

# Evaluación del impacto de las aguas residuales del beneficio húmedo del café en Xicotepec, México

## Evaluation of the wastewater impact of coffee wet mill in Xicotepec, Mexico

Gabriela Pérez-Osorio<sup>1\*</sup> ; Fabiola Avelino-Flores<sup>2</sup> ; Betzabe Hernández-Lorenzo<sup>1</sup> ; José Eligio Moisés Gutiérrez-Arias<sup>3</sup> ; José Carlos Mendoza-Hernández<sup>1</sup> ; Yaselda Chavarín-Pineda<sup>4</sup> 

<sup>1</sup>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Ingeniería Química. México; e-mail: betzahernandez16@gmail.com, josecarlos.mendoza@correo.buap.mx

<sup>2</sup>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Posgrado en Ciencias Ambientales, Instituto de Ciencias, Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas. México; e-mail: fabiola.avelino@correo.buap.mx

<sup>3</sup>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica. México; e-mail: jose.gutierrez@correo.buap.mx

<sup>4</sup>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas, Instituto de Ciencias. México; e-mail: yaselda.chavarinp@correo.buap.mx

\*autor para correspondencia: gabriela.perez@correo.buap.mx

**Cómo citar:** Pérez-Osorio, G.; Avelino-Flores, F.; Hernández-Lorenzo, B.; Gutiérrez-Arias, J.E.M.; Mendoza-Hernández, J.C.; Chavarín-Pineda, Y. 2025. Evaluación del impacto de las aguas residuales del beneficio húmedo del café en Xicotepec, México. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2717. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2717>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada en Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional

**Recibido:** junio 26 de 2024

**Aceptado:** junio 8 de 2025

**Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

### RESUMEN

El municipio de Xicotepec, Puebla, es uno de los principales productores de café en México y cuenta con 978 beneficios, que arrojan sus aguas residuales a los arroyos circundantes, la mayoría sin tratamiento previo. Dichas aguas residuales contienen materia orgánica y contaminantes, que disminuyen el oxígeno disuelto, generan color y malos olores en los cuerpos de agua receptores. Este trabajo evalúa el impacto de las aguas residuales descargadas en el arroyo Nopalutla, por uno de estos beneficios húmedos de café. Se analizaron siete parámetros físicos, diez químicos y dos microbiológicos asociados a la calidad del agua, de acuerdo con la normatividad mexicana correspondiente. Se determinó que las aguas provenientes del procesamiento del café poseen características físicas y químicas, que superaron los límites permitidos en la normatividad mexicana vigente, tales como los sólidos sedimentables y los suspendidos totales, la dureza, la demanda química de oxígeno, el nitrógeno total y los fosfatos, así como la presencia de coliformes totales y fecales. Lo anterior indica un impacto negativo en la calidad del agua del arroyo Nopalutla y un riesgo a la salud de la población aledaña que la usa.

**Palabras clave:** Arroyo Nopalutla; Beneficio húmedo de café; Calidad del agua; Impacto ambiental; Residuos agrícolas.

### ABSTRACT

The municipality of Xicotepec, Puebla is one of the leading coffee producers in Mexico. It has 978 wet coffee processing plants, which discharge their wastewater into the surrounding streams, most of which are without prior treatment. Such wastewater contains organic matter and pollutants, which reduce dissolved oxygen and produce color and foul odors in receiving water bodies. The impact of wastewater discharged into the Nopalutla stream from a wet coffee processing plant in Xicotepec, Puebla was evaluated by analyzing seven physical, ten chemical, and two microbiological characteristics associated with water quality according to Mexican regulations. It was determined that wastewaters from coffee processing showed physical and chemical characteristics that exceeded the limits allowed in current Mexican regulations, such as settleable and suspended solids, hardness, chemical oxygen demand, total nitrogen, and phosphates. As well as the presence of total and fecal coliforms. The above indicates a negative impact on the water quality of the Nopalutla stream and a risk to the health of the surrounding population that uses it.

**Keywords:** Agricultural waste; Environmental impact; Nopalutla stream; Wet coffee processing plant; Water quality.

## INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el café es la segunda bebida de mayor consumo después del agua y se estima que se consumen 2.250 millones de tazas de café diariamente, mientras que en México, se consumen 1,6 kg de café por persona al día.

En México, el 90 % de la producción de café cereza se concentra en cuatro estados: Chiapas, Veracruz, Puebla y Guerrero (SADR, 2020). En el estado de Puebla, el principal productor es el municipio de Xicotepec, que cuenta con 978 productores (Cervantes & Velázquez, 2015). El municipio registra un gran número de arroyos y ríos, donde se descargan las aguas residuales de los beneficios y, en la mayoría de los casos, sin tratamiento previo, lo que genera un impacto ambiental negativo para las comunidades aledañas, que utilizan los arroyos y ríos como suministro de agua potable, para sus actividades cotidianas.

El cafeto es un árbol pequeño o arbusto perteneciente a la familia de las rubiáceas, compuesta por 500 géneros y más de 6.000 especies, la mayoría de origen tropical y con amplia distribución geográfica. Su madera es dura y densa, sus flores son blancas o rosadas y el fruto está formado por dos semillas, cada una con una grieta característica (Herrera Pinilla & Cortina Guerrero, 2013). El fruto del café maduro es de color rojizo y se asemeja a una cereza, de ahí que se le conozca también como café cereza.

El conjunto de operaciones para transformar el fruto del café desde el denominado café cereza hasta la obtención del grano seco (café pergamino), se conoce como “beneficiado de café” y se realiza en instalaciones que cuentan con maquinaria especializada para el recibo, despulpe, fermentación, lavado, clasificación y secado de los granos. Existen dos metodologías para llevar a cabo el proceso de beneficiado, clasificadas según el uso de agua en el proceso: el beneficio húmedo y el beneficio seco (Dadi *et al.* 2018). El beneficiado húmedo es más costoso y requiere más instalaciones, equipo, maquinaria y conocimiento que el método seco; pero el producto que se obtiene por método húmedo es de mejor calidad y su principal requerimiento es un abundante abastecimiento de agua (Rattan *et al.* 2015; Navaz & Roy, 2016).

El beneficiado húmedo es el método de procesamiento de café más utilizado en Centroamérica, México y Colombia. El método surgió como una alternativa para solucionar el problema de la fermentación inmediata y excesiva de los granos en zonas tropicales (Orozco *et al.* 2005). Este tipo de procesado húmedo de café se da, principalmente, cerca de los ríos, debido a que se requiere gran cantidad de agua para el lavado de los granos, para remover la pulpa y el mucílago y, de igual forma, se utiliza el río para la descarga de las aguas residuales. El tema de los residuos generados durante el procesamiento del café es motivo de diversas investigaciones (Ijanu *et al.* 2020). Dependiendo del tipo de proceso, se pueden generar residuos sólidos y semi húmedos, como la piel, pulpa, corteza seca del grano, además del agua residual, por lo que, en diversas investigaciones, se analizan perspectivas sustentables para su tratamiento (Cássia Campos *et al.* 2021).

En uno de los beneficios húmedos de café en el municipio de Xicotepec - Puebla, México, se procesan cada año alrededor de 3 a 4 toneladas

diarias de café cereza, entre septiembre y abril. Este beneficio utiliza el agua del arroyo Nopalutla, un afluente de agua limpia cercano a la ubicación del beneficio que, a lo largo de su cauce, sirve para dar de beber al ganado, regar los árboles que crecen en invernaderos situados a las orillas y en su paso cerca del beneficio es transportado mediante una bomba al interior, para lavar el café.

Al llevar a cabo el proceso de beneficiado húmedo se generan dos subproductos: la pulpa del café y las aguas residuales, llamadas aguas mieles que, si no se aprovechan o disponen adecuadamente, se convierten en fuentes importantes de contaminación ambiental. En el beneficio de café no se ha medido el gasto de agua que se emplea en el proceso de lavado y aunque el despulpado de los granos y el transporte de la pulpa se llevan a cabo en seco, lo cual, reduce un 75 % el potencial contaminante de los subproductos, en las instalaciones tradicionales de beneficio húmedo para lavar café, se registran consumos de agua entre 20 y 30 L por kg de café pergamino seco. En la literatura se han reportado consumos de hasta 45,5 L de agua por kg de café (Rodríguez Pérez *et al.* 2000). Además del uso desmedido del agua durante el proceso de beneficiado húmedo, este beneficio de café no cuenta con un tratamiento previo para el uso del agua de lavado ni al final de dicho proceso, por lo que las aguas mieles son descargadas sin tratamiento alguno al mismo arroyo, pero aguas abajo.

Las descargas a cielo abierto de aguas residuales procedentes de los beneficios húmedos de café son una práctica frecuente en los principales estados cafeteros de México; en Chiapas es muy común encontrar residuos procedentes de los beneficios húmedos en los cuerpos de agua, debido a la ineficiente disposición y abundancia de equipos obsoletos con que cuentan la mayoría de los productores de café. En Veracruz, el panorama es muy similar; en la región centro, las 90 industrias cafeteras, registradas hasta el 2004, descargaban 171,63 Mm<sup>3</sup> de aguas residuales, de los cuales, sólo trataban 24,51 Mm<sup>3</sup> (Ruelas Monjardín *et al.* 2020); sin embargo, esta situación se puede observar en varios países productores de café, como es el caso de Etiopía, en donde hay 18 ríos que reciben las descargas del procesamiento de café, generando agotamiento del oxígeno disuelto y, como consecuencia, la disminución considerable de macroinvertebrados (Beyene *et al.* 2012).

Debido a que las descargas de aguas mieles aportan color y materia orgánica (principalmente pectinas, proteínas y azúcares), se producen malos olores y se modifican las características fisicoquímicas del cuerpo de agua receptor (Dadi *et al.* 2018; Ijanu *et al.* 2020). Además, estas descargas también contienen nutrientes que pueden generar la eutrofización de los cuerpos de agua receptores, por lo que es importante cuantificar los parámetros de nitrógeno y fósforo, que están expuestos a la acción de agentes microbiológicos. En el caso presentar altas concentraciones de nitratos, se asume que se debe a la desaminación del nitrógeno amoniacal por bacterias, mientras que los fosfatos, por su parte, pueden estar presentes en altas concentraciones por los diferentes tipos de máquinas despulpadoras, el tiempo de fermentación y la cantidad de agua utilizada en el proceso. En general, los nutrientes (nitrógeno y fósforo) en altas concentraciones representan un riesgo de eutrofización para los cuerpos de agua, localizados aguas abajo, afectando a los residentes cercanos y ecosistemas acuáticos.

En cuanto a otros parámetros fisicoquímicos, el pH por debajo de 7 de las descargas de los beneficios de café resulta tóxico para los organismos acuáticos, mientras que la conductividad eléctrica es un indicador de la calidad del agua, asociado a los sólidos totales disueltos presentes en el agua. El aumento de ambos parámetros en las aguas residuales del procesamiento de café se debe a la etapa del despulpado y a la fermentación de los azúcares en el mucilago, lo que, a su vez, produce alcohol y CO<sub>2</sub>, lo que favorece la disminución del pH en las aguas residuales (Dadi *et al.* 2018).

En este trabajo de investigación, se realiza una caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua del río antes, en el punto de descarga y después de las descargas de las aguas residuales del beneficio de café, para determinar su impacto en la calidad del agua del río Nopalutla, así como del agua del tanque de almacenamiento, del agua de lavado del café y de la descarga de agua del proceso, con el fin de determinar la variabilidad espacial y temporal de la calidad del agua en los diferentes puntos de muestreo seleccionados, tanto en la temporada previa y durante el procesamiento del grano de café.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Descripción de la zona de estudio.** Xicotepec se encuentra ubicado dentro de la Sierra Norte del estado de Puebla, entre los paralelos 20°26'

y 20°13' latitud Norte y los meridianos 97°45' y 98°03' longitud Oeste. Los climas que predominan en el municipio son cálido húmedo, con lluvias todo el año Af (22,63 %), semicálido húmedo con lluvias todo el año ACf (77,09 %) y templado húmedo con lluvias todo el año C(f) (0,28 %) (INEGI, 1995). La población total del municipio para 2020 fue de 80.591 habitantes, de 57.072 personas en edad laboral el 14,60 % trabaja en actividades primarias, 16,9 % en actividades secundarias y 50,3 % en el sector terciario (INEGI, 2020). Xicotepec es el municipio de Puebla en donde más café se produce con 15.860 toneladas, seguido de Zihuateutla (12.320 ton), Hueytamalco (9.600 ton), Tlacuilotepec (8.960 ton), Jalpan (8.525 ton), Cuetzalan del Progreso (6.582 ton), Tlaxco (6.300 ton) y Jopala (6.000 ton) (SIAP, 2024).

**Selección y descripción de sitios de muestreo.** Para evaluar y comparar las características físicas, químicas y microbiológicas del agua antes y después del proceso del lavado de café y conocer la variabilidad espacial de la calidad del agua, se designaron seis puntos de muestreo (Figura 1). El primer sitio (S1) corresponde al arroyo aguas arriba, donde se bombea el agua hasta el beneficio de café; el tanque, que almacena el agua del arroyo y que será utilizada para el proceso de lavado del café representa al sitio 2 (S2); el sitio 3 (S3) corresponde a la zona del arroyo aguas abajo, posterior a la ubicación del beneficio de café.

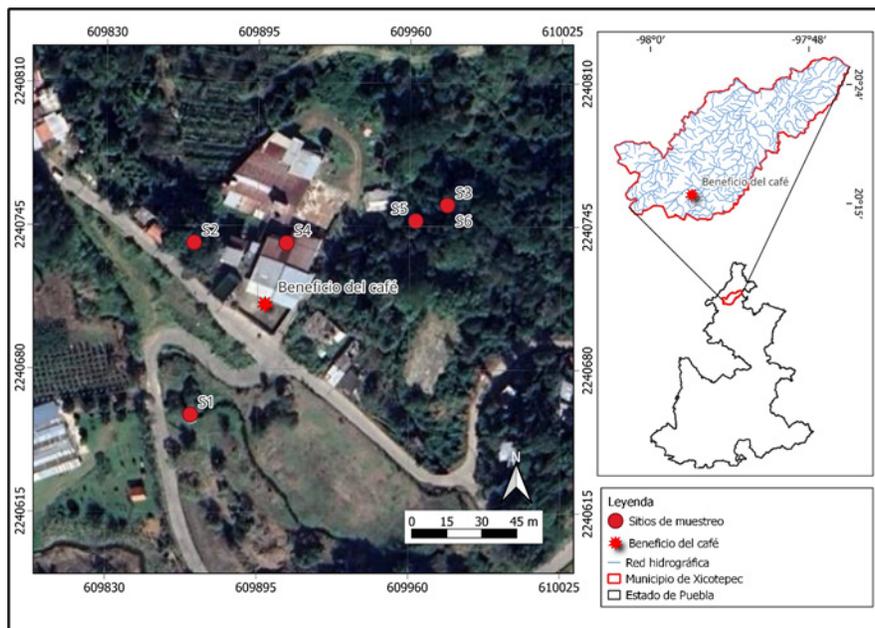


Figura 1. Sitios de muestreo del agua superficial fuera del beneficio de café (S1, S3 y S6) y del tanque de almacenamiento dentro del beneficio (S2), zona de lavado del café (S4) y descarga de aguas residuales (S5). Fuente: Google Earth. INEGI, 2023.

Una vez que el beneficio de café comenzó a operar se fijaron los otros tres puntos de muestreo, que corresponden al agua de lavado de café, cuando está siendo separada de los granos (S4), antes de ser descargada (S5) y, finalmente, cuando se descarga al arroyo Nopalutla (S6). Los puntos se presentan en la figura 2, que describe las etapas del proceso del beneficio húmedo de café. Es importante mencionar que el S3 y S6 son el mismo sitio, con la diferencia de que en S3 se muestreó en septiembre de 2019, antes de la temporada de cosecha y en S6 durante la temporada de procesamiento del café, en enero de 2020.

**Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua.** Las muestras de agua fueron obtenidas antes (septiembre de 2019 en los sitios 1, 2 y 3) y durante el periodo de actividad de procesamiento del café (enero de 2020 en los sitios 4, 5 y 6) y analizadas conforme lo establecen las normas oficiales mexicanas (NOM) vigentes. Se determinaron 17 parámetros fisicoquímicos y dos microbiológicos. La temperatura (T), pH y Conductividad eléctrica (CE) se determinaron por el método potenciométrico (Cotemarnat, 2014; 2016a; 2018), con un instrumento de campo Conductronic PC18;

los sólidos sedimentables (SS) con se determinaron, con cono Imhoff (Cotemarnat, 2013a); los sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos disueltos totales (SDT), por gravimetría (Cotemarnat, 2016b); el color y la turbidez, se determinaron por fotometría, con un equipo Merck SQ118 (Cotemarnat, 2001a; 2001b); el olor se determinó de acuerdo con el proyecto de norma de Cotemarnat (2005); dureza, cloruros (Cl), acidez y alcalinidad, se determinaron por volumetría, como lo indican las normas de

Cotemarnat (2001c; 2001d; 2001e); las Grasas y Aceites (GA), se midieron por el método soxhlet (Cotemarnat, 2013b); la demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno (N) y fósforo (P) totales, se determinaron mediante espectrofotometría con pruebas de cubetas de la marca Merck, en un equipo Spectroquant NOVA60A (Cotemarnat, 2001f; 2010; 2011). Como indicadores biológicos de calidad del agua, se midieron los coliformes totales y coliformes fecales (Cotemarnat, 2015).

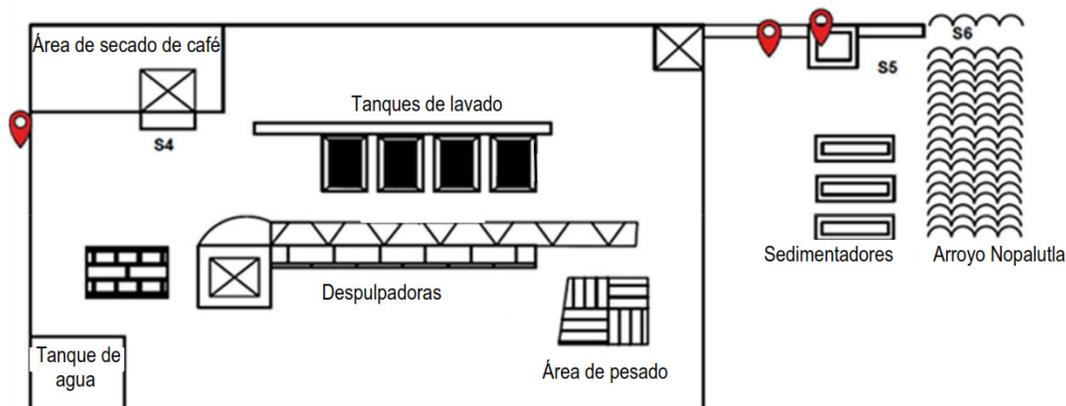


Figura 2. Descripción de las etapas del proceso del beneficio húmedo de café que descarga sus aguas residuales al arroyo Nopalutla y ubicación de los puntos de muestreo S4, S5 y S6.

**Evaluación de la calidad del agua.** Para determinar la calidad del agua se tomaron en cuenta las normas oficiales mexicanas de la Semarnat (2021), que establece los límites permisibles (LP) de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación (con valores instantáneos V.I. de descargas en ríos); la SSA1 (2021), que establece los límites permisibles de calidad del agua para uso y consumo humano y la Semarnat (1997), que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Respecto a los criterios de calidad del agua, se consideró, de acuerdo con lo que establece la Comisión Nacional del Agua (CNA), según los parámetros que monitorea la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua (Renameca) en 5.000 sitios del país, tanto para aguas superficiales como subterráneas (CONAGUA, 2020). También, se calculó la desviación estándar entre los seis sitios muestreados para cada parámetro, de manera que se pueda determinar aquellos que tienen grandes variaciones por la operación del procesamiento del café.

**Análisis estadístico de los resultados.** El análisis estadístico de los parámetros fisicoquímicos definidos se realizó mediante dos técnicas con el software Matlab. Primero, se determinó la intensidad y la dirección de la relación lineal entre las variables, es decir, entre los parámetros de calidad del agua medidos, mediante el análisis del coeficiente de correlación de Pearson.

Posteriormente, se analizó la variabilidad espacial y temporal de los parámetros de calidad del agua medidos en los distintos sitios; lo anterior se determinó mediante el análisis de grupos, en el cual, se clasifican los objetos de un sistema en categorías o grupos

basados en sus proximidades o similitudes. En este agrupamiento jerárquico se forman los grupos secuencialmente, empezando por la comparación de dos objetos con mayor similitud que formarán el grupo más alto y así sucesivamente. Se utilizó la distancia euclidiana entre los parámetros medidos en los distintos sitios y temporadas para representar los resultados de variabilidad, a través de un dendrograma (Singh *et al.* 2004; Liu *et al.* 2019).

En ambos casos, se analizaron, de manera independiente, los dos periodos de muestreo, es decir, antes del procesamiento del café (S1, S2 y S3) y durante la temporada de trabajo del beneficio de café (S4, S5 y S6).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Parámetros físicos.** La tabla 1 muestra los valores de los parámetros físicos de las muestras de agua de los seis puntos de muestreo. Los parámetros de T, SS y SST se compararon con la norma de la Semarnat (2021) (V.I. Ríos), de los cuales, solo los SS fueron superiores al límite permisible (LP), que es de 2 mL/L. Los sitios que sobrepasaron el valor fueron los S4, S5 y S6, ya que son aguas residuales provenientes del lavado y despulpado del café y se descargan directamente al arroyo sin ningún tratamiento, por lo que contienen residuos sólidos de la pulpa del grano de café, siendo el valor más alto en el sitio S4, justo en la etapa de lavado del grano.

También, se compararon los parámetros físicos con la norma del SSA1 (2021), ya que el agua utilizada en el proceso debe ser considerada como potable para ser utilizada en un producto alimenticio. En este caso, se encuentran normados los SDT, color y

turbidez, de los cuales, solo los dos últimos sobrepasaron los LP, en los sitios S4, S5 y S6. Nuevamente, el sitio S4 se destacó por tener los valores más altos: color de 44,2 m<sup>-1</sup> y turbidez 299 UNT, lo cual, se presentó porque es la etapa del lavado donde se generan una gran cantidad de residuos sólidos y semi húmedos. Las muestras de los sitios S1, S2 y S3 presentaron color con valores muy bajos; sin embargo, al salir del proceso de lavado las muestras adquirieron tonalidades de color café, quedando los sitios S4 y S5 fuera del LP.

Es importante hacer la comparación de los valores de parámetros físicos de los sitios S3 y S6, ya que se aprecia claramente la influencia de las descargas de aguas residuales del beneficio de café en la calidad del agua del arroyo. Para el caso de los SS, pasó de 0,2 a 38,5 mL/L, SDT de 0,625 a 0,5165 mg/L, SST de 0,0299 a 0,0419 mg/L, color de 1,4 a 14,3 m<sup>-1</sup>, turbidez de 6 a 85 UNT; en cuanto al olor, se percibió un olor dulce similar a la miel.

**Parámetros químicos.** La tabla 2 muestra los valores obtenidos para los diez parámetros químicos de las muestras de agua de los seis puntos de muestreo. Los parámetros que rebasaron los LP fueron la dureza, DQO y fosfatos (Semarnat, 2021) (V.I. Ríos). Los valores más altos de DQO para las aguas mieles se presentaron en los sitios de muestreo S4 y S5, con valores de 3.708 y 2.504 mg/L y no cumplen con el LP, que es de 210 mg/L. Para el sitio S6, el valor de DQO obtenido fue de 320 mg/L y muestra una disminución considerable respecto a los puntos S4 y S5; esto se podría deber a que, una vez que el agua residual entra en contacto con la del arroyo Nopalutla, comienza a diluirse. La estimación de la DQO es importante para plantear estrategias que disminuyan la carga de materia orgánica de las aguas mieles de lavado de café, de tal forma, que se reduzca el impacto ambiental en la calidad del agua del arroyo.

Tabla 1. Parámetros físicos determinados en las muestras de agua analizadas en los diferentes sitios del beneficio de café y del arroyo.

Sitio de muestreo	T (°C)	SS (mL/L)	SDT (mg/L)	SST (mg/L)	Color (m <sup>-1</sup> )	Turbidez (UNT)	Olor
S1	21,5	0,05	0,0497	0,0228	0,7	4	Dulce
S2	21,3	0	0,0807	0,0293	1,8	11	Dulce
S3	21,4	0,2	0,0625	0,0299	1,4	6	Dulce
S4	21,8	178,5	2,81	0,4	44,2	299	Dulce
S5	21,4	124,2	1.418	0,372	44,1	213	Dulce
S6	21,5	38,5	0,5165	0,0415	14,3	85	Dulce
Desviación estándar	0,17	76,60	1.1066	0,1836	21,1	125	
<b>Límites permisibles (LP)</b>							
NOM-001	35	2	N.A.	84	N.A.	N.A.	N.A.
NOM-127	N.A.	N.A.	1000	N.A.	15	4	Agradable

T: temperatura, SS: sólidos sedimentables, SDT: sólidos disueltos totales, SST: sólidos suspendidos totales. LP: límites permisibles, N.A.: no aplica.

Tabla 2. Parámetros químicos determinados en las muestras de agua analizadas en los diferentes sitios del beneficio de café y del arroyo.

Sitio de muestreo	pH	CE (µS/cm)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Acidez (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Alcalinidad (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	GA (mg/L)	DQO (mg/L)	N (mg/L)	P (mg/L)
S1	6,9	90,10	0,031	16,00	8	14	0,91	140	0,6	0,64
S2	7,75	103,40	0,030	29,00	5	19	0,16	189	2,1	0,38
S3	7,16	75,95	0,034	22,00	9	16	0,19	174	1,8	0,78
S4	7,18	2.169,40	0,084	1.215,50	550	155	0,54	3.708	18,6	45,60
S5	7,25	1.176,60	0,062	938,00	350	105	0,21	2.504	13,8	38,80
S6	6,47	315,32	0,027	437,50	60	55	0,52	320	6	11,20
Desviación estándar	0,42	853,17	0,023	523,98	232	58	0,29	1.547	7,4	20,64
<b>Límites permisibles (LP)</b>										
NOM-001	6,5-8,5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	21	210	35	21
NOM-127	6,5-8,5	N.A.	250	500	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,5	N.A.

CE: conductividad eléctrica, Cl<sup>-</sup>: cloruros, GA: grasas y aceites, DQO: demanda química de oxígeno, N: nitrógeno, P: fósforo, N.A.: no aplica.

Las muestras de agua de los puntos de muestreo S4 y S5 presentaron una mayor cantidad de fosfatos que los LP. Los fosfatos están relacionados con la composición de la pulpa de los granos de café y los fertilizantes utilizados para su cultivo. El contenido de fósforo en las aguas residuales del procesamiento húmedo de café varía entre 4 y 36 mg/L (Alemayehu *et al.* 2020); para este beneficio de café su concentración está por arriba de los valores típicos.

El pH, las grasas y aceites y el nitrógeno total no sobrepasaron los LP establecidos por la Semarnat (2021) (V.I. Ríos); sin embargo, al comparar con los LP de la SSA1 (2021) se observa que el nitrógeno sobrepasa los LP de 0,5 mg/L en todos los sitios de muestreo, con los valores más altos en los sitios S4 y S5; los valores de dureza para los sitios de muestreo S4 y S5 estuvieron fuera de los LP. La dureza está relacionada con la adición de cal para el lavado de los granos y cuyo exceso ocasiona un mal sabor en el agua e interfiere con otros usos que se le pudieran dar.

Los valores de pH obtenidos para las aguas mieles de lavado de café oscilaron entre 6,47 y 7,75, que están dentro de los LP; no presentan valores tan ácidos, debido a la adición de cal (óxido de

calcio) durante el proceso de lavado, que se utiliza para remover los restos de mucílago que quedan en los granos, una vez transcurrido el tiempo de fermentación. Siu *et al.* (2007) reportaron resultados similares; los valores típicos de pH oscilan entre 6 y 8, de acuerdo con la alcalinidad característica para las aguas de despulpe y lavado del café, dichas aguas tienen concentraciones entre 10 y 15 mg/L de CaCO<sub>3</sub> (Rodríguez Pérez *et al.* 2000), tal como se observa en los sitios S1, S2 y S3, aunque en este caso, no era temporada de procesamiento de café para tales sitios; sin embargo, los valores aumentan en 100 % cuando inicia el procesamiento del café en los sitios S4 y S5 y disminuye, considerablemente, al entrar al río y se diluyó hasta 55 mg/L, en el sitio S6.

**Parámetros microbiológicos.** La tabla 3 muestra los valores obtenidos para los análisis microbiológicos. Todos los sitios de muestreo presentaron valores de coliformes totales superiores a los LP, en donde el límite es de 2 NMP, para aguas que se consideran y se usan como potables (Semarnat, 2021). En este caso, el agua de entrada al proceso no recibió ningún tipo de tratamiento y se tomó directamente del arroyo.

Tabla 3. Parámetros microbiológicos determinados en las muestras de agua analizadas en los diferentes sitios del beneficio de café y del arroyo.

Sitio de muestreo	Coliformes totales (NMP/100 mL)	Coliformes fecales (NMP/100 mL)
S1	1.609	8
S2	551	3
S3	569	3,5
S4	2.400	916
S5	813	806
S6	2.400	1.614
Límites permisibles (LP)		
NOM-127	2	0
NOM-003		240 (con contacto directo), 1000 (con contacto indirecto)

NMP: número más probable, LP: límites permisibles.

Respecto al análisis de coliformes fecales, aunque las muestras S4 y S5 presentaron valores por debajo de los LP, el punto de muestreo correspondiente a S6 presentó un valor muy alto y superior al LMP de 1.000 NMP, que establece la Semarnat (1997). La presencia de coliformes fecales en la muestra de agua de S6 se asocia a las descargas de aguas residuales provenientes de la comunidad cercana a la ubicación del beneficio de café, por lo que estas aguas no deben de ser empleadas para otros usos. La presencia de coliformes en el agua, tanto de entrada al proceso como la que se descarga al arroyo después del lavado de café, indica que es necesario un tratamiento para eliminar estos microorganismos, especialmente, los coliformes fecales, que son patógenos causantes de enfermedades hídricas.

**Correlación entre los parámetros fisicoquímicos.** Los coeficientes de correlación de Pearson del análisis estadístico de los sitios S1, S2 y S3 arrojan correlación positiva alta > 0,9, de los parámetros SST, turbidez, color y pH con dureza, alcalinidad, DQO y N, por lo que

se asume que, aunque no hay procesamiento de café en la temporada en que se analizaron estos puntos, sí existe contaminación residual de los periodos de producción anteriores. En el caso de los sólidos, turbidez y color se debe a los residuos de la cáscara, mucílago y pulpa del café, mientras que la dureza y alcalinidad son resultado del uso de óxido de calcio durante el proceso de lavado del café. En cuanto a los elevados valores de DQO y N se pueden deber a la gran cantidad de materia orgánica que resulta del procesamiento de café y a los agroquímicos utilizados durante su cultivo. Es evidente el caso crítico de contaminación del río Nopalutla, una vez que inicia el procesamiento de café, ya que todos los parámetros fisicoquímicos incrementan simultáneamente con correlaciones positivas altas > 0,7; por lo anterior, es inminente la necesidad de aplicar algún tratamiento para las aguas residuales del beneficio.

**Variabilidad espacial y temporal de la calidad del agua.** El análisis de grupos permite presentar el dendrograma de la figura 3.

Particularmente, se observan cinco grupos; el primero, formado por los sitios S2 y S3, que corresponden al tanque de almacenamiento y aguas abajo del beneficio de café, en los cuales, existen similitudes en la calidad del agua, ya que no hay actividades de procesamiento

de café en el periodo de septiembre. A su vez, estos dos sitios forman un segundo grupo con el S3, que corresponde a aguas arriba; en este caso, ambos grupos no presentan variabilidad espacial significativa y se consideran como sitios con bajo nivel de contaminación.

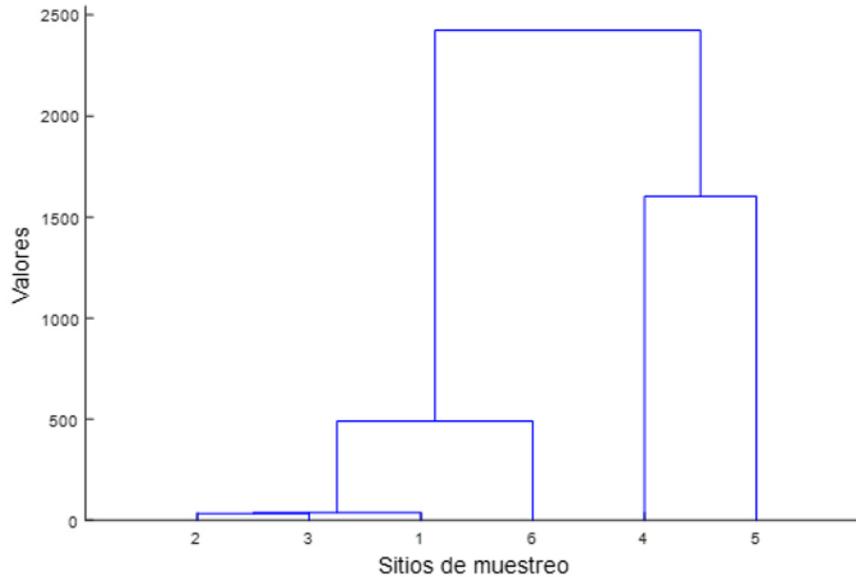


Figura 3. Dendrograma que presenta el agrupamiento de los sitios de muestreo por similitudes en las características fisicoquímicas de las muestras de agua analizadas en el beneficio de café y del arroyo.

El tercer grupo se forma por los dos anteriores y el sitio S6, que corresponde al mismo S3, pero en temporada de procesamiento de café, por lo que se observa una variabilidad temporal importante, evidenciando que las descargas de aguas residuales del beneficio de café se diluyen al incorporarse al arroyo, pero la carga de contaminantes es tan alta, que se aprecia gran diferencia con los valores de los grupos anteriores; por lo anterior, se considera como un sitio de contaminación media.

El cuarto grupo se forma por los sitios S4 y S5, que corresponden al agua de lavado y procesamiento del café y a la descarga de aguas residuales, respectivamente. La diferencia es amplia entre los valores de los dos primeros grupos e, incluso, con el tercero, por lo que se asume que hay una variabilidad espacial y temporal alta, considerando a estos sitios como los de mayor contaminación.

El último grupo se forma de la unión de los tres primeros con el cuarto. La variabilidad espacial y temporal de la contaminación del agua del arroyo Nopalutla quedan evidenciadas con esta herramienta de análisis.

La presencia de un alto contenido de sólidos en el agua de lavado se relaciona directamente con el color café, característico de las aguas mieles, ya que contienen azúcares, proteínas y compuestos fenólicos, provenientes del mucílago del café que, cuando se fermentan, producen un olor dulce a miel, cuando son recientes y un olor putrefacto.

La turbidez se ve afectada por la presencia de los sólidos en el agua y la importancia de su análisis se debe a la presencia de partículas coloidales en estas aguas, lo que vuelve más difícil la eliminación o inactivación de microorganismos patógenos. A su vez, tanto la turbidez como el color de las aguas residuales descargadas limitan los procesos fotosintéticos naturales (Ijanu *et al.* 2020). Particularmente, los sólidos sedimentables tienen un aumento de más del 100 % durante la temporada de actividades del beneficio de café, por lo que sería útil analizar la propuesta de un proceso de sedimentación previo a la descarga de las aguas mieles, ya que podrían remover alrededor del 95 % de estos sólidos (Gutiérrez Guzmán *et al.* 2014).

De acuerdo con los criterios de calidad del agua de México, DQO > 200 mg/L, indica que son aguas municipales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas y no municipales (CONAGUA, 2022). La presencia de grandes cantidades de materia orgánica genera una disminución de la cantidad de oxígeno disuelto por la alta demanda para la oxidación de los compuestos orgánicos. Lo anterior, lleva a que un cuerpo de agua cambie de condiciones aerobias a anaerobias, causantes de los malos olores (Ijanu *et al.* 2020).

La presencia de fosfatos a esta concentración junto con los altos niveles de DQO en los cuerpos de agua causan grandes problemas, debido a que eliminan el oxígeno disuelto, provocando la mortalidad de los peces, desequilibrios en la vida acuática y eutrofización del cuerpo de agua en donde se descargan (Beyene *et al.* 2012).

En este sentido, la literatura propone algunas alternativas para su disposición y aprovechamiento, como es la fertilización de los cultivos por la alta carga de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y su fácil aplicación; sin embargo, se requiere un ajuste de pH por los bajos valores que presentan las descargas de aguas residuales del procesamiento del café (Cássia Campos *et al.* 2021).

La posibilidad del uso del agua residual para riego agrícola requiere el cumplimiento de límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud; como lo establecen Getahun *et al.* (2024), es posible remover el color y la turbiedad, usando coagulantes naturales, como la moringa y el aloe vera, logrando eficiencias mayores al 90 %, para ambos parámetros.

Existen importantes estudios con relación al aprovechamiento de los residuos generados por el procesamiento del café (Bonilla-Hermosa *et al.* 2014), como en la reducción del agua utilizada y su tratamiento posterior, por procesos fisicoquímicos (Amarasinghe *et al.* 2015) y biológicos (Jenifer *et al.* 2020; Sujatha *et al.* 2020). Otra posibilidad de tratamiento a bajo costo es el propuesto por Hernández Martínez *et al.* (2021), en donde se utiliza un biofiltro formado con piedra pómez, biopelículas de formadas con la levadura *Saccharomyces cerevisiae* y una capa de biocarbón activado, logrando reducir 100 % de la carga orgánica.

Entre los tratamientos que se recomiendan en la literatura están los procesos de oxidación avanzada, coagulación y floculación, adsorción, humedales, oxidación aerobia y anaerobia (Alemayehu *et al.* 2020); sin embargo, cada método tiene sus limitaciones que deben ser tomadas en cuenta, para lograr la producción verde y sustentable de café (Rattan *et al.* 2015). Incluso, los residuos sólidos y semi sólidos del beneficio de café, como la cáscara y la pulpa, podrían ser aprovechados para producir extractos con actividad antifúngica (Alvarado-Ambriz *et al.* 2020). Los procesos biológicos son una importante opción para el tratamiento de las aguas residuales de este proceso, obteniéndose una relación de DBO<sub>5</sub>/DQO por encima de 0,5, dando como resultado aguas biodegradables con tratamientos adecuados.

De acuerdo con los datos obtenidos se recomienda realizar un monitoreo continuo de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos e incluir aquellos con una ponderación alta, que permita medir el índice de calidad del agua (ICA), como lo establece la Comisión Nacional del Agua en México o con algún otro modelo, como el del NSF (García-González *et al.* 2021), de tal manera, que se tenga una interpretación clara y entendible para los productores de café y se concientice sobre la importante necesidad de realizar un tratamiento de las aguas residuales del beneficio húmedo del café, antes de descargarlo al río Nopalutla.

Como conclusión, se evidenció un impacto negativo de las aguas mieles provenientes del beneficio de café, debido a que modifican las características fisicoquímicas y la calidad del agua del arroyo Nopalutla, en donde son descargadas sin un tratamiento, impidiendo que el agua pueda ser aprovechada nuevamente. Las poblaciones que se ubican aguas abajo utilizan el agua del arroyo para sus

actividades básicas de aseo y consumo, por lo que la contaminación causada por las aguas mieles descargadas representan un riesgo a la salud de la población, por el contacto directo, principalmente, por la presencia de microorganismos patógenos.

**Agradecimientos.** Los autores agradecen con profundo respeto y admiración al Dr. Fernando Hernández Aldana q.e.p.d. **Conflictos de intereses:** El presente artículo es derivado del trabajo de grado para obtener el título de licenciatura en Ingeniería Ambiental, elaborado por Betzabe Hernández Lorenzo. El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Contribución de los autores:** Gabriela Pérez Osorio: conceptualización, investigación, supervisión, escritura-borrador original; Fabiola Avelino Flores: conceptualización, metodología, validación, análisis formal; Betzabe Hernández Lorenzo: metodología, investigación, curación de datos, escritura-borrador original; José Eligio Moisés Gutiérrez Arias: software, análisis formal, escritura-revisión y edición, visualización; José Carlos Mendoza Hernández: validación, análisis formal, escritura-revisión y edición; Yaselda Chavarín Pineda: redacción del borrador original, revisión y edición, visualización.

## REFERENCIAS

- ALEMAYEHU, Y.A.; ASFAW, S.L.; TIRFIE, T.A. 2020. Management options for coffee processing wastewater. A review. In Journal of Material Cycles and Waste Management. 22(2):454-469. Springer. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00953-y>
- ALVARADO-AMBRIZ, S.; LOBATO-CALLEROS, C.; HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, L.; VERNON-CARTER, E.J. 2020. Wet processing coffee waste as an alternative to produce extracts with antifungal activity: In vitro and in vivo valorization. Revista Mexicana de Ingeniería Química. 19:135-149. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio1612>
- AMARASINGHE, U.A.; HOANH, C.T.; D'HAENZE, D.; HUNG, T.Q. 2015. Toward sustainable coffee production in Vietnam: More coffee with less water. Agricultural Systems. 136:96-105. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.02.008>
- BEYENE, A.; KASSAHUN, Y.; ADDIS, T.; ASSEFA, F.; AMSALU, A.; LEGESSE, W.; KLOOS, H.; TRIEST, L. 2012. The impact of traditional coffee processing on river water quality in Ethiopia and the urgency of adopting sound environmental practices. Environmental Monitoring and Assessment. 184(11):7053-7063. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2479-7>
- BONILLA-HERMOSA, V.A.; FERREIRADUARTE, W.; FREITAS SCHWAN, R. 2014. Utilization of coffee by-products obtained from semi-washed process for production of value-added compounds. Bioresource Technology. 166:142-150. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.031>

- CÁSSIA CAMPOS, R.C.; PINTO, V.R.A.; MELO, L.F.; ROCHA, S.J.S.S.; DA, COIMBRA, J.S. 2021. New sustainable perspectives for “Coffee Wastewater” and other by-products: A critical review. *Future Foods*. 4:100058. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100058>
- CERVANTES, M.; VELÁZQUEZ, J.R. 2015. Estudio de cadenas de valor de café en el Municipio de Xicotepec de Juárez, Puebla. *Revista Administración & Finanzas*. 2(4):800-804.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, CONAGUA. 2022. Estadísticas del agua en México 2021. Disponible desde Internet en: <https://agua.org.mx/biblioteca/estadisticas-del-agua-en-mexico-2021-conagua/>
- COMITÉ CONSULTIVO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN DE REGULACION Y FOMENTO SANITARIO - SSA1. 2021. NOM-127-SSA1-2021: Norma Oficial Mexicana que establece los criterios y métodos para evaluar la calidad del agua para uso y consumo humano. Disponible desde Internet en: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022)
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2001a. NMX-AA-045-SCFI-2001: Análisis de agua - Determinación de color platino-cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-045-1981). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166781/NMX-AA-045-SCFI-2001.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2001b. NMX-AA-038-SCFI-2001: Análisis de agua - Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA038-1981). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166777/NMX-AA-038-SCFI-2001.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2001c. NMX-AA-072-SCFI-2001: Análisis de agua - Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA072-1981) Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166788/NMX-AA-072-SCFI-2001.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2001d. NMX-AA-036-SCFI-2001: Análisis de agua - Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-036-1980). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166776/NMX-AA-036-SCFI-2001.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2001e. Análisis de agua - Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-073-1981). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166789/NMX-AA-073-SCFI-2001.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2001f. NMX-AA-029-SCFI-2001: Análisis de agua - Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA029-1981). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166773/NMX-AA-029-SCFI-2001.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2005. PROY-NMX-AA-083-SCFI-2005: Análisis de agua - Determinación de olor en aguas naturales y residuales - Método de prueba. Disponible desde Internet en: [http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa083-Proy2005\\_11.pdf](http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa083-Proy2005_11.pdf)
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2010. NMX-AA-026-SCFI-2010: Análisis de agua - Medición de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-026-SCFI-2001). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166772/NMX-AA-026-SCFI-2010.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2011. NMX-AA-030/2-SCFI-2011: Análisis de agua - Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba - Parte 2 - Método del tubo sellado a pequeña escala. Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166775/NMX-AA-030-2-SCFI-2011.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2013a. NMX-AA-004-SCFI-2013: Análisis de agua - Medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-004-SCFI-2000). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166763/NMX-AA-004-SCFI-2013.pdf>

- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2013b. NMX-AA-005-SCFI-2013: Análisis de agua - Medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-005-SCFI-2000). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166764/nmx-aa-005-scfi-2013.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2014. NMX-AA-007-SCFI-2013: Análisis de agua - Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. Disponible desde Internet en: [https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/wp-content/uploads/sites/2/PDF\\_Normas\\_Publicas/nmx-aa-007-scfi-2013.pdf](https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/wp-content/uploads/sites/2/PDF_Normas_Publicas/nmx-aa-007-scfi-2013.pdf)
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2015. NMX-AA-042-SCFI-2015: Análisis de agua - Enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y *escherichia coli* - Método del número más probable en tubos múltiples (cancela a la NMX-AA-42-1987). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166147/nmx-aa-042-scfi-2015.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2016a. NMX-AA-008-SCFI-2016: Análisis de agua - Medición de pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-008SCFI-2011). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166767/NMX-AA-008-SCFI-2016.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2016b. NMX-AA-034-SCFI-2015: Análisis de agua - Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-034-SCFI-2001). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, COTEMARNAT. 2018. NMX-AA-093-SCFI-2018: Análisis de agua - Medición de la conductividad eléctrica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-093-1984). Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166800/NMX-AA-093-SCFI-2000.pdf>
- CONAGUA. 2020. Calidad del Agua en México. Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>
- DADI, D.; MENGISTIE, E.; TEREFE, G.; GETAHUN, T.; HADDIS, A.; BIRKE, W.; BEYENE, A.; LUIS, P.; VAN DER BRUGGEN, B. 2018. Assessment of the effluent quality of wet coffee processing wastewater and its influence on downstream water quality. *Ecohydrology and Hydrobiology*. 18(2):201-211. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2017.10.007>
- GARCÍA-GONZÁLEZ, J.; OSORIO-ORTEGA, M.A.; SAQUICELA-ROJAS, R. A.; CADME, M. L. 2021. Determinación del índice de calidad del agua en ríos de Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. *Ingeniería Del Agua*. 25(2):115. <https://doi.org/10.4995/ia.2021.13921>
- GETAHUN, M.; BEFEKADU, A.; ALEMAYEHU, E. 2024. Coagulation process for the removal of color and turbidity from wet coffee processing industry wastewater using bio-coagulant: Optimization trough central composite design. *Heliyon*. 10:e27584. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27584>
- GUTIÉRREZ GUZMÁN, N.; VALENCIA GRANADA, E.; ARAGON CALDERON, R.A. 2014. Eficiencia de remoción en sistemas de tratamiento de aguas residuales del beneficio de café (*Coffea arabica*). *Colombia Forestal*. 17(2):151-159. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a02>
- HERNÁNDEZ MARTÍNEZ, I.; SANTIAGO SEGURA, C.A.; LIMÓN HERNÁNDEZ, R.A.; LÓPEZ HERNÁNDEZ, V.; AGUILAR AGUILAR, F.A. 2021. Tratamiento de agua residual de beneficio de café mediante un biofiltro de bajo costo. *Revista Ingeniantes*. 8(1):60-66.
- HERRERA PINILLA, J.C.; CORTINA GUERRERO, H.A. 2013. Taxonomía y clasificación del café. *Manual Del Cafetero Colombiano*. 1:117-121. [https://doi.org/10.38141/cenbook-0026\\_07](https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_07)
- IJANU, E.M.; KAMARUDDIN, M.A.; NORASHIDDIN, F.A. 2020. Coffee processing wastewater treatment: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. In *Applied Water Science*. 10:11. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1091-9>
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA, INEGI. 1995. Xicotepec, Estado de Puebla: cuaderno estadístico municipal. 1994. Gobierno del estado de Puebla. Disponible desde Internet en: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/municipios/cuad\\_est/1995/pue/xic/702825923754\\_1.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/municipios/cuad_est/1995/pue/xic/702825923754_1.pdf)

- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA, INEGI. 2020. Principales resultados censo de población y vivienda, Puebla. Disponible desde Internet en: [https://en.www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/702825198275.pdf](https://en.www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825198275.pdf)
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA, INEGI. 2023. Marco geoestadístico, diciembre 2023. Disponible desde Internet en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=794551067314>
- JENIFER, A.A.; CHANDRAN, T.; MUTHUNARAYANAN, V.; RAVINDRAN, B.; NGUYEN, V.K.; NGUYEN, X.C.; BUI, X.T.; NGO, H.H.; NGUYEN, X.H.; CHANG, S.W.; NGUYEN, D.D. 2020. Evaluation of efficacy of indigenous acidophile- bacterial consortia for removal of pollutants from coffee cherry pulping wastewater. *Bioresource Technology Reports*. 11:100533. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100533>
- LIU, C.; QIAN, B.; WANG, L.; MIAO, Q. 2019. Research on spatial-temporal distribution characteristics of main pollutants of the rivers in the Linyi development zone. *Journal of Water and Climate Change*. 10(2):285-297. <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.187>
- NAVAZ, M.; ROY, E. 2016. Tecnologías apropiadas para la caficultura: aprovechamiento y tratamiento de residuos del café. *Engyneria Sense Fronteres*. 37p.
- OROZCO, C.; BARRIENTOS, H.; LOPEZLENA, A.; CRUZ, J.; SELVAS, C.; OSORIO, E.L.; OSORIO, E.D.; OSORIO, E.; OSORIO, E.; CHÁVEZ, R.; MIRANDA, J.; ARELLANO, J.; GIESSEMAN, B. 2005. Evaluación de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales del procesamiento del café: características químicas. *Higiene y Sanidad Ambiental*. 5:123-131.
- RATTAN, S.; PARANDE, A.K.; NAGARAJU, V.D.; GHIWARI, G.K. 2015. A comprehensive review on utilization of wastewater from coffee processing. *Environmental Science and Pollution Research*. 22(9):6461-6472. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4079-5>
- RODRÍGUEZ PÉREZ, S.; PÉREZ SILVA, R.M.; FERNÁNDEZ BOIZÁN, M. 2000. Estudio de la biodegradabilidad anaerobia de las aguas residuales del beneficio húmedo del café. *Interciencia*. 25(8):386-390.
- RUELAS MONJARDÍN, L.C.; ARIAS MOTA, R.M.; RODRÍGUEZ RAMOS, LI. 2020. Impacto de la caficultura en la contaminación del agua. En: Ortega Pineda, G.; Fabre Platas, D.A.; Cano Polo, Y.I. *Dialogando lo Ambiental. Compartiendo experiencias e intercambiando saberes*. Sedema, FAV. p.290-306.
- SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, SADR. 2020. Café, la bebida que despierta a México. Disponible desde Internet en: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cafe-la-bebida-que-despierta-a-mexico?idiom=es>
- SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, SEMARNAT. 1997. NOM-003-SEMARNAT-1997: Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Disponible desde Internet en: <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3297/1/nom-003-semarnat-1997.pdf>
- SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, SEMARNAT. 2021. NOM-001-SEMARNAT-2021: Norma oficial mexicana que establece los límites permisibles (LP) de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Disponible desde Internet en: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022)
- SERVICIO DE INFORMACIÓN ALIMENTARIA Y PESQUERA, SIAP. 2024. Servicio de Información Alimentaria y Pesquera, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- SINGH, K.P.; MALIK, A.; MOHAN, D.; SINHA, S. 2004. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India) - A case study. *Water Research*. 38(18):3980-3992. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.06.011>
- SIU, Y.; MEJIA, G.; MEJIA-SAAVEDRA, J.; POHLAN, 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>
- SUJATHA, G.; SHANTHAKUMAR, S.; CHIAMPO, F. 2020. UV light-irradiated photocatalytic degradation of coffee processing wastewater using TiO<sub>2</sub> as a catalyst. *Environments – MDPI*. 7(6):1-13. <https://doi.org/10.3390/environments7060047>