estudio.

En Honduras, Bolaños (2011) menciona que la huella hídrica total en la producción de café fue de 221385 millones de m³ Ortiz-Caballero (2014) obtuvo la huella hídrica verde y gris para diferentes cultivos, en donde el cultivo de café fue el que tuvo más gasto de agua 21633 m³ t y en este trabajo no tomaron en cuenta para el cálculo del gasto de agua en el proceso de beneficiado húmedo del café. Por otro lado, Torres et al (2023) calculó la huella hídrica en relación con la producción de café y encontró que se tuvo 15249 m³ t en Risaralda, Colombia,

la cual resultó superior a la reportada en el presente estudio que fue de 977.16 m⁻³ t, Así, en el departamento de Risaralda, Colombia Garay & Rivero (2014) analizaron que el gasto de agua en todo el proceso de beneficiado de café es de 29411 m⁻³ Kg de pergamino seco, cuyo trabajo fue desarrollado a nivel cuenca. Este dato es mucho más elevado que el presentado en este trabajo que fue una huella hídrica de 132.74 m⁻³ kg de café producido. Esto es superior a lo mencionado por Rodríguez et al., (2015), quienes mencionan que en Colombia el beneficiado húmedo tradicional alcanza hasta 40 L Kg de café pergamino seco, este dato es menor al encontrado en dos de los beneficios húmedos analizados en el trabajo de la región cafetalera de Huatusco, en el trabajo de Rodríguez et al., (2015), los autores solo tomaron en cuenta el gasto en beneficio sin medir la huella hídrica verde y gris.

Ngo et al. (2018), encontraron una huella hídrica en la producción de café verde de 13000 m⁻³ t, esto para regiones productoras con condiciones normales de precipitación, en regiones donde se presentó mayor sequía la huella hídrica se incrementó hasta 15918 m⁻³ t, esto datos son mayores comparados con los aquí presentados donde la huella llegó a los 977.16 m⁻³ t. Lo cual permite observar que las regiones productoras con afectaciones debido al calentamiento global se verán más presionadas en relación con el uso del recurso agua. Silva et al (2022), encontraron una huella hídrica de 13862 m⁻³ t en cafetales de sombra, y 16895 m⁻³ t en cafetales a pleno sol.

Mekonnen & Hoesktra (2011) reportaron para la huella hídrica verde de 15,239 m⁻³ t, y la huella gris fue de 532 m⁻³ t. El valor de la huella verde fue alto pues también evaluaron el gasto del agua en el beneficiado del café. En el Cuadro 4, se muestra el cálculo de uso de agua en el beneficiado húmedo del café para cinco beneficios de la región de Huatusco. Los datos de agua encontrados son menores en los cinco beneficios de café con un promedio de 155.14 m⁻³ Kg de café pergamino seco. Por otro lado, En Colombia, Jiménez (2017), reportó que la huella hídrica verde fue de 11001 m⁻³ t, la huella hídrica azul de 7014 m⁻³ t, y la huella hídrica gris de 107 m⁻³ t, en algunos casos se trató de una huella similar

con la obtenida en el estudio en donde se obtuvieron hasta $566.05 \text{ m}^3 \text{ t}$ de agua, para el caso del beneficio 1 y $161.64 \text{ m}^3 \text{ t}$ para el beneficio 2 Cuadro 4.

En Vietnam (Hoang & Nguyen, 2019) tuvieron una huella hídrica de $1223 \text{ m}^3 \text{ t}$, esta se incrementó por el uso de N y P en el campo, estos datos son cercanos a los $977.16 \text{ m}^3 \text{ t}$ determinados en el presente estudio. Utilizando un beneficiado ecológico redujeron el uso del agua con 0.7 a 1 L por café pergamino seco, a diferencia del encontrado en este trabajo que fue de 10 L por café pergamino seco para uno de los beneficios estudiados (Cuadro 4). Los datos del Cuadro 4 muestran que se tiene un gasto importante de agua que llega hasta $565.056 \text{ m}^3 \text{ Kg}$ de café cereza producido, anualmente, este gasto es generado por el beneficiado de café vía húmeda encontrado en la región de Huatusco Ver. En Colombia, Builes Cedula (2018) menciona una huella hídrica gris de 5600 m^3 . Estos estudios se han realizado a nivel país, de ahí las cifras encontradas en el gasto de agua. En otro estudio sobre el uso adecuado del agua realizado a escala países por Eriyagama, Chemin & Alankars, (2014) encontraron que el consumo de agua en el proceso de cultivo y transformación de café en un escenario de cambio climático se tiene que para producir un kilogramo de café verde ocupa $18.8 \text{ m}^3 \text{ Kg}$ de café verde, dando un consumo de $18900 \text{ m}^3 \text{ t}$ de café verde, estos datos son mayores a los encontrados en este trabajo.

En relación con la medición de huella hídrica a nivel cuenca López (2018) encontró que la huella hídrica en región de Boyacá, Colombia la huella hídrica verde fue de $11060 \text{ m}^3 \text{ t}$ a nivel región, la huella azul de $53.9 \text{ m}^3 \text{ t}$ para cafetales con riego y huella hídrica gris de $75 \text{ m}^3 \text{ t}$. El cálculo de huella verde toma en cuenta hasta el beneficiado del café, de ahí la cantidad de agua usada la cual es proporcionada principalmente por la lluvia. También, en Colombia Builes Cedula (2013) encontró que la huella hídrica para el cultivo de café utiliza 75 millones de m^3 de a nivel región del río Porce, esto de igual manera solo midiendo la huella hídrica en campo, sin medir el gasto de agua en el proceso de beneficiado del café. En este sentido, el trabajo realizado aquí, no alcanzó a ser realizado de manera regional debido a esto su resultado es menor. Similar a este trabajo,

Calderón-Carrero & Moya-Garzón (2017) evaluaron únicamente la huella hídrica verde y gris, similar a este trabajo, los resultados de la huella gris son más altos $1683.83 \text{ m}^3 \text{ t}$ y para el caso de la huella hídrica gris obtuvieron $845.07 \text{ m}^3 \text{ t}$. Esto lo desarrollaron a nivel cuenca, también se debe tomar en cuenta que el cultivo de café produce hasta el tercer año de manera constante por lo que los tres primeros años demanda la mayor cantidad de agua para su desarrollo y al no tener riego utiliza el agua de la precipitación de ahí que este cálculo tienda a ser mayor. La huella hídrica verde, azul y gris, se ha medido en sus modalidades como lo realizó Pérez, (2012). Lo que obtuvo fue lo siguiente: huella verde: $10559 \text{ m}^3 \text{ t}$ superior a los datos de la región que se estudió en donde no se tomó en cuenta la parte de vivero, como sí lo realizó este autor, quién midió el gasto de agua desde el semillero hasta producción, con una huella hídrica azul o riego: $8148 \text{ m}^3 \text{ t}$ y huella gris: $111 \text{ m}^3 \text{ t}$, en el caso de huella azul no se obtuvo ya que no se realiza riego. Y para la huella gris esta fue menor comparada con la que se obtuvo en esta investigación. Aun así, se observa que el cultivo de café demanda gran cantidad de agua para su producción ya que es un cultivo de ciclo largo.

Bustamante *et al.*, (2015) mencionan que una disminución de la lluvia resulta clave para promover la etapa de floración, si la baja precipitación se alarga la apertura del botón floral disminuye, lo que limita el crecimiento de hojas y frutos, de igual manera, un exceso de agua baja considerablemente el porcentaje de floración En el mismo sentido, en sus escenarios de cambio climático para la zona centro del estado de Veracruz, se plantean una disminución de la precipitación en un 7.5 % y acentuándose más en los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo, lo que repercutiría en una disminución de los rendimientos, provocado por la falta de agua (Rivera-Silva et al., 2013). Los valores obtenidos de la huella hídrica verde y gris son menores que los que reporta Echeverri y Tobón (2021) en donde alcanzan valores de $1749 \text{ m}^3 \text{ t}$ y $1400 \text{ m}^3 \text{ t}$, para las huellas hídricas verde y gris, respectivamente.

Navarrete-Molina et al. (2015), evaluaron la huella verde en la producción de café cereza en el distrito de Motozintla, en Chiapas y encontraron un valor de $3931 \text{ m}^3 \text{ t}$

³ t para esta región, los autores no realizaron la medición de la Huella hídrica gris a diferencia de esta investigación. Aquí se tomó en cuenta la huella hídrica gris, azul y verde. A diferencia de este estudio en donde la huella hídrica azul (riego) no se aplicó debido a no hay sistemas de riego en la región y donde se obtuvo una huella gris y verde y de gasto en beneficiado húmedo de 1132.61 m⁻³ Kg de café producido.

4.6-. Conclusiones

La huella hídrica estimada en la producción del café medida en parcela fue de 977.61 m⁻³ Kg de café cereza procesado, tomando en cuenta también que la huella hídrica azul es cero debido a que en la región de estudio no se utiliza riego, cuando se suma el gasto de agua en beneficio se tiene un incremento de la huella hídrica. En el beneficio uno se estimó un gasto de 566 m⁻³ Kg de café cereza procesado, y en el beneficio do se estimó en 162 m⁻³ Kg de café cereza procesado. El promedio obtenido sobre gasto de agua fue 155.14 m⁻³ Kg de café cereza procesado. En total se estimó una huella hídrica gris, verde y de gasto de agua en el beneficiado de café de: 1132.74 m⁻³ Kg de fruto. Esto es un foco de atención que se debe tomar en cuenta por todos los actores involucrados actualmente en la cafecultura nacional, gobierno, empresas, organizaciones y sociedad civil, ya que la problemática por el uso del recurso hídrico se encrucecerá en los próximos años.

4.7-. Literatura citada

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>.

Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L., & Burman, R.D. (1989). Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agron. J*, (81), 650-662. <https://doi.org/10.2134/agronj1989.00021962008100040019x>.

- Álvarez-Sánchez, M. E., Maldonado-Torres, R., Nájera-Rosas, C., & Cristóbal-Acevedo, D. (2020). Manejo agroecológico para la restauración de la calidad del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias agrícolas*, 11(4), 741-752. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i4.2462>.
- Arcos, S. I. P. (2012). Evaluación y análisis de la huella hídrica y agua virtual de la producción agrícola en el Ecuador. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/105eeca8-ce9d-4827-b30a-e3f1c2266aca/content>.
- Ataroff, M., Monasterio, M. (1993). Estudio comparativo de los cafetales de sol y sombra en Los Andes venezolanos: balance hídrico y erosión durante un ciclo anual. Capítulo 6. En: M. Rabey (Ed): El Uso de Recursos Naturales en las Montañas: Tradición y Transformación. *UNESCO/MAB, Montevideo*. 79-100. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/46/1/arc061%2801%2955-66.pdf>.
- Bolaños, M. E. (2011). Determinación de la huella hídrica y comercio de agua virtual de los principales productos agrícolas de Honduras. [Tesis de Ingeniería. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano]. Biblioteca Wilson Poponoe. <https://bdigital.zamorano.edu/items/479beb7c-f3cd-433f-a328-051e4078547a>.
- Brigido, J. G., Nikolskii, I., Terrazas, L., & Herrera, S. S. (2015). Estimación del impacto del cambio climático sobre fertilidad del suelo y productividad de café en Veracruz, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(4), 101-116. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v6n4/v6n4a7.pdf>
- Builes Cedula, E. D. (2013). Cuantificación y análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica agrícola y pecuaria de la cuenca del río Porce. *Escuela de Geociencias y Medio Ambiente*. [Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia]

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/20267/1017142094.2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Bustamante González, C., Pérez Díaz, A., Rivera Espinosa, R., Martín Alonso, G. M., & Viñals Nuñez, R. (2015). Influencia de las precipitaciones en el rendimiento de *Coffea canephora* Pierre ex Froehner cultivado en suelos Pardos de la región oriental de Cuba. *Cultivos Tropicales*, 36(4), 21-27. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S025859362015000400003&script=sci_arttext&tlng=en.

Calderón Carrero, P. A., & Moya Garzón, L. K. (2017). Cálculo comparativo de la huella hídrica como criterio de sostenibilidad para el sistema productivo de café en la microcuenca Quebrada Cune, municipio Villeta Cundinamarca. [Tesis de licenciatura. Universidad de la Salle. Colombia] https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1379&context=ing_ambiental_sanitaria.

Cisneros Zayas, E., Rey García, R., Martínez Varona, R., López Seijas, T., & González Robaina, F. (2015). Evapotranspiración y coeficientes de cultivo para el cafeto en la provincia de Pinar del Río. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(2), 23-30. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S20710054201500200004&lng=es&nrm=iso. ISSN 2071-0054.

Echeverri, J. C. L., & Tobón, C. (2021). Huella hídrica de la producción de café en Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 74(3), 9685-9697. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n3.91461>.

Eriyagama, N., Chemin, Y., & Alankara, R. (2014). A methodology for quantifying global consumptive water use of coffee for sustainable production under conditions of climate change. *Journal of water and climate change*, 5(2), 128-150. [Doi: 10.2166/wcc.2013.035](https://doi.org/10.2166/wcc.2013.035).

Escamilla Prado, E. (2007). Influencia de los factores ambientales, genéticos, agronómicos y sociales en la calidad del café orgánico en México. [Tesis

doctoral. Colegio de Postgraduados, México].
<http://hdl.handle.net/10521/1625>.

Escamilla, P., E, Robledo, M, J.D. y Díaz, C.S. (2018). Estimación de cosecha de café (CENACAFÉ. CRUO. Chapingo. 39).

Fernández-Ojeda, P. R., Acevedo, D. C., Villanueva-Morales, A., & Uribe-Gómez, M. (2016). Estado de los elementos químicos esenciales en suelos de los sistemas natural, agroforestal y monocultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, (35), 65-77.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200711322016000300065&lng=es&nrm=iso>. ISSN 2007-1132.

Forero Peña, A. M., & Pastor Silva, E. P. (2014). Aproximación a la huella hídrica del cultivo de café en el municipio de Anolaima y determinación de la presión generada por la demanda hídrica y descarga de aguas mieles. [Tesis de Ingeniería. Universidad de la Salle Colombia]
https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1911&context=ing_ambiental_sanitaria.

Garay, J., & Rivero, J. (2016). Biosistemas para purificar aguas residuales del beneficiado húmedo del café: distrito La Copia, departamento de Cajamarca. *Manglar* 11(1), 43-50. <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2014.006>

Gay, C., Estrada, F., Conde, C., Eakin, H., & Villers, L. (2006). Potential impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. *Climatic Change*, 79(3), 259-288. DOI: [10.1007/s10584-006-9066](https://doi.org/10.1007/s10584-006-9066).

Hoang, V., & Nguyen, A. (2019). PGI Buon Ma Thuot Coffee in Vietnam. *Sustainability of European Food Quality Schemes: Multi-Performance, Structure, and Governance of PDO, PGI, and Organic Agri-Food Systems*, 265-285. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27508-2_29

- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (9), 3232-3237. [http:// ayhoekstra.nl/pubs/Hoekstra-Mekonnen-2012a.pdf](http://ayhoekstra.nl/pubs/Hoekstra-Mekonnen-2012a.pdf)
- Jaramillo-Robledo, A. (2005). La redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de plantaciones de café (*Coffea arabica* L.). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 29 (112): 371-382. https://www.acefyn.com/revista/Vol_29/112/112_371_382.pdf.
- Jiménez, K. M., Yaguache, J. V. O., & Escalante, M. G. T. (2017). Especialización productiva mediante un proceso de selección multicriterio, que considere la huella hídrica de los productos en la provincia de Loja, Ecuador. *Revista Ciencias Estratégicas*, 25(37), 181-210. <https://www.redalyc.org/pdf/1513/151353628010.pdf>
- López, K. L. G. Cuantificación de la huella hídrica en la microcuenca del río Sunuba en el municipio de Guayatá, Boyacá. Colombia. [Tesis de Licenciatura. Universidad Católica de Colombia. Bogotá, Colombia]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/10983/22377>.
- Maestri, M., & Barros, R. S. 1981. *Ecofisiología de cultivos tropicales Café*. IICA. No. (288). <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=RzNtAAAAIAAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Ecofisiolog%C3%ADa+de+cultivos+tropicales.+Caf%C3%A9%E2%80%9D&ots=3jecrxvI5s&sig=mHjy-JtCE-2qcHv3JT-9K8vxt2M#v=onepage&q=Ecofisiolog%C3%ADa%20de%20cultivos%20tropicales.%20Caf%C3%A9%E2%80%9D>.
- Mekonnen, M.M & Hoekstra, A.Y. 2011. La huella hídrica verde, azul y gris de los cultivos y productos derivados de cultivos. *Hidrología y Ciencias del Sistema Terrestre*, 15 (5), 1577-1600. [Doi:10.5194/hess-15-1577-2011](https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011).
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2014). <https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/sistema-informacion-agroclimatica-regadio/default.aspx>.

- Naranjo, J. F., & Reyes, H. 2021. Huella hídrica del cultivo de aguacate cv. Hass (Persea americana Mill.), en el Distrito de Conservación de Suelos Barbas-Bremen, Quindío, Colombia. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 15(29), 63-70. DOI: <https://doi.org/10.31908/19098367.1813>
- Navarrete-Molina, C., Rios-Flores, J. L., & Castaño-Quintero, P. A. (2015). Productividad del Agua en Café Producido Bajo Condiciones de Temporal en Motozintla, Chiapas, México. [Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Durango, México]. <https://docplayer.es/51515129-Productividad-del-agua-en-cafe-producido-bajo-condiciones-de-temporal-en-motozintla-chiapas-mexico.html>.
- Ngo, T. T., Le, N. T., Hoang, T. M., & Luong, D. H. (2018). Water scarcity in Vietnam: a point of view on virtual water perspective. *Water Resources Management*, 32, 3579-3593. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2007-4>
- Ortiz-Caballero, L. D. (2014). Cálculo de la huella hídrica de los sistemas productivos agrícolas de la microcuenca Quebrada Cune, municipio de Villeta Cundinamarca. [Tesis de Ingeniería. Universidad de la Salle. Bogotá. Colombia]. Repositorio Universitario. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1959&context=ing_ambiental_sanitaria.
- Pérez, S. I. (2012). Evaluación y análisis de la huella hídrica y agua virtual de la producción agrícola en el Ecuador. [Tesis de licenciatura. Zamorano, Honduras]. Biblioteca digital. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/911>.
- Ramírez, V. H., Jaramillo, A., & Arcila, J. (2013). Rangos adecuados de lluvia para el cultivo de café en Colombia. Centro Nacional de Investigaciones de Café Cenicafe. Manizales, Colombia. (*Avances Técnicos* No. 395). <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/364>.
- Ratchawat, T., Panyatona, S., Nopchinwong, P., Chidthaisong, A., & Chiarakorn, S. (2020). Carbon and water footprint of Robusta coffee through its

production chains in Thailand. *Environment, Development and Sustainability*, (22), 2415-2429. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0299-4>

Rivera Silva, M. D. R., Nikolskii Gavrillov, I., Castillo Álvarez, M., Ordaz Chaparro, V. M., Díaz Padilla, G., & Guajardo Panes, R. A. 2013. Vulnerabilidad de la producción del café (*Coffea arabica* L.) al cambio climático global. *Terra Latinoamericana*, 31(4), 305-313. http://www.scielo.org.mx/article_plus.php?pid=S018757792013000500305&tlng=es&lng=es.

Rivera, L. R., Tablada, M. E. N., & Prado, E. E. (2021). Mercados diferenciados en organizaciones cafetaleras del centro de Veracruz, México. *Interconectando Saberes*, (12), 177-184. <https://doi.org/10.25009/is.v0i12.2716>

Rodríguez, N., Sanz, J. R., Oliveros, C. E., & Ramírez, 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. Manizales: *Cenicafé*, 37. <http://hdl.handle.net/10778/659>

Ruelas-Monjardín, L. C., Nava-Tablada, M. E., Cervantes, J., & Barradas, V. L. (2014). Importancia ambiental de los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra en la zona central montañosa del estado de Veracruz, México. *Madera y bosques*, 20(3), 27-40. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712014000300003&script=sci_abstract&tlng=pt.

Sánchez, M., & Carvacho, L. (2006). Estimación de evapotranspiración potencial, ETP, a partir de imágenes NOAAVHRR en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. *Revista de Geografía Norte Grande*, (36), 49-60. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022006000200003>

- Schneir, E. R. (2015). La huella hídrica como un indicador de sustentabilidad y su aplicación en el Perú. *Saber y Hacer*, 2(1), 34-47. <https://revistas.usil.edu.pe/index.php/syh/article/view/40>
- Sedas, S. P., Gervasio, J., & de Jesús, J. (2021). Evaluación de un sistema agroecológico minifundista familiar alternativo a las formas de producción de café predominante en Huatusco, Veracruz. *Brazilian Journal of Agroecology and Sustainability*. 3 (1), 2675-1712. <https://orcid.org/0000-0003-0329-9901>
- Silva, L. M. R., Ribeiro, M. D. F., Ferreira, W. P. M., Rocha Junior, P. R. D., & Fernandes, R. B. A. (2022). Water footprint of Arabica coffee from “Matas de Minas” under shade management. *Revista Ceres*, (69), 488-494. <https://doi.org/10.1590/0034-737X202269040015>
- Suazo, A. R. C. (2023). Productores agroindustriales de café de la zona Huatusco, y el establecimiento de relaciones comerciales con empresas chinas. [Tesis de maestría. Universidad Veracruzana, México]. https://www.uv.mx/mescal/files/2021/05/Tesis_Andres-25Enero23.pdf.
- Tarazona, M. H., Jiménez, C. F. A., Durán, Y. P. V., Gómez-Melo, D., Gómez-Herrera, S., López-Moreno, J. M., & Villota-Paz, J. M. (2023). *Conocimientos para un futuro sostenible*. (págs.163-178). <http://hdl.handle.net/11634/51983>
- Tobón, C. (2018). “Producir café de manera tradicional incrementa la huella hídrica”. Departamento de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Colombia (U.N.) Sede Medellín. Agencia de noticias de la Universidad Nacional de Colombia. <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/producir-cafe-de-manera-tradicional-incrementa-la-huella-hidrica>.
- Torres, C., Gitau, M., Lara-Borrero, J., Paredes-Cuervo, D., & Daher, B. (2023). Modelo Urbano POCOS Nexos para la Cuenca del Río Otún. *Archivo abierto de ESS*. DOI: [10.22541/essoar.169008310.09765430/v1](https://doi.org/10.22541/essoar.169008310.09765430/v1)

- Torres, M. C. D., Carvajal, H. S. M., Trujillo, A. R., & Cobo, N. U. (2017). Necesidades hídricas de estevia calculadas con el coeficiente del cultivo. *Agronomía Mesoamericana*, 28(2), 509-521. doi:10.15517/ma.v28i2.24354
- Vázquez del Mercado Arribas, R., & Lambarri Beléndez, J. (2017). Huella hídrica en México: análisis y perspectivas. (editores Jiutepec, Mor.: *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, (2), 13-35. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/1714>.
- Villers, L., Arizpe, N., Orellana, R., Conde, C., & Hernández, J. (2009). Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia*, 34(5), 322-329. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S037818442009000500006&lng=es&nrm=iso. ISSN 0378-1844.
- Viveros-García, B. E., Viveros-Contreras, R., Medina-Mendoza, V., & García-Moctezuma, H. (2022). Desarrollo de un servicio climático basado en datos científicos y comunitarios para uso agrícola, en una región cafetalera de Veracruz, México. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(5), 3373-3392. DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i5.3324

5.- EVALUACIÓN FÍSICA Y SENSORIAL DE TRES TIPOS DE BENEFICIADO DE CAFÉ Y SU EFECTO EN LA CALIDAD EN TAZA EN LA REGIÓN CENTRO DE VERACRUZ.

5.2.- Resumen

En este estudio se evaluaron las características físicas y sensoriales de café, en tres municipios de Veracruz región de las montañas (Huatusco, Totutla, Tlaltetela). El café se procesó mediante tres métodos de beneficiado (Natural, Húmedo y Despulpado). En las características físicas se evaluaron humedad, presencia de defectos del café verde (semilla). También se evaluaron 10 atributos organolépticos en el que se siguió el protocolo de la Asociación Estadounidense de Cafés Especiales (SCAA). Para el análisis físico se utilizó estadística descriptiva (mínimo, máximo, CV, DE). Con los datos colectados se realizaron correlaciones de Pearson entre todas las variables, con la finalidad de obtener las variables más asociadas e incluirlas en un análisis de componentes principales (ACP). Luego se realizó el ACP, para obtener las variables más significativas y varianzas totales que contribuye al número total de componentes y clúster para conocer la calidad sensorial de café. Posteriormente, se elaboró un análisis de los atributos de la calidad sensorial en el que se utilizó un análisis descriptivo y gráfico boxplot. Se encontró poco daño por broca, lo cual contribuyó a un menor porcentaje de defecto totales de café, mayor contenido de almendra sana, con un promedio de 89% y por lo tanto un mayor rendimiento en trilla. Más del 80 % de las muestras presentaron contenido de humedad dentro del rango admisible 10- 12 % de humedad. Mas del 70 % de las muestras presentaron puntuaciones de calidad sensorial ≥ 80 . Los resultados de la evaluación sensorial demostraron una mejor preferencia de la bebida de café por beneficiado despulpado, seguido del beneficiado húmedo, con promedios en taza de 86.41 para el beneficiado con café despulpado, lo cual son considerados cafés excelentes dentro del grupo de cafés especiales, seguido del beneficiado húmedo con un puntaje promedio de 82.34, el cual se consideran cafés muy buenos.

Palabras clave: análisis sensorial, beneficiado, calidad, cafés de especialidad, atributos organolépticos

5.3-. Abstract

In this study, the physical and sensory characteristics of coffee (*Coffea arabica* L.) were evaluated in three municipalities of the Veracruz Mountain region (Huatusco, Totutla, Tlaltetela). The coffee was processed using three processing methods (Natural, Wet and Honey or Pulped). In the physical characteristics, humidity, presence of defects of green coffee (seed) were evaluated. 10 attributes were also evaluated organoleptics in which the Specialty Coffee Association of America (SCAA) protocol was followed. For the physical analysis, descriptive statistics (minimum, maximum, CV, SD) were used. With the data collected, Pearson correlations were conducted between all the variables, to obtain the most associated variables and include them in a principal components analysis (PCA). Then the PCA was conducted to obtain the most significant variables and total variances that contribute to the total number of components and cluster to know the sensory quality of coffee. Subsequently, an analysis of the attributes of sensory quality was conducted in which a descriptive analysis and boxplot graphic was used. Little borer damage was found, which contributed to a lower percentage of total coffee defects, a higher healthy almond content, with an average of 89 %, and therefore a higher threshing yield. More than 80 % of the samples had moisture content within the admissible range of 10-12 % humidity. More than 70 % of the samples presented sensory quality scores ≥ 80 . The results of the sensory evaluation demonstrated a better preference for the coffee drink for Honey or pulped processing, followed by wet processing, with cup averages of 86.41 for Honey processing, which are considered excellent coffees within the group of specialty coffees. followed by wet processing with an average score of 82.34, which are considered exceptionally good coffees.

Keywords: sensory analysis, processing, quality, specialty coffees, organoleptic attributes

5.4.- Introducción

El cultivo de café (*Coffea arabica* L.) es uno de los productos agrícolas más importantes a nivel mundial. De acuerdo con (FAO, 2022), la producción mundial de este cultivo estuvo representada en una superficie de 11 043 032 ha y una producción total de 10 688 153 toneladas de café verde en el año 2020. Cerca de 25 millones de familias de agricultores se dedican a su producción, por lo que representa el sustento de más de 100 millones de personas a nivel mundial (De Matta et al., 2019; Guido et al., 2020). Solo dos especies son las más cultivadas para su consumo (*Coffea arabica* L., *Coffea canephora*; Pierre ex A. Froehner) esta conocida como robusta (Puerta, 1996; WCR, 2023). Es conocido que la almendra de lo arábigos da una infusión de mejor calidad, aroma intenso, cuerpo y amargor moderados, mientras que los robustas, contienen sabor más fuerte, y amargor debido a su contenido de cafeína (Puerta, 1996; Farat et al., 2006). De manera que, los granos de arábiga son los más buscados en el mercado y por consiguiente obtienen un mejor precio. La calidad del café puede verse afectada por diversos factores, entre ellos, los ambientales (altitud, clima y suelo), genéticos y de procesamiento de postcosecha (beneficiado) (Puerta, 1996; López-García et al., 2016; Worku et al., 2018). Este último influye en gran medida. Diferentes estudios reportan que los atributos y defectos que generan los diferentes métodos de procesamiento pueden influir desde el punto de vista químico y sensorial en la calidad del café (Hamdouche et al., 2016; Pereira et al., 2020). En el procesamiento húmedo, la pulpa y/o el mucílago se eliminan mecánicamente y los granos se fermentan en tanques con un determinado volumen de agua. El proceso semi-seco (Honey) es una variación del proceso húmedo, en el que los frutos del café se despulpan, pero el proceso de fermentación ocurre directamente bajo el sol en una plataforma, este proceso se caracteriza por el resultado de tres colores de pergamino diferentes: amarillo, rojo y negro; causada por las enzimas del mucílago que cambian de color después de ser oxidadas por el aire. Por su parte el método seco se utiliza para fermentar y secar al sol sin lavar en plataformas de madera y/o cemento (Evangelista et al.,

2014; Pereira et al., 2020). Los granos de café oro de alta calidad presenta un 5 % defectos físicos y cuando se tuestan, tienen un carácter distintivo en la taza y altos puntajes en la catación de la bebida (Tolessa et al., 2016). Cuando un café es considerado especial, su calificación sensorial es superior a 80 puntos sobre 100 (Guambi D. et al., 2018). El objetivo de este trabajo fue analizar la calidad física y sensorial de café en tres tipos beneficiado, en los agroecosistemas de pequeños productores de café en la región de Huatusco, Veracruz.

5.5- Materiales y métodos

5.5.1- Área de estudio

Este estudio se realizó en tres municipios (Huatusco, Tlaltetela y Totutla) Cuadro 5. Huatusco se ubica entre los paralelos 19° 04' y 19° 13' de latitud norte; los meridianos 96° 41' y 97° 04' de longitud oeste; altitud entre 400 y 2 000 m (INEGÍ, 2010). El municipio de Tlaltetela se ubica entre los paralelos 19° 12' y 19° 23' de latitud norte; los meridianos 96° 36' y 97° 02' de longitud oeste; altitud entre 100 y 1 600 m (INEGÍ, 2010). Totutla se encuentra entre los paralelos 19° 11' y 19° 17' de latitud norte; los meridianos 96° 49' y 96° 59' de longitud oeste; altitud entre 700 y 1 500 m (SEFIPLAN, 2021).

Cuadro 5. Procedencia de las muestras de café ciclo 2021-2022.

Municipios	Finca	Altitud (msnm)	Variedad	Tipo de beneficiado
Huatusco	Finca Tlaxiopa	1445	Costa Rica 95, Geisha	Húmedo, Seco, Despulpado
	Finca García	1100	Sarchimor rojo, Sarchimor amarillo	Húmedo, Seco, Despulpado
	Finca Tlavictopan	1200		Húmedo, Seco, Despulpado
Tlaltetela	Col. Tlaltetela	980	Costa Rica 95, Colombia, Pluma Hidalgo	Húmedo, Seco, Despulpado
	Ohuapan	1300	Costa Rica 95, Caturra y criollo	Húmedo, Seco, Despulpado
	Finca Cuapol	1350	Criollo, Costa Rica 95, Colombia	Húmedo, Seco, Despulpado

Totutla	Axocuapan	1450	Criollo, Costa Rica 95, Mundo Novo, Bourbon, Garnica	Húmedo, Seco, Despulpado
	Totutla	1445	Caturra rojo y Caturra amarillo	Húmedo, Seco, Despulpado
	Finca los pinos	1340	Criollo, Costa Rica 95	Húmedo, Seco, Despulpado

5.5-. Datos de producción, beneficiado y determinación de propiedades físicas y organolépticas

Durante el periodo de cosecha del ciclo 2021-2022 se llevó a cabo la colecta de frutos en nueve localidades de tres municipios (Tlaltetela, Totutla y Huatusco). Las muestras colectadas fueron de pequeños productores con un gradiente altitudinal que osciló entre los 900 a 1455 msnm. Se obtuvieron 20 kg de café cereza en su óptima madurez por cada productor y se subdividieron en tres submuestras para cada tipo de beneficiado (húmedo, seco o bola y despulpado) (Figura 6). Se realizó el despulpado y posteriormente el secado en zarandas de madera, con exposición al sol hasta una humedad máxima de 12 %. Se procesaron y se guardaron a temperatura ambiente hasta su posterior análisis.



Figura 6. Tipos de beneficiado en el estudio. Fuente: Elaboración propia, 2023.

5.6.- Variables físicas del café

En cada muestra se determinó Humedad, tamaño de zaranda: Z19, Z18, Z17, Z16, Z15, Z0, granos negros, granos agrios, total de defectos primarios, granos partidos, negro/agrio, averanados, blanqueados, brocados, café sano, planchuela sana, quebrados.

5.6.- Variables sensoriales del café

En un tostador de cilindro Probat modelo BRZ2 se tostaron 100 g de café oro entre 180 a 220°C por 8 a 12 min, hasta obtener un color café marrón oscuro. Luego los granos se redujeron a partículas pequeñas con un molino eléctrico.

Se conformó un panel de tres catadores, dos técnicos y uno catador certificado denominado (Q grader) del Centro Regional universitario O (CRUO), el cual pertenece a la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), ubicado en Huatusco, Veracruz. Los catadores calificaron los parámetros sensoriales (fragancia/aroma, gusto, regusto, Equilibrio/amargo/acidez, Equilibrio/amargo/dulce, uniformidad, Sensación en la boca/ Equilibrio y limpieza y el puntaje del catador. Cada atributo se calificó a una escala de 1 a 10, donde 1 fue el valor menor y 10 valor mayor. Para ellos se utilizó la metodología de la Asociación Americana de cafés (2015).

Para el análisis estadístico se usó el programa Infostat versión 2020 (Di Rienzo et al., 2020). El análisis se realizó con la información de las 27 unidades de producción realizándose tres diferentes beneficios de café (despulpado, húmedo y natural). Para realizar la tipificación de los productores de café se utilizaron las variables de las características técnicas de postcosecha. Con los datos colectados se realizaron correlaciones de Pearson entre todas las variables, con la finalidad de obtener las variables más asociadas e incluirlas en un análisis de componentes principales (ACP). Luego se realizó el ACP, para obtener las variables más significativas y varianzas totales que contribuye al número total de componentes y clúster para conocer la calidad sensorial de café. Posteriormente, se elaboró un análisis de los atributos de la calidad sensorial en el que se utilizó

un análisis descriptivo y gráfico boxplot. Finalmente, se realizó análisis de varianza y prueba de Tukey con un nivel de significancia de 0.05 para determinar los problemas específicos durante los tres diferentes beneficios del café.

5.7.- Resultados y discusión

5.7.1-. Calidad física de café almendra

Los análisis mostraron, cafés de excelente calidad, muy buena (cafés de especialidad), y no especiales. Se encontró poco daño por broca, lo cual contribuyó a un menor porcentaje de defecto totales de café, mayor contenido de almendra sana, con un promedio de 89 % y por lo tanto un mayor rendimiento en trilla. Más del 80 % de las muestras presentaron contenido de humedad dentro del rango admisible (Figura 7). El promedio del contenido de humedad del grano de las muestras fue de 10.57 %, con valores mínimo de 9.1 % y máximo de 12.2 %, solamente el 11.11 % se encontraron fuera del rango admisible, donde se garantiza la conservación del producto, el rango admisible de humedad es del 10 a 12 % (Cuadro 6). A diferencia de Puertas, (2016), encontraron desviaciones por humedad del grano por sobresecado y por falta del secado del café, lo cual ocasiona pérdidas económicas y por lo tanto la calidad del café se ve afectada, también puede haber riesgos en la inocuidad del producto (Oliveros et al., 2009; Puerta, 2010).

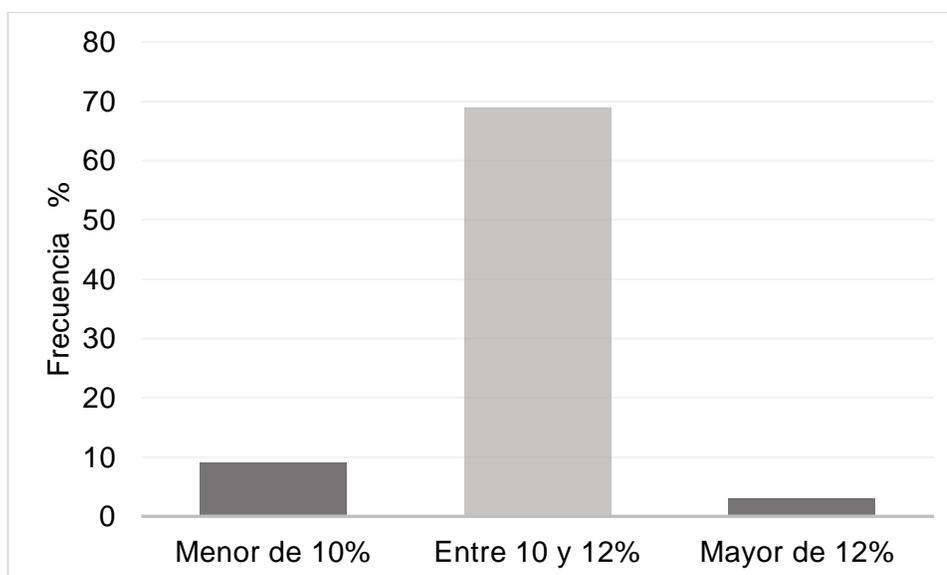


Figura 7. Frecuencia de los granos de café de las muestras obtenidas con humedad por debajo de 10 %, entre 10 y 12 % y por encima de 12 %. Fuente: Elaboración propia, 2023.

Cuadro 6. Estadística descriptiva de la calidad física de las muestras de café ciclo 2021-2022.

Variable	Unidad de medida	No. de observaciones	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	Coficiente de variación
Humedad	%	81	10.5716	10.6000	9.1000	12.2000	0.64172	6.0703
Z19	%	81	21.8654	18.5000	7.9000	52.1000	10.12775	46.3185
Z18	%	81	28.2309	28.6000	20.2000	35.8000	3.72514	13.1953
Z17	%	81	24.7346	25.6000	12.0000	34.0000	4.69505	18.9818
Z16	%	81	14.9198	15.1000	3.6000	25.2000	4.57893	30.6904
Z15	%	81	6.7247	6.4000	1.4000	12.9000	2.69729	40.1103
Z0	%	81	3.5222	3.1000	0.3000	12.3000	2.18895	62.1468
Granos Negro	%	81	2.2222	0.0000	0.0000	43.0000	7.11337	320.1015
Grano Agrio	%	81	1.4198	0.0000	0.0000	27.0000	4.46896	314.7702
Total, de defectos primarios	%	81	3.0247	1.0000	0.0000	34.0000	6.99102	231.1317
Partidos	%	81	26.3086	31.0000	0.0000	63.0000	21.50619	81.7457
Negro/agrio	%	81	9.0247	5.0000	0.0000	58.0000	10.84317	120.1501
Averanados	%	81	0.0864	0.0000	0.0000	3.0000	0.39362	455.4769

Blanqueados	%	81	0.8395	0.0000	0.0000	22.0000	2.74070	326.4654
Brocados	%	81	4.7037	0.0000	0.0000	107.0000	17.39285	369.7692
Peso DS	%	81	10.5198	9.9000	3.400	23.200	4.23552	40.2625
Café sano	%	81	89.0099	89.9000	75.0000	96.4000	4.74412	5.3299
Planchuela sana	%	81	85.9963	87.0000	74.9000	92.9000	5.77375	7.5303
Quebrados	%	81	3.4778	2.1000	0.2000	18.3000	3.85120	110.7374
Caracol	%	81	10.1185	9.2000	4.4000	20.5000	3.59469	35.5258
Planchuelas con D	%	81	9.2506	9.2000	0.6000	18.7000	3.75637	40.6066

Las variables peso defecto secundario y planchuelas con defecto presentaron la correlación más elevada en el análisis ($r = 0.93$), seguida por café y planchuelas sanos ($r = 0.75$) y altitud con planchuelas sanas ($r = 0.65$). En el análisis de componentes principales se retuvieron dos componentes, el primero cuantificó 69.5 % de la varianza total, el segundo 25.8 % y ambos explican 95.3 % de la varianza en los datos. Estos componentes muestran las relaciones existentes entre las variables de mayor importancia en las características técnicas de postcosecha en los tres tipos de beneficiado que realizaron los cafecultores en el componente 1 fueron café y planchuelas sanos, mientras que en el componente 2 fue la altitud (**Figura 8**).

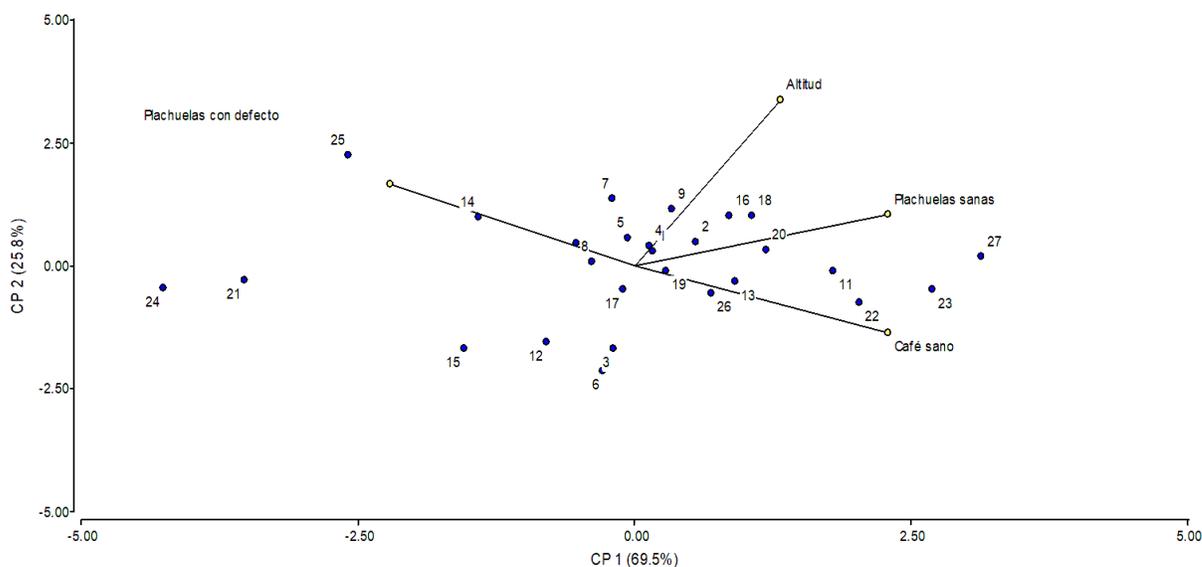


Figura 8. Valores de los componentes 1 (CP 1) Y 2 (CP 2) que identifica las variables postcosechas.

Los defectos en el proceso de benéfico de café influyen de manera negativa. Por lo tanto, esta actividad logra identificar algún problema en específico durante la obtención de grano de café (Cuadro 7).

Cuadro 7. Cantidad de defectos de 300 g de muestra de café en tres diferentes beneficios de café en tres municipios de Veracruz.

Defectos	Despulpado	Húmedo	Natural
Hongo	0.11±0.33b	0.11±0.33b	0.22±0.67 ^a
Capulín	0.00±0.00b	0.07±0.20 ^a	0.03±0.10b
Quebrado	13.97±2.41c	17.82±6.69b	46.08±39.77 ^a
Partido	45.09±8.24 ^a	37.83±11.99b	1.50±3.24c
Negro/agrio	10.46±8.84 ^a	6.71±7.30c	9.82±12.83b
Inmaduro	2.82±4.20b	2.34±2.01b	6.89±7.48 ^a
Brocados	1.60±3.29b	1.60±3.14b	10.82±29.93 ^a
Total	74.05	66.48	75.36

Los promedios con distinta letra son estadísticamente diferentes. Los valores indican la media ± desviación estándar.

De acuerdo con Haile & Kang (2019) la fermentación del grano de café es un proceso muy importante dentro de los métodos húmedo y semihúmedo del café y se prolonga más de lo que marcan los manuales 15-24 hrs, esto puede provocar sabores poco deseados en la bebida de café, las muestras trabajadas y analizadas en este trabajo cumplieron con este requisito en tiempo de fermentación.

Poltronieri & Rossi (2016) realizaron un trabajo sobre los métodos de beneficiado de café, dentro de lo que mencionan que además de llevar a cabo de la mejor forma estos procesos, es necesario también, atender los siguientes pasos en el proceso de beneficiado, es decir, controlar el transporte y almacenaje del grano, así como mejorar los empaques del grano en oro para evitar contaminación por agentes patógenos y así mantener la calidad del café.

Subedi (2010) menciona que, al comparar el método húmedo y el método seco, encontró que la mejor calidad en taza ocurrió en los cafés beneficiados por el

método húmedo además de tener menos defectos físicos también, esto contrasta con el trabajo que se realizó y que en este trabajo los resultados muestran que los tres métodos usados generaron cafés de buena calidad y puntaje (85.03 puntos en la escala SCAA).

En otro estudio realizado en Java Privadi et al., (2021) encontraron que los cafeticultores de esa zona sí aceptan como una tecnología apropiada para el beneficiado del café el método de beneficiado despulpado, el cual tiene la característica de usar menos agua. Aunado a esto, se trata de un café novedoso que está teniendo un segmento de mercado en crecimiento y que también como es el caso de este estudio, tuvo puntajes en el análisis sensorial de café de especialidad (85 puntos en la escala SCAA).

5.7.2.- Calidad organoléptica de las muestras de café

En el Cuadro 8 se encuentran los datos de los análisis sensoriales de las 27 muestras de café. En relación con el aroma se tiene una valoración que va desde 8.08 (beneficiado por la vía Húmeda y despulpado) hasta 6.83 (por la vía natural). En las características sabor y sabor residual la mayor calificación fue de 8.25 y 8.0 respectivamente (ambos por la vía despulpado) y una menor calificación que va desde 6.75 y 6.50 (ambos por la vía Honey). En cuanto a acidez la mayor calificación fue de 8.33 (despulpado) y la menor calificación fue de 6.33 (Natural). En relación con el carácter cuerpo el mayor puntaje fue de 8.0 (Natural) y la menor calificación fue de 6.50 respectivamente (despulpado). En cuanto al balance el mayor puntaje fue de 8.17 (despulpado) y un menor puntaje de 6.67 (Honey) y en cuanto al dulzor en todos los beneficiados se obtuvo una máxima calificación.

Cuadro 8. Características y despulpado organolépticas de 27 muestras de café en relación con tres métodos de beneficiado en tres municipios de Veracruz.

Municipio	Beneficio	Finca	Aroma	Sabor	Sabor residual	Acidez	Cuerpo	Balance	Dulzor
Tlaltetela	Húmedo	Finca Rogelio	7.33	7.00	7.25	6.83	7.33	6.83	10.00
		Finca Ohupan	7.58	7.25	7.42	7.50	7.75	7.50	10.00

		Finca Coapol	7.67	7.67	7.50	7.50	7.58	7.33	10.00
	Natural	Finca Los Pinos	7.83	7.17	7.00	6.83	7.83	7.17	9.33
		Finca Silvano	7.50	7.25	7.17	7.67	7.50	7.42	10.00
		Fica Loa Fresnos	7.75	7.67	7.50	7.58	8.00	7.67	10.00
	Despulpado	Fica Tlaxiopa	7.67	7.75	7.67	7.50	7.92	7.83	10.00
		Finca García	8.08	8.08	7.67	7.92	7.75	8.17	10.00
		Finca Tlaxictepan	7.92	7.92	7.75	7.75	7.83	7.33	10.00
Totutla	Húmedo	Finca Rogelio	7.83	7.67	7.17	7.17	7.33	7.83	10.00
		Finca Ohupan	7.67	7.50	7.33	7.53	7.56	7.31	9.11
		Finca Coapol	7.25	7.17	7.00	6.67	7.42	7.00	10.00
	Natural	Finca Los Pinos	7.67	7.67	7.50	7.58	7.67	7.42	10.00
		Finca Silvano	6.83	7.42	7.25	7.50	7.67	7.42	10.00
		Fica Loa Fresnos	7.58	7.50	7.33	6.83	7.67	7.58	10.00
	Despulpado	Fica Tlaxiopa	8.08	8.25	8.00	8.33	8.00	8.00	10.00
		Finca García	7.67	7.83	7.33	7.67	7.67	7.58	10.00
		Finca Tlaxictepan	7.67	7.75	7.33	7.25	8.00	7.92	10.00
Huatusco	Húmedo	Finca Rogelio	8.00	7.67	7.42	7.50	7.92	7.83	9.33
		Finca Ohupan	8.08	7.75	7.58	7.58	7.33	7.58	10.00
		Finca Coapol	7.33	7.25	7.33	7.25	7.92	7.58	10.00
	Natural	Finca Los Pinos	7.58	7.58	7.33	7.17	7.33	7.25	10.00
		Finca Silvano	7.67	7.17	7.00	6.33	7.50	7.00	10.00
		Fica Loa Fresnos	7.83	7.92	7.75	7.83	7.92	7.83	10.00
	Despulpado	Fica Tlaxiopa	7.92	7.58	7.17	8.08	7.83	7.08	9.33
		Finca García	6.92	6.75	6.50	6.50	6.50	6.67	10.00
		Finca Tlaxictepan	7.75	7.83	7.75	7.83	7.92	7.50	10.00

Dulzor, taza limpia y uniformidad son las variables que obtuvieron mayor puntaje. Sin embargo, en otras variables que se consideraron fueron diferentes gustos en las muestras (**Figura 9**).

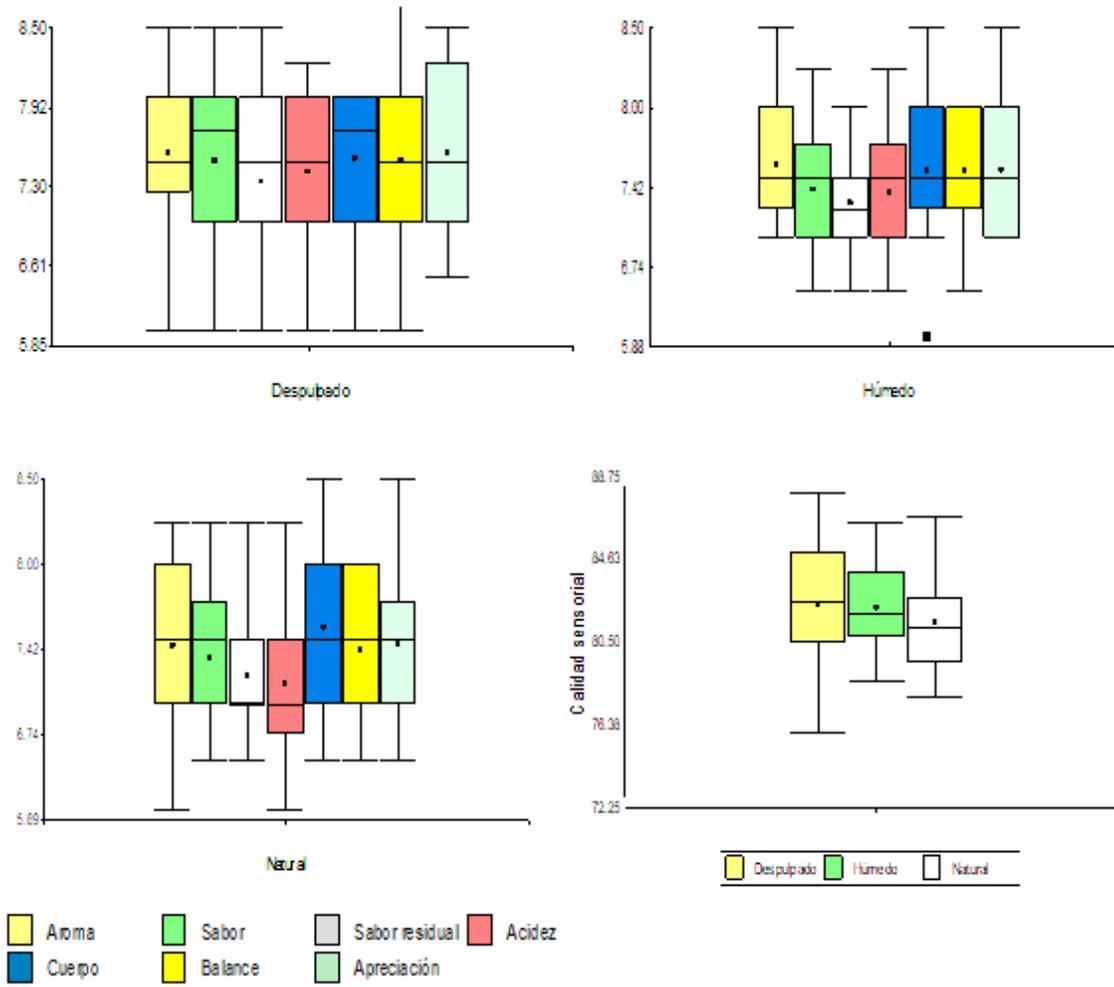


Figura 9. Análisis estadístico de los atributos de la calidad sensorial de los tres diferentes beneficios de café.

En el beneficiado seco, el producto final en taza desarrolla aroma y sabor afrutados, debido a que la capa que envuelve (pericarpio) el café no se elimina. En el caso del método de beneficiado húmedo, al ser retirada la pulpa y debido a la fermentación se desarrollan microorganismos que son los responsables de liberar determinados compuestos volátiles y metabolitos que se propagan al interior del grano y que ayudan a dar mejor sabor y aroma (De Melo-Pereira et al., 2018; Juárez et al., 2021). (De Melo-Pereira et al., 2018; Juárez et al., 2021). Mientras que el beneficiado despulpado posee sabores más intensos Cuadro 9. De acuerdo con (Poltronieri y Rossi, 2016; Pereira et al., 2019), el sabor dulce, lo proporciona los siguientes compuestos, como los esteres, furanos, hidrocarburos

y cetonas para el sabor cítricos; aldehídos, terpenos y cetonas para el sabor a hierbas. Aunque también estos aromas pueden estar influenciados por el método de procesamiento y no necesariamente de la composición química. Es por ello, mantener un control adecuado en la etapa de postcosecha es fundamental para obtener aromas apreciados.

Los resultados de la evaluación sensorial demostraron una mejor preferencia de la bebida de café por beneficiado despulpado, seguido del beneficiado húmedo, con promedios en taza de 86.41 para el beneficiado despulpado, lo cual son considerados cafés excelentes dentro del grupo de cafés especiales, seguido del beneficiado húmedo con un puntaje promedio de 82.34, el cual se consideran cafés muy buenos. Mas del 70 % de las muestras están en el rango de cafés especiales y se clasifican como muy buenos de acuerdo con la (SCAA, 2015).

Cuadro 9. Evaluación sensorial de café obtenido por los diferentes métodos de beneficiado (Natural, Húmedo y despulpado).

Atributos	Beneficiado		
	Natural	Húmedo	Despulpado
Notas de aroma	Naranja, tostado, café tostado, tabaco, pulpa, pepino, tierra, semillas de cilantro, cedro, frutas, ciruela, fresas, frambuesa	Nuez, almendra, caramelo, avellanas, mantequilla, te de rosas, flor de cafeto, vainilla, maple, chocolate, cacahuete	Grosella, pan tostado, almendra, limón, tostado, pasitas, miel, caramelo, durazno, galleta
Notas de sabor	café tostado, chocolate, madera, semillas de cilantro, amargo, limón, chícharo, pepino	Chocolate, almendras, mantequilla, cereza, nuez, cacahuete, durazno	Chocolate, avellanas, almendras, maple, caramelo, miel
Puntaje en tasa promedio	82.25	82.34	83.68
Porcentaje	22.22 %	33.33 %	22.22 %
Clasificación	Muy buenos	Muy buenos	Muy buenos
Puntaje en tasa promedio	79.5	79.5	76.75
Porcentaje	3.70 %	3.70 %	3.70 %
Clasificación	No especiales	No especiales	No especiales

Puntaje en tasa Promedio			86.41
Porcentaje			7.40 %
Clasificación	N/D	N/D	Excelente

5.8.- Conclusiones

El análisis físico y sensorial por los métodos de beneficiado Natural, Húmedo y despulpado demostró que en el aspecto físico presentaron niveles de humedad, defectos físicos aceptables para fines de comercialización. El proceso de beneficio del café es muy importante para dar valor agregado de acuerdo con el método utilizado del beneficio, se encontró las características de post cosecha aceptable para su comercialización por la altitud que se encuentran establecidos los cultivos de café. En la evaluación de la calidad sensorial del café los granos de café se encuentran aceptables como buenos para su venta en el mercado. El método del beneficiado húmedo permitió obtener menos defectos en el grano. Seguido por el benéfico despulpado y natural. Por lo tanto, es necesario antes de realizar el proceso de beneficiado seleccionar los granos de café para mejorar la calidad del producto final y que estos resultados sirvan para que los pequeños productores pueden mejorar el precio por la venta de café de calidad y de especialidad.

5.9.- Literatura citada

- DaMatta, FM, Rahn, E., Läderach, P., Ghini, R., & Ramalho, J.C. (2019). Why could the coffee crop endure climate change and global warming to a greater extent than previously estimated? *Climatic Change*, (152), 167–178. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2346-4>.
- De Melo-Pereira, G. V. Carvalho Neto, D. P., Magalhães Júnior, A. I., Vásquez, Z. S., Medeiros, A. B. P., Vandenberghe, L. P. S., & Soccol, C. R. (2018). Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of

- coffee beans a review. *Food Chem*, (272), 441-452. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.061>.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C.W. infoStat, version. (2020). Centro de transferencias infoStat. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>.
- Evangelista, S. R, da Cruz Pedrozo, Miguel., M. G., de Souza Cordeiro, C., Silva, C. F., Marques Pinheiro, A. C., & Schwan, R. F. (2014). Inoculation of starter cultures in aseme-dry coffee (*Coffea arabica*) fermentation process. *Food Microbiology*, (44), 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.05.013>.
- Farah, A., Monteiro, M. C., Calado, V., Franca, A. S., & Trugo, L. C. (2006). Correlation between cup quality and chemical attributes of Brazilian coffee. *Food Chemistry*, 98(2), 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.032>.
- Food and agriculture Organization of the United Nations. (2022). FAOSTAT (database). <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>.
- Guambi D., L. A., Andrade M., J., Farfán T., D. S. & Velásquez C., S. del R. (2018). Calidad organoléptica, métodos de beneficio y cultivares de café robusta (*Coffea canephora* Pierre ex Froehner) en la Amazonía del Ecuador. *Revista iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 19(2), 239–253. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81357541011>.
- Guido, Z., Knudson, C., Finan, T., Madajewicz, M., & Rhiney, K. (2020). Shocks and cherries: The production of vulnerability among smallholder coffee farmers in Jamaica. *World Development*, (132), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.104979>.
- Haile, M., & Kang, W. H. (2019). The role of microbes in coffee fermentation and their impact on coffee quality. *Journal of Food Quality*, 1-6. <https://doi.org/10.1155/2019/4836709>

- Hamdouche, Y, Meile, J. C., Nganou, D. N., Durand, N., Teyssier, C., & Montet, D. (2016). Discrimination of post-harvest coffee processing methods by microbial ecology analyses. *Food Control*, (65), 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.01.022>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Compendio de información geográfica municipal. Huatusco, Veracruz. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/30/30071.pdf.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Compendio de información geográfica municipal. Tlaltetela, Veracruz. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/30/30024.pdf
- Juárez González, T., Maldonado Astudillo, Y. I., González Mateos, R., Ramírez Sucre, M. O., Álvarez Fitz, P., & Salazar, R. (2021). Caracterización fisicoquímica y sensorial de café de la montaña de Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(6), 1057-1069. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i6.2773>
- López-García, F. J., Escamilla-Prado, E., Zamarripa-Colmenero, A. & Cruz-Castillo, J. G. (2016). Producción y calidad en variedades de café (*Coffea arabica* L.) en Veracruz, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(3), 297–304. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S018773802016000300297&script=sci_abstract&tlng=pt.
- Oliveros T., C.E.; Peñuela M., A.E.; Jurado C., J.M. (2009) Controle la humedad del café en el secado solar utilizando el método gravimet. Chinchiná: *Cenicafé Avances Técnicos* (387). <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/385>
- Pereira, G., Carvalho, D., Magalães, A., Vásquez, Z., Medeiros, A., Vandenbergue, L., & Soccol, C. (2019). Exploring the impacts of

- postharvest processing on the aroma formation of coffee beans – A review. *Food Chemistry*, (272), 441-452. [DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.08.061](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.061).
- Pereira, L. L., Guarçoni, R. C., Pinheiro, P. F., Osório, V. M., Pinheiro, C. A., Moreira, T. R. & ten Caten, C. S. (2020). New propositions about coffee wet processing: Chemical 76 and sensory perspectives. *Food Chemistry*, 310(2010), 125-943. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125943>.
- Poltronieri, P. & Rossi, F. (2016). Challenges in specialty coffee processing and quality assurance. *Challenges*, 7(2), 19. <https://doi.org/10.3390/challe7020019>.
- Priyadi, D. A., Prayogo, G. S., & Nur, K. M. (2021). Smallholder farmers' perceptions of coffee bean processing using the honey method. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 672(1), 012-025. [DOI 10.1088/1755-1315/672/1/012025](https://doi.org/10.1088/1755-1315/672/1/012025).
- Protocolos de la Asociación Estadounidense de Cafés Especiales (2015). <http://www.scaa.org/PDF/resources/cupping-protocols.pdf>
- Puerta Q., G.I. (1996). Escala para la evaluación de la calidad de la bebida de café verde *Coffea arabica*, procesado por vía húmeda. *Cenicafé*, 47(4), 231- 234. <http://hdl.handle.net/10778/62>
- Puerta Q., G.I. Rendimientos y calidad de *Coffea arabica* L. (2010). Según el desarrollo del fruto y la remoción del mucílago. *Cenicafé*, 61(1), 67-89. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/41>
- Secretaria de Finanzas y Planeación. Cuadernillos municipales. (2017). <http://ceieg.veracruz.gob.mx/wpcontent/uploads/sites/21/2017/05/Totutla.pdf>
- Subedi, R. N. (2010). Comparative analysis of dry and wet processing of coffee with respect to quality in Kavre District, Nepal. Master's Thesis. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands. <https://edepot.wur.nl/166282>

Tolessa, K., Rademaker, M., De Baets, B., & Boeckx, P. (2016). Prediction of specialty coffee cup quality based on near infrared spectra of green coffee beans. *Talanta*, (150), 367–374.
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.12.039>

Worku M., B. de Meulenaer., L. Duchateau and P. Boeckx. (2018). Effect of altitude on biochemical composition and quality of green arabica coffee beans can be affected by shade and postharvest processing method. *Food Research International*, (105), 278-285.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.016>

World Coffee Research (2023). <https://varieties.worldcoffeeresearch.org/>

6.- CONCLUSIONES GENERALES

- ❖ De acuerdo con la revisión sobre las tecnologías de beneficiado sus retos y perspectiva, se encontró que, en México, Centroamérica y se han desarrollado desde la década de los años 90 diferentes tecnologías enfocadas a disminuir la contaminación generada por el beneficiado húmedo del café, principalmente presente en las aguas residuales.
- ❖ Las tecnologías más eficaces fueron los sistemas de tratamientos anaerobios, y humedales, esto en relación con la disminución de la carga contaminante en efluentes tanto sólidos como líquidos. Por otro lado, algunas de estas tecnologías de tratamientos pueden ser accesibles económicamente para pequeños productores lo que permite poder desarrollar una cafecultura más sostenible.
- ❖ En lo que concierne a la medición de la huella hídrica en la producción y el beneficiado de café en la región de Huatusco, Veracruz. Se encontró una huella hídrica verde y gris de $977.16 \text{ m}^3 \text{ t}$ de café cereza, la cual resulta baja para la región, tomando en cuenta que tampoco se tienen cafetales que tengan sistemas de riego. En este sentido el agua utilizada para la producción de café no es tan alta que se estimó en $155.13 \text{ m}^3 \text{ Kg}$ de café cereza procesado. La suma final encontrada al sumar la huella hídrica verde, gris y gasto de agua en beneficios de café fue de $1132.74 \text{ m}^3 \text{ Kg}$ de café cereza producido, es un foco de atención que se debe tomar en cuenta por todos los actores involucrados actualmente en la cafecultura nacional, gobierno, empresas, organizaciones y sociedad civil, ya que la problemática por el uso del recurso hídrico se encrudecerá en los próximos años.
- ❖ Los beneficios ecológicos son una opción, debido a que el gasto de agua fue de $10.77 \text{ m}^3 \text{ Kg}$ de café cereza procesado. Este tipo de beneficios modificados en el sentido de que en el proceso de beneficiado haya un

ahorro del gasto de agua pueden ser una opción para pequeños cafecultores y además resultan también más económicos.

- ❖ Los productores de café necesitan saber si el café que se produce en la región centro de Huatusco Ver., posee la calidad de un café de especialidad. Esto lo constatan las muestras que se obtuvieron por parte de los productores de tres municipios de la región mencionada, los cuales fueron beneficiados por tres métodos; 1) Beneficiado húmedo tradicional, 2) Beneficiado natural y 3) despulpado y alcanzaron puntajes de cafés muy buenos y que pueden ser vendidos a mejores precios en mercados de especialidad.
- ❖ El resultado de las muestras se confirma que los cafés producidos en la región están dentro de los puntajes de cafés de calidad. Se encontró que tuvieron poco daño por broca, lo cual contribuyó a un menor porcentaje de defecto totales de café, mayor contenido de almendra sana, con un promedio de 89% y por lo tanto un mayor rendimiento en trilla. Más del 80% de las muestras presentaron contenido de humedad dentro del rango admisible 10 - 12% de humedad. Más del 70% de las muestras presentaron puntuaciones de calidad sensorial ≥ 80 .
- ❖ Los resultados de la evaluación sensorial demostraron una mejor preferencia de la bebida de café por beneficiado despulpado, seguido del beneficiado húmedo, con promedios en taza de 86.41 para el beneficiado despulpado, lo cual son considerados cafés excelentes dentro del grupo de cafés especiales, seguido del beneficiado húmedo con un puntaje promedio de 82.34, el cual se consideran cafés muy buenos.
- ❖ Estos resultados permiten al productor pequeño, mediano, o grande tomar decisiones acertadas acerca de la oportunidad que le genera tener cafés especiales los cuales pueden colocar en el mercado con un mayor precio que beneficie a las familias y la cafecultura local y regional.

- ❖ Las aportaciones generadas por esta investigación proveen herramientas tanto a productores, organizaciones, tomadores de decisiones y gobierno para enfocar la caficultura hacia una multifuncionalidad.
- ❖ Al productor de café le provee herramientas importantes para poder llevar a cabo una caficultura multifuncional y sostenible, que también se refleje en mejores condiciones de vida de las familias caficultoras de la región e incluso de todo el país.