



Benemérita

Universidad Autónoma de Puebla

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

“EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE UN BENEFICIO DE CAFÉ EN XICOTEPEC, PUEBLA”

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Título de:

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Presenta:

BETZABE HERNÁNDEZ LORENZO

Directora de Tesis:

Dra. Gabriela Pérez Osorio

Codirectora de Tesis:

Dra. Fabiola Avelino Flores

Puebla, Pue. 2021

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que me han apoyado incondicionalmente a lo largo de mi carrera y de este proyecto de tesis.

A quienes se desvelaron conmigo y me alentaron a seguir adelante cuando ya no podía más.

A mis padres y hermanas por sus palabras de apoyo y motivación para no rendirme. Gracias por ser un ejemplo siempre.

A quienes estuvieron y ya no están aquí, pero han dejado parte de sus enseñanzas conmigo.

A mis profesores, a la doctora Gaby por aceptarme espero no haberle fallado, a la doctora Fabi, al maestro Ángel y al doctor Fernando, gracias por sus consejos, su guía y sus aportes a este trabajo.

Gracias a todos.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
INTRODUCCIÓN	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
JUSTIFICACIÓN	12
OBJETIVO GENERAL	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
HIPÓTESIS	13
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	14
Marco Teórico.....	15
El agua	15
El agua en el municipio de Xicotepec.....	17
Contaminación del agua.....	18
Contaminantes físicos.....	20
Contaminantes químicos.....	21
pH	21
Sustancias consumidoras de oxígeno disuelto	22
Contaminantes inorgánicos.....	22
Contaminantes orgánicos	23
Contaminantes biológicos	23
El agua y los beneficios de café	25
Índice de calidad del agua (ICA).....	29

Tratamientos del agua residual	32
Tren de tratamiento convencional.....	33
Tratamientos para las aguas residuales del beneficio	34
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....	37
Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua.....	38
a) Selección de sitios de muestreo	38
b) Análisis físicos	40
c) Análisis químicos	41
d) Análisis microbiológicos	43
Análisis físicos	44
Determinación de temperatura, sales y SDT mediante el método electrométrico.	44
Determinación de sólidos sedimentables.....	44
Determinación de sólidos y sales disueltas.....	45
Determinación de color y turbidez.....	47
Análisis químicos.....	48
Determinación de pH y conductividad eléctrica mediante el método electrométrico.	48
Determinación de dureza	48
Determinación de cloruros	49
Determinación de acidez y alcalinidad.....	50
Determinación de la demanda química de oxígeno	51
Determinación de grasas y aceites	52
Determinación de nitrógeno	53
Determinación de fósforo	54

Análisis microbiológicos	55
CAPÍTULO 3. RESULTADOS	58
Caracterización física	59
Caracterización química	62
Caracterización microbiológica	65
Índice de calidad del agua	67
CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	69
Impacto ambiental	70
Indicadores de calidad del agua (CONAGUA).....	71
Propuesta de tratamiento	73
¿Qué es un humedal artificial?	73
Comparación de los humedales con otros sistemas de tratamiento	73
CONCLUSIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estados físicos del agua	16
Figura 2. Ubicación del municipio de Xicotepec.....	17
Figura 3. Patógenos y enfermedades de origen hídrico.....	24
Figura 4. De izquierda a derecha: 1. Cafeto o planta de café, 2. Café cereza, 3. Café pergamino	26
Figura 5. Instalaciones del beneficio de café	26
Figura 6. Vertido de las aguas mieles del beneficio de café en el arroyo Nopalutla	28
Figura 7. Pesos relativos para cada parámetro del ICA.....	29
Figura 8. Escala de clasificación del ICA-NSF.....	32
Figura 9. Tren de tratamiento de aguas residuales.....	34
Figura 10. Medición de sólidos disueltos totales (izquierda) y de sales (derecha)	44
Figura 11. Determinación de sólidos sedimentables en el agua antes y después del lavado de café.....	45
Figura 12. Determinación de sólidos y sales disueltos en el agua antes y después de lavado de café.....	46
Figura 13. Determinación de color en las muestras de entrada y lavado.....	47
Figura 14. Determinación de turbidez en las muestras de entrada y lavado.....	47
Figura 15. Determinación de pH (izquierda) y conductividad (derecha).....	48
Figura 16. Determinación de dureza	49
Figura 17. Determinación de cloruros	50
Figura 18. Determinación de acidez (izquierda) y alcalinidad (derecha).....	51
Figura 19. Resultados para DQO de las muestras de entrada y lavado	52
Figura 20. Determinación de grasas y aceites	53
Figura 21. Determinación de nitrógeno en muestras de agua de lavado de café .	54
Figura 22. Determinación de fósforo en muestras de agua de lavado de café	55
Figura 23. Tubos positivos para la determinación de coliformes totales y fecales	57
Figura 24. Parámetros físicos que rebasaron el LMP. A) Sólidos sedimentables, B) Turbidez, C) Color.....	61

Figura 25. Parámetros químicos que rebasaron el LMP. A) Dureza, B) Demanda Química de Oxígeno, C) Fosfatos..... 64

Figura 26. Parámetros microbiológicos. A) Coliformes totales, B) Coliformes fecales 66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sitios de muestreo del agua utilizada en el beneficio húmedo de café. .. 39

Tabla 2. Parámetros físicos determinados a las aguas muestreadas en los 6 puntos de estudio..... 59

Tabla 3. Parámetros químicos determinados a las aguas muestreadas en los 6 puntos de estudio..... 62

Tabla 4. Parámetros microbiológicos determinados a las aguas muestreadas en los 6 puntos de estudio..... 65

Tabla 5. Parámetros utilizados para el cálculo estimado del ICA..... 67

Tabla 6. Leyenda de calidad del agua en los 6 puntos de muestreo. 68

Tabla 7. Comparación de 3 sistemas de tratamiento de aguas mieles de lavado de café. 73

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Fórmula para calcular el ICA. 29

INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso natural más importante sobre la Tierra, es necesaria para llevar a cabo los procesos biológicos de los seres vivos y, además, el hombre la ocupa en diversas actividades diarias como la industria, el uso en los hogares y en la agricultura. La escasa disponibilidad y la distribución desigual de agua potable provoca serios problemas de salud en las poblaciones, además con el aumento de éstas es necesaria una mayor demanda de agua.

Otro problema que enfrentamos hoy en día es su uso desmedido por parte de las industrias en las cuales es utilizada en distintos procesos y posteriormente descargada en drenajes o en cuerpos de agua sin tener un tratamiento previo.

En el beneficio húmedo de café que se estudia en este trabajo el agua proveniente de un afluente cercano al beneficio es utilizada para el lavado de los granos y mientras estos continúan su proceso, las aguas residuales también llamadas aguas mieles producto del lavado de café son transportadas hacia el punto de descarga final donde son vertidas sin ningún tipo de tratamiento.

En el proceso de transformación de los granos de café por vía húmeda las aguas mieles producto del lavado se convierten en un contaminante ambiental significativo debido a la importante carga de materia orgánica y azúcares que contienen, los cuales producen una disminución del oxígeno disuelto en el cuerpo receptor y aportan color y malos olores al degradarse.

En este trabajo se pretende evaluar el impacto ambiental de las aguas mieles de un beneficio húmedo de café ubicado en el municipio de Xicotepec, Puebla mediante el análisis de las principales características fisicoquímicas y microbiológicas asociadas a la calidad del agua antes y después de ser utilizadas en el proceso de lavado para proponer un sistema de tratamiento de agua que minimice los impactos ambientales negativos generados por su descarga en el arroyo Nopalutla y para que estas aguas puedan ser utilizadas para otros fines una vez descargadas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cafeto es un árbol pequeño o arbusto perteneciente a la familia de las rubiáceas, que generalmente tiene una altura de entre 2 y 5 metros (Infocafé, s.f.). 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 llamadas "Beneficios de café".

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 seco (Navaz & Roy, 2016). 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 calidad muy superior. Sin embargo, su principal requerimiento es un abundante abastecimiento de agua (Molina & Villatoro, 2006).

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, y otros, 2005)

En el beneficio húmedo de café que se localiza entre los 20°15'39.46" de latitud norte y 97°56'51.69" de longitud oeste en el municipio de Xicotepec, Puebla, México, se procesan alrededor de 3 a 4 toneladas diarias de café cereza en los meses de septiembre a abril.

El agua para el lavado de café se toma del arroyo Nopalutla, el cual es 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 árboles que crecen en los invernaderos situados a las orillas y en su paso cerca del beneficio es transportado mediante una bomba al interior de este 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 tienen medido el gasto de agua que realizan al llevar a cabo 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 (Cárdenas & Ortiz, 2014), 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 (Zambrano e Isaza, 1994).

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 y al final de dicho proceso, por lo que las aguas mieles son descargadas sin tratamiento alguno al mismo arroyuelo, 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 (Vázquez, 2016), en Veracruz el panorama es muy similar, en la región centro las 90 industrias cafeteras registradas hasta el 2004 descargaban 171.63 mm³ de aguas residuales, de los cuales sólo trataban 24.51 mm³ (Ruelas, 2018).

Este trabajo de investigación surge a partir de la falta de un tratamiento para las aguas mieles del beneficio de café cuya descarga aporta color y materia orgánica, además ocasiona malos olores y modifica las características fisicoquímicas del cuerpo de agua receptor.

JUSTIFICACIÓN

En el cultivo del café, 80% del grano es al final un desecho en pulpa y aguas residuales (producto del beneficio del café), lo cual lo convierte en un cultivo altamente contaminante (Sánchez, Espindola, Henk, & Guisepe, s.f.).

En el beneficio húmedo de café que se estudia en este trabajo el agua es utilizada para el lavado de los granos con la finalidad de desprender el mucílago que los rodea para la obtención del café pergamino, producto que comercializa este beneficio. Una vez lavado el café, las aguas mieles son transportadas por un canal y vertidas en un arroyo cercano a las instalaciones sin ningún tipo de tratamiento. La descarga de aguas mieles del lavado de café sin un tratamiento previo representa un riesgo importante para el cuerpo de agua en donde son vertidas, puesto que el beneficio de 1 Kg de café produce una contaminación equivalente a la de 45.5 L de aguas residuales domésticas (Vázquez, 2016).

La importancia de este trabajo consiste en evaluar el impacto de las aguas residuales procedentes del beneficiado húmedo de café sobre la calidad del arroyo Nopalutla, debido a que la oxidación de la materia orgánica contenida en el agua residual se efectúa por medio de la microflora de bacterias que se alimentan de la materia consumiendo el oxígeno disuelto en el agua, lo que conlleva a serios problemas ambientales.

Con este trabajo se establecerán las bases para la implementación de un tren de tratamiento para las aguas mieles del lavado de café, basándonos en la caracterización física, química y microbiológica de dichas aguas y que además cumpla con la normatividad ambiental aplicable a fin de reducir el impacto ambiental que causa su descarga en el arroyo Nopalutla.

La alternativa propuesta como tratamiento para el agua residual del beneficio pretende disminuir la cantidad de contaminantes de las aguas de lavado de café para mitigar el impacto que causa su descarga en cuerpo de agua receptor.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el impacto ambiental de las aguas residuales de un beneficio húmedo de café en el municipio de Xicotepec, Puebla descargadas en el arroyo Nopalutla.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar y analizar las características físicas, químicas y microbiológicas de las aguas del arroyo Nopalutla antes y después de las descargas de aguas residuales del beneficio.
- Evaluar la calidad del agua y el impacto de las aguas residuales descargadas.
- Evaluar distintas opciones para el tratamiento de las aguas residuales del beneficio húmedo para reducir su impacto en el arroyo.

HIPÓTESIS

Las aguas mieles provenientes del beneficio húmedo de café 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.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

Marco Teórico

El agua

El agua es básicamente el líquido más importante que existe sobre la superficie terrestre, nada puede sustituirla y no se conoce ser vivo que prescindiera de ella. Químicamente pura está desprovista de olor, sabor y color, aunque en la naturaleza las sales minerales y otros compuestos presentes en los cuerpos de agua aportan en menor cantidad un sabor característico (Ambientum, s.f.).

Desde el punto de vista químico es un compuesto formado por la unión de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno unidos mediante enlaces covalentes. Su fórmula molecular es H_2O y los átomos de hidrógeno están separados entre sí formando un ángulo de 105° respecto al del oxígeno lo que le confiere su dipolaridad. Esta composición y estructura son responsables de las propiedades fisicoquímicas que la distinguen de otras sustancias y que hacen que sea considerada como el disolvente universal (AGUA.org.mx, s.f.).

Las moléculas de agua se unen unas con otras mediante enlaces llamados puentes de hidrógeno formando así enormes cadenas que constituyen el líquido vital que hace posible el desarrollo de la vida en nuestro planeta.

Toda la vida sobre la Tierra depende de la disponibilidad del agua, la cual tiene un promedio anual en el mundo de aproximadamente 1,386 millones de Km^3 , de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5%, es decir 35 millones de Km^3 , es agua dulce. (CONAGUA, 2011).

Podemos encontrar al agua en cualquiera de los tres estados de la materia: sólida en los glaciares, casquetes polares, congelada en las superficies de los lagos durante el invierno y en forma de nieve en la cima de los volcanes, líquida en los océanos donde es salada y como agua dulce en ríos, lagos y lagunas sobre la superficie terrestre, y en estado gaseoso en forma de niebla, vapor y en las nubes como lo muestra la Figura 1. A la presión atmosférica de 760 mm de mercurio, el

punto de congelación del agua es de 0°C y su punto de ebullición en 100°C. El agua alcanza su densidad máxima a una temperatura de 4°C y se expande al congelarse (Ambientum, s.f.).

El estado físico del agua depende de la temperatura y la presión atmosférica

ESTADOS FÍSICOS DEL AGUA

SÓLIDO	❄️ Punto de congelación a 0°C a nivel del mar
	El hielo es agua en estado sólido. Flota en el agua líquida debido al aire que queda atrapado entre las moléculas de agua al congelarse.
LÍQUIDO	🌊 Entre 0°C - 100°C a nivel del mar
	La atracción entre las moléculas de agua permite la formación de gotas; si no fuera por la gravedad de la tierra las gotas de agua tendrían una forma esférica.
GASEOSO	☁️ Punto de ebullición a 100°C a nivel del mar
	El vapor es agua en su estado gaseoso. Está conformado por moléculas de agua que se mueven de forma rápida, constante e independiente; por lo que se esparcen muy rápido en la atmósfera proporcionando humedad al ambiente.

Centro Virtual de Información del Agua, 2017

AGUA
org.mx

Figura 1. Estados físicos del agua

Fuente: AGUA.org.mx

A pesar de estar distribuida por todo el planeta, esta distribución no es de forma igualitaria para todos, puesto que somos más de 7,000 millones de personas las que habitamos el planeta, de las cuales aproximadamente el 11% de la población no tiene acceso a agua potable: 10 millones en los países desarrollados, 32 millones en Latinoamérica y 345 millones en África (RED OCAS, s.f.).

El agua virtual (AV) representa el cálculo de la cantidad total de agua que se requiere para obtener un producto, lo cual incluye el agua utilizada durante el cultivo, el crecimiento, procesamiento, fabricación, transporte y venta de los productos. Para cada alimento y producto agrícola o industrial se puede calcular el contenido de agua virtual y se dice que es virtual porque no está presente en los productos finales. (CONAGUA, El agua virtual y la huella hídrica, s.f.)

La huella hídrica (HH) es un indicador de toda el agua que utilizamos en nuestra vida diaria; para producir nuestra comida, en procesos industriales y generación de

energía, así como la que ensuciamos y contaminamos a través de esos mismos procesos (CONAGUA, El agua virtual y la huella hídrica, s.f.).

La huella hídrica para la producción de café es muy alta, puesto que el contenido de agua virtual para producir una taza de café de 125 mL es de 140 L de agua aproximadamente. Entre los estudios realizados para medir el agua virtual que movilizan algunos productos el café no tostado y no descafeinado ocupa el primer lugar aproximadamente con 80,000 millones de m³, esto equivale al 6.32% del volumen del intercambio de agua virtual en el mundo (Chapagain & Hoekstra, 2003).

El agua en el municipio de Xicotepec

El municipio de Xicotepec de Juárez se localiza en la parte Noroeste del estado de Puebla en la Sierra Madre Oriental entre los ríos San Marcos y Necaxa los cuales son a su vez los más importantes de la región. Sus colindancias son al Norte con Jalpan, al Sur con Juan Galindo y Zihuateutla, al Oeste con Zihuateutla y al Poniente con Tlacuilotepec (SECTUR, 2014).



*Figura 2. Ubicación del municipio de Xicotepec
Fuente: Unidad de Transparencia H. Ayuntamiento de Xicotepec de Juárez, s.f.)*

El municipio pertenece a la vertiente septentrional del estado, la cual está formada por cuencas parciales de ríos que desembocan en el Golfo de México y a la región hidrológica Tuxpan-Nautla.

Xicoteppec cuenta con numerosos escurrimientos y es beneficiado por los vientos alisios y las corrientes marinas provenientes del Golfo de México, cuyas precipitaciones caen desde las partes más bajas a las partes más altas. Debido a su gran cantidad de manantiales dispersos por el municipio se originan arroyos intermitentes, entre los más importantes destacan El Apatlauco, El Cilima, El Xolintla, El Nextlalpan, El Magdalena y el Tlaxcalantongo. La precipitación media anual es de 2,720 mm., con lluvias durante todo el año, mismas que se intensifican en los meses de junio a octubre. (Jiménez, 2012)

Debido a las condiciones hidrológicas con las que cuenta el municipio de Xicoteppec existen una gran cantidad de arroyos cuyo cauce es utilizado a su paso en actividades como la ganadería para dar de beber al ganado, en los invernaderos para regar las plantas y en los beneficios de café para el lavado del grano, tema de especial interés para este trabajo.

Contaminación del agua

Actualmente la contaminación del agua representa uno de los mayores retos para la sociedad, puesto que es un líquido de vital importancia en nuestro día a día. Cuando se habla de contaminación del agua se hace referencia a la introducción de agentes físicos, químicos y biológicos que alteran las características de esta provocando principalmente efectos en la salud del hombre y animales, aunque también tiene incidencia en plantas y suelos. (Agua.org.mx, s.f.).

Cuando el agua contaminada entra en contacto con otros cuerpos de agua puede provocar la contaminación de estos y a su vez de los ecosistemas de su alrededor, lo mismo ocurre cuando se infiltra en los suelos y llega hasta los mantos freáticos.

Las cuencas hidrológicas tienen un proceso de autodepuración cuando ingresan a ellas contaminantes como hojarasca, partículas o gases atmosféricos, en este proceso intervienen las corrientes y los ciclos biogeoquímicos reduciendo de esta forma el nivel de afectación de los cuerpos de agua. Sin embargo, las actividades humanas aportan una gran cantidad de contaminantes a los cuerpos de agua puesto que en la mayoría de los procesos se eliminan los desechos a través de esta, excediendo así la concentración de contaminantes lo que provoca que la capacidad natural de autodepuración de los cuerpos de agua no sea suficiente para revertir las afectaciones.

En las aguas contaminadas, algunos organismos logran sobrevivir en sitios con temperaturas, pH y condiciones iónicas que resultarían fatales para otros organismos (Brown, Eugene, Bursten, Murphy, & Woodward, 2014). Sin embargo, dependiendo el grado de contaminación que presente el cuerpo de agua puede provocar desde una intoxicación hasta la muerte a los seres vivos que la consuman.

En el procesamiento de un kilogramo de café cereza el agua utilizada produce una contaminación equivalente a la que genera una persona por día en excremento ((Sánchez, Espindola, Henk, & Guisepe, s.f.)

Otro factor que depende del grado de contaminación y del origen de los contaminantes es la recuperabilidad del cuerpo de agua, es decir si es o no recuperable.

Existen diferentes agentes que contaminan el agua y a grandes rasgos se pueden clasificar en contaminantes físicos, químicos y biológicos, los cuales se describen más a detalle a continuación.

Contaminantes físicos

La materia en suspensión que se compone de distintos tipos de sólidos como los flotantes, sedimentables y coloidales junto con el calor y la radioactividad son considerados los contaminantes físicos del agua.

Los sólidos suspendidos representan la fracción no filtrable y son aquellos que pueden retenerse en un filtro estándar de fibra de vidrio cuyo diámetro nominal sea $1.2 \mu\text{m}$ (Arce, Calderón, & Tomasini, s.f.), mientras tanto los que pasan a través del filtro representan la fracción filtrable a la que pertenecen los sólidos disueltos y coloidales.

El origen de los sólidos suspendidos es muy diverso, por ejemplo, la lluvia arrastra partículas de suelo desde las tierras de cultivo hasta los ríos y estos los transportan a lo largo de su cauce, además de considerar también que la mayor parte de actividades humanas desde las domésticas hasta las industriales aportan una importante cantidad de sólidos a los cuerpos de agua receptores.

El grado de incidencia que tienen los sólidos en la contaminación del agua independientemente de su tamaño y naturaleza es su interferencia con la penetración de la luz solar en los cuerpos de agua, conocida comúnmente como turbiedad.

El calor es otro de los contaminantes físicos del agua, se sabe que esta requiere de una mayor capacidad calorífica para elevar su temperatura 1°C respecto de otras sustancias es por ello por lo que es ampliamente utilizada en actividades industriales donde una parte del proceso requiere del enfriamiento de alguna sustancia además es utilizada en las plantas hidroeléctricas para la generación de energía eléctrica. El problema de contaminación se genera cuando el agua que fue utilizada en alguno de los procesos mencionados es descargada al cuerpo de agua más cercano, debido a que el aporte de calor induce un aumento de temperatura en el cuerpo receptor y se sabe que un aumento de 10°C duplica la actividad microbiana

provocando un déficit del oxígeno disuelto y por consiguiente la muerte de diversas especies acuáticas.

Por último, las aguas subterráneas que han estado en contacto con yacimientos de materiales radioactivos pueden contener niveles bajos de radioactividad, pero estos también provienen de actividades como la minería tal es el caso del uranio y el torio, las centrales nucleares y los residuos generados como parte de la investigación y la medicina.

Los efectos de la radioactividad en la vida acuática y en la salud humana pueden manifestarse como una alteración de la tasa normal de mutación genética y también puede ser una causal de cáncer (Arce, Calderón, & Tomasini, s.f.).

Contaminantes químicos

pH

El potencial de Hidrógeno o pH como lo definió Sorensen es el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno en el agua $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$. Cuando proliferan los iones $[\text{H}^+]$ el pH del agua se dice que es ácido y su valor será menor a 7, pero mayor o igual que 0. Por otra parte, cuando el ion $[\text{OH}^-]$ es el que abunda, entonces se dice que el agua es básica o alcalina y el valor de pH será mayor a 7 pero menor o igual a 14 (Arce, Calderón, & Tomasini, s.f.).

La importancia del pH del agua radica en los organismos acuáticos que en ella se desarrollan, puesto que requieren un margen definido de valores de pH que van del 6.5-8.5, los cambios en el pH del agua pueden modificar el nivel de toxicidad de esta, por ejemplo, una disminución de pH podría derivar en un aumento en la cantidad de mercurio soluble.

El pH es uno de los parámetros que intervienen en la determinación del origen del agua, mientras las aguas residuales provenientes principalmente de industrias

metalúrgicas y químicas presentan un pH ácido, las aguas residuales provenientes de la industria alimenticia y papelera poseen rangos de pH alcalinos.

Sustancias consumidoras de oxígeno disuelto

El oxígeno presente en el agua es necesario para el desarrollo de peces y demás organismos acuáticos, por lo que la cantidad de oxígeno disuelto presente en un cuerpo de agua es a su vez un indicador de la calidad del agua. El agua que está completamente saturada con aire a 1 atm y 20°C contiene aproximadamente 9 ppm de O₂ (Brown, Eugene, Bursten, Murphy, & Woodward, 2014).

El exceso de materia orgánica biodegradable en un cuerpo de agua es perjudicial debido a que el oxígeno presente es consumido por las bacterias anaerobias para transformar esta materia en compuestos más simples. Las fuentes de suministro de los desechos que demandan oxígeno son las aguas negras, los desechos de las plantas industriales procesadoras de alimentos y las fábricas de papel, puesto que el proceso de beneficiado húmedo de café aporta una carga importante de materia orgánica al agua en donde son descargados los residuos, puede considerarse como una de las fuentes de suministro de sustancias consumidoras de oxígeno.

Además de la materia orgánica, compuestos como el carbono, azufre, fósforo y nitrógeno también son materiales biodegradables que al oxidarse provocan una reducción del oxígeno disuelto ocasionando la muerte de las bacterias anaerobias. Con la muerte de estas colonias de bacterias y durante el proceso de descomposición se producen gases como el metano (CH₄) y el ácido sulfhídrico (H₂S) los cuales contribuyen a dar un mal olor a los efluentes de aguas residuales.

Contaminantes inorgánicos

Dentro de los contaminantes inorgánicos se consideran aquellos que aportan nutrientes, detergentes y metales pesados al agua. En el caso de los metales pesados los de mayor interés ambiental son el Cadmio (Cd), Mercurio (Hg), Plomo (Pb) y Cromo (Cr) debido a que al introducirse en los seres vivos les pueden

ocasionar desde intoxicaciones, trastornos graves y hasta la muerte. Los efectos dependerán del grado de toxicidad de la sustancia y la dosis consumida, aunque la mayoría de las sustancias tóxicas son bioacumulables, es decir, se absorben fácilmente en los tejidos grasos de los seres vivos y no pueden ser eliminadas. Además, se incorporan en la cadena alimenticia de tal forma que los animales que ocupan la cumbre de la pirámide alimenticia acumulan dichas sustancias en cantidad suficiente para ser dañinas (Arce, Calderón, & Tomasini, s.f.).

Contaminantes orgánicos

Los compuestos orgánicos se pueden clasificar a grandes rasgos en naturales y sintéticos. Los de origen natural producen mal olor y sabor, son producto de la actividad natural de plantas y animales como las biotoxinas y de yacimientos minerales como los metales pesados y no metales.

Mientras tanto, los sintéticos son todos aquellos derivados de las actividades antropogénicas como residuos de pesticidas y fertilizantes provenientes de actividades agrícolas y ganaderas, compuestos orgánicos volátiles (COP), grasas y aceites, el petróleo y sus derivados y los provenientes de actividades industriales como los disolventes.

Al ser liberados en los cuerpos de agua de forma deliberada o accidental persisten en el ambiente y muchos de ellos son bioacumulables, lo que provoca que logren transportarse a través de largas distancias pasando de un organismo a otro y muchas veces tienen efectos carcinogénicos sobre estos.

Contaminantes biológicos

La contaminación microbiana de los cuerpos receptores es de gran preocupación por sus repercusiones sobre la salud del hombre, ya que muchos de los microorganismos causantes de enfermedades son ampliamente distribuidos por las aguas (Ramos, Sepúlveda, & Villalobos, 2003).

Entre los grupos de microorganismos patógenos que podemos encontrar en el agua tenemos bacterias, protistas, helmintos y virus.

Los virus se encuentran en cantidades pequeñas en el agua, sin embargo, hay un género que destaca porque se encuentran más comúnmente y se desarrollan en el aparato gastrointestinal de su huésped: los enterovirus.

Cuando existe contaminación fecal en el agua proveniente de excretas humanas y animales, los indicadores son los coliformes fecales, específicamente la bacteria *Escherichia coli* y si bien no es la que mayores daños causa a la salud, su presencia indica el ingreso de materia fecal en el agua y alerta sobre otros microorganismos más dañinos como *Salmonella* y *Shigella* (Arce, Calderón, & Tomasini, s.f.).

Algunos protozoarios parásitos se han aislado de aguas residuales, entre los más importantes figuran la *Entamoeba histolytica* que causa la Disenteria amibiana, *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium*, ambos causan infecciones gastrointestinales severas como lo muestra la Figura 3.

Patógenos	Enfermedad causada
Bacterias	
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenteritis
<i>Escherichia coli</i>	Gastroenteritis
<i>Legionella pneumophila</i>	Enfermedades respiratorias agudas
<i>Salmonella</i>	Salmonelosis, tifoidea, paratifoidea
<i>Shigella</i>	Disenteria bacilar
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Gastroenteritis
Protozoarios	
<i>Cryptosporidium</i>	Diarrea
<i>Entamoeba histolytica</i>	Disenteria amibiana
<i>Giardia lamblia</i>	Diarrea
<i>Naegleria fowleri</i>	Meningitis cefálica
Enterovirus	
Adenovirus	Enfermedades respiratorias, infecciones en los ojos, gastroenteritis
Astrovirus	Gastroenteritis
Calicivirus	Gastroenteritis
Coxsackievirus A	Meningitis, enfermedades respiratorias, miocarditis
Echovirus	Meningitis, diarrea, fiebre, enfermedades respiratorias
Hepatitis A viral	Infecciones hepáticas
Norwalk virus	Diarrea, vómito y fiebre
Poliovirus	Meningitis, parálisis
Rotavirus	Diarrea, vómitos

Figura 3. Patógenos y enfermedades de origen hídrico

Fuente: Serie autodidáctica de medición de la calidad del agua. Coliformes

Los huevos de helminto son parásitos que se transmiten a través del agua y son liberados a través de las heces de personas infectadas. En sus formas de huevecillo y larva presentan resistencia a ambientes severos, mientras que los gusanos adultos viven en el intestino de las personas.

La contaminación microbiológica del agua representa un problema severo a nivel mundial debido a las enfermedades que estos organismos causan en las personas, afectando principalmente a niños y ancianos, aunque también inciden factores importantes como la edad, sexo y condiciones de vida.

Estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) indican que en el mundo anualmente mueren aproximadamente 1.5 millones de niños por enfermedades diarreicas, de un total de 2.5 mil millones de casos infantiles anuales. Estas muertes infantiles ocurren en su mayoría en países en vías de desarrollo, lo que representa una carga significativa para escasos recursos disponibles para salud pública (CONAGUA, 2011).

El agua y los beneficios de café

El cultivo de café llegó a México a finales del siglo XVIII, procedente de Europa, a su llegada se adoptó y adaptó en las zonas tropicales del país en donde el clima es mayormente idóneo para la producción de éste. Los estados en donde se produce con éxito son Chiapas, Puebla, Oaxaca, Guerrero, Veracruz e Hidalgo. Desde el punto de vista biológico las áreas donde abunda el cultivo de cafeto se distinguen por ser de regiones ricas en flora y fauna. (Fideicomiso de Riesgo Compartido, 2017).

Las instalaciones en donde se lleva a cabo el proceso de transformación del fruto de café cereza a café pergamino (grano de café seco y cubierto por una cáscara denominada cascarilla) se denominan beneficios y es aquí en donde se lleva a cabo el recibo, despulpado, lavado y secado de los granos.



Figura 4. De izquierda a derecha: 1. Cafeto o planta de café, 2. Café cereza, 3. Café pergamino
Fuente: Autoría propia

Debido a la alta demanda de agua durante el procesamiento húmedo, los beneficios de café a menudo se construyen cerca de fuentes de agua permanentes, principalmente ríos y arroyos, lo que hace que estos cuerpos de agua sean más propensos a la contaminación por las aguas residuales del café (Endris, Kebede, W/Senbet, Legesse, & Kassahun, 2020). El agua en el beneficio de café tiene tres funciones principales:

- Transportar el grano en el proceso húmedo
- Clasificar los granos por calidad (granos livianos que flotan)
- Remover el mucilago del grano para limpiar el café



Figura 5. Instalaciones del beneficio de café
Fuente: Autoría propia

El beneficio del caso de estudio es un beneficio húmedo cuya característica principal es el uso del agua para la transformación del grano.

A continuación, se describen las etapas principales del beneficiado húmedo (Cenicafé, 2005):

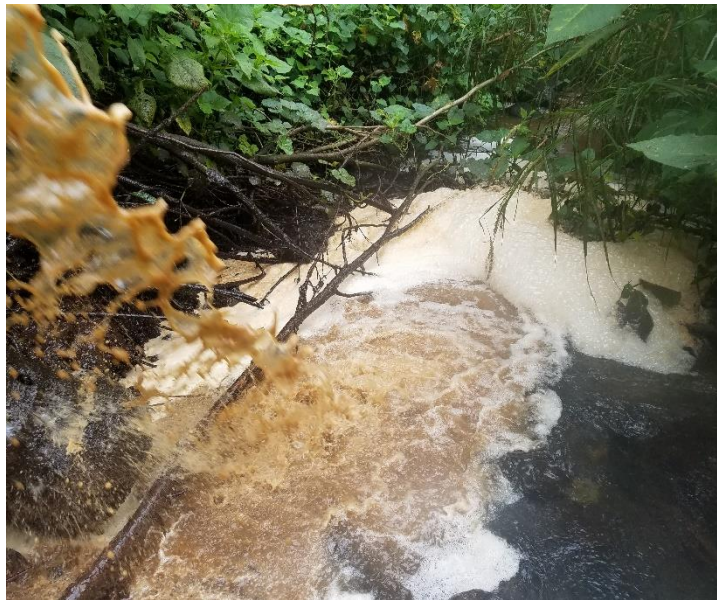
1. Recibo del café cereza. El café cereza se recibe en la tolva de la despulpadora. En fincas de mayor producción pueden usarse tolvas secas, donde se recibe el café y se transporta por gravedad hasta la despulpadora. No debe usarse agua en esta etapa.
2. Despulpado. Consiste en retirar la pulpa de la cereza por medio de presión que ejerce la camisa de la despulpadora y debe iniciarse inmediatamente después de que se cosechan los frutos. El café maduro contiene mucílago, que permite el despulpado con solo presionar la cereza.
3. Remoción del mucílago. El mucílago es la baba que recubre el grano despulpado. El mucílago debe removerse por medio del proceso de fermentación natural o mecánicamente. El proceso de fermentación se realiza en los tanques donde se recibe el grano despulpado.
4. Lavado. El lavado permite retirar totalmente el mucílago fermentado del grano. Use agua limpia para evitar defectos como el grano manchado, sucio, el sabor a fermento y la contaminación.

Una vez lavados los granos, se transportan a los hornos en donde se secan los granos para su posterior almacenamiento. En el beneficio de este caso, el grano seco se almacena y vende como café pergamino.

En estos procesos se generan dos subproductos: la pulpa del café y las aguas residuales (llamadas aguas mieles). Esta agua residual tiene un alto contenido de materia orgánica y acidez que son nocivas para la flora y la fauna, pero principalmente pueden llegar a contaminar fuentes de agua destinadas al consumo humano. La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es un parámetro que indica la cantidad de materia orgánica presente en una muestra de agua. Para las aguas

residuales de café, las concentraciones máximas del DQO se encuentran entre los 18,000 y 55,000 miligramos por litro, lo cual son valores muy altos y contaminantes (Sánchez, Espindola, Henk, & Guisepe, s.f.).

Además de valores altos de DQO las aguas residuales de los beneficios de café presentan un color café y olor dulce a miel cuando el agua del proceso es reciente, mismos que se van modificando con el paso de los días hasta llegar a ser desagradables para quienes los perciben.



*Figura 6. Vertido de las aguas mieles del beneficio de café en el arroyo Nopalutla
Fuente: Autoría propia*

El vertido desmedido y sin tratamiento de las aguas mieles procedentes del beneficiado de café hacia los cuerpos de agua genera acidificación del medio debido a que sus valores de pH varían de 4 a 4.5 lo que se traduce en la muerte de muchas especies acuáticas debido al nivel de acidez, al mismo tiempo la gran carga de materia orgánica conlleva a la proliferación de especies como lirios y algas, los cuales crecen en exceso provocando la mayoría de las veces la eutrofización de los cuerpos a donde son vertidas (Navaz & Roy, 2016).

Índice de calidad del agua (ICA)

Debido al aumento de los niveles de contaminación en los cuerpos de agua y a la necesidad de cuantificar y evaluar su calidad mediante un marco de referencia unificado, se agruparon los parámetros más representativos y se desarrolló a principios de los años setenta un sistema estimativo de calidad del agua para expresar la relación entre la existencia de varios contaminantes en el agua y el grado de impacto en los diferentes usos de esta. Este sistema se denominó Índice de Calidad del Agua (ICA) y se define como el grado de contaminación existente en el agua a la fecha de un muestreo, expresado como un porcentaje de agua pura (SEMARNAT, 2019).

Para realizar un cálculo estimado de la calidad del agua antes y después de ser utilizada en el beneficio de café de este trabajo se utilizará el Water Quality Index (WQI) desarrollado por la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF) de EE. UU. (SNET, s.f.). Para calcular el ICA se utilizará la ecuación 1:

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

*Ecuación 1. Fórmula para calcular el ICA.
Fuente: CONAGUA, 1999*

Donde el subíndice *i* identifica a cada parámetro presentado anteriormente.

La Figura 7 muestra los parámetros y pesos relativos (*W_i*) que serán utilizados para el cálculo del ICA.

i	Sub_i	w_i
1	Coliformes Fecales	0.15
2	pH	0.12
3	DBO ₅	0.10
4	Nitratos	0.10
5	Fosfatos	0.10
6	Temperatura	0.10
7	Turbidez	0.08
8	Sólidos disueltos Totales	0.08
9	Oxígeno Disuelto	0.17

*Figura 7. Pesos relativos para cada parámetro del ICA
Fuente: SNET, s.f.*

El ICA propuesto por la NSF está constituido por ocho variables fisicoquímicas: oxígeno disuelto, pH, DBO₅, temperatura, fósforo total, nitratos, turbidez y sólidos totales y un elemento biótico: los coliformes fecales (González, Caicedo, & Aguirre, 2013).

Para determinar el WQI, se miden los siguientes nueve parámetros de calidad del agua (Pathfinderscience, 2006):

- Demanda bioquímica de oxígeno: La DBO es una medida de la cantidad de alimento para las bacterias que se encuentra en el agua. Las bacterias utilizan materia orgánica en su respiración y eliminan el oxígeno del agua. La prueba de DBO proporciona una idea aproximada de la cantidad de residuos biodegradables presentes en el agua.
- Oxígeno disuelto: La prueba de oxígeno disuelto mide la cantidad de oxígeno vital que se disuelve en el agua. Este es el oxígeno que está disponible para peces, invertebrados y todos los demás animales que viven en el agua. Los bajos niveles de oxígeno disuelto en el agua son un signo de posible contaminación.
- Coliformes fecales: Los coliformes fecales son bacterias que se encuentran en los desechos humanos y animales y representan la contaminación microbiológica de los cuerpos de agua.
- Nitratos: Los nitratos son una medida de la forma oxidada de nitrógeno y son un macronutriente esencial en ambientes acuáticos. Los nitratos pueden ser dañinos para los humanos, porque nuestros intestinos pueden descomponer los nitratos en nitritos, lo que afecta la capacidad de los glóbulos rojos para transportar oxígeno. Los nitritos también pueden causar enfermedades graves en los peces.
- pH: El nivel de pH es una medida del contenido de ácido del agua. La mayoría de las formas de vida acuática tienden a ser muy sensibles al pH. El agua

que contiene una gran cantidad de contaminación orgánica normalmente tenderá a ser algo ácida. El agua con un pH de 7 se considera neutral. Si el pH es inferior a 7, se clasifica como ácido, mientras que se dice que el agua con un pH superior a 7 es alcalina.

- Cambio de temperatura: La temperatura del agua de un río es muy importante, ya que muchas de las características físicas, biológicas y químicas de un río se ven directamente afectadas por la temperatura. La mayoría de la vida animal y vegetal transmitida por el agua sobrevive dentro de un cierto rango de temperaturas del agua, y pocos de ellos pueden tolerar cambios extremos en este parámetro.
- Sólidos Disueltos Totales: Esta es una medida de los materiales sólidos disueltos en el agua del río. Esto incluye sales, algunos materiales orgánicos y una amplia gama de otras cosas, desde nutrientes hasta materiales tóxicos. Un nivel constante de minerales en el agua es necesario para la vida acuática. Las concentraciones de sólidos disueltos totales que son demasiado altas o bajas pueden limitar el crecimiento y conducir a la muerte de muchas formas de vida acuática.
- Fosfato total: Los fosfatos son compuestos químicos hechos de los elementos fósforo y oxígeno; Son necesarios para el crecimiento de plantas y animales. Los fosfatos pueden estar presentes en el agua en muchas formas, por lo que el fosfato total proporciona una estimación de la cantidad total de fosfato potencialmente disponible en un suministro de agua dado.
- Turbidez: La turbidez es una medida de la dispersión de la luz en una columna de agua debido a la materia suspendida. Cuanto mayor es la turbidez, más turbia aparece el agua. Si el agua se vuelve demasiado turbia, pierde la capacidad de soportar una amplia variedad de plantas y otros organismos acuáticos.

El resultado final será interpretado de acuerdo con la siguiente escala de clasificación en el cual un agua con un ICA cercano a 100 es de excelente calidad

y una con un ICA cercano a 0 es de una muy mala calidad, además cada rango se representa con un color.

<i>Rango</i>	<i>Escala de color</i>
Excelente: 91-100	AZUL
Buena: 71-90	VERDE
Media: 51-70	AMARILLO
Mala: 26-50	NARANJA
Muy Mala: 0-25	ROJO

Figura 8. Escala de clasificación del ICA-NSF

Fuente: Fernández y Solano, 2005

Tratamientos del agua residual

Cuando utilizamos el agua transformamos sus características físicas, químicas y biológicas y al desecharla se convierte en agua residual, la cual vertimos al drenaje para ser descargada posteriormente en algún cuerpo receptor.

Una vez en el sitio de descarga el agua residual interactúa con la del cuerpo receptor llevándose a cabo fenómenos físicos cuando comienza a diluirse, mezclarse y sedimentarse, químicos entre ellos reacciones químicas de difusión y microbiológicos llevados a cabo por las bacterias aerobias y anaerobias para la degradación de la materia orgánica. A este fenómeno se le conoce como autopurificación del cuerpo de agua.

Cuando se rebasa el límite de la capacidad de autopurificación de dichos cuerpos y ya no logran recuperar su estado original, el cuerpo de agua se contamina, sin embargo, como alternativa de solución para este tipo de problemas se ha diseñado una serie de operaciones y procesos que aceleren el proceso natural, los cuales reciben el nombre de "Tratamiento de aguas residuales".

No toda el agua residual que es descargada a los cuerpos receptores es tratada, en los países desarrollados el 70% de las aguas recibe un tratamiento mientras que en

países con ingresos medios el 35% es tratada y en países pobres únicamente el 8% del agua residual recibe un tratamiento (RED OCAS, s.f.)

La necesidad de proponer alternativas eficientes de sistemas de tratamientos de aguas radica no solo en los beneficios ambientales, sino que también repercute directamente en la salud de las personas puesto que un 80% de las enfermedades son causadas por agua contaminada y anualmente se reportan 3.4 millones de muertes al año relacionadas con la contaminación del agua (RED OCAS, s.f.).

Tren de tratamiento convencional

Los trenes de tratamiento de aguas residuales son diseñados con base en las características, volumen y usos posteriores del agua que se desea tratar. En el pretratamiento se retiran objetos como basura y hojarasca del agua mediante rejillas, el tratamiento primario remueve los sólidos del agua a través de procesos fisicoquímicos, los sólidos son removidos en sedimentadores o tanques de sedimentación. El tratamiento secundario también conocido como biológico reduce la DBO_5 y elimina la materia orgánica biodegradable mediante lagunas de oxidación, lodos activados, contactores biológicos rotatorios, entre otros y finalmente el tratamiento terciario involucra procesos de desinfección del agua para su reuso o descarga a través de la cloración, radiación UV u ozonificación. Cuando el agua se reutilizará en otro proceso el tren de tratamiento convencional no termina en el tratamiento terciario puesto que se llevan a cabo tratamientos avanzados o específicos. (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013)

Los componentes individuales de tratamiento se clasifican en operaciones físicas unitarias, procesos químicos o biológicos unitarios. Estas operaciones y procesos unitarios se combinan en los sistemas de depuración de aguas residuales, dando lugar a un tren de tratamiento, como se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Tren de tratamiento de aguas residuales

Fuente: ALIANZAPORELAGUA, s.f.

Tratamientos para las aguas residuales del beneficio

Como ya se ha mencionado después del lavado de café, las aguas residuales denominadas aguas mieles procedentes de esta operación se convierten en una fuente importante de contaminantes para los cuerpos de agua en donde son descargadas por lo que es necesario darles un tratamiento no sólo para reducir la carga contaminante sino para que además puedan ser utilizadas para el riego de los cultivos o inclusive para volver a utilizarse en el proceso de lavado.

Dentro del tratamiento para las aguas mieles del café se contemplan tres partes principales (Navaz & Roy, 2016):

Tratamiento primario en él se eliminan los sólidos según el tamaño de partícula ya sea mediante un filtro mecánico o un sistema de tuberías para las partículas grandes o mediante tanques sedimentadores y lagunas de lodos para las pequeñas.

El tratamiento secundario se encarga de reestablecer las propiedades del agua para reducir los contaminantes. Consta de tres fases:

1. Tanque de homogeneización: El agua es conducida al tanque de homogeneización, donde las bacterias degradan la materia orgánica en suspensión.
2. Dos pilas de floculación-sedimentación colocadas en serie: El agua pasa a las pilas de floculación para recuperar los lodos y la separación del agua clarificada. El agua deberá estar de 12 a 24 horas en cada una.
3. Dos lagunas de oxidación, una para los lodos y otra para el agua. En esta fase se requieren dos lagunas de oxidación. Una de ellas albergará los lodos y la otra el agua clarificada. Los lodos pueden utilizarse como abono orgánico solos o combinándolos con la pulpa ya compostada.

Una vez tratada el agua mediante los procesos primario y secundario, el agua es transportada hacia un biofiltro, cuya función es similar a la de los humedales artificiales, puesto que se eliminan los contaminantes mediante procesos naturales como la sedimentación, filtración y biodegradación de la materia orgánica.

Existe distintos tipos de tratamientos para las aguas residuales del lavado de café como los biodigestores tubulares, reactores de cúpula, humedales por biofiltración, lagunas anaerobias entre otros, sin embargo, el sistema de tratamiento se debe adaptar a las características del agua residual del proceso de lavado (Sánchez, Espindola, Henk, & Guiseppe, s.f.).

Debido a la falta de normas que regulen las descargas de aguas mieles de los beneficios de café y la desinformación que existe respecto a su impacto en el ambiente, la mayoría de los beneficios húmedos de la región no cuentan con sistemas de tratamiento para sus aguas residuales, por lo que es necesario proponer alternativas para su tratamiento que sean eficaces y viables económicamente con la finalidad de reducir la carga contaminante y que de esta forma puedan ser utilizadas nuevamente. Además, durante el lavado del café en los tanques de fermentación, el uso indiscriminado del agua conduce a obtener grandes volúmenes de aguas residuales lo que dificulta su tratamiento y lo hace más costoso

(Zambrano, 1992). A continuación, se presentan algunos tratamientos para las aguas mieles del café en distintos lugares:

En Cuba se ha evaluado la biodegradabilidad anaerobia de las aguas residuales producidas durante el despulpe y el lavado de café en la despulpadora “Madrugón”. Los ensayos de biodegradabilidad se realizaron utilizando dos fuentes de inóculo: el estiércol vacuno y los lodos de la laguna de estabilización, siendo estos últimos los más efectivos para lograr la biodegradabilidad por digestión anaerobia cuando son empleados como inóculos (Rodríguez, Pérez, & Fernández, 2000).

En Colombia se diseñó un sistema de tratamiento para las aguas residuales del proceso de desmucilaginación del café con extractos vegetales en la finca “La Pedregosa” municipio de Anolaima, Cundinamarca. El mejor extracto vegetal que actúa como floculante fue la yuca, debido a que demostró mejores resultados en la reducción de la turbiedad, pH, DQO, DBO₅, acidez, cloruros, dureza total y dureza cálcica (Aguirre, 2015).

En una parcela del Ejido Alpujarras, Chiapas, se evaluó la eficiencia de Humedales Artificiales (HA) aplicados al tratamiento de aguas residuales del beneficiado del café. La eficiencia de remoción de materia orgánica de los HA utilizados para tratar aguas residuales de café de pequeños productores, fue alta (89.99 % para DQO y 81.70 % para DBO₅), tomando en cuenta la alta concentración inicial. Además, la remoción de nutrientes como fósforo y nitrógeno, para los tiempos de retención hidráulica evaluados, fue superior al 90% (Moreno, 2012).

Estudios previos demuestran que se ha realizado muy poco trabajo para analizar varios aspectos del procesamiento de café y sobre el impacto de dichos efluentes en el medio ambiente y la salud humana. Por tanto, existe la necesidad de desarrollar tecnología económicamente viable y ecológica para el manejo de este tipo de aguas residuales (Haddis & Rani Devi, 2008).

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua.

a) Selección 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 cómo cambia la calidad del agua se designaron 6 puntos de muestreo, los primeros tres sitios de muestreo están identificados en la Figura 10 y corresponden al agua antes de que el beneficio de café comenzara a trabajar.



Figura 10. Sitios de muestreo del agua antes de entrar al proceso.

Fuente: Google Earth

Una vez que el beneficio de café comenzó a operar se fijaron los otros tres puntos de muestreo los cuales corresponden al agua de lavado de café cuando está siendo separada de los granos, antes de ser descargada y finalmente cuando se descarga al arroyo Nopalutla. Los puntos están marcados en el Layout de la Figura 11.

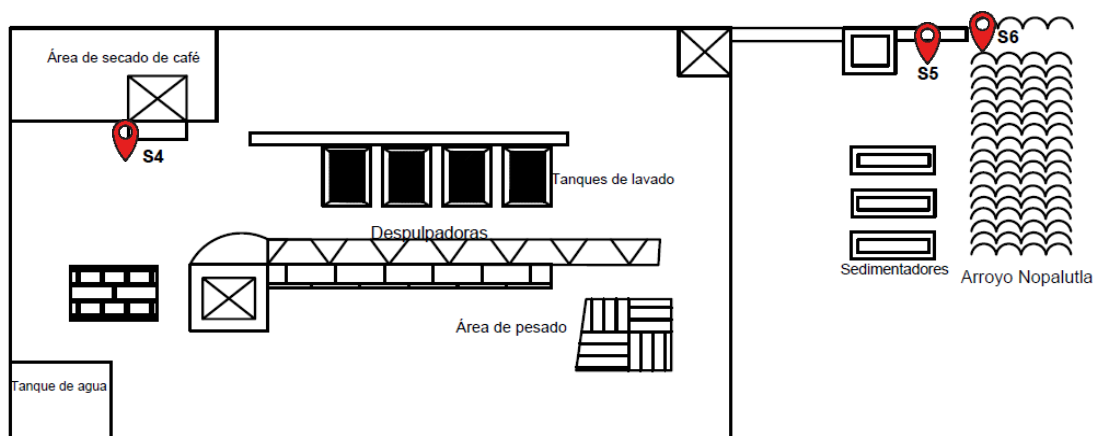


Figura 11. Layout del beneficio húmedo de café
Fuente: Autoría propia

En la Tabla 1 se muestra la leyenda utilizada para identificar los puntos de muestreo y su descripción correspondiente.

Tabla 1. Sitios de muestreo del agua utilizada en el beneficio húmedo de café.

Clave	Sitio de muestreo	Descripción
S1	Arroyo Bomba	- En este punto se encuentra la bomba de agua que se utiliza para transportar el agua desde el arroyo Nopalutla hasta el beneficio de café.
S2	Tanque	Aquí se almacena el agua proveniente del arroyo, esta agua es utilizada para llevar a cabo el proceso de lavado del café.
S3	Arroyo Punto final	- Zona del arroyo en donde se descargan las aguas mieles del lavado de café del beneficio cuando este comienza a funcionar.
S4	Lavado	En este punto se muestreó el agua del lavado de café, la cual está siendo separada de los granos y que será descargada en el arroyo Nopalutla.
S5	Descarga	Es el punto por donde fluye el agua del lavado de café antes de mezclarse con el arroyo. Las aguas residuales son conducidas por un canal de piedra que desemboca al arroyo Nopalutla aguas debajo de donde se ubica la bomba.
S6	Arroyo más Efluente	Este sitio es en donde se mezclan directamente las aguas residuales del lavado de café con el agua del arroyo Nopalutla.

A continuación, se presentan los parámetros que se les determinaron a las seis muestras de agua, clasificados en físicos, químicos y biológicos, además de la norma que dictamina las condiciones de muestreo y preservación de la muestra y las fechas de muestreo.

b) Análisis físicos

Parámetro determinado	Método	Norma	Fecha de muestreo
Temperatura	Con potenciómetro	NMX-AA-007-SCFI-2013 Análisis de agua. Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	17/Sep/2019 14/Ene/2020
Sales	Con potenciómetro	el	
Sólidos Disueltos Totales	Con potenciómetro	el	
Sólidos Sedimentables	Con cono Imhoff	NMX-AA-004-SCFI-2013 Análisis de agua. Medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	19/Sep/2019 14/Ene/2020
Sólidos Totales	Método gravimétrico	NMX-AA-034-SCFI-2015 Análisis de agua. Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	30/Sep/2019 14/Ene/2020
Sólidos Totales Volátiles, Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Disueltos Totales			
Color	Con fotómetro	NMX-AA-045-SCFI-2001 Análisis de agua. Determinación de color platino cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	17/Nov/2019 02/Feb/2020

Turbidez	Con fotómetro	NMX-AA-038-SCFI-2001	Análisis de agua. Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
Olor	Descripción cualitativa	PROY-NMX-AA-083-SCFI-2005	Durante todos los muestreos Análisis de agua. Determinación de olor en aguas naturales y residuales.

c) Análisis químicos

Parámetro determinado	Método	Norma	Fecha de muestreo
pH	Método electrométrico y colorimétrico	NMX-AA-008-2016	Análisis de agua. Medición de pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. 17/Sep/2019 14/Ene/2020
Conductividad Eléctrica	Con potenciómetro	NMX-AA-093-2018	Análisis de agua. Medición de la conductividad eléctrica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
Dureza	Método EDTA	NMX-AA-072-SCFI-2001	Análisis de agua. Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. 10/Nov/2019 14/Ene/2020
Cloruros	Método Mohr	NMX-AA-073-SCFI-2001	Análisis de agua. Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. 17/Nov/2019 14/Ene/2020
Acidez y Alcalinidad	Valoración de la muestra empleando	NMX-AA-036-SCFI-2001	Análisis de agua. Determinación de acidez 26/Nov/2019 29/Ene/2020

		como disolución y alcalinidad en aguas naturales, valorante un álcali o residuales y residuales tratadas. un ácido		
Demanda Química de Oxígeno	Test en cubetas DQO	NMX-AA-030/1-SCFI-2012	24/Sep/2019	
		Análisis de agua - medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba parte 1 Método de reflujó abierto.	09/Feb/2020	
Grasas y Aceites	Método Soxhlet	NMX-AA-005-SCFI-2013	06/Oct/2019	
		Análisis de agua. Medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	29/Ene/2020	
Nitrógeno	Test en cubetas	NMX-AA-026-SCFI-2010	01/Dic/2019	
		Análisis de agua. Medición de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	02/Feb/2020	
Fosfatos	Test en cubetas	NMX-AA-029-SCFI-2001		
		Análisis de aguas. Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.		

d) Análisis microbiológicos

Parámetro determinado	Método	Norma	Fecha de muestreo
Coliformes	Método del número	NMX-AA-042-SCFI-2015	24/Oct/2019
totales, fecales	más probable en	de agua. Enumeración de	03/Nov/2019
y E. coli	tubos múltiples	organismos coliformes totales,	09/Feb/2020
		organismos coliformes fecales	12/Feb/2020
		(termotolerantes) y Escherichia coli.	10/Mar/2020

Análisis físicos

Determinación de temperatura, sales y SDT mediante el método electrométrico.

1. Calibrar el potenciómetro Pocket Pro y Pro+ de Hach o en su defecto revisar si se encuentra calibrado.
2. Enjuagar cuidadosamente el electrodo con agua destilada.
3. Introducir el electrodo en el vaso de precipitado que contiene la muestra.
4. Seleccionar el parámetro a medir y esperar a que la lectura se estabilice.
5. Anotar el resultado (DOF, NMX-AA-007-SCFI-2013. Análisis de agua Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba., 2014).



Figura 10. Medición de sólidos disueltos totales (izquierda) y de sales (derecha)
Fuente: Autoría propia

Determinación de sólidos sedimentables

1. Montar el cono Imhoff en su respectiva base.
2. Homogenizar la muestra que fue tomada y vaciar 1 litro en el cono Imhoff.
3. Dejar reposar la muestra en el cono durante 45 minutos.
4. Transcurridos los 45 minutos, con el agitador de vidrio raspar suavemente las paredes del cono con el fin de remover los sólidos que se quedaron adheridos.
5. Después de remover de las paredes los sólidos dejar reposar 15 minutos.

6. Transcurridos los 15 minutos, medir el volumen que ocupan los sólidos sedimentables (DOF, NMX-AA-004-SCFI-2013. Análisis de agua Medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba.).



Figura 11. Determinación de sólidos sedimentables en el agua antes y después del lavado de café
Fuente: Autoría propia

Determinación de sólidos y sales disueltas

Preparación de cápsulas de porcelana y crisoles gooch

1. Pesar las cápsulas de porcelana y los crisoles.
2. Introducirlos a la mufla a una temperatura de 550°C durante 20 minutos.
3. Posteriormente transferirlos a la estufa a 105°C por 20 min.
4. Pasarlas al desecador hasta que se enfríen.
5. Pesar nuevamente para revisar que el peso sea constante (variación menor a 0.5 mg).
6. Registrar el peso de la cápsula como G.

Preparación de la muestra:

1. Sacar las muestras del sistema de refrigeración y permitir que alcancen la temperatura ambiente. Agitar las muestras para asegurar la homogeneización de la muestra.

Determinación de sólidos totales (ST):

1. Agregar un volumen de 20 mL de muestra de agua en cada cápsula.
2. Colocar las cápsulas en la estufa a 105°C hasta la sequedad.
3. Enfriar las capsulas en el desecador y determinar su peso y registrarlo como G1.

Determinación para sólidos totales volátiles (STV):

1. Introducir las cápsulas que contienen el residuo de la determinación de sólidos totales a la mufla a 550°C.
2. Posteriormente transferirlas a la estufa a 105°C durante 20 min.
3. Luego colocarlas en un desecador para enfriarlas
4. Pesar y registrar el peso como G2.

Determinación de sólidos suspendidos Totales (SST):

1. En los crisoles poner el papel filtro, pesarlo y registrarlo como G3.
2. Con una probeta medir un volumen de 70 mL de la muestra que previamente fue homogeneizada.
3. Filtrar la muestra (de ser necesario utilizar una bomba de vacío).
4. Después colocar el crisol en la estufa a 105°C aproximadamente 1 hora (DOF, NMX-AA-034-SCFI-2015 Análisis de agua. Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba., s.f.).



Figura 12. Determinación de sólidos y sales disueltos en el agua antes y después de lavado de café
Fuente: Autoría propia

Determinación de color y turbidez

1. Enjuagar tres veces con agua destilada las celdas para medición de color y turbidez.
2. Llenar con agua destilada la celda que será el blanco y la otra celda con la muestra a medir.
3. Seleccionar en el fotómetro Merck SQ 118 el programa para medir color y turbidez. Para color seleccionar 113 y para turbidez 139.
4. Una vez seleccionado el programa, introducir la celda del blanco en el fotómetro y esperar la medición.
5. Retirar la celda del blanco e introducir la celda con muestra para su medición.
6. Anotar los resultados obtenidos (Merck, s.f.).

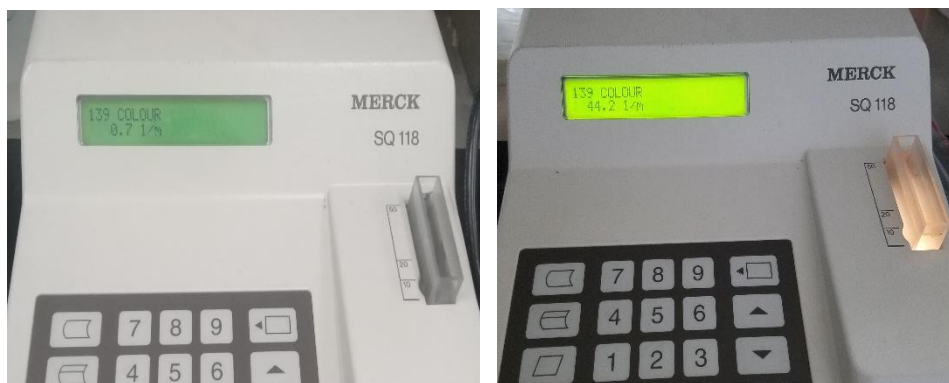


Figura 13. Determinación de color en las muestras de entrada y lavado
Fuente: Autoría propia

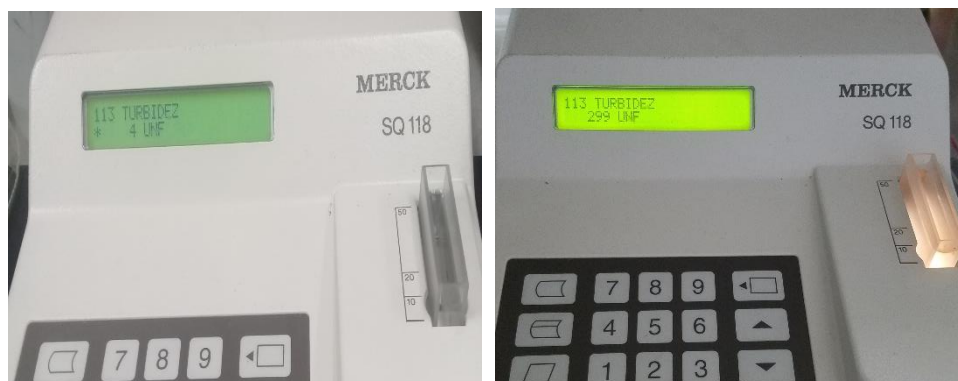


Figura 14. Determinación de turbidez en las muestras de entrada y lavado
Fuente: Autoría propia

Análisis químicos

Determinación de pH y conductividad eléctrica mediante el método electrométrico.

1. Calibrar el potenciómetro Pocket Pro y Pro+ de Hach o en su defecto revisar si se encuentra calibrado.
2. Enjuagar cuidadosamente el electrodo con agua destilada.
3. Introducir el electrodo en el vaso de precipitado que contiene la muestra.
4. Seleccionar el parámetro a medir y esperar a que la lectura se estabilice.
5. Anotar el resultado (DOF, NMX-AA-008-SCFI-2016 Análisis de agua - Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba, s.f.).



Figura 15. Determinación de pH (izquierda) y conductividad (derecha)
Fuente: Autoría propia

Determinación de dureza

1. Colocar 50 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer.
2. Añadir 0.5 mL de disolución amortiguadora para alcanzar un pH de 10.
3. Agregar una pizca del indicador eriocromo negro T. La muestra debe tomar un color vino rojizo.
4. Titular con la disolución de EDTA 0.01 M agitando continuamente hasta que desaparezcan los últimos matices rojizos y vire a color azul.

5. Realizar por duplicado (DOF, NMX-AA-072-SCFI-2001 Análisis de agua - Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba, s.f.).



Figura 16. Determinación de dureza
Fuente: Autoría propia

Determinación de cloruros

1. La muestra debe estar en un pH entre 7 y 10. Ajustar con hidróxido de sodio 0.1 N.
2. Colocar 50 mL de la muestra homogeneizada y a temperatura ambiente, en un matraz Erlenmeyer.
3. Adicionar 0.5 mL del indicador (cromato de potasio).
4. Colocar en la bureta Nitrato de Plata (AgNO_3), y proceder a la titulación hasta el vire de color de amarillo a anaranjado-rojizo (DOF, NMX-AA-073-SCFI-2001 Análisis de agua - Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba, s.f.).



Figura 17. Determinación de cloruros
Fuente: Autoría propia

Determinación de acidez y alcalinidad

Acidez con fenolftaleína

1. Transferir 50 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL.
2. Adicionar dos gotas de solución indicadora de fenolftaleína.
3. Titular con una disolución de hidróxido de sodio (NaOH) 0.02 N hasta el vire del indicador (de incoloro a rosa).
4. Registrar el volumen empleado en la titulación (acidez total).

Alcalinidad con naranja de metilo

1. Transferir 50 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL.
2. Adicionar dos gotas de solución indicadora de naranja de metilo.
3. Titular con una disolución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0.02 N hasta el vire del indicador (de amarillo a canela).
4. Registrar el volumen empleado en la titulación (DOF, NMX-AA-036-SCFI-2001 Análisis de agua - Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba, s.f.).



Figura 18. Determinación de acidez (izquierda) y alcalinidad (derecha)
Fuente: Autoría propia

Determinación de la demanda química de oxígeno

Test en cubetas DQO

1. Verter cuidadosamente mediante la pipeta 3 mL de muestra preparada sobre el reactivo en la pared interna de la cubeta de reacción mantenida inclinada.
2. Cerrar firmemente la cubeta con tapa roscada y mezclar vigorosamente el contenido de la cubeta.
3. Calentar la cubeta durante 120 minutos a 148°C en el termorreactor precalentado.
4. Sacar del termorreactor la cubeta caliente y colocarla en un soporte para tubos de ensayo para que se enfríe. No refrigerar con agua fría.
5. Al cabo de 10 minutos agitar la cubeta por balanceo y dejar que se enfríe mínimo 30 minutos.
6. Medir la en el fotómetro NOVA 60A y anotar los resultados (Merck KGaA, 2016).

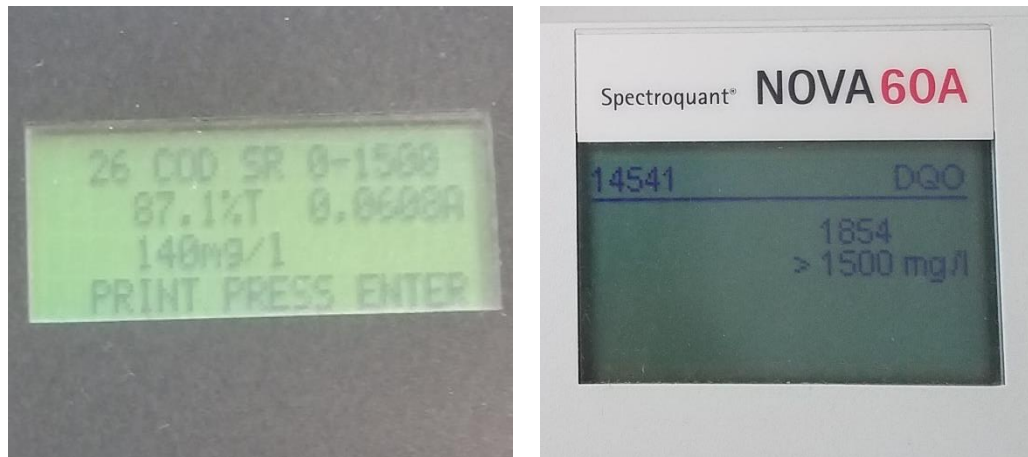


Figura 19. Resultados para DQO de las muestras de entrada y lavado
Fuente: Autoría propia

Determinación de grasas y aceites

1. Preparar el matraz de extracción (matraz de bola de 100 mL) poniéndolo a peso constante.
2. Medir el pH del agua el cual debe ser igual o menor 2 (Acidificar con una solución de ácido sulfúrico).
3. Preparar el material filtrante colocando un papel filtro en el embudo Büchner. Colocar el embudo en un matraz Kitazato y agregar 100 mL de la suspensión de tierra de diatomeas-sílice sobre el filtro, aplicar vacío y agregar 100 mL de agua desionizada, aplicar vacío y agregar 100 mL de agua de muestra.
4. Con ayuda de unas pinzas, transferir el material filtrante a un cartucho de extracción. Limpiando las paredes internas del embudo y el frasco contenedor de la muestra, así como la parte interna de la tapa del frasco con trozos de papel filtro previamente impregnados de disolvente (etanol) tener cuidado en remover la película de grasa y los sólidos impregnados sobre las paredes; colocar los trozos de papel en el mismo cartucho.
5. Llenar los matraces de extracción a la mitad y colocarlos a extracción en el equipo Soxhlet durante 4 horas.

6. Adicionar un poco más de etanol a los matraces para que se logre llevar a cabo la recirculación.
7. Una vez terminada la extracción retirar el cartucho de los matraces para extraer el etanol.
8. Colocar el matraz durante 40 minutos en la estufa a 105°C. Después transferir los matraces al desecador hasta que se enfríen.
9. Pesar los matraces de extracción y determinar la concentración de grasas y aceites recuperables (DOF, NMX-AA-005-SCFI-2013 Análisis de agua – Medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba, 2014).



Figura 20. Determinación de grasas y aceites
Fuente: Autoría propia

Determinación de nitrógeno

Test en cubetas Nitrógeno Total

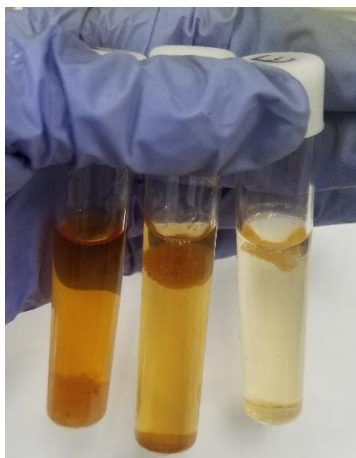
Disgregación

1. Pipetear en una cubeta vacía 10 mL de muestra.
2. Añadir una microcuchara azul rasa de reactivo N-1K y mezclar.
3. Añadir 6 gotas de reactivo N-2K cerrar firmemente la cubeta y mezclar.
4. Calentar la cubeta durante 1 hora a 120°C en el termorreactor precalentado.

5. Dejar enfriar a temperatura ambiente la cubeta cerrada.
6. Después de 10 minutos agitar brevemente la cubeta.

Preparación de la muestra de medición

7. Pipetear en una cubeta de reacción 1 mL de muestra disgregada y enfriada. No mezclar el contenido.
8. Añadir con una pipeta 1 mL de reactivo N-3K, cerrar firmemente la cubeta y mezclar. Agarrar la cubeta solamente por la tapa roscada.
9. Dejar en reposo la cubeta caliente durante 10 minutos (tiempo de reacción).
10. Medir la muestra de medición en el fotómetro NOVA 60A (Merck KGaA, 2016).



*Figura 21. Determinación de nitrógeno en muestras de agua de lavado de café
Fuente: Autoría propia*

Determinación de fósforo

Test Fosfatos

1. Pipetear en un tubo de ensayo 5 mL de muestra.
2. Añadir 5 gotas de reactivo PO_4^{-1} y mezclar.
3. Añadir una microcuchara azul rasa de reactivo PO_4^{-2} y agitar vigorosamente hasta que el reactivo se haya disuelto completamente.

4. Dejar en reposo 5 minutos (tiempo de reacción), luego se introduce la muestra de medición en la cubeta y se mide en el fotómetro NOVA 60A (Merck KGaA, 2013).

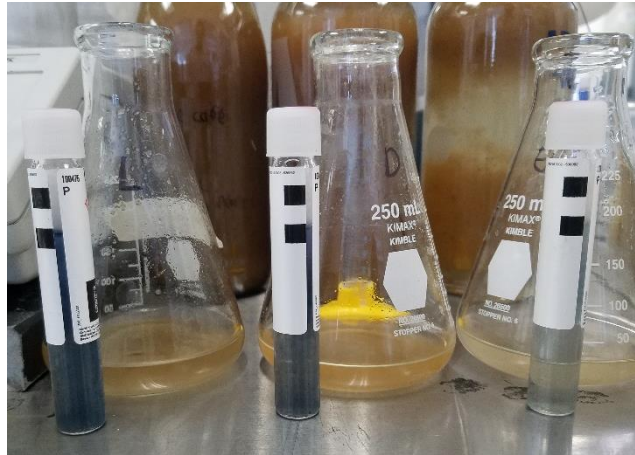


Figura 22. Determinación de fósforo en muestras de agua de lavado de café
Fuente: Autoría propia

Análisis microbiológicos

Determinación de coliformes totales, fecales y E. coli

1. Determinar el número de tubos a utilizar para las pruebas (3 o 5 tubos)

Prueba Presuntiva. Preparación de la muestra e inoculación del medio

2. Antes del examen, mezclar la muestra agitándola vigorosamente para lograr una distribución uniforme de los microorganismos dependiendo de la naturaleza del agua y el contenido bacteriano esperado, hacer las diluciones necesarias en esta etapa.
3. Para preparar la muestra, realizar diluciones e inocular alícuotas en el medio presuntivo. Para alícuotas superiores o iguales a 10 mL, usar tubos conteniendo medio de cultivo de doble concentración.
4. Incubar los tubos inoculados en caldo lactosado de 24 h a 48 h \pm 3 h a 35 $^{\circ}\text{C} \pm 0,5$ $^{\circ}\text{C}$.

Pruebas confirmativas

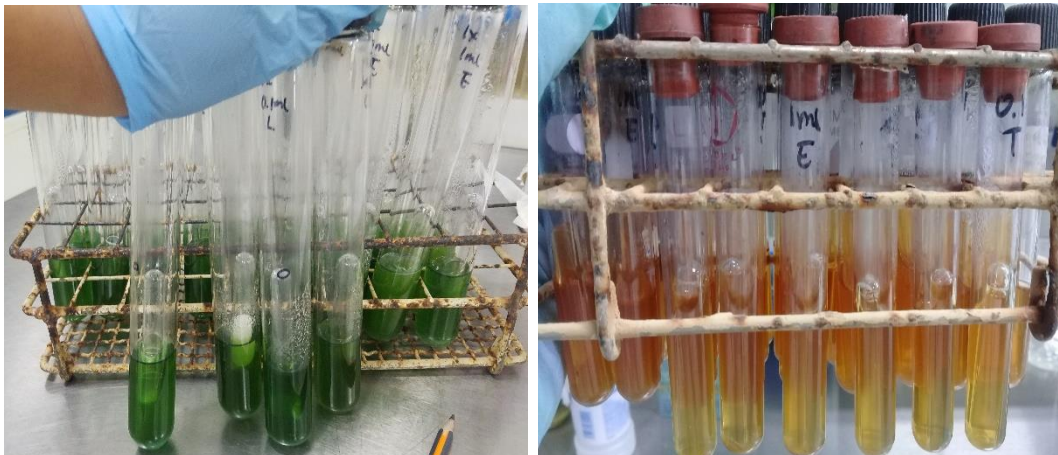
La formación de gas y turbidez son resultados presuntivos de coliformes y es necesario realizar pruebas confirmativas, resembrar cada uno de los tubos con reacción positiva a tubos con caldos para prueba confirmativas según sea la determinación para coliformes totales, coliformes fecales termo tolerantes y/o E. coli.

Organismos coliformes totales

5. Para confirmar la presencia de organismos coliformes, incubar los tubos con caldo lactosa bilis verde brillante resembrados a $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y examinar la producción de gas en un periodo de 24 h a $48\text{ h} \pm 3\text{ h}$. 9.4.2

Organismos coliformes fecales (termo tolerantes) y E. coli.

6. Para confirmar la presencia de organismos coliformes fecales (termo tolerantes), incubar los tubos con caldo EC resembrados a una temperatura de $44,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ por $24\text{ h} \pm 2\text{ h}$ y examinar la producción de gas.
7. Para confirmar la presencia de E. coli, incubar los tubos de agua triptona o agua peptonada resembrados, a $44,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ por $24\text{ h} \pm 2\text{ h}$. Después del periodo de incubación adicionar de 0,2 mL a 0,3 mL de reactivo de Kovac o su equivalente, a todos los tubos resembrados; el desarrollo de una coloración roja en la parte superior del tubo después de una agitación suave denota la producción de indol, característica de la presencia de E. coli (DOF, 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, s.f.).



*Figura 23. Tubos positivos para la determinación de coliformes totales y fecales
Fuente: Autoría propia*

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

Caracterización física

La Tabla 2 muestra los valores obtenidos para los parámetros físicos de las 6 muestras de agua, dentro de estos parámetros los que rebasaron la normatividad fueron los sólidos sedimentables, la turbidez y el color.

Tabla 2. Parámetros físicos determinados a las aguas muestreadas en los 6 puntos de estudio.

Parámetro/ Sitio de muestreo	Temperatura (°C)	Sales (ppt)	SDT (ppm)	Sólidos sedimentables (mL/L)	Sólidos Totales (mg/L)	Sólidos Totales Volátiles (mg/L)	Sólidos Suspendedos Totales (mg/L)	Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	Color (U)	Turbidez (UNT)	Olor
S1	21.5	4.50E-02	66.95	0.05	0.0725	0.0225	0.0228	0.0497	0.7	4	Dulce a miel
S2	21.35	5.00E-02	73.55	0	0.11	0.0375	0.0293	0.0807	1.8	11	
S3	21.4	4.00E-02	55.3	0.2	0.0925	0.02	0.0299	0.0625	1.4	6	
S4	21.82	6.60E+08	224.6	178.5	3.21	1.0125	0.4	2.81	44.2	299	
S5	21.36	3.20E+08	441.8	124.2	1.79	0.7475	0.372	1.418	44.1	213	
S6	21.5	1.20E+08	273.36	38.5	0.475	0.28	0.0415	0.5165	14.3	85	
LMP	35		1000	2			72		20	5	N.A
Normatividad	PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017	N.A	NOM-127-SSA1-1994	NOM-001-SEMARNAT-1996	N.A	N.A	PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017	N.A	NOM-127-SSA1-1994		

Parámetro/ Sitio de muestreo	Temperatura (°C)	Sales (ppt)	Sólidos Disueltos Totales (ppm)	Sólidos sedimentables (mL/L)	Sólidos Totales (mg/L)	Sólidos Totales Volátiles (mg/L)	Sólidos Suspendedos Totales (mg/L)	Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	Color (U)	Turbidez (UNT)	Olor
S1	21.5	4.50E-02	66.95	0.05	0.0725	0.0225	0.0228	0.0497	0.7	4	Dulce a miel
S2	21.35	5.00E-02	73.55	0	0.11	0.0375	0.0293	0.0807	1.8	11	
S3	21.4	4.00E-02	55.3	0.2	0.0925	0.02	0.0299	0.0625	1.4	6	
S4	21.82	6.60E+08	224.6	178.5	3.21	1.0125	0.4	2.81	44.2	299	
S5	21.36	3.20E+08	441.8	124.2	1.79	0.7475	0.372	1.418	44.1	213	
S6	21.5	1.20E+08	273.36	38.5	0.475	0.28	0.0415	0.5165	14.3	85	
LMP	35	N. A	1000	2	N. A	N. A	72	N. A	20	5	N. A
Normatividad	PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017		NOM-127-SSA1-1994	NOM-001-SEMARNAT-1996			PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017		NOM-127-SSA1-1994		

S1: Arroyo-Bomba, S2: Tanque, S3: Arroyo-Punto final, S4: Lavado, S5: Descarga, S6: Arroyo más Efluente

En la Tabla 2 se observa cómo los sólidos sedimentables pasaron de tener una presencia mínima en el agua antes del inicio de actividades del beneficio, con valores de 0.05, 0 y 0.2 mg/L en S1, S2 y S3 respectivamente a exceder en los sitios de muestreo S4, S5 y S6 con valores de 178.5, 124.2 y 38.5 mg/L el LMP de 2 mg/L que marca la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Respecto a la turbidez, para la muestra tomada en S2 el valor obtenido fue de 11 UNT, el cual rebasa el LMP de 5 UNT establecido en la NOM-127-SSA1-1994 debido al estancamiento del agua cuando no está funcionando el beneficio. Posteriormente se observa un decrecimiento desde la muestra tomada en S4 donde tiene un valor de 299 UNT hasta la de S6 con solo 85 UNT, esto ocurre porque una vez que el agua proveniente del beneficio se descarga en el arroyo, comienza a diluirse ocasionando que los valores de los parámetros analizados se reduzcan considerablemente.

En cuanto al color, las muestras S1, S2 y S3 presentaron valores muy bajos de 0.7, 1.8 y 1.4 U de color, sin embargo, al salir del proceso de lavado las muestras adquirieron tonalidades de color café lo que se refleja en los resultados obtenidos para S4, S5 y S6 cuyos valores son de 44.2, 44.1 y 14.3 U.

A continuación, se presentan gráficamente los parámetros físicos de la Tabla 2 que rebasaron el LMP.

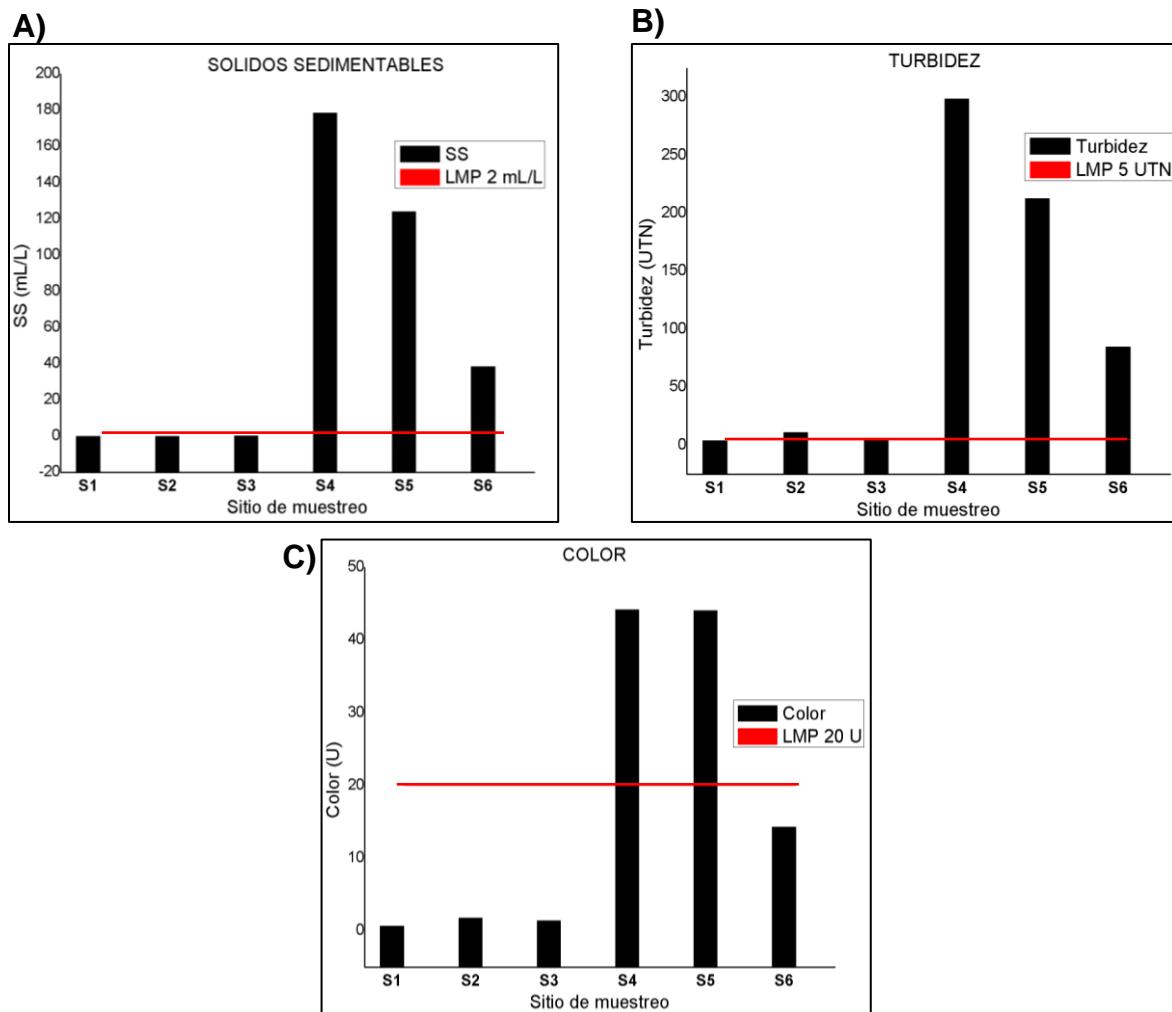


Figura 24. Parámetros físicos que rebasaron el LMP. A) Sólidos sedimentables, B) Turbidez, C) Color
Fuente: Autoría propia

Caracterización química

La Tabla 3 muestra los valores obtenidos para los parámetros químicos de las 6 muestras de agua.

Los parámetros que rebasaron el LMP establecido en su respectiva norma fueron la dureza, DQO y fosfatos.

Tabla 3. Parámetros químicos determinados a las aguas muestreadas en los 6 puntos de estudio.

Parámetro/ Sitio de muestreo	pH		Conductividad eléctrica (µS)	Dureza (CaCO ₃ mg/L)	Cloruros (mg/L Cl ⁻)	Acidez (CaCO ₃ mg/L)	Alcalinidad (CaCO ₃ mg/L)	DQO (mg/L)	Grasas y aceites (mg/L)	Nitrógeno (mg/L)	Fosfatos (mg/L)
	Potenciómetro	Tira reactiva									
S1	6.9	5.5	90.1	16	0.0318	8	14	140	0.91	0.6	0.64
S2	7.75	6.25	103.4	29	0.0308	5	19	189	0.161	2.1	0.38
S3	7.16	5.5	75.95	22	0.0341	9	16	174	0.196	1.8	0.78
S4	7.18	6.7	2169.4	1215.5	0.084	550	155	3708	0.548	18.6	45.6
S5	7.25	6.8	1176.6	938	0.0621	350	105	2504	0.214	13.8	38.8
S6	6.47	6.3	315.32	437.5	0.0273	60	55	320	0.527	6	11.2
LMP	6.5 - 8.5		N. A	500	250	N. A	300	180	18	25	15
Normatividad	PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017			NOM-127-SSA1-1994	NOM-127-SSA1-1994		NOM-041-SSA1-1993	PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017			

S1: Arroyo-Bomba, S2: Tanque, S3: Arroyo-Punto final, S4: Lavado, S5: Descarga, S6: Arroyo más Efluente

En la Tabla 3 se observa como los valores de dureza para los sitios de muestreo S4 y S5 fueron de 1215.5 y 938 CaCO₃ mg/L y se compararon con lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994 para agua potable donde rebasan el LMP de 500 mg/L.

Los valores más altos de DQO para las aguas mieles se presentaron en los sitios de muestreo S4 y S5 con valores de 3708 y 2504 mg/L y pese a no ser valores muy altos no cumplen con lo establecido en el PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 en el cual el LMP es de 180 mg/L.

Para S6 el valor de DQO obtenido fue de 320 mg/L y muestra una disminución considerable respecto a los puntos S4 y S5, esto podría deberse a que una vez que

el agua residual entra en contacto con la del arroyo Nopalutla comienza a diluirse con el cauce del arroyo.

La muestra de agua en S4 presentó una mayor cantidad de nitrógeno y fosfatos, los cuales están relacionados con la composición de la pulpa de los granos de café y los fertilizantes utilizados para su cultivo (Torres, Sanín, Arango, & Serna, 2019). Aunque las cantidades de nitrógeno se elevaron en las muestras de agua miel con valores de 18.6, 13.8 y 6 mg/L en S4, S5 y S6 respecto al agua de entrada al proceso cuyos valores en los puntos de muestreo S1, S2 y S3 fueron de 0.6, 2.1 y 1.8 mg/L, no rebasaron el LMP de 25 mg/L establecido por el PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017, sin embargo, los fosfatos si rebasaron el LMP de 15 mg/L en los sitios de muestreo marcados como S4 y S5.

Las gráficas siguientes muestran los resultados que rebasaron los LMP mostrados en la Tabla 3.

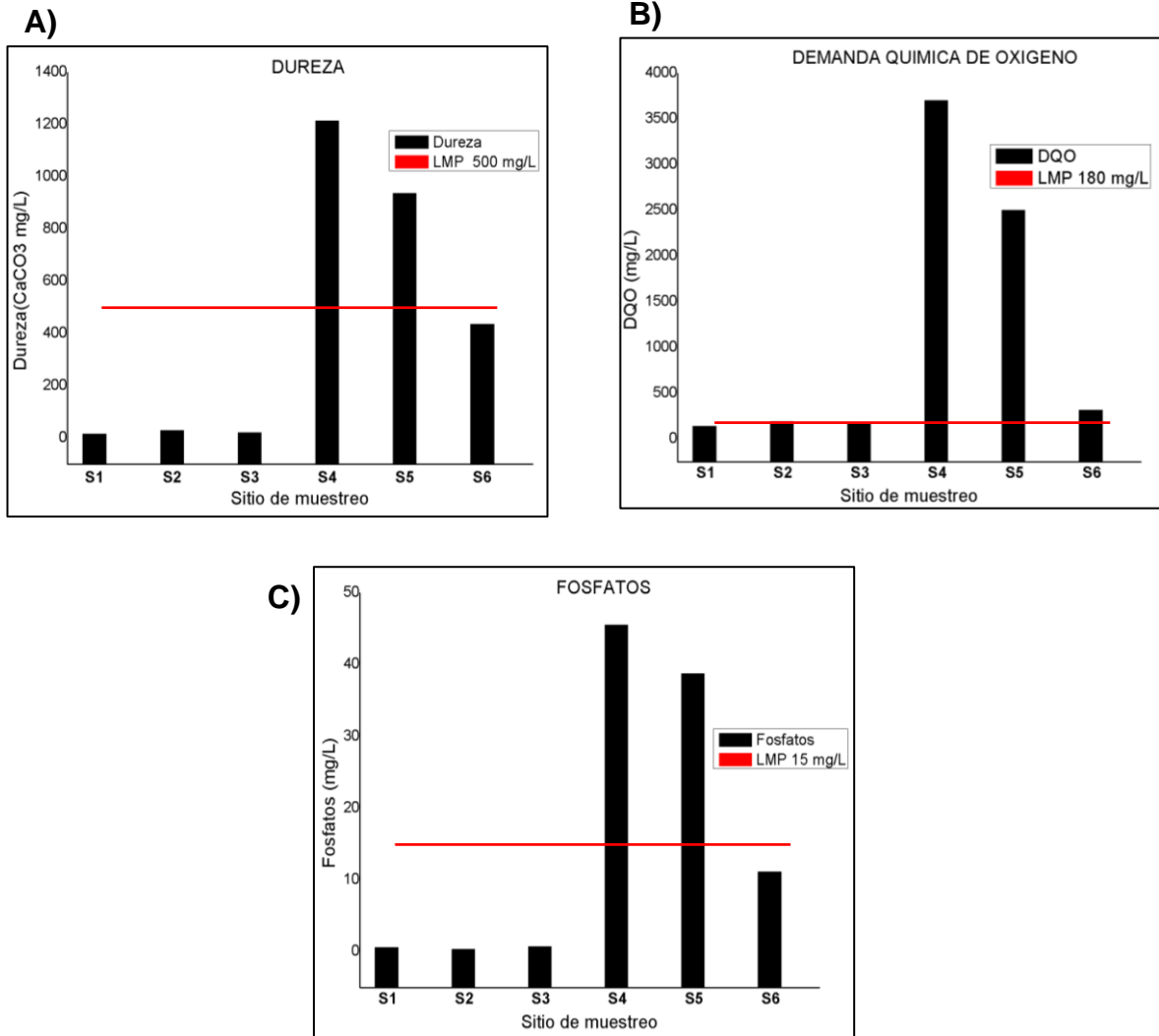


Figura 25. Parámetros químicos que rebasaron el LMP. A) Dureza, B) Demanda Química de Oxígeno, C) Fosfatos
Fuente: Autoría propia

Caracterización microbiológica

La Tabla 4 muestra los valores obtenidos para los análisis microbiológicos. Los sitios de muestreo S1, S4 y S6 presentaron valores de 1609, 2400 y 2400 NMP para coliformes totales debido a que el agua de entrada al proceso no recibe ningún tipo de tratamiento y se toma directamente del arroyo.

Respecto al análisis de coliformes fecales, aunque las muestras S4 y S5 presentaron valores por debajo de lo que marca la norma, el punto de muestreo correspondiente a S6 presentó un valor muy alto de 1614 NMP y superior al LMP de 1000 NMP que establece la NOM-001-SEMARNAT-1996. 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 (Torres, Sanín, Arango, & Serna, 2019).

Tabla 4. Parámetros microbiológicos determinados a las aguas muestreadas en los 6 puntos de estudio.

Parámetro/ Sitio de muestreo	Coliformes Totales	Coliformes Fecales
S1	1609	8
S2	551	3
S3	569	3.5
S4	2400	916
S5	813	806
S6	2400	1614
LMP	N. A	1000
Normatividad		NOM-001-SEMARNAT-1996

S1: Arroyo-Bomba, S2: Tanque, S3: Arroyo-Punto final, S4: Lavado, S5: Descarga, S6: Arroyo más Efluente

En las gráficas siguientes están representados los datos de la Tabla 4, para coliformes totales no hay un LMP establecido como en el caso de los coliformes fecales.

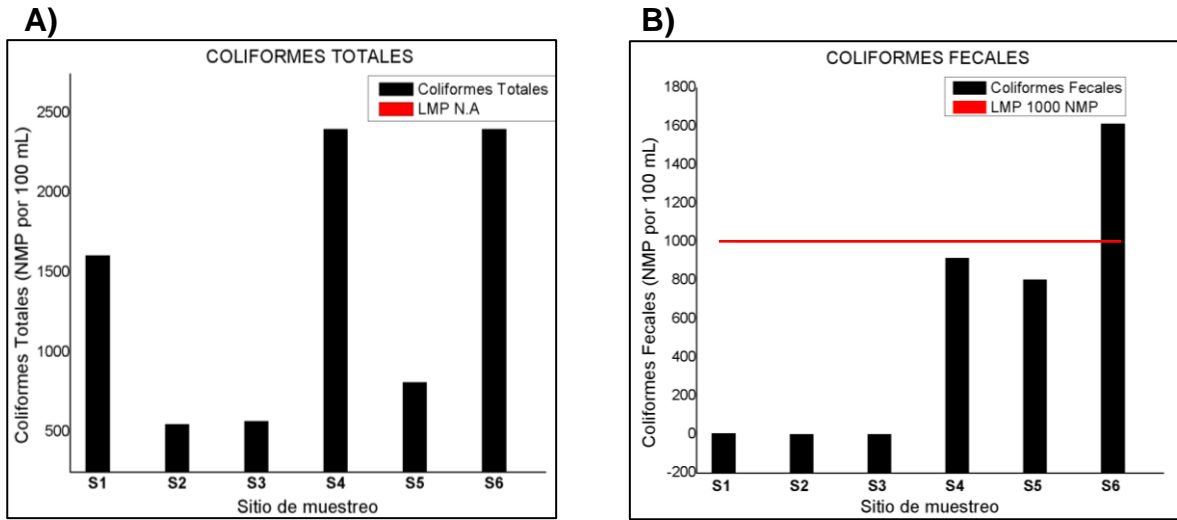


Figura 26. Parámetros microbiológicos. A) Coliformes totales, B) Coliformes fecales
Fuente: Autoría propia

Índice de calidad del agua

Además de comparar los parámetros muestreados con la normatividad mexicana aplicable, también se calculó el Índice de Calidad del Agua (ICA) para estimar la calidad general del agua en los 6 puntos muestreados.

Para realizar la estimación del ICA se utilizaron 7 de los 9 parámetros establecidos por el ICA-NSF (Índice del National Science Foundation) de los cuales se midieron los coliformes fecales, pH, temperatura, fosfatos, nitrógeno, turbidez y sólidos totales y se calculó un ICA aproximado puesto que no se realizaron las mediciones de oxígeno disuelto y DBO₅ debido a las condiciones de preservación de la muestra para realizar estos análisis.

En la Tabla 5 se muestran los resultados del cálculo aproximado del Índice de calidad del agua para cada sitio de muestreo.

Tabla 5. Parámetros utilizados para el cálculo estimado del ICA.

Parámetro/ Sitio de muestreo	Coliformes Fecales	*Sub _i					Sólidos Totales (mg/L)	WQI
		pH Potenciómetro	Temperatura (°C)	Fosfatos (mg/L)	Nitrógeno (mg/L)	Turbidez (UNT)		
S1	11.6333	10.368	2.01	6.088	9.518	7.04	1.418	65.857
S2	13.7167	10.35	2.019	7.596	8.813	5.92	1.418	68.264
S3	13.5083	10.704	2.016	5.276	8.954	6.72	1.418	66.570
S4	3.772	10.692	1.9908	0.5	4.054	0.4	1.419	31.271
S5	4.19367	10.65	2.0184	0.5	4.582	0.4	1.418	32.551
S6	3.30673	8.5104	2.01	0.5	6.98	1.92	1.418	33.761
W_i	0.15	0.12	0.1	0.1	0.1	0.08	0.08	0.73

*Sub_i índice de calidad para el parámetro i

*W_i Coeficiente de ponderación del parámetro i

*WQI Water Quality Index (Índice de Calidad del Agua)

La interpretación de la calidad del agua para cada sitio de muestreo se realizó tomando en cuenta la escala de clasificación del ICA-NSF de la Figura 8. Los sitios

de muestreo S1, S2 y S3 tienen valores de 65, 68 y 66 lo que los ubica dentro del rango de 51-70 correspondiente a una calidad del agua media y en la escala de color se encuentran en amarillo. S4, S5 y S6 tienen valores de 31, 32 y 33 por lo que se ubican en el rango de 26-50 correspondiente a una mala calidad del agua y están marcados con color naranja en la Tabla 6.

Tabla 6. Leyenda de calidad del agua en los 6 puntos de muestreo.

Parámetro/ Sitio de muestreo	WQI	Leyenda de calidad del agua
S1	65.857238	MEDIA
S2	68.264555	MEDIA
S3	66.570941	MEDIA
S4	31.271181	MALA
S5	32.551877	MALA
S6	33.761239	MALA

CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Impacto ambiental

Todos los parámetros evaluados presentaron cambios considerables en los resultados respecto al agua de entrada al proceso y cuando esta sale, dentro de los parámetros físicos que rebasaron los LMP establecidos en la normatividad mexicana encontramos los sólidos sedimentables, el color y la turbidez.

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, los cuales cuando se fermentan producen un olor dulce a miel cuando son recientes y un olor a descompuesto cuando llevan más días (Torres, Sanín, Arango, & Serna, 2019).

La turbidez también se ve afectada por la presencia de los sólidos en el agua (Molina & Villatoro, 2006) 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 (Ciencia Ambiental, 2020).

En los parámetros químicos analizados, contrario a lo que se reporta en la literatura, los valores de pH obtenidos para las aguas mieles de lavado de café de este beneficio oscilan entre 6.47 y 7.75. Para este caso en particular lo que hace que estas aguas no presenten valores tan ácidos se debe a la adición de cal (óxido de calcio) durante el proceso de lavado. La cal ayuda a remover los restos de mucílago que quedan en los granos una vez transcurrido el tiempo de fermentación. De acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996 el rango de pH para la descarga de aguas residuales se encuentra entre 6.5 y 8.5 por lo que el agua del beneficio está dentro del rango permisible.

Los parámetros químicos que rebasaron el LMP fueron la dureza 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 quieran dar, la DQO y los fosfatos.

La DQO permite determinar químicamente la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica, para las aguas residuales de café, las concentraciones máximas de DQO se encuentran entre los 18,000 y 55,000 miligramos por litro, lo cual son valores muy altos y contaminantes (Sánchez, Espindola, Henk, & Guisepe, s.f.). 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

Otro de los parámetros químicos que rebasó el LMP fueron los fosfatos, la presencia de una alta concentración de estos en las aguas mieles que serán descargadas junto con los altos niveles de DQO causan grandes problemas de contaminación 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 (Campos, Prado, & Pereira, 2010).

Finalmente, a nivel microbiológico 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 en las personas.

Indicadores de calidad del agua (CONAGUA)

Otra forma de comparar los cambios que producen las descargas de aguas mieles en el cuerpo de agua receptor e identificar cómo cambia su calidad es mediante la comparación de los resultados obtenidos con las escalas de clasificación de calidad del agua superficial. Debido a que no se midieron todos los parámetros del ICA propuesto por la CONAGUA y se utilizó el WQI, tomamos únicamente en cuenta los parámetros de Sólidos Suspendidos Totales, DQO y Coliformes Fecales.

Para los Sólidos Suspendidos Totales los valores obtenidos para S4, S5 y S6 correspondientes al agua del lavado de café presentaron valores de 0.4, 0.372 y 0.0415 mg/L que son mayores comparados con los obtenidos en S1, S2 y S3 los

cuales fueron de 0.0228, 0.0293 y 0.0299 mg/L correspondientes al agua antes de iniciar el proceso de beneficiado del café. Pese a la ligera variación de sólidos obtenidos antes y después de dicho proceso, la calidad fue excelente en los 6 sitios de muestreo.

Respecto a la DQO para los tres primeros sitios de muestreo, es decir en S1, S2 y S3 de acuerdo a la escala de clasificación de calidad del agua esta se encuentra dentro de la clasificación de contaminada puesto que los valores obtenidos para estos sitios de muestreo varían de 140 a 189 mg/L, lo que nos ayuda a recalcar la importancia de tratar el agua que entra al proceso de lavado de café. Una vez que el agua es utilizada los valores de DQO para los sitios de muestreo en S4 y S5 se encuentran clasificados dentro de las aguas fuertemente contaminadas debido a la importante carga de materia orgánica presente en las aguas de lavado por lo que antes de su descarga es necesario darles un tratamiento.

En cuanto a los Coliformes Fecales en los sitios de muestreo S1, S2 y S3 el agua presenta una excelente calidad, luego para S4 y S5 su calidad se vuelve aceptable, sin embargo, en S6 ya se encuentra contaminada esto puede justificarse con las descargas que la comunidad cercana al beneficio realiza en este mismo arroyo.

De forma general, el Índice de Calidad del agua antes de que comience a operar el beneficio de café en los sitios de muestreo S1, S2 y S3 presenta una calidad media. Sin embargo, cuando comienza su operación y el agua es utilizada para el lavado de los granos de café, la calidad en los sitios de muestreo S4, S5 y S6 pasa a ser mala, por lo que antes de ser descargadas al arroyo Nopalutla las aguas mieles provenientes del beneficio de café deben de recibir un tratamiento para no afectar al cuerpo de agua receptor.

Propuesta de tratamiento

¿Qué es un humedal artificial?

Los humedales artificiales son sistemas que simulan una zona de transición entre el ambiente terrestre y el acuático (Romero-Aguilar et al., 2009), pero que son específicamente construidos para el tratamiento de aguas residuales bajo condiciones controladas de ubicación, dimensión y capacidad de tratamiento (Moreno, 2012).

Los humedales se han aplicado globalmente para tratar aguas residuales: domésticas y municipales; agrícolas; drenaje de minas; procesamiento de alimentos; lixiviados de vertederos; industria pesada (refinerías de petróleo) y aguas de escorrentía (Ciencia Ambiental, 2020).

El tratamiento se logra mediante una variedad de procesos físicos, químicos y biológicos, como sedimentación, filtración, precipitación, sorción, absorción de plantas, descomposición microbiana y transformaciones de nitrógeno.

Comparación de los humedales con otros sistemas de tratamiento

A continuación, en la Tabla 7 se comparan tres procesos de tratamiento de aguas mieles de lavado de café aplicados en diferentes países, se presentan sus requerimientos, los parámetros que remueve cada sistema, el área en donde fueron aplicados y sus ventajas y desventajas.

Tabla 7. Comparación de 3 sistemas de tratamiento de aguas mieles de lavado de café.

Sistema de tratamiento	Digestión anaerobia	Utilización de extractos de origen vegetal como floculantes de materia orgánica	Humedales artificiales
------------------------	---------------------	---	------------------------

Requerimientos	<p>Selección de un inóculo que cumpla con las características adecuadas para el funcionamiento del reactor: estiércol vacuno y lodos de las lagunas de estabilización. Control de parámetros operacionales como: temperatura, concentración de inhibitorios, tasa de carga orgánica y tiempo de retención hidráulica (Morales, Rivadeneira, & García, 2018).</p>	<p>Considerar la cantidad de agua a tratar. Cálculos de diseño: diámetro de tuberías y velocidad de flujo. Identificar el gradiente de velocidad. Considerar el espacio para la construcción del sistema de tratamiento (Aguirre, 2015).</p>	<p>Bajos consumos de agua en el proceso del beneficio. Un terreno plano con poca pendiente. Nivel de agua subterránea profundo. Previo al sistema debe haber remoción de sólidos para evitar taponeo en el lecho de filtración y un pH neutro. Requiere de agua todo el año para mantener las plantas y bacterias vivas (Sánchez, Espindola, Henk, & Guiseppe, s.f.).</p>
Parámetros remueve	<p>que Reducción de carga orgánica contaminante, expresada en función de la DQO (Rodríguez, Pérez, & Fernández, 2000).</p>	<p>Sólidos sedimentables, DBO₅, DQO, pH, turbiedad, oxígeno disuelto, acidez, dureza, cloruros y conductividad eléctrica (Aguirre, 2015).</p>	<p>Eliminación de altas concentraciones de materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo y en algunos casos, compuestos tóxicos (Orozco et al., 2005; Devi, 2008; Tee et al., 2009; Xuan et al., 2009).</p>
Área de aplicación	<p>Despulpadora Madrugón, provincia de Santiago de Cuba (Rodríguez, Pérez, & Fernández, 2000).</p>	<p>Predio "La Pedregosa" Municipio de Anolaima, Cundinamarca, Colombia (Aguirre, 2015).</p>	<p>Parcela del Ejido Alpujarras, municipio de Cacahoatán, Chiapas, México (Moreno, 2012).</p>

Ventajas	<p>Bajo costo de instalación.</p> <p>Baja producción de lodos residuales.</p> <p>Producción de biogás.</p> <p>Inóculos de fácil adquisición (estiércol vacuno y lodos de las lagunas de estabilización (Rodríguez, Pérez, & Fernández, 2000).</p>	<p>La adquisición de extractos vegetales es sencilla y económica.</p> <p>Los floculantes de extractos vegetales pueden ser utilizados sin la necesidad de floculantes inorgánicos.</p> <p>El sistema de tratamiento es sencillo y de fácil entendimiento (Aguirre, 2015).</p>	<p>Relativamente fácil de diseñar y construir.</p> <p>No requiere energía.</p> <p>No requiere personal especialmente entrenado.</p> <p>Produce vegetación que se puede emplear como alimento de ganado.</p> <p>En cosecha de café se usan aguas mieles y fuera de cosecha, aguas domésticas (Sánchez, Espindola, Henk, & Guiseppe, s.f.).</p>
Desventajas	<p>Difícil degradación de compuestos recalcitrantes.</p> <p>Dificultad para controlar largos tiempos de retención.</p> <p>Baja estabilidad y alta sensibilidad a los cambios ambientales (Amani et al.,2010).</p>	<p>Requiere una inversión inicial elevada.</p> <p>Para cafeteros de bajos ingresos la viabilidad económica es desfavorable.</p> <p>El proyecto se realizó específicamente para el predio “La Pedregosa” por lo que si se desea implementar en otro predio deben realizarse las adaptaciones correspondientes (Aguirre, 2015).</p>	<p>La construcción requiere bastante mano de obra, o alternativamente el uso de una máquina para excavar.</p> <p>Ocupa mucho terreno y necesita un área casi plana.</p> <p>Requiere de suministro de agua los meses post cosecha de café para evitar que las plantas Mueran (Sánchez, Espindola, Henk, & Guiseppe, s.f.).</p>

Después de analizar los otros sistemas de tratamiento, se ha determinado que la implementación de un humedal artificial como sistema de tratamiento para las aguas mieles del beneficio de café ubicado en el Municipio de Xicotepec es la opción más viable debido a que es fácil de construir, no requiere de mucho mantenimiento y el terreno donde se encuentra ubicado el beneficio de café cuenta con un área extensa y plana para su construcción, además las plantas que se utilicen para el humedal pueden ser utilizadas como alimento para el ganado que tiene el dueño del beneficio. Para este caso de estudio en particular, las desventajas presentadas en la Tabla 7 se convertirían en ventajas si se implementa el humedal artificial y de esta forma se cumpliría con los LMP para las descargas de aguas mieles del beneficio.

CONCLUSIONES

Con la realización de este trabajo se logró evaluar el impacto ambiental de las aguas residuales de un beneficio de café ubicado en el municipio de Xicotepec, mediante la caracterización física, química y microbiológica del agua del arroyo Nopalutla antes y después de ser utilizada en el proceso de beneficiado húmedo de café.

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante el cálculo aproximado del Índice de Calidad del Agua, se determinó 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.

De acuerdo a los resultados obtenidos, para este trabajo de estudio se propone como tratamiento para las aguas mieles del lavado de café la implementación de un humedal artificial con la finalidad de reducir los niveles de sólidos sedimentables, color, turbidez, dureza, DQO, fosfatos y coliformes fecales que rebasan los LMP establecidos en la normatividad mexicana y de esta forma reducir el impacto negativo que generan en el cuerpo de agua en donde son descargadas.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUA.org.mx. (s.f.). *¿QUÉ ES EL AGUA?* Obtenido de <https://agua.org.mx/ques/#agua>
- Aguirre, F. A. (2015). *Diseño de un sistema de tratamiento de las aguas residuales del proceso de desmucilaginosación del café con extractos vegetales en la finca "La Pedregosa" Municipio de Anolaima, Cundinamarca.*
- Ambientum. (s.f.). *El agua motor del ecosistema.* Obtenido de Enciclopedia ambiental [ambientum: https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/el_agua_motor_del_ecosistema.asp](https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/el_agua_motor_del_ecosistema.asp)
- Arce, A., Calderón, C., & Tomasini, A. (s.f.). Fundamentos Técnicos para el Muestreo y Análisis de Aguas Residuales. *Serie Autodidáctica de Medición de la Calidad del Agua*, 9-23.
- Brown, T. L., Eugene, L. J., Bursten, B. E., Murphy, C. J., & Woodward, P. M. (2014). *Química la ciencia central.* México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Campos, C., Prado, M., & Pereira, E. (2010). CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA, BIOQUÍMICA E ENERGÉTICA DA ÁGUA RESIDUÁRIA DO CAFÉ PROCESSADO POR VIA ÚMIDA. *Biosci. J., Uberlândia,*, 514-524.
- Cárdenas, R., & Ortiz, J. (2014). *Manejo integrado del recurso agua, en el proceso de beneficio húmedo del café, para la asociación de productores de café especial "ACAFETO" en el municipio de Fresno departamento del Tolima (Tesis de grado).* Universidad de Manizales, Caldas, Colombia.
- Cenicafé. (2005). Beneficio Ecológico del Café. *Producción de café.*
- Ciencia Ambiental. (2020). *Humedales.* Obtenido de https://cienciaambientalnew.blogspot.com/?fbclid=IwAR06W_9rhflymTg8wlw8MaY8weUzIK3EagyxwKrLr9NOzCKho1om-K4zo6c

- Ciencia Ambiental. (2020). *Turbidez*. Obtenido de https://cienciaambientalnew.blogspot.com/?fbclid=IwAR06W_9rhflymTg8wlw8MaY8weUzIK3EagyxwKrLr9NOzCKho1om-K4zo6c
- Compartido, F. d. (03 de octubre de 2017). *Beneficios del café y su proceso de cata*. Obtenido de <https://www.gob.mx/firco/es/articulos/beneficios-del-cafe-y-su-proceso-de-cata?idiom=es>
- CONAGUA. (2011). Agua en el mundo. *Estadísticas del agua en México*, 113-126. Obtenido de http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/sina/capitulo_8.pdf
- DOF. (2014). *NMX-AA-005-SCFI-2013 Análisis de agua – Medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-mexicanas-83266>
- DOF. (2014). *NMX-AA-007-SCFI-2013. Análisis de agua Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-mexicanas-83266>
- DOF. (2018). *NMX-AA-093-SCFI-2018 Análisis de agua - Medición de la conductividad eléctrica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba*. Obtenido de http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/AA093-2018_06.pdf
- DOF. (s.f.). *NMX-AA-004-SCFI-2013. Análisis de agua Medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-mexicanas-83266>

- DOF. (s.f.). *NMX-AA-008-SCFI-2016 Análisis de agua - Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-mexicanas-83266>
- DOF. (s.f.). *NMX-AA-034-SCFI-2015 Análisis de agua. Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-mexicanas-83266>
- DOF. (s.f.). *NMX-AA-036-SCFI-2001 Análisis de agua - Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-mexicanas-83266>
- DOF. (s.f.). *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*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-mexicanas-83266>
- DOF. (s.f.). *NMX-AA-072-SCFI-2001 Análisis de agua - Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-mexicanas-83266>
- DOF. (s.f.). *NMX-AA-073-SCFI-2001 Análisis de agua - Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-mexicanas-83266>
- DOF. (s.f.). *PROY-NMX-AA-083-SCFI-2005 Análisis de agua - Determinación de olor en aguas naturales y residuales - Método de prueba*. Obtenido de http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa083-Proy2005_11.pdf

- Endris, S., Kebede, T., W/Senbet, B., Legesse, W., & Kassahun, Y. (2020). Environmental Contamination from by-Products of Wet Coffee Processing. *ResearchGate*, 335-343.
- González, V., Caicedo, O., & Aguirre, N. (2013). Aplicación de los índices de calidad de agua NSF, Dinius y BMWP en la quebrada La Ayurá, Atioquia, Colombia. *Revista Gestión y Ambiente*, 97-108. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/33902/1/33863-170537-1-PB.pdf>
- Haddis, A., & Rani Devi, R. (2008). Effect of effluent generated from coffee processing plant on the water bodies and human health in its vicinity. *Journal of Hazardous Materials*, 259–262.
- Infocafé. (s.f.). *Cultivo y recolección del café*. Obtenido de <https://www.infocafe.es/cafe/cultivo-recoleccion.php>
- Merck KGaA. (07 de 2013). *Test Fosfatos*.
- Merck KGaA. (06 de 2016). *Test en cubetas DQO*.
- Merck KGaA. (05 de 2016). *Test en cubetas Nitrógeno Total*.
- Merck. (s.f.). *Determinación de color y turbidez*.
- Molina, A., & Villatoro, R. (03 de 2006). *Propuesta de tratamientos de aguas residuales en beneficios húmedos de café*. Obtenido de Tesis de grado : <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/4524/1/Propuesta%20de%20tratamientos%20de%20aguas%20residuales%20en%20beneficios%20h%C3%BAmedos%20de%20caf%C3%A9.pdf>
- Morales, C., Rivadeneira, B., & García, S. (2018). Digestión anaerobia de las aguas residuales de la industria del café instantáneo. *ESPAMCIENCIA*, 23-32.
- Moreno, H. I. (2012). *Humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales del beneficio de café: caso de estudio con pequeños productores. (Tesis de grado)*. Universidad Autónoma de Chiapas. Tapachula, Chiapas.

- Navaz, M., & Roy, E. (2016). Tecnologías apropiadas para la caficultura. *Aprovechamiento y tratamiento de residuos*, 1-35.
- Orozco, C., Barrientos, H., Lopezlena, A., Cruz, J., Selvas, C., Osorio, E., & cols., E. O. (2005). Evaluación de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales del procesamiento del café: características químicas. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 123-131.
- Pathfinderscience. (2006). *Water Quality Index Protocol*. Obtenido de <http://www.pathfinderscience.net/stream/cproto4.cfm#:~:text=The%20Water%20Quality%20Index%20uses,is%20on%20a%20given%20day>.
- Pesquera, S. d. (19 de junio de 2017). *Servicio de información agroalimentaria y pesquera*. Obtenido de <https://www.gob.mx/siap/articulos/cafe-datos-preliminares-a-2017-indican-una-produccion-nacional-de-839-mil-toneladas>
- Ramos, R., Sepúlveda, R., & Villalobos, F. (2003). *El agua en el medio ambiente: muestreo y análisis*. México : Plaza y Valdes.
- RED OCAS. (s.f.). *El agua en el mundo*. Obtenido de <https://www.aguas.org.mx/sitio/publicaciones/agua-en-el-mundo/agua-en-el-mundo.pdf>
- Rodríguez, S., Pérez, R., & Fernández, M. (2000). Estudio de la biodegradabilidad anaerobia de las aguas residuales del beneficio húmedo del café. *Interciencia*, 386-390.
- Ruelas, L. (2018). Manejo de las aguas residuales del beneficiado de café: un asunto relegado en Veracruz, México. *Revista Internacionales*, 12-46.
- Sánchez, L., Espindola, R., Henk, R., & Guiseppe, C. (s.f.). Manual para la construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales en beneficios pequeños de café.

- SEMARNAT. (06 de 2019). *Indicadores de calidad del agua*. Obtenido de http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_A GUA05_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce
- SNET. (s.f.). *Índice de calidad del agua general "ICA"*. Obtenido de <http://www.snet.gob.sv/Hidrologia/Documentos/calculolCA.pdf>
- TecDepur. (2013). *Agua dura: ¿qué es y cómo me afecta?* Obtenido de <https://www.iagua.es/blogs/tecdepur/agua-dura-%C2%BFque-es-y-como-me-afecta>
- Torres, L., Sanín, A., Arango, A., & Serna, J. (2019). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café . *Ion*, 59-66.
- Vázquez, G. (2016). *Efectos del proceso beneficio húmedo café sobre la sostenibilidad hídrica de la microcuenca La Suiza, Chiapas. (Tesis de grado)*. Monterrey, Nuevo León, México.