

INFORME DE ACTIVIDADES

CALIDAD DEL AGUA-BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ



PROYECTO 319069

“Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafeticultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas”

Responsable Técnico:
Dr. Martín A. Bolaños González

Colaboradora(e)s:
Dr. Axel E. Rico Sánchez
Luz M. Ramírez Armas
Ángel A. Bolaños Ibarra
Adán Villa Herrera
José M. Contreras López

Montecillo, Edo. de Méx., 26 de noviembre de 2023

Introducción

Los sistemas agroforestales, como es el caso de la producción de café bajo sombra en México, proporcionan servicios hidrológicos (van Noordwijk, 2019) y contribuyen a la conservación de suelos (Muchane *et al.* 2020); con ello, mantienen la calidad del agua al reducir los caudales pico y evitar la erosión en las plantaciones. Sin embargo, durante su ciclo de vida, desde el vivero hasta la bebida, también pueden generar una cantidad importante de sustancias nocivas que se liberan al ambiente, principalmente a la atmósfera (gases de efecto invernadero como bióxido de carbono, metano y óxido nitroso), al suelo (pesticidas, metales pesados) y a las corrientes de agua superficiales y subterráneas (materia orgánica, cafeína, pesticidas, nutrientes inorgánicos eutrofizantes, entre otros). Particularmente, en la etapa poscosecha existen fuentes de contaminación importantes debido a que solo el 5% del peso del fruto fresco se aprovecha en la preparación de la bebida, el 95% restante corresponde a residuos (Fernández *et al.*, 2020). Muchos de estos residuos, debido a un manejo inadecuado, contaminan el suelo, agua y aire, y se convierten en focos infecciosos para la salud de las personas (Jaulis *et al.*, 2022).

El proceso para obtener el café verde, previo a su tostado, se denomina beneficio. En éste se retiran las capas que cubren el grano, incluyendo la piel plateada, el pergamino, el mucílago, la pulpa y la cáscara, lo cual se puede realizar de tres maneras diferentes: húmedo, seco y semisecho (Bastian *et al.*, 2021). El método húmedo es el más utilizado por la mayoría de productores del mundo, y de manera particular en México, debido a que, en general, garantiza una mayor calidad de los granos de café, pero es el que usa los mayores volúmenes de agua, con la eventual degradación de su calidad. Las aguas residuales de esta actividad generalmente se arrojan en las inmediaciones afectando las corrientes superficiales y subterráneas (Ashenafi *et al.*, 2021).

El beneficio húmedo comprende los subprocesos de despulpado, fermentado, lavado y secado y, debido a que la cereza del café contiene un mucílago (miel) que durante el lavado origina un residuo líquido conocido como “agua miel”, a las aguas residuales de este proceso se les denomina como aguas mieles (Jaulis *et al.*, 2022). Estas se consideran como una de las mayores fuentes contaminantes de compuestos orgánicos en el sector cafetalero (Rugama y Save, 2013); y se caracterizan por su alta acidez y contenido de materia orgánica (Bisekwa *et al.*, 2020; Jaulis *et al.*, 2022). En consecuencia, se genera un aumento considerable de la demanda bioquímica de oxígeno, carga de sólidos totales, temperatura del agua, cambios en el pH, altas concentraciones de fenoles y antioxidantes, entre otros (Navarro y Large, 2010; Guaranguay y Orozco, 2019).

Se estima que el beneficio húmedo de 1 kg de café genera una cantidad de agua y material contaminante equivalente a aquella producida por seis personas en un día (Navarro y Large, 2010). En México, Torres (2018) estimó que un litro de agua generada en un beneficio húmedo de café equivale a 125 L del agua residual doméstica que se genera en una casa habitación, lo que da una idea del impacto potencial de contaminación. La mayoría de beneficios de café en los países en vías de desarrollo no tratan sus aguas, por lo que eventualmente pueden alcanzar las corrientes superficiales provocando contaminación severa que afecta a la flora y fauna acuáticas, y que además impide el uso del agua por el hombre para fines domésticos, industriales o recreativos (Woldesenbet *et al.*, 2014; Gómez *et al.*, 2017).

En primera instancia, para evitar que los desechos del despulpado y lavado del café pueden llegar a las corrientes de agua y contaminarlos, es necesario conocer la carga y tipo de contaminantes generados en este proceso, lo que es el punto inicial para proponer alternativas que ayuden en la solución de esta problemática ambiental. Debido a ello, en la presente investigación se tomaron muestras de agua durante el periodo de cosecha 2023, en beneficios de café ubicados en las cooperativas de café orgánico Comon Yaj Noptic S.P.R. de R.L. y Finca Triunfo Verde S.C., ambas localizadas en la vertiente interior de la Sierra Madre de Chiapas. Estas cooperativas agrupan a pequeños productores de café arábica orgánico de los municipios de La Concordia, Capitán Luis A. Vidal, Montecristo de Guerrero, Siltepec, Chicomuselo y Ángel Albino Corzo.

Debido a lo expuesto, se realizó la caracterización de la calidad del agua utilizada para el beneficio húmedo del café en ambas cooperativas, así como de las aguas mieles generadas por este proceso, lo que aportará información y, posteriormente, proponer alternativas para reducir el potencial de contaminación de las corrientes y cuerpos de agua debido a la cafecultura de esta región.

Toma de muestras de agua

Durante los días 8 y 9 de marzo del 2023 se tomaron muestras de agua en cinco beneficios de café húmedo ubicados en el municipio de La Concordia Chiapas, cuatro de los cuales pertenecen a la cooperativa Triunfo Verde y uno a la cooperativa Comon Yaj Noptic (Figura 1).

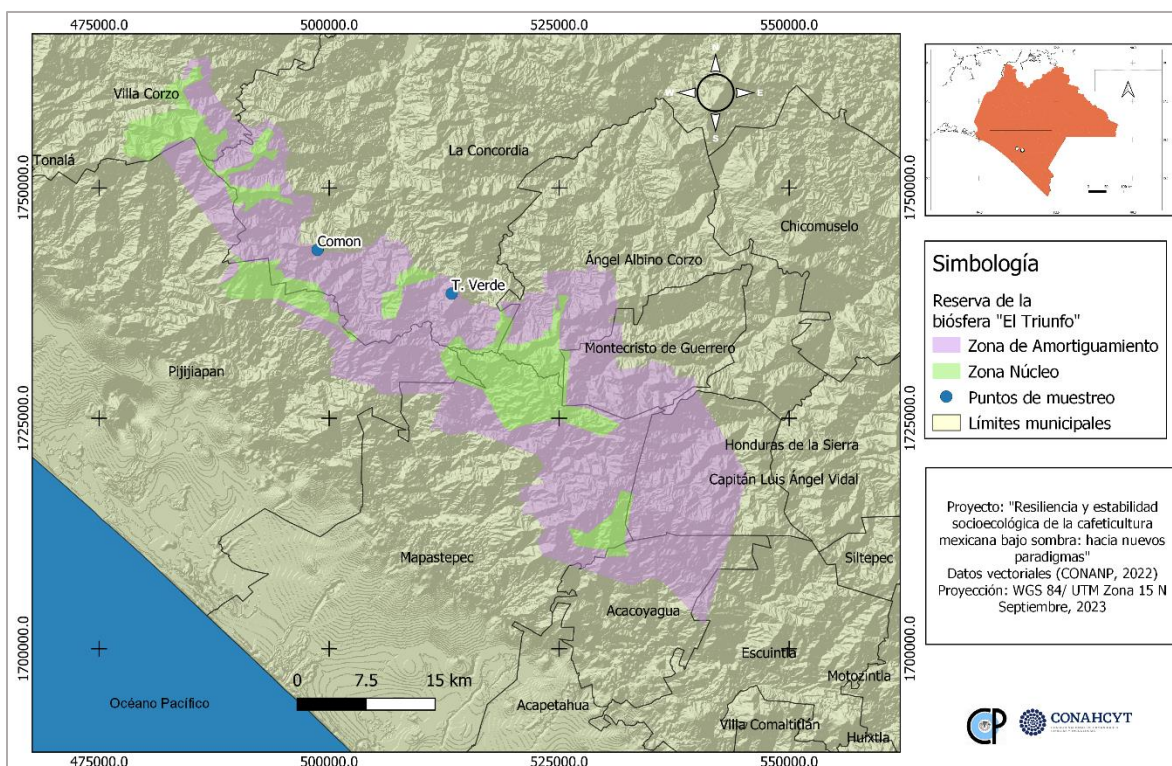


Figura 1. Puntos de muestreo de calidad de agua para las organizaciones de Comon Yaj Noptic y Triunfo Verde, Chiapas, Méx.

Los sitios/procesos para tomar las muestras se seleccionaron en función del conocimiento de carga de contaminantes en muestras de agua derivada de los diferentes subprocesos reportados en trabajos previos, y se nombraron como se indica a continuación:

- Vertiente: muestra de agua tomada directamente en la fuente de abastecimiento para los procesos de despulpado y lavado. Presumiblemente es agua limpia.
- Cerezo: muestra de agua proveniente del despulpado.
- Lavado: muestra de agua proveniente del primer lavado del café, que contiene mayor carga de sedimentos respecto a los siguientes lavados.
- Fosas: muestra de agua tomada en las fosas de descarga de aguas residuales, depósito que recibe el agua derivada de los procesos de despulpado y los diferentes lavados.

Cuadro 1. Cadena de custodia de las muestras de la cooperativa Triunfo verde.

PROCEDENCIA: CHIAPAS, MX			PROYECTO: "Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafeticultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas"			FECHA: 9/03/23		
ESTADO: Chiapas						COMUNIDAD: Monterrey		
MUNICIPIO: La Concordia						RESPONSIBLE		
LOCALIDAD: Monterrey						OBSERVACIONES:		
MUESTREADOR: José Manuel Contreras								
No. De muestra	Productor	Tipo de muestra	Cooperativa	Localidad	Fecha	Latitud	Longitud	Elevación (m)
1	Venancio	vertiente	Triunfo Verde	Monterrey	9/3/2023	15.725123	-92.87571	1600
3	Venancio	lavado	Triunfo Verde	Monterrey	9/3/2023	15.728042	-92.878786	1600
4	Venancio	fosas	Triunfo Verde	Monterrey	9/3/2023	15.727965	-92.87876	1600
5	Morales	vertiente	Triunfo Verde	Monterrey	9/3/2023	15.718936	-92.86856	1300
6	Morales	lavado	Triunfo Verde	Monterrey	9/3/2023	15.720836	-92.865105	1300
17	Guillermo	vertiente	Triunfo Verde	Monterrey	9/3/2023	15.721261	-92.880413	1600
9	Guillermo	lavado	Triunfo Verde	Monterrey	9/3/2023	15.722994	-92.881383	1600
10	Guillermo	fosas	Triunfo Verde	Monterrey	9/3/2023	15.723064	-92.881516	1600
11	Aladino	vertiente	Triunfo Verde	Monterrey	9/3/2023	15.731368	-92.872099	1630
12	Aladino	lavado	Triunfo Verde	Monterrey	9/3/2023	15.732824	-92.875034	1630

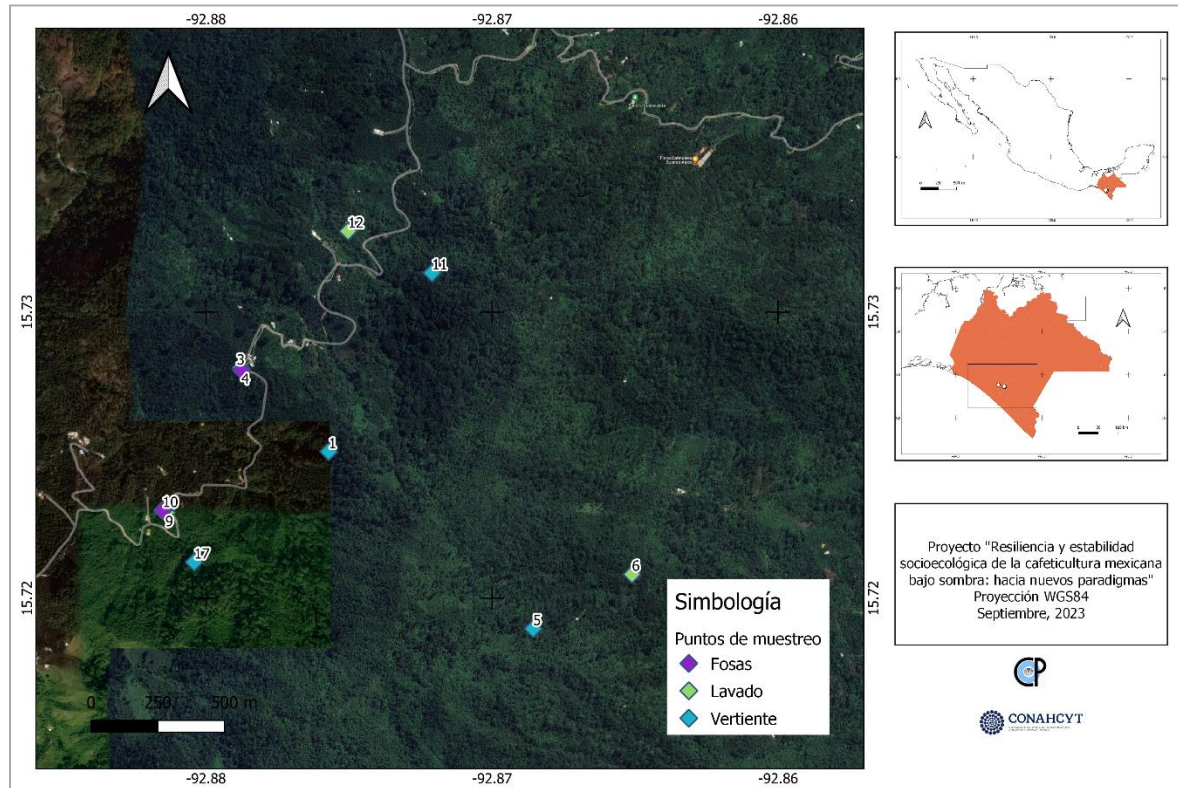


Figura 2. Puntos de muestreo de calidad de agua para la organización Triunfo Verde.

Cuadro 2. Cadena de custodia de las muestras de la cooperativa Comon Yaj Nopitic.

PROCEDENCIA: CHIAPAS, MX			PROYECTO: "Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafeticultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas"			FECHA: 8/03/23		
ESTADO: Chiapas						COMUNIDAD: Emiliano Zapata		
MUNICIPIO: La Concordia						RESPONSABLE		
LOCALIDAD: Emiliano Zapata						OBSERVACIONES:		
MUESTREADOR: Luz María Ramírez								
No. De muestra	Productor	Tipo de muestra	Cooperativa	Localidad	Fecha	Latitud	Longitud	Elevación (m)
13	David	vertiente	Comon Yaj N.	Emiliano Zapata	8/3/2023	15.767444	-93.012215	1464
14	David	cerezo	Comon Yaj N.	Emiliano Zapata	8/3/2023	15.767572	-93.012319	1464
15	David	lavado	Comon Yaj N.	Emiliano Zapata	8/3/2023	15.767560	-93.012467	1464
16	David	fosas	Comon Yaj N.	Emiliano Zapata	8/3/2023	15.768165	-93.011744	1451

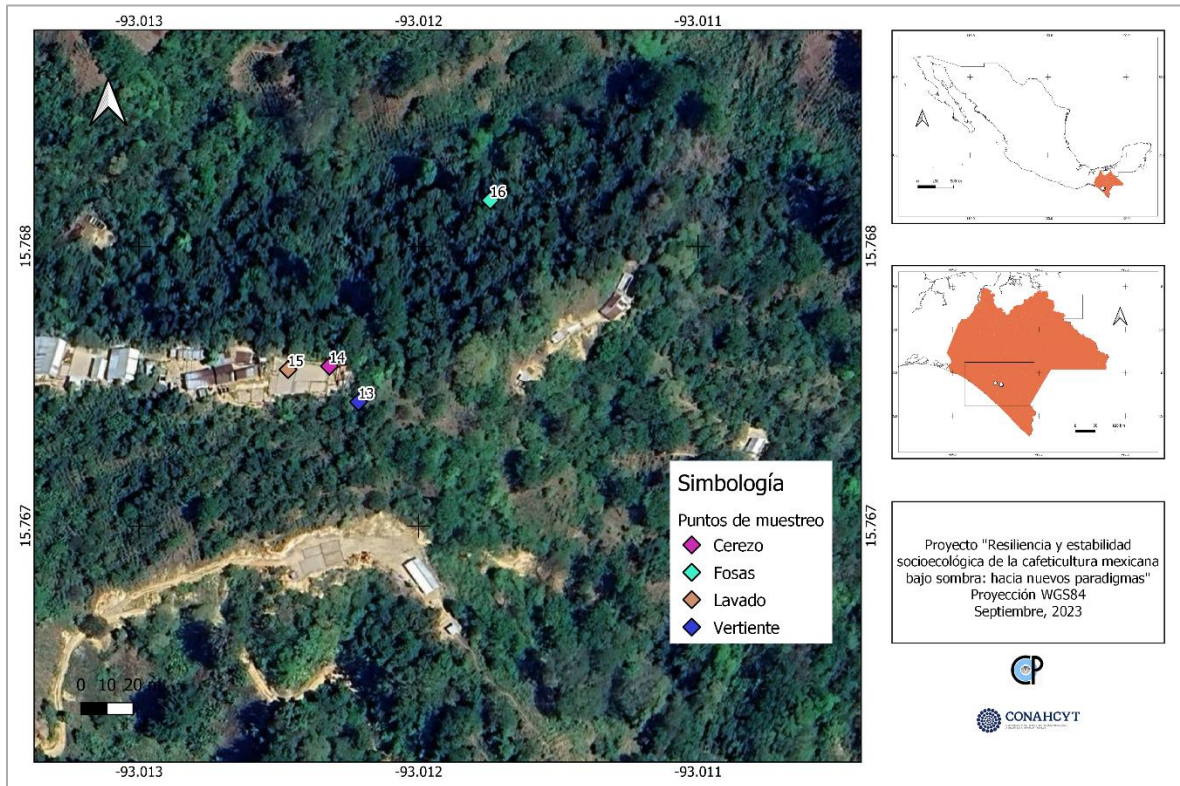


Figura 3. Puntos de muestreo de calidad de agua para la organización Comon Yaj Nopitic.

El método de colecta de agua, tanto en la vertiente, tanque de lavado y fosa, correspondiente a cada muestreo fue el siguiente:

- Se usaron guantes estériles para manipular los frascos que contendría las muestras, los cuales se introdujeron en su totalidad en el agua con la tapa abierta para rellenarlos con las muestras respectivas.
- Al estar llenos los frascos, fueron sellados manteniéndolos inmersos en el medio.
- Posteriormente se rotularon con el nombre de la parcela de donde proviene el café procesado y el tipo de muestra.
- Además, se registraron sus datos de ubicación (coordenadas geográficas) y nombre del propietario de las parcelas.
- Las muestras de agua fueron congeladas y aisladas térmicamente para su transporte al laboratorio.

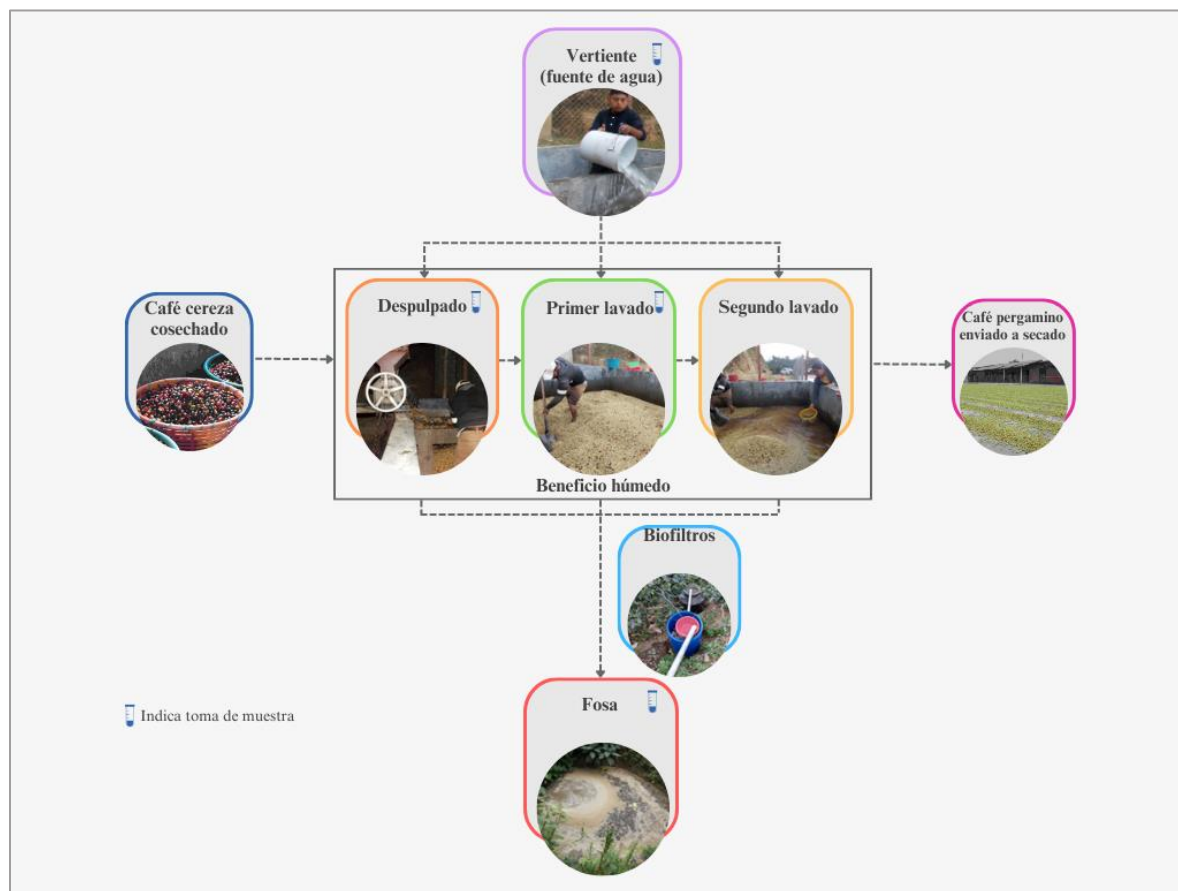


Figura 4. Proceso de colecta de muestras de agua.

El tipo de vegetación circundante a los sitios de muestreo (beneficio húmedo) correspondió a bosque mesófilo de montaña; sin embargo, este presentó diferentes niveles de degradación. En cambio, en lo que corresponde a los sitios de muestreo en las fuentes de abastecimiento de agua (posas, vertientes y cascadas), el bosque mesófilo se encontró más conservado (niveles de perturbación bajos). Las fuentes se encontraron rodeadas de mangueras, mallas mosquiteras, botellas de refresco, alambres. También fue evidente la presencia de macroinvertebrados, insectos, anfibios y aves. Asimismo, los pequeños cuerpos de agua se encontraron colmados de sedimentos, hojarasca, piedras y arenas.

El entorno del sitio en el cual se tomaron las muestras del primer lavado de liga estaba rodeado por plantaciones de café, pero también se observaron mangueras usadas, restos de basura, botellas de *pet*, latas de aluminio, bolsas negras, trozos de costales y alambres, elementos que pueden ser fuente de contaminación. Todos los tanques de lavado de liga estaban contruidos con concreto.

En cuanto a las fosas, estas se encontraron en los extremos de los cafetales, tenían una profundidad de 3 metros, y se encontraron rodeados de herbáceas, restos de basura como

botellas de pet, cartón, pañales y latas de aluminio. Así mismo, se notó la presencia de perros, aves, insectos, y restos de pulpa ácida de café con diferentes grados fermentación.



Figura 5. Proceso de Despulpado de café.

Para el despulpado de café cereza se utiliza una máquina despulpadora de motor eléctrico a la cual se le agrega agua para facilitar la separación del grano.



Figura 6. Proceso de lavado.

Regularmente se realizan 3 lavados.



Figura 7. Tubería para desagüe de las piletas de lavado.

Una vez realizado el despulpado y los diferentes lavados ¿cuántos? del café pergamino, el agua se direcciona a las fosas de depósito para aguas residuales a través de una tubería de PVC.



Figura 8. Fosas de descarga de aguas residuales del beneficiado de café.

Dentro de las fosas de aguas residuales, el agua es contenida y filtrada de manera natural hacia el subsuelo. Una vez que las fosas están llenas a toda su capacidad, el agua se desborda y sigue un curso natural extendiéndose en el sentido de la pendiente.

Parámetros de calidad del agua

Cálculo del índice de Calidad de Agua

El índice de calidad de agua (ICA) se obtuvo a partir del método propuesto por Dinius (1978), el cual está basado en cuatro pasos (Chidiac y Najjar, 2023):

- 1) Selección de parámetros.
- 2) Transformación o normalización de parámetros de diferentes unidades a una escala común (obtención de subíndices de calidad).
- 3) Ponderación de los parámetros seleccionados.
- 4) Agregación de valores de subíndices para obtener el ICA final

Utiliza un índice multiplicativo para reunir los contaminantes en un solo sistema (Ec. 1). Define 12 variables contaminantes: Oxígeno Disuelto (OD), Demanda Biológica de Oxígeno a 5 días (DBO₅), Coliformes totales (Col. T), Coliformes fecales (Col. F), pH, Alcalinidad, Dureza,

Cloruros (Cl^-), Conductividad específica, Temperatura, Turbidez y Nitratos (NO_3), en seis categorías de usos de agua: Abastecimiento público, Recreación, Vida acuática (peces), Vida acuática (mariscos), Agricultura e Industria.

$$DWQI = \sum_{i=1}^n I_i^{W_i} \quad (I)$$

dónde, $DWQI$ es el índice de la calidad del agua Dinius cuyo valor oscila entre 0- 100 I_i es la función del subíndice del parámetro contaminante, W_i es el peso específico del parámetro contaminante cuyo valor oscila entre 0-1 y n es el número de parámetros de contaminantes.

La ponderación de cada parámetro fue asignada a partir de la evaluación de importancia de los miembros del panel Delphi; siete científicos del agua reconocidos a nivel nacional, quienes determinaron los contaminantes que se incluyeron en el índice, la relación entre la cantidad de estos contaminantes en el agua y la calidad resultante del agua, y la importancia de cada variable de contaminación para cada uso del agua, así como para la contaminación general (Cuadro 3).

Cuadro 3. Pesos relativos de los parámetros que conformas en ICA de Dinius (1987).

NÚMERO	PARÁMETRO	UNIDADES	PESO RELATIVO
1	OD	% Sat	0.109
2	Coliformes fecales	NMP/100 mL	0.116
3	pH	Unidades de pH	0.077
4	DBO ₅	mg/L	0.097
5	Nitratos	mg/L	0.09
6	Temperatura	°C	0.077
7	Dureza	mg/L	0.065
8	Conductividad	ms/cm	0.079
9	Turbidez	UNT	0.063
10	Cloruros	Q (mL)	0.074
11	Coliformes totales	NMP/100 mL	0.09
12	Alcalinidad	Q (mL)	0.063

Fuente: Torres *et al.*, 2009.

Este índice se ha utilizado como referencia en la construcción de índices adicionales de calidad de agua, ya que toma en cuenta aspectos sociales y económicos; por ello este índice es considerado como el primer índice rudimentario de contabilidad social.

En el presente proyecto, el ICA se obtuvo para cinco categorías de usos del agua: Uso humano, Agricultura, Pesca, Industria y Recreación. Se incluyeron 14 parámetros físico-químico-biológicos analizados en el laboratorio, los cuales son: OD, pH, Conductividad, Temperatura, Nitratos, Fosfatos, Coliformes totales, Coliformes fecales, Dureza, Alcalinidad, Cloruros y DBO₅. En este caso también se consideraron algunas variables físicas del lugar de muestreo, como son: Elevación, Velocidad del viento, Temperatura y Color.

Resultados

En el Cuadro 4 se observan los resultados obtenidos para los parámetros analizados:

Cuadro 4. Valores obtenidos para los parámetros utilizados en el cálculo del ICA

Muestra	OD %	DBO ₅ mg/l	NO ₃ mg/l	Dureza mg/l	Color UNT	Col. T NMP	Col. F NMP	Alc. Q (ml)	Cl- Q (ml)	Conduc. ms/cm	T. Agua °C	T. Aire °C	Δ T °C	pH	Altitud msnm
1	6.25	2.5	0.3	0.67	28.00	<2	<2	75.50	54.98	2015	18.00	26.73	8.73	6.8	1600
3	3.25	250	29.25	7.90	162.00	<2	<2	76.50	1244.61	445	19.00	27.31	8.31	4.5	1600
4	2	250	17.8	0.12	124.00	<2	<2	96.00	1244.61	655	19.50	28.97	9.47	4.6	1600
5	7	3.37	0.3	0.18	2.00	43	23	93.50	27.49	60	18.50	30.93	12.43	6.7	1300
6	2.75	250	16.9	5.70	31.00	<2	<2	41.00	1244.61	515	19.50	31.35	11.85	4.3	1300
17	7	3.71	0.2	0.21	5.50	15	<2	121.50	22.49	65	18.00	31.14	13.14	9.2	1600
9	2	100	26.7	6.20	132.00	<2	<2	352.00	1244.61	720	19.50	30.15	10.65	4.5	1600
10	1.25	250	20.65	0.13	244.00	<2	<2	181.00	1244.61	840	20.00	30.15	10.15	4.8	1600
11	7.75	4.84	0.25	0.21	9.00	21	23	223.00	19.99	70	18.00	26.6	8.6	7	1630
12	1.25	250	95.7	0.30	1274.00	<2	<2	134.50	1244.61	2575	18.50	25.9	7.4	4.6	1630
13	7.75	3	0.3	0.50	7.00	<2	<2	80.00	24.99	50	19.00	22.46	3.46	7	1464
14	1.75	250	53.3	0.18	258.00	<2	<2	50.00	1244.61	1030	19.50	21.99	2.49	4.5	1464
15	0.85	250	96.55	0.21	430.00	<2	<2	72.50	1244.61	1400	20.00	20.94	0.94	4.5	1464
16	0.25	250	58.65	0.18	1576.00	<2	<2	56.00	1244.61	1090	20.50	25.75	5.25	4.4	1451

El término pH se usa universalmente para determinar si una solución es ácida o básica. El pH óptimo de las aguas debe estar entre 6.5 y 8.5 según la NOM-127-SSA1-2021, por lo que las aguas de pH menor de 6.5 se consideran corrosivas debido a compuestos ácidos o sales ácidas que tienen en disolución.

El color del agua puede ser alterado por la presencia de partículas suspendidas y disueltas de gases, líquidos y sólidos tanto orgánicos como inorgánicos. El límite máximo recomendado por la NOM-127-SSA1-2021 para el agua de consumo humano de 15 UNT (unidades nefelométricas de turbidez), el cual tiene un alto índice de dispersión; según esta información, solo las muestras de la vertiente cumplen con estos valores.

La presencia de Coliformes en el agua es un indicio de que pueden estar contaminado con aguas negras u otro tipo de desechos en descomposición. Generalmente, las bacterias Coliformes se encuentran en mayor abundancia en la capa superficial del agua o en los sedimentos del fondo. De acuerdo a lo observado, las muestras 5 y 11 superan los límites permisibles (<2 NMP) en la NOM-127-SSA1-2021; lo cual indica que posiblemente no hay un buen manejo de desinfección y de limpieza de los reservorios o hay filtraciones difusas de aguas contaminadas. Tampoco se descarta una posible contaminación debido al manejo y procesamiento de las muestras.

Una vez que se integraron todos los parámetros analizados en el índice de calidad de agua, los resultados indican que el agua de la vertiente se clasificó con una ICA Excelente en las fuentes de origen (vertiente), pero como Contaminada después de usar el agua para el beneficio de café, como se muestra en el Cuadro 5. En el caso de posibles usos del agua para Agricultura, Pesca e Industria, el ICA se clasificó con Calidad Excelente en las fuentes de origen y, en todos los casos, disminuyó su calidad después de usarse en el beneficio a Contaminación Leve. En el caso de uso para la recreación, las muestras se clasificaron con Calidad Aceptable después de su uso en el beneficio (Cuadro 5).

Cuadro 5. Clasificación de las muestras de agua de acuerdo al índice de calidad del agua (ICA).

MUEST	ICA	C. HUMANO	AGRICULTURA	PESCA	INDUSTRIA	RECREACIÓN
1	93	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE
3	54	CONTAMINADA	CONTAMINACIÓN LEVE	CONTAMINACIÓN LEVE	CONTAMINACIÓN LEVE	CALIDAD ACEPTABLE
4	59	CONTAMINADA	CONTAMINACIÓN LEVE	CONTAMINACIÓN LEVE	CONTAMINACIÓN LEVE	CALIDAD ACEPTABLE
5	100	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE
6	54	CONTAMINADA	CONTAMINACIÓN LEVE	CONTAMINACIÓN LEVE	CONTAMINACIÓN LEVE	CALIDAD ACEPTABLE
17	99	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE
9	52	CONTAMINADA	CONTAMINACIÓN LEVE	CONTAMINACIÓN LEVE	CONTAMINACIÓN LEVE	CALIDAD ACEPTABLE
10	56	CONTAMINADA	CONTAMINACIÓN LEVE	CONTAMINACIÓN LEVE	CONTAMINACIÓN LEVE	CALIDAD ACEPTABLE
11	100	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE
12	50	CONTAMINADA	CONTAMINACIÓN LEVE	CONTAMINACIÓN LEVE	CONTAMINACIÓN LEVE	CALIDAD ACEPTABLE
13	91	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE	CALIDAD EXCELENTE
14	58	CONTAMINADA	CONTAMINACIÓN LEVE	CONTAMINACIÓN LEVE	CONTAMINACIÓN LEVE	CALIDAD ACEPTABLE
15	54	CONTAMINADA	CONTAMINACIÓN LEVE	CONTAMINACIÓN LEVE	CONTAMINACIÓN LEVE	CALIDAD ACEPTABLE
16	50	CONTAMINADA	CONTAMINACIÓN LEVE	CONTAMINACIÓN LEVE	CONTAMINACIÓN LEVE	CALIDAD ACEPTABLE

El uso y acceso al agua de calidad es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades relacionadas con el agua, así como para mantener el equilibrio en los ecosistemas. Se recomienda establecer y mantener actualizados los límites permisibles para estudios de calidad de agua, en los beneficios de café, en cuanto a sus características físicas, químicas, microbiológicas, y radiactivas, con el fin de garantizar la calidad del agua en los sistemas socioecológicos.

REFERENCIAS

- Ashenafi Hailemariam, F., Velmurugan, P., & Selvaraj, S. K. (2021). Treatment of wastewater from coffee (coffea arabica) industries using mixed culture Pseudomonas florescence and Escherichia coli bacteria. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7396-7401. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1124>
- Bastian, F., Hutabarat, O. S., Dirpan, A., Nainu, F., Harapan, H., Emran, T. B., & Simal-Gandara, J. (2021). From Plantation to Cup: Changes in Bioactive Compounds during Coffee Processing. *Foods*, 10(11), 2827. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/foods10112827>
- Bisekwa, E., Njogu, P.M. and Kufa-Obso, T. (2020) Effluent Quality of Wet Process Coffee Processing Factories in Coffee Growing Ecological Zones in Burundi. *International Journal of Water and Wastewater Treatment*, 6, 1-7. <https://sciforschenonline.org/journals/water-and-waste/IJWWT176.php>
- Chidiac, S., El Najjar, P., Ouaini, N. et al. A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and perspectives. *Rev Environ Sci Biotechnol* 22, 349–395 (2023). <https://doi.org/10.1007/s1157-023-09650-7>
- Dinius's Second Index, S.H., 1987. Design of an index of water quality. *Water Resources Bulletin* 23 (5), 833e843.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2022. NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0
- Fernández-Cortés, Yessica, Sotto-Rodríguez, Karla Daniela, & Vargas-Marín, Luis Alberto. (2020). Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados. *Producción + Limpia*, 15(1), 93-110. Epub November 20, 2020. <https://doi.org/10.22507/pml.v15n1a7>
- Gómez-Anaya, José Antonio, Novelo-Gutiérrez, Rodolfo, & Astudillo-Aldana, Manuel Ricardo. (2017). Efecto de las descargas domésticas y de beneficio de café sobre la calidad del agua y la diversidad de larvas de Odonata (Insecta) en un arroyo de bosque mesófilo de montaña en Veracruz, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 88(2), 372-380. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.004>
- Guaranguay, A., & Orozco, D. (2019). *Evaluación de la eficiencia de remoción de DBO, DQO y SST en aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café a través de una columna de adsorción con borra de café*. Tesis de Licenciatura. Cooperación Universitaria Autónoma del Cauca. Popayán, Cauca, Colombia. Recuperado el 16 de julio de 2023 de <https://repositorio.uniautonomo.edu.co/bitstream/handle/123456789/321/T%20IA-M%20080%202019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Jaulis Cancho, J. C., Juscamaita Morales, J. G., Villanueva Santos, E., Gutiérrez Collao, J. E., & Dilas-Jiménez, J. O. (2022). Limpieza del agua miel proveniente del beneficiado húmedo del café mediante polímeros naturales orgánicos. *Alpha Centauri*, 3(3), 02–10. <https://doi.org/10.47422/ac.v3i3.84>
- Muchane, M. N., Sileshi, G. W., Gripenberg, S., Jonsson, M., Pumariño, L., & Barrios, E. (2020). Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295, 106899. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106899>
- Navarro, C. I. & Large, P. J. (2010). *Evaluación de los efectos de las aguas mieles generadas por actividades cafeteras sobre la calidad físico-química del agua de la microcuenca la Eugenia sector San Pedro, Sierra Nevada de Santa Marta. Magdalena - Colombia*. Tesis de Licenciatura. Universidad del Magdalena. Santa Marta, Colombia. Recuperado el 19 de noviembre de 2023, de <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://core.ac.uk/download/pdf/270126394.pdf>
- Rugama Espinoza, M. I., & Save Monserrat, R. (2016). Efecto vertido aguas mieles en calidad físico-química del agua microcuenca Rio Cuspire Yalí, Nicaragua. *Revista Científica De FAREM-Esteli*, (7), 43–53. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i7.2631>
- Torres, P., Cruz, C. y Patiño, P. J. 2009. Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano: una revisión crítica. *Revista Ingenierías*. Universidad de Medellín, 8(15), 79-94.

- Torres, Y. (2018). *Desarrollos tecnológicos: proceso integral de café*. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. Fecha de consulta: 15 de julio de 2023 en <https://ciatej.mx/el-ciatej/comunicacion/Noticias/Desarrollos-tecnologicos--proceso-integral-de-cafe/76>
- van Noordwijk, M. (ed.). (2019). *Sustainable Development Through Trees on Farms: Agroforestry in its Fifth Decade*. World Agroforestry (ICRAF). Bogor, Indonesia. <https://apps.worldagroforestry.org/downloads/Publications/PDFS/BI9029.pdf>
- Woldesenbet, A. G., Woldeyes, B. y Chandravanshi, B. S. (2014). Characteristics of wet coffee processing waste and its environmental impact in Ethiopia. *International Journal of Research in Engineering and Science*, 2, 1–5. Recuperado el 16 de julio de 2023, de <https://ijres.org/papers/Volume%202/v2-i4/A0240105.pdf>