



Calidad de agua en fincas cafetaleras de la región de Coatepec, Veracruz, México*

Water quality on coffee farms in the Coatepec region, Veracruz, Mexico

Antonio Arrechea-Villacampa¹, Ofelia Andrea Valdés-Rodríguez¹, Lorena Patricia Sánchez-Morales¹,
Lisseth Valdés-Monteaudo¹

* Recepción: 23 de abril, 2025. Aceptación: 11 de agosto, 2025. Esta investigación formó parte de la tesis del primer autor titulada *Evaluación de la sustentabilidad, calidad del agua y métodos de fermentación en el beneficiado del café en Coatepec, Veracruz, México*, financiada por la Secretaría de Ciencias Humanidades, Tecnologías e Innovación (SECIHTI).

¹ El Colegio de Veracruz. Xalapa, México. antonioarrechea87@gmail.com (<https://orcid.org/0009-0000-9059-1753>); dra.valdes.colver@gmail.com (autora para correspondencia, <https://orcid.org/0000-0002-3702-6920>); lorena.samadhi@gmail.com (<https://orcid.org/0009-0004-3159-4259>); lissethvm92@gmail.com (<https://orcid.org/0009-0004-3584-0111>).

Resumen

Introducción. El agua utilizada en la industria de alimentos debe ser potable; por lo tanto, su análisis es un proceso vital para asegurar el cumplimiento de los estándares de seguridad. **Objetivo.** Evaluar la calidad del agua empleada en el beneficio de café en fincas cafetaleras de la región de Coatepec, Veracruz, México. **Materiales y métodos.** La investigación se realizó en 14 fincas cafetaleras de Coatepec, Veracruz, México, seleccionadas por criterios de disponibilidad para participar durante octubre, noviembre y diciembre de 2024. En cada sitio se tomaron tres muestras del agua utilizada para beneficiar café, para un total de 42 muestras. Se empleó un equipo multitest y tiras reactivas para cuantificar sólidos totales disueltos (TDS), demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico total (COT), conductividad eléctrica (CE), pH, alcalinidad total, ácido cianhídrico (HCN), nitratos, nitritos y cobre. También se realizaron determinaciones de coliformes. El programa SPSS, versión 25, fue usado para realizar la estadística descriptiva y las comparaciones entre fincas ($p < 0,05$). **Resultados.** Las aguas presentaron promedios de pH de 6,8, bajos niveles de TDS (44,2 mg/L), nitratos (4,3 mg/L), CE (87,3 μ S/cm), alcalinidad total (15,4 mg/L), cobre (0,14 mg/L) y HCN (0,004 mg/L). Las concentraciones de COT y DQO fueron de 2,67 y 3,59 mg/L, respectivamente. En el 57 % de los sitios de estudio se encontraron valores de nitritos superiores a los establecidos en las legislaciones vigentes; además, se detectaron coliformes en el 29 % de las muestras. **Conclusiones.** Una proporción importante del agua utilizada en el beneficio de café no satisfizo los criterios de calidad requeridos para el consumo humano, lo que resalta la necesidad de establecer controles en este proceso para no comprometer el producto final.

Palabras clave: procesamiento de café, agua potable, contaminación, beneficio húmedo.

Abstract

Introduction. Water used in the food industry must be potable; therefore, its analysis is a vital process to ensure compliance with safety standards. **Objective.** To evaluate the quality of water used in coffee processing on coffee farms



Agronomía Mesoamericana es desarrollada en la Universidad de Costa Rica bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Para más información escriba a pccmca@ucr.ac.cr o pccmca@gmail.com

in Coatepec, Veracruz, Mexico. **Materials and methods.** The study was conducted on 14 coffee farms in Coatepec, Veracruz, Mexico, selected based on availability to participate, during October, November, and December 2024. At each site, three samples of the water used for coffee processing were collected, for a total of 42 samples. A multitest kit and reactive strips were used to quantify total dissolved solids (TDS), chemical oxygen demand (COD), total organic carbon (TOC), electrical conductivity (EC), pH, total alkalinity, hydrocyanic acid (HCN), nitrates, nitrites, and copper. Coliform determinations were also performed. SPSS version 25 was used to perform descriptive statistics and comparisons among farms ($p < 0.05$). **Results.** The waters showed an average pH of 6.8 and low levels of TDS (44.2 mg/L), nitrates (4.3 mg/L), EC (87.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$), total alkalinity (15.4 mg/L), copper (0.14 mg/L), and HCN (0.004 mg/L). The concentrations of TOC and COD were 2.67 and 3.59 mg/L, respectively. In 57 % of the study sites, nitrite values exceeded those established in current legislation; additionally, coliforms were detected in 29 % of the samples. **Conclusions.** A substantial proportion of the water used in coffee processing did not meet the quality criteria required for human consumption, highlighting the need to establish controls in this process to avoid compromising the final product.

Keywords: coffee processing, drinking water, pollution, wet processing.

Introducción

El agua no tiene sustituto, no se conoce forma de vida que prescindiera de ella, por lo que es indispensable para el mantenimiento de la vida en la Tierra. Representa el 70 % del cuerpo humano, participa en la composición de nuestros tejidos y transporta las sustancias más diversas en el organismo (Barcia, 2024). El agua químicamente pura es un líquido inodoro e insípido; incoloro y transparente en capas de poco espesor. A una presión atmosférica normal (760 mm Hg), el punto de congelación del agua es 0 °C y su punto de ebullición es de 100 °C. Alcanza su densidad máxima a una temperatura de 4 °C y se expande al congelarse (Arrechea-Villacampa & Bolumen, 2018; Buenalaya Asto, 2019).

Las características fisicoquímicas y biológicas de las aguas permiten su uso para diversos fines (Arrechea Villacampa & Valdés Monteagudo, 2023). La calidad necesaria para consumo humano no es la misma que la calidad para sostener vida acuática, o la destinada para fines de riego o recreación (World Health Organization, 2017). El agua clasificada como potable no debe representar un riesgo para la salud cuando se consume durante toda la vida (Organización Panamericana de la Salud, 2022). Esta se contamina cuando se mezcla con basura, detergentes, minerales, fungicidas, insecticidas, agroquímicos, desechos de las casas, residuos orgánicos e inorgánicos y excrementos humanos y animales. El agua contaminada puede afectar la calidad e inocuidad de alimentos y bebidas (Puerta Quintero, 2015).

Los contaminantes que afectan la calidad del agua se clasifican en físicos, químicos, radiológicos y biológicos (Secretaría de Salud, 2022). En cuanto a los contaminantes microbiológicos, se estima que 829 000 personas mueren cada año por enfermedades relacionadas con la insalubridad del agua o mala higiene (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2023). En este contexto, es importante determinar la calidad microbiológica del agua en las fuentes de abastecimiento y dar a conocer los riesgos a la salud en las comunidades (OMS, 2023).

En el procesamiento de alimentos, el agua es esencial no solo como ingrediente, sino también en los procesos de limpieza y desinfección. Garantizar su calidad y seguridad es fundamental para evitar la contaminación de los productos alimenticios y proteger la salud del consumidor. El análisis de agua en la industria alimentaria se ha convertido en un proceso vital para asegurar el cumplimiento de los estándares de seguridad (Puerta Quintero, 2015).

El monitoreo del agua permite conocer su calidad a través del tiempo, la cual se determina analíticamente por diferentes parámetros físicos, químicos y biológicos, en función del fin destinado. Si no se cuenta con información

histórica, difícilmente se pueden llevar a cabo tanto el seguimiento de las acciones requeridas para mejorar la calidad como para evitar el deterioro de los cuerpos de agua (Puente Miranda et al., 2023).

El beneficiado o beneficio del café es el proceso por el cual se obtiene el grano de café verde a partir de la cereza madura (Escamilla-Prado et al., 2021). Existen tres métodos de beneficio: natural o seco, lavado o húmedo, y *honey* o semihúmedo (Ormaza, et al., 2022). En el beneficio húmedo, el proceso comprende el despulpado, la remoción del mucílago, el lavado y el secado hasta obtener café pergamino seco, el cual se trilla para producir café verde (Puerta Quintero, 2015).

En países como Colombia y Venezuela se han realizado estudios sobre la calidad del agua empleada para procesar café en fincas (Malavé et al., 2017; Puerta Quintero, 2015). Los resultados evidenciaron que estas aguas no eran aptas para consumo humano debido a la presencia de coliformes fecales, altos niveles de nitrógeno y compuestos orgánicos. Asimismo, los cafés procesados con dichas aguas presentaron defectos en olor y sabor, lo que afectó negativamente la calidad sensorial de la bebida.

En México se implementan los indicadores de calidad del agua como una herramienta cuantitativa para determinar la calidad de los cuerpos de agua nacionales en diversos sitios (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2024). Los indicadores superficiales que la comisión reguladora mexicana (CONAGUA) considera son ocho: demanda bioquímica de oxígeno a 5 días (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales, coliformes fecales, *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, saturación de oxígeno disuelto y toxicidad aguda. Además, se consideran otros indicadores como las concentraciones de nitrógeno en forma de nitratos ($N-NO_3$), arsénico total, cadmio total, cloro total, mercurio y plomo total, alcalinidad total, conductividad eléctrica (CE), dureza total, sólidos totales disueltos (TDS), hierro total y manganeso total (CONAGUA, 2024).

En la región cafetalera de Coatepec, Veracruz, México, el último monitoreo realizado por la CONAGUA data del año 2020 (CONAGUA, 2024). De los 31 cuerpos de agua de la región, solo existe evidencia de monitoreo en catorce de ellos, en los cuales se reportaron altos recuentos de coliformes fecales (por encima de 100 UFC/mL) y elevados valores de DQO (superiores a los 100 mg/L). Los resultados indican que las aguas de la región no son aptas para la producción de alimentos. No obstante, en las fincas cafetaleras, los pequeños productores emplean aguas de diferentes procedencias, como agua de lluvia almacenada, agua del sistema de acueducto o aguas subterráneas de acuíferos cercanos (Parada Molina et al., 2020).

La hipótesis central establece que no es posible obtener productos clasificados como inocuos ni de buena calidad a partir de materias primas contaminadas (Arrechea-Villacampa & Bolumen, 2018; Puerta Quintero, 2015). Se plantea que la calidad del agua utilizada en el beneficiado del café influye directamente en la calidad final del producto. En la región de Coatepec, el desconocimiento sobre el origen y la calidad del agua empleada por los caficultores limita la calidad del café de pequeños productores y su inserción en mercados exigentes. En este contexto, el objetivo de esta investigación fue evaluar la calidad del agua empleada en el beneficio de café en fincas cafetaleras de la región de Coatepec, Veracruz, México.

Materiales y métodos

Esta investigación fue realizada por El Colegio de Veracruz, con el apoyo económico de la Secretaría de Ciencias Humanidades, Tecnologías e Innovación. El muestreo fue realizado en octubre, noviembre y diciembre de 2024 durante el periodo de cosecha. Las fincas se establecieron con base en los siguientes criterios: disponibilidad para participar en este estudio; ser pequeños o medianos productores de café (hasta 5 ha cultivadas); beneficiar el café en las fincas por el método húmedo, y tener cafetales bajo sombras sin uso de agroquímicos.

La región cafetalera de Coatepec se ubica en la zona montañosa central del estado de Veracruz, México, entre las latitudes 19,16° y 19,53°N y las longitudes 96,47° y 97,60°O (Figura 1), a una altitud entre 900 y 1600 metros sobre el nivel del mar (Hernández Sánchez & Nava Tablada, 2019). Presenta un clima semicálido-templado húmedo y condiciones hídricas de humedad alta durante todo el año. La temperatura media anual oscila entre 17 °C y 22 °C con precipitaciones anuales entre 1500 y 2500 mm (Parada Molina et al., 2020). Predominan los suelos de origen volcánico, ricos en materia orgánica y minerales y pH ligeramente ácido (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2022). En la región se encuentran dos grandes cuencas, la cuenca del río La Antigua y la cuenca del río Actopan (Parada Molina et al., 2020) (Figura 1).

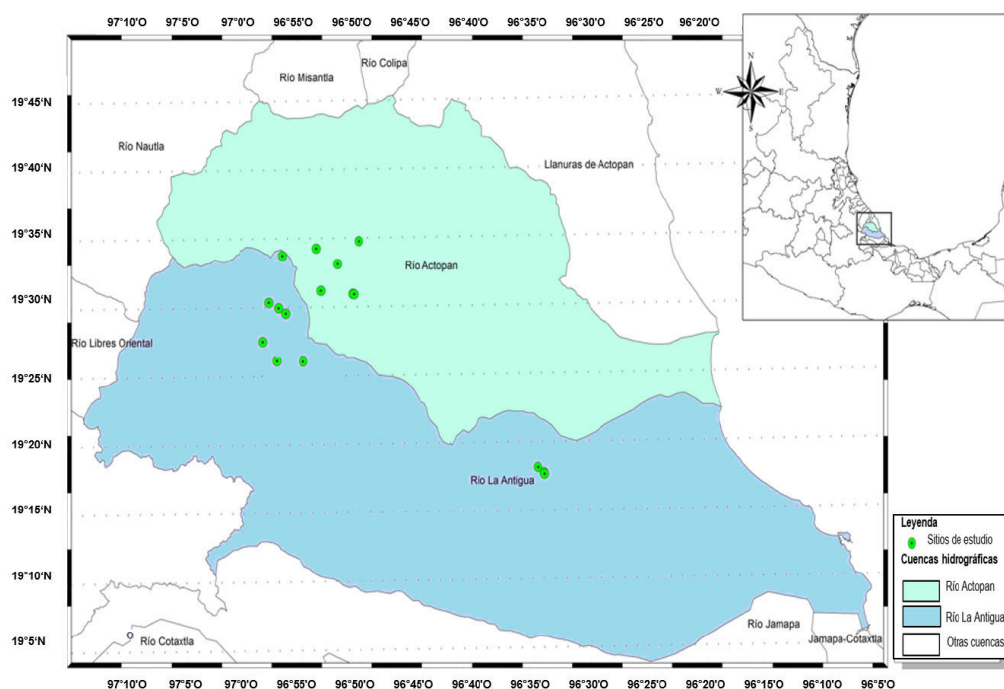


Figura 1. Ubicación de los sitios de estudio de acuerdo con las cuencas hidrográficas de la región cafetalera de Coatepec, México. Octubre, noviembre y diciembre de 2024.

Figure 1. Location of the study sites according to the watersheds of the Coatepec coffee-growing region, Mexico. October, November, and December 2024.

Para la determinación de la calidad química-física y microbiológica del agua, se muestrearon 14 fincas en los municipios de Xico, Coatepec, Xalapa y Teocelo, todos pertenecientes a la región cafetalera de Coatepec, las cuales se codificaron del 1 al 14. Las muestras se tomaron de mangueras, llaves y tanques de los sitios de beneficiado. En cada lugar se recolectaron tres muestras de 500 mL en botes de polietileno nuevos, previamente enjuagados o “endulzados” con las aguas a muestrear. Las muestras se conservaron en una hielera a una temperatura de 0 a 4 °C hasta su posterior análisis el día siguiente.

A través de tiras reactivas para pruebas químicas de agua industriales (fecha de expiración 28-11-2025) se cuantificaron los siguientes parámetros: cloro total, ácido cianhídrico (HCN), carbonatos, alcalinidad total, cloro libre, bromo libre, nitrógeno en forma de nitratos, nitrógeno en forma de nitritos, hierro, cobre, plomo y fluoruros, todos expresados en mg/L. Se utilizó un equipo multiparámetro analizador de la calidad físico-química de aguas para determinar las concentraciones de sólidos totales disueltos (mg/L), demanda química de oxígeno (DQO,

mg/L), carbono orgánico total (COT, mg/L), conductividad eléctrica (CE, $\mu\text{S}/\text{cm}$) y pH. Para comprobar la calidad microbiológica, se realizaron determinaciones cualitativas rápidas de coliformes mediante el uso del test Bacterias en Agua WATERWORKS Bacterias a 20 °C.

La estadística descriptiva de las variables de estudio se realizó con el programa SPSS versión 25.0.0. A las variables relacionadas con la calidad del agua se les realizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov y la prueba de Levene para determinar la normalidad y la homogeneidad de varianza. Ambas pruebas resultaron significativas ($p < 0,05$), por lo que se pudo afirmar con un 95 % de confiabilidad que las variables analizadas no siguen una distribución normal ni son homocedásticas, por lo que se procesaron estadísticamente a través de las pruebas no paramétricas Kruskal Wallis y correlación de Spearman.

Resultados

Se identificó presencia de coliformes totales en el 29 % de las muestras analizadas. No se detectaron bromo libre, cloro total, hierro ni plomo en ninguna de las muestras de agua analizadas. El cobre se detectó en el 7 % de las muestras (en un solo sitio), con un valor máximo de 2 mg/L. El análisis descriptivo de las variables en estudio evidenció una alta desviación estándar para los sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica, nitritos, cloro, nitratos, carbonatos y alcalinidad (Cuadro 1).

Cuadro 1. Resultados estadísticos descriptivos de las variables fisicoquímicas de las aguas para procesamiento de café en fincas cafetaleras. Región de Coatepec, México. Octubre, noviembre y diciembre de 2024.

Table 1. Descriptive statistical results of the physicochemical variables of coffee processing waters on coffee farms. Coatepec region, Mexico. October, November, and December 2024.

Parámetros	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	DE
TDS (mg/L)	42	110,00	8,00	118,00	44,20	26,82
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	42	218,00	18,00	236,00	87,26	53,58
Cloro libre (mg/L)	42	1,00	0,00	1,00	0,18	0,24
Bromo libre (mg/L)	42	ND	ND	ND	ND	0,00
Cloro total (mg/L)	42	ND	ND	ND	ND	0,00
Hierro (mg/L)	42	ND	ND	ND	ND	0,00
Plomo (mg/L)	42	ND	ND	ND	ND	0,00
Cobre (mg/L)	42	2,00	0,00	2,00	0,14	0,01
N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	42	10,00	0,00	10,00	4,33	3,24
N-NO ₂ ⁻ (mg/L)	42	3,00	0,00	3,00	0,64	0,69
CO ₃ ²⁻ (mg/L)	42	20,00	0,00	20,00	8,74	5,68
AT (mg/L)	42	40,00	0,00	40,00	15,38	11,44
HCN (mg/L)	42	0,05	0,00	0,04	0,004	0,013
COT (mg/L)	42	8,10	0,40	8,50	2,67	2,51
DQO (mg/L)	42	11,56	0,54	12,10	3,59	3,55
pH (u)	42	1,74	6,18	7,92	6,78	0,38

N: Número de datos; **DE:** Desviación estándar; **AT:** Alcalinidad total valores expresados en mg de CaCO₃/L de muestra; **CO₃²⁻:** Carbonatos, **N-NO₃⁻:** Nitrógeno en forma de nitratos; **N-NO₂⁻:** Nitrógeno en forma de nitritos, **TDS:** Sólidos totales disueltos; **EC:** Conductividad eléctrica; **DQO:** Demanda química de oxígeno, **HCN:** Ácido cianhídrico **COT:** Carbono orgánico total, **ND:** No detectado. / **N:** Data number; **DE:** Standard deviation; **AT:** Total alkalinity values expressed in mg CaCO₃/L of sample; **CO₃²⁻:** Carbonates, **N-NO₃⁻:** Nitrogen in the form of nitrates; **N-NO₂⁻:** Nitrogen in the form of nitrites, **TDS:** Total dissolved solids; **EC:** Electrical conductivity; **DQO:** Chemical oxygen demand, **HCN:** Hydrocyanic acid; **COT:** Total organic carbon; **ND:** Not detected.

Comparación entre los sitios

Los valores medios de los nitritos en las aguas variaron significativamente ($p < 0,05$) entre las fincas. Se detectó presencia de nitritos en los sitios 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12 y 14. En el 5 se encontraron concentraciones de 2 mg/L, lo cual representó el valor más elevado de esta variable (Figura 2).

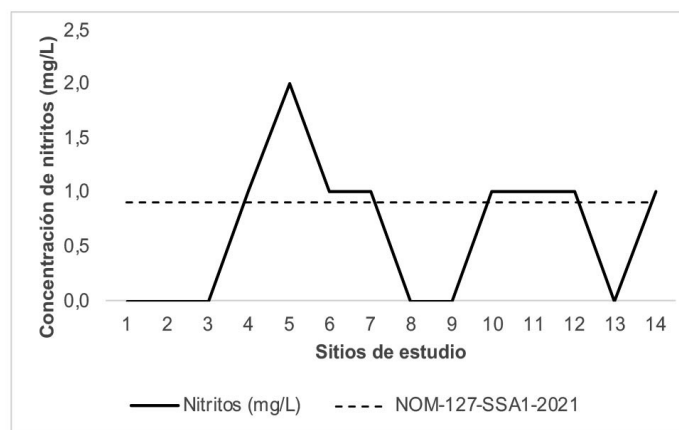


Figura 2. Variación de la concentración de nitritos en aguas para procesamiento de café en fincas cafetaleras. Región de Coatepec. Octubre, noviembre y diciembre de 2024.

Figure 2. Variation in nitrite concentration in coffee processing water on coffee farms. Coatepec region, Mexico. October, November, and December 2024.

En cuanto a la demanda biológica de oxígeno, solo dos sitios de estudio presentaron valores por encima de los 10 mg/L y ninguno superó los 20 mg/L (Figura 3). Las aguas con menos cargas contaminantes se registraron en las fincas 11 y 12. Entre los sitios de estudio existieron diferencias significativas ($p < 0,05$).

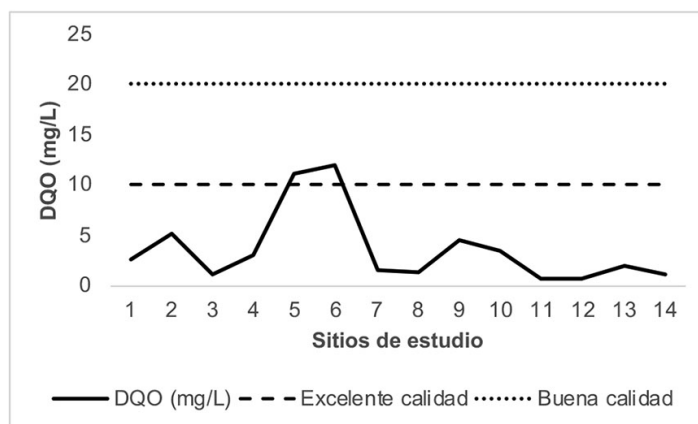


Figura 3. Variación de la demanda biológica de oxígeno en aguas para procesamiento de café en fincas cafetaleras. Región de Coatepec, México. Octubre, noviembre y diciembre de 2024.

Figure 3. Variation of biological oxygen demand in coffee processing waters on coffee farms. Coatepec region, Mexico. October, November, and December 2024.

Los sólidos totales disueltos y la conductividad eléctrica variaron según el sitio de estudio (Figura 4). Se apreciaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre ellos en ambas variables, las cuales se relacionaron con el origen de las aguas. Los lugares con los TDS y CE más bajos coincidieron con que la fuente de abasto fue agua de lluvia, mientras que los mayores valores se asociaron con aguas de origen subterráneo (sitios 2 y 3). Se encontró correlación positiva (Rho de Spearman de 0,99) y significativa ($p < 0,05$) entre las variables TDS y CE.

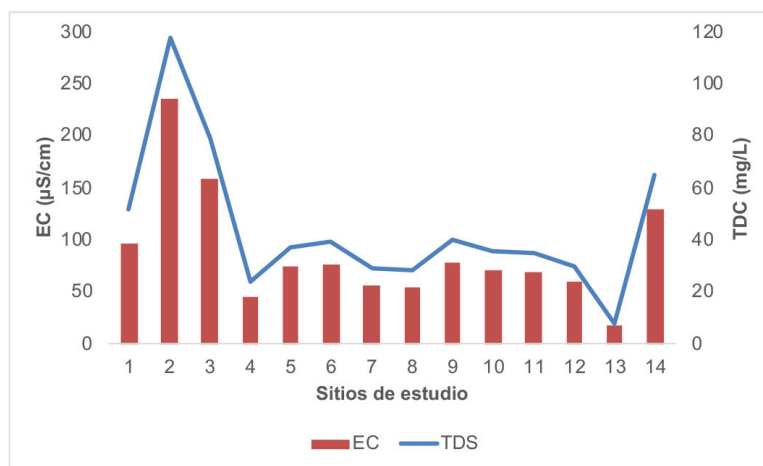


Figura 4. Variación de los sólidos totales disueltos y la conductividad eléctrica en aguas para procesamiento de café en fincas cafetaleras. Región de Coatepec, México. Octubre, noviembre y diciembre de 2024.

Figure 4. Variation of total dissolved solids and electrical conductivity in coffee processing waters on coffee farms. Coatepec region, Mexico. October, November, and December 2024.

Los valores de pH, COT y nitratos variaron significativamente ($p < 0,05$) de una finca a otra (Figura 5). El pH de las muestras de aguas analizadas se mantuvo entre 6,5 y 7,0, por lo que se pueden considerar aguas neutras. Los pH más bajos se encontraron en el sitio 13 con valores de 6,33 unidades, mientras que los valores más altos se encontraron en el 1 y 11. El pH no tuvo correlación con ninguna de las variables analizadas ($p > 0,05$).

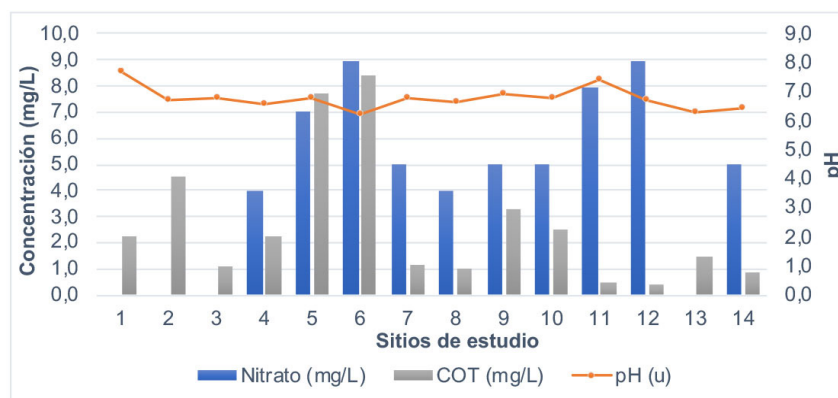


Figura 5. Variación de las variables nitratos, pH y carbono orgánico total en aguas para procesamiento de café en fincas cafetaleras. Región de Coatepec, México. Octubre, noviembre y diciembre de 2024.

Figure 5. Variation of nitrates, pH, and total organic carbon in coffee processing waters on coffee farms. Coatepec region, Mexico. October, November, and December 2024.

Los valores de COT más elevados –superiores a los 7 mg/L– se registraron en los sitios 5 y 6, mientras que en el resto los resultados fueron menores a los 5 mg/L. Entre los valores de DQO y TOC se evidenció correlación positiva alta (coeficiente de correlación = 0,96). En el 28,5 % de las muestras analizadas no se detectó presencia de nitratos y se encontró correlación positiva entre estos y los nitritos (coeficiente = 0,782). En los sitios 5, 6, 11 y 12 se cuantificaron las mayores concentraciones de nitratos y nitritos, los cuales correspondieron con los que presentaron coliformes.

Los valores de alcalinidad total (AT) y carbonatos variaron significativamente ($p < 0,05$) entre los sitios de estudio (Figura 6). Se encontró correlación positiva (Rho de Spearman de 0,92) y significativa ($p < 0,05$) entre las variables AT y carbonatos. Las mayores concentraciones correspondieron a las fincas 2 y 3, y coincidieron con agua de origen subterráneo. Ambas variables estuvieron correlacionadas con TDS y la CE, con coeficientes de 0,43 y 0,42 ($p < 0,05$).

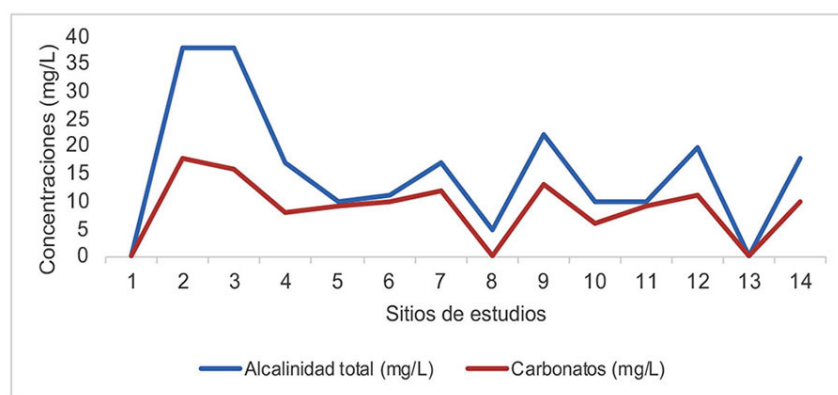


Figura 6. Variación de la alcalinidad total y carbonatos en aguas para procesamiento de café en fincas cafetaleras. Región de Coatepec, México. Octubre, noviembre y diciembre de 2024.

Figure 6. Variation of total alkalinity and carbonates in coffee processing waters on coffee farms. Coatepec region, Mexico. October, November, and December 2024.

Discusión

En México, la Secretaría de Salud, a través de la Norma Oficial Mexicana (NOM) -127-SSA1-2021, estableció que el agua destinada al procesamiento de alimentos debe poseer valores menores a 11 mg/L para el nitrógeno en forma de nitratos (Secretaría de Salud, 2022), por lo tanto, todas las muestras de agua analizadas cumplieron con las especificaciones. Para el nitrógeno en forma de nitrito, la NOM-127-SSA1-2021 establece concentraciones menores a 0,9 mg/L (Secretaría de Salud, 2022). Los sitios 1, 2, 3, 8, 9 y 13 cumplieron con este criterio. Estos resultados indicaron que el 57 % de las aguas empleadas por los productores de café no son aptas para el consumo humano y, por ende, para el procesamiento de alimentos.

Si un recurso hídrico recibe descargas de aguas residuales domésticas, el nitrógeno estará presente como nitrógeno orgánico amoniacal (Zúñiga-Ruiz et al., 2024). Este contacto con el oxígeno disuelto se transforma por oxidación en nitritos y nitratos (Chibinda et al., 2017). En los sitios 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13 y 15 el agua provenía de tanques de almacenamiento sin protección y de los ríos aledaños Texcoco y Texolo, los cuales pudieron estar contaminados por escorrentías de aguas albañales de las casas cercanas, debido a la ausencia de drenaje público.

Valores de nitritos entre 0,1 y 0,9 mg/L pueden generar problemas de toxicidad según el pH, y por encima de 1,0 mg/L son totalmente tóxicos (Chibinda et al., 2017). De los ocho sitios con alto contenido de nitritos, cinco de ellos presentaron coliformes, lo que evidenció contaminación fecal de las aguas (Salgado Arauz, 2024). La norma mexicana NOM-127-SSA1-2021 no permite coliformes en las aguas de consumo humano (Secretaría de Salud, 2022). Resultados microbiológicos similares fueron obtenidos en estudios de aguas para procesamiento de café en Colombia y Venezuela (Malavé et al., 2017; Puerta Quintero, 2015), lo que sugiere que la contaminación de las aguas para el beneficiado de café podría presentarse en otras regiones que aún no han sido estudiadas.

Los nitratos en el agua pueden indicar contaminación por materia orgánica transformada mediante la oxidación bacteriana (Valenzuela-Antezana & Yucra-Limahuaya, 2022). Los coliformes podrían indicar la presencia de otros patógenos capaces de causar enfermedades transmitidas por el agua, lo cual representa una preocupación de salud pública (Masocha et al., 2019). Entre las enfermedades asociadas a la contaminación por patógenos se encuentran la tifoidea, el cólera, la disentería y diarreas diversas (OMS, 2023). En el café, fermentarían los azúcares del mucílago y los metabolitos afectarían considerablemente la calidad de la taza, provocando la aparición de sabores astringentes y sucios (Puerta Quintero, 2015). Debido a los elevados costos de las pruebas microbiológicas, no se pudo realizar un análisis más profundo de este tema.

El parámetro de DQO no está especificado en la normativa mexicana para agua potable; sin embargo, es un indicador del grado de contaminación (Zúñiga-Ruíz et al., 2024). Se encontró que los resultados del presente estudio fueron similares a lo reportado por Malavé et al. (2017), quienes registraron valores de DQO entre 3 y 21 mg/L en aguas para procesamiento de café. Al estar por debajo de los 20 mg/L, las aguas se clasificaron como de buena calidad a excelente (CONAGUA, 2024). Otros autores han descubierto valores de DQO desde 17 hasta 181 mg/L, los cuales se relacionaron con altos contenidos de materia orgánica influenciados con lixiviados por un vertedero cercano (Mishra et al., 2019; Vaverková et al., 2020; Zúñiga-Ruíz et al., 2024).

El pH fue la variable con menos variación, aunque los valores están dentro de los límites máximos establecidos (6,5-8,5) (Secretaría de Salud, 2022). El agua pura tiene un valor de pH de 7, que se considera neutro, mientras que la lluvia limpia normal tiene un valor de pH de entre 6,2 y 6,8 (Teutli León et al., 2021). Los valores de pH más ácidos se observaron en los sitios 6 y 13, muy próximos a los del agua de lluvia, por lo que se consideró esta como su fuente de abasto. Esta disminución del pH se debió a la presencia de ácidos orgánicos derivados de la descomposición de materia orgánica, que transforma los compuestos orgánicos en dióxido de carbono y agua (Valles-Aragón et al., 2017).

Las concentraciones máximas permisibles para el agua de consumo humano son de hasta 1000 mg/L de sólidos disueltos totales y una conductividad eléctrica en el rango de 100 a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, según la Secretaría de Salud (2022). Estos parámetros están asociados con la presencia de sales disueltas en el agua (Chibinda et al., 2017).

En las muestras estudiadas no se detectaron concentraciones de cloruros, fluoruros y bromuros, razón por la cual las concentraciones de TDS y CE fueron bajas (Valles-Aragón et al., 2017). Se asumió que las concentraciones de iones sodio, magnesio y sulfatos fueron bajas, debido a los bajos valores de TDS y CE (Pérez-Vidal et al., 2025). Estos valores son superiores a los reportados por Malavé et al. (2017), quienes asociaron la baja CE a tratamientos previos realizados en las aguas (Ravikumar et al., 2020). Los sitios con bajos valores de CE (menor a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$) se atribuyeron al uso de agua de lluvia (Teutli León et al., 2021).

Los valores de carbono orgánico total indicaron una alta variabilidad entre las aguas en los sitios estudiados. Esta variabilidad puede atribuirse principalmente al origen del agua, las condiciones ambientales locales y el nivel de intervención antrópica (Petro Macea, 2024). El COT provino de la materia orgánica natural en descomposición (también como acción del metabolismo y excreción de plantas y animales), así como de compuestos químicos sintéticos (plaguicidas, fertilizantes, herbicidas, compuestos químicos industriales y compuestos orgánicos clorados) (Secretaría de Economía, 2022).

Aunque en México no se regula este valor, en España, el Real Decreto 3/2023 estableció para el COT un límite máximo del 5 mg/L para aguas de consumo humano (Ministerio de la Presidencia, 2023). Basados en dicho decreto, en los sitios 5 y 6, los valores de COT superaron los límites establecidos, lo cual se atribuyó a la presencia de aportaciones externas de materia orgánica, ya sea de origen natural (hojarasca y residuos vegetales) o antrópico (aguas residuales o escorrentía agrícola) (Petro Macea, 2024). Los valores más bajos son indicativos de aguas con baja carga orgánica, generalmente asociadas a zonas de recarga o con menor impacto humano (Teutli León et al., 2021).

Si se realiza un análisis en prospectiva, alterar la pureza del agua para el beneficio del café puede generar sabores no deseados (Puerta Quintero, 2024). El exceso de materia orgánica también puede interferir en la remoción de mucílago durante el lavado y afectar la calificación sensorial del grano (Puerta Quintero, 2015). En el contexto mexicano, la NOM-001-SEMARNAT-2021, enfocada en aguas residuales, reconoce al COT como un parámetro alternativo a la DQO, especialmente útil en aguas con interferencias analíticas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022).

La alcalinidad regula los cambios de pH producidos por la adición de ácidos y es una medida de la capacidad del agua para neutralizarlos (Marín-Machuca et al., 2023). La alcalinidad de las aguas muestreadas fue inferior en comparación con los valores reportados por Puerta Quintero (2015) y los 20 mg/L aceptados internacionalmente para mantener la vida acuática (Pérez-Vidal et al., 2025). Cuando las aguas tienen alcalinidades inferiores a los 20 mg/L, son propensas a la contaminación (Teutli León et al., 2021). La baja alcalinidad influyó en que el pH de las aguas fuera ligeramente ácido; además, se asoció a la baja presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos (Marín-Machuca et al., 2023).

La alcalinidad baja de las aguas no sería un problema para el desarrollo de los microorganismos durante la fermentación del mucílago del café, mientras que valores elevados provocarían mineralización excesiva y, por tanto, muerte de microorganismos por elevada presión osmótica, así como aparición de sedimentos en las bebidas (Arrechea Villacampa & Valdés Monteagudo, 2023).

En el análisis de correlaciones se obtuvieron coeficientes positivos mayores a 0,95 entre TDS y CE, así como entre carbonatos y alcalinidad total, lo que indicó una interrelación perfecta (Roy-García et al., 2019). Estas asociaciones reflejan relaciones funcionales directas, ya que los TDS influyen en la conductividad eléctrica por su contenido iónico (Ravikumar et al., 2020), y los carbonatos representan una fracción importante de la alcalinidad (Pérez-Vidal et al., 2025). Los coeficientes cercanos a 0,50 entre TDS, CE, carbonatos y AT sugirieron correlaciones moderadas, asociadas a interacciones parciales, mientras que la interacción entre nitritos y nitratos (0,78) se consideró buena (Roy-García et al., 2019), atribuida a su origen común en procesos de nitrificación (Valenzuela-Antezana & Yucra-Limahuaya, 2022).

Conclusiones

En el 57 % de las fincas estudiadas, el agua no cumplió con los criterios para su uso en el procesamiento de café. Las concentraciones de nitritos y los conteos de coliformes superaron las especificaciones vigentes. Los sitios presentaron diferencias significativas en las variables nitritos, nitratos, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos disueltos totales (TDS), conductividad eléctrica (CE), potencial de hidrógeno, carbono orgánico total (COT), alcalinidad total y carbonatos. Además, se observaron correlaciones positivas entre las variables TDS, CE, carbonatos y alcalinidad total; COT y DQO, y nitratos y nitritos. El análisis del agua en el proceso de beneficiado de café representa una oportunidad de investigación debido a la falta de información.

Se recomienda proteger los depósitos de agua de lluvia con tapas o accesorios que impidan la caída de hojas o material orgánico producto de las escorrentías. Asimismo, se sugiere el uso de métodos de análisis más precisos para aquellas variables cuya concentración es del orden de los miligramos por litro. Para los productores con

presencia de coliformes es recomendable un tratamiento primario con cloro. A la comunidad científica se le insta a determinar si la cantidad de cloro, nitritos y nitratos produce afectación sensorial al café.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencias Humanidades, Tecnologías e Innovación de México por brindar sus recursos y confianza necesarios para el desarrollo de este proyecto. Se agradece a El Colegio de Veracruz por ofrecer un entorno académico enriquecedor y el acompañamiento necesario para avanzar en esta labor investigativa.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Arrechea Villacampa, A., & Valdés Monteagudo, L. (2023). Desarrollo de una bebida carbonatada sabor piña envasados en botellas polietilén tereftalato de 330 ml para el mercado en Moneda Librementemente Convertible. *Directivo al Día*, 22(2), 34–47. <https://directivoaldia.villaclara.cu/index.php/dad/article/view/117>
- Arrechea-Villacampa, A., & Bolumen, S. (2018). *Evaluación de la estabilidad de refrescos carbonatados de naranja, piña y limón envasados en pomos PET de 330 mL* [Tesis de Maestría, Universidad de La Habana]. Scriptorium: Repositorio Institucional de tesis de la Universidad de La Habana. <https://accesoabierto.uh.cu/s/scriptorium/item/2130352#lg=1&slide=0>
- Barcia, X. (2024). *Agua*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/175693/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Buenalaya Asto, J. S. (2019). *Termodinámica de electrolitos* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle] Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Educación. <https://repositorio.une.edu.pe/handle/20.500.14039/6960>
- Chibinda, C., Arada-Pérez, M.A., & Pérez-Pompa, N. (2017). Caracterización por métodos fisicoquímicos y evaluación del impacto cuantitativo de las aguas del Pozo Cantera de Caliza. *Revista Cubana de Química*, 29(2), 303-321. <https://cubanaquimica.uo.edu.cu/index.php/cq/article/view/2517>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024, octubre 9). *Calidad del agua en México*. Recuperado el 9 de octubre de 2024, de <https://www.gob.mx/conagua/es/articulos/calidad-del-agua>
- Escamilla-Prado, E., Tinoco-Rueda, J. Á., Pérez-Villatoro, H. A., Aguilar-Calvo, Á. de J., Sánchez-Hernández, R., & Ayala-Montejo, D. (2021). Transformación socioecológica en el agroecosistema café afectado por roya en Chiapas, México. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 44(4), Artículo 643. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.4.643>
- Hernández Sánchez, M. I., & Nava Tablada, M. E. (2019). Capital social en organizaciones cafetaleras de dos regiones de la zona centro de Veracruz, México. *Sociedad y Ambiente*, 21, 185–206. <https://doi.org/10.31840/sya.v0i21.2045>

- Malavé, A., Silva-Acuña, R., Ángel-Martínez, M., Méndez-Natera, J. R., & Barrios-Maestre, R. (2017). Diagnóstico del agua utilizada en las procesadoras de café del Municipio Caripe – Estado Monagas, Venezuela. *Revista Ciencia Unemi*, 10(24), 99–108. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol10iss24.2017pp99-108p>
- Marín-Machuca, O., Alvarado-Zambrano, F. A., Vargas-Ayala, J. B., Ortiz-Guizado, J. I., Jáuregui-del-Águila, L. G., Alvarado-Zambrano, R. A., Marín-Sánchez, U., Candela-Díaz, J. E., Quispe-Quispe, A., & Marín-Sánchez, O. (2023). Cuantificación de la alcalinidad del agua natural aplicando los números de Bernoulli y la integral aproximada de Simpson. *Biotempo*, 20(2), 183–196. <https://doi.org/10.31381/biotempo.v20i2.5945>
- Masocha, M., Dube, T., & Dube, T. (2019). Integrating microbiological and physicochemical parameters for enhanced spatial prediction of groundwater quality in Harare. *Physics and Chemistry of the Earth*, 112, 125–133. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.03.003>
- Ministerio de la Presidencia. (2023, enero 10). *Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro*. Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2023/01/10/3>
- Mishra, S., Tiwary, D., Ohri, A., & Agnihotri, A. K. (2019). Impact of municipal solid waste landfill leachate on groundwater quality in Varanasi, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, Artículo 100230. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100230>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2023, septiembre 13). *Agua para consumo humano*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Organización Panamericana de la Salud. (2022). *Saneamiento básico: agua segura, disposición de excretas y manejo de la basura: cuadernillo para capacitaciones con enfoque intercultural en áreas rurales*. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/56014>
- Ormaza, A. M., Díaz-Arango, F. O., & Rojano, B. A. (2022). Efecto de la preparación fría de café (*Coffea arabica* L. var. Castillo) sobre la capacidad antioxidante y la calidad sensorial. *Información Tecnológica*, 33(1), 57–70. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000100057>
- Parada Molina, P. C., Cervantes Pérez, J., Ruiz Molina, V. E., & Cerdán Cabrera, C. R. (2020). Efectos de la variabilidad de la precipitación en la fenología del café: caso zona cafetalera Xalapa-Coatepec, Veracruz, Mex. *Ingeniería y Región*, 24, 61–71. <https://doi.org/10.25054/22161325.2752>
- Pérez-Vidal, A., Gutiérrez-Zapata, H. M., Delgado-Cabrera, L. G., Vidal-Guerrero, A. J., Ramírez-Medina, L. M., Porras-Castro, C. F., Escobar-Rivera, J. C., Ospina-Rodríguez, J., Gutierrez-Marín, J. P., & Torres-Lozada, P. (2025). Influencia del Tipo de Alcalinizante Sobre el Proceso de Estabilización Química del Agua Tratada en Plantas de Tratamiento Convencional. *Revista EIA*, 22(43), Artículo 4337, 1–32. <https://doi.org/10.24050/reia.v22i43.1767>
- Petro Macea, S. E. (2024). *Validación de un método analítico para la determinación de nitratos en agua natural y residual por espectrofotometría UV* [Tesis de Ingeniería, Universidad de Córdoba]. Repositorio institucional Unicordoba. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/8062>
- Puente Miranda, D. G., Valenzuela García, L. I., & Alarcón Herrera, M. T. (2023). Determinación histórica de índices de calidad del agua en observatorios participativos en el norte de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 39, 127–137. <https://doi.org/10.20937/RICA.54697>

- Puerta Quintero, G. I. (2015). *La inocuidad y calidad del café requiere de agua potable para su beneficio y preparación de la bebida*. Centro Nacional de Investigaciones de Café. <http://hdl.handle.net/10778/599>
- Puerta Quintero, G. I. (2024, julio 3). Los sabores especiales de la fermentación del café. *Café Gourmet Ensoñación*. <https://cafegourmetensonacion.com/los-sabores-especiales-de-la-fermentacion-del-cafe/>
- Ravikumar, P., Shridhar, D. M., & Prakash, K. L. (2020). Assessment of leachate contaminated groundwater quality near Mandur solid waste dumping site, Bangalore. *Current World Environment*, 15, 194-203. <https://doi.org/10.12944/cwe.15.2.06>
- Roy-García, I., Rivas-Ruiz, R., Pérez-Rodríguez, M., & Palacios-Cruz, L. (2019). Correlación: no toda correlación implica causalidad. *Revista Alergia México*, 66(3), 354–360. <https://doi.org/10.29262/ram.v66i3.651>
- Salgado Arauz, G. J. (2024). Control bacteriano con luces UV en la industria alimentaria en Nicaragua. *Revista Torreón Universitario*, 13(36), 178–185. <https://doi.org/10.5377/rtu.v13i36.17637>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). *Cultivo de café en México*. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cultivo-de-cafe-en-mexico>
- Secretaría de Economía. (2022, febrero 1). *Norma Mexicana (NMX-AA-187-SCFI-2021) Análisis de agua – medición de carbono orgánico total en aguas naturales, salinas, residuales y residuales tratadas*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5641713&fecha=01/02/2022#gsc.tab=0
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022, 11 de marzo). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021. Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- Secretaría de Salud. (2022, 2 de mayo). *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0
- Teutli León, M. M. M., Sánchez Hernández, A. A., & Moreno Gutiérrez, E. (2021). Calidad del agua de lluvia en Atlixco, Puebla. *Decumanus*, 6(6), 1–17. <https://doi.org/10.20983/decumanus.2021.1.1>
- Valenzuela-Antezana, R. N., & Yucra-Limahuaya, Y. (2022). Evaluación de la calidad de agua subterránea del Parque Industrial Taparachi del distrito de Juliaca. *ÑAWPARISUN – Revista de Investigación Científica de Ingenierías*, 3(4), 67–72. <https://doi.org/10.47190/nric.v3i4.8>
- Valles-Aragón, M.C., Ojeda-Barrios, D. L., Guerrero-Prieto, V.M., Prieto-Amparan, J. A., & Sánchez-Chávez, E. (2017). Calidad del agua para riego en una zona nogalera del Estado de Chihuahua. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(1), 85–97. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.01.08>
- Vaverková, MD, Elbl, J., Koda, E., Adamcová, D., Bilgin, A., Lukas, V., Podlasek, A., Kintl, A., Wdowska, M., Brtnický, M. & Zloch, J. (2020). Chemical composition and hazardous effects of leachate from the active municipal solid waste landfill surrounded by farmlands. *Sustainability*, 12(11), Artículo 4531. <https://doi.org/10.3390/su12114531>
- World Health Organization. (2017). *Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
- Zúñiga-Ruiz, P., Amaro-Espejo, IA, Bernal-Ramírez, R. de G., & Reyes-Velázquez, C. (2024). Evaluación de la calidad del agua subterránea cercana a un relleno sanitario. *Revista Terra Latinoamericana*, 42, 1–10. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1814>