



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

CARRERA DE BIOLOGÍA

“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO CACALOTENANGO
EN EL TRAMO EL FRAILE-TAXCO EL VIEJO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

P R E S E N T A N

**DIANA KARINA CAMARILLO JUÁREZ
CITLALI NASHALLY CORTÉS SALINAS**

JURADO DE EXÁMEN

**DIRECTORA: M. EN C. MARICELA ARTEAGA MEJÍA
ASESOR: M. EN C. RAMIRO RÍOS GÓMEZ
ASESOR: M. EN C. ARMANDO CERVANTES SANDOVAL
SINODAL: DR. JORGE ANTONIO VALDIVIA ANISTRO
SINODAL: BIÓL. IRENE CASTILLO CHAIRES**



CIUDAD DE MÉXICO

FEBRERO 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

De Nashelly

A mi máxima casa de estudios la UNAM, afortunadamente tuve la dicha de formar parte de su matrícula estudiantil, me lleno de conocimiento, me regalo bastos momentos de felicidad y asombro, conocí personas increíbles y admirables como mis profesores y por supuesto amigos, a los cuales les agradezco que pudieran hacer de los días estresantes y difíciles, un poco más llevaderos, jamás olvidare las risas en los laboratorios y salones de clases, siempre estaré orgullosa de ser zaragozana.

A mi madre, no tengo las palabras suficientes para agradecerte todo, jamás habría llegado hasta donde estoy ahora si no fuera por ti Rosita de mi corazón. Gracias por trabajar incasablemente porque nunca nos faltara nada a mí y a mis hermanas, gracias por todos tus consejos y palabras de aliento, gracias por escuchar todas mis historias escolares y madrugar para asegurarte de que tomara el camión, gracias porque siempre fuiste tan comprensiva con este rollo de la titulación y por darme ánimos para seguir adelante con esto, te amo ma y por fin, ya quedo la interminable tesis.

A mi padre, ¡ay mi viejito!, tu fuiste mi principal inspiración para estudiar esta carrera que tanto amo, gracias a ti crecí amando la naturaleza y a ver en lo cotidiano cosas asombrosas. Gracias por todas tus enseñanzas y por compartirme ese amor al conocimiento. Siempre estaré orgullosa de ser tu hija, te ama por siempre, tu picus.

A mi esposo, Braulio, eres el regalo más grande que me tenía deparado la vida, quien diría que nuestra historia comenzó justo en el laboratorio donde nació este trabajo, tu más que nadie viviste este proceso de ir y venir a mi lado, estuviste conmigo en la última etapa de este trabajo y fuiste ese impulso que necesitaba para finalizarlo y no flaquear, gracias por estar conmigo en todo momento, por ser el mejor amigo que necesitaba, un gran tutor y mi compañero de vida.

A mis hermanas, las simias más sabias, gracias por todos sus consejos y apoyo a lo largo de la carrera.

A mi tía Babi que es uno de los pilares más importantes en mi vida, gracias infinitas por todo el apoyo que no solo me brindado a mí, si no a mi mami y a mis hermanas, gracias porque sin usted yo no habría podido terminar mi carrera universitaria, por procurarme siempre desde que tengo memoria y amarme incondicionalmente como a una hija.

Y por supuesto a mi compañera de tesis Kari que, a pesar de que nuestras vidas dieron mil vueltas y paso de todo después de que salimos de la carrera, nunca se rajó y sacamos esto adelante juntas.

De Karina

A la Mtra. Maricela y la Dra. Mónica, Muchas gracias por ofrecerme las mejores oportunidades y ayudarme a crecer como profesional.

A Nash, gracias por ser mi equipo y no rendirte a pesar de todo, de corazón te deseo lo mejor del éxito.

A mis padres Lena, Enrique y Gil, a mi abue Vicky y a mis hermanos. Es imposible agradecer todo el cuidado y el amor incondicional que recibo día a día, gracias por guiarme e inspirarme a dar lo mejor de mí, para hacer las cosas con dedicación y sobre todo con amor.

A Elyn, mi niña, desde el primer día me ofreciste la amistad más increíble, sincera y amorosa que podría existir, aprender y crecer de la mano contigo es de lo más valioso que tengo en mi vida, te agradezco infinitamente tu inmenso apoyo, comprensión es inspiración a ser la versión que más me ha gustado de mí misma, sin duda eres una pieza indispensable para lograr todo lo que tengo y lo que ahora soy.

A Isaac, mi gran simbiosis en este ciclo que ahora culmina, tu más que nadie sabe todo lo que esta etapa ha significado para mí y siempre he estado muy agradecida por el rol que has tenido desde entonces como mi animador más presente y entusiasta, gracias por evolucionar a mi lado y compartir conmigo la perspectiva que como biólogos nos caracteriza, gracias por formar parte de mí, ATE.

A mis amigos, Toño, Axel, Ximena, Aida, Kevin. Muchas gracias por estar siempre conmigo a pesar del tiempo y las circunstancias, por creer en mí, cuidarme, procurarme y hacer de mi vida lo más divertido en todo momento.

Muchas gracias a todos y cada uno de ustedes, porque puedo avanzar sin miedo alguno sintiéndome acompañada y rodeada de mucho amor, porque me enseñaron a verme y creer en mí, así como ustedes siempre lo han hecho, les prometo que esto es sólo el inicio de todo lo que es por y para ustedes.

CONTENIDO GENERAL

	Pg.
1. Resumen	7
2. Introducción	8
3. Marco teórico	9
3.1 Antecedentes	9
3.2 Generalidades	10
3.2.1 Cencas hidrográficas	10
3.2.2 Ríos	13
3.2.3 Contaminación	17
3.2.4 Procesos de autodepuración	18
3.2.5 Calidad de agua	21
3.2.6 Relaves mineros	25
4. Zona de estudio	25
4.1 Ubicación	25
4.2 Clima	26
4.3 Fisiografía	26
4.4 Hidrología	27
4.5 Contexto socioeconómico	27
4.6 Uso de suelo	28
4.7 Flora y fauna	28
5. Identificación del problema	29
6. Justificación	29
7. Objetivos	30
7.1 Objetivo general	30
7.2 Objetivos particulares	30
8. Método	31
8.1 Trabajo de gabinete	31
8.2 Trabajo de campo	31
8.3 Trabajo de laboratorio	35
8.4 Índices de contaminación	36
8.4.1 Índice de contaminación por mineralización	36
8.4.2 Índice de contaminación por materia orgánica	37
8.4.3 Índice de contaminación por sólidos suspendidos	37
8.4.4 Índice de contaminación trófico	38
9. Resultados	38
10. Discusión	57
11. Conclusión	70
12. Referencias	72
13. Anexo: Tabla de resultados	76

14.	Anexo 2: Tablas de concentraciones y graficas para el cálculo de los ICO.	77
-----	---	----

CONTENIDO DE FIGURAS

		pg
Figura 1	Relaciones entre el sistema social y la cuenca hidrográfica	11
Figura 2	Impactos acumulados de las actividades humanas en una cuenca hidrográfica	12
Figura 3	Orden de los sistemas fluviales	16
Figura 4	Zonas de influencia de un vertido.	19
Figura 5	Mapa de georeferenciación de los puntos de muestreo en el río Cacalotenango	26
Figura 6	Río Cacalotenango	33
Figura 7	Promedio diario de la temperatura en el río Cacalotenango	39
Figura 8	Concentración de grasas y aceites en el río Cacalotenango	39
Figura 9	Demanda bioquímica de oxígeno en el río Cacalotenango	40
Figura 10	Promedio diario de nitrógeno total en el río Cacalotenango	40
Figura 11	Promedio diario de fósforo total en el río Cacalotenango	41
Figura 12	Promedio de pH en el río Cacalotenango	42
Figura 13	NMP de coliformes totales en el río Cacalotenango	43
Figura 14	Promedio diario de alcalinidad en el río Cacalotenango	44
Figura 15	Promedio diario de dureza total en el río Cacalotenango	44
Figura 16	Oxígeno disuelto en el río Cacalotenango	45
Figura 17	Promedio diario de cloruros en el río Cacalotenango	46
Figura 18	Concentración de SDT en el río Cacalotenango	47
Figura 19	Concentración de SST en el río Cacalotenango	47
Figura 20	Concentración de SAAM en el río Cacalotenango	49
Figura 21	Promedio diario de nitrógeno amoniacal en el río Cacalotenango.	50
Figura 22	Promedio diario de nitrógeno orgánico en el río Cacalotenango	51
Figura 23	Promedio diario de sulfatos en el río Cacalotenango	52
Figura 24	Conductividad en el río Cacalotenango	53
Figura 25	Caudal en las diferentes estaciones de referencia del río Cacalotenango	53

Figura 26	Resultados finales de los cuatro índices de contaminación en las dos épocas del año	56
Figura 27	Concentración de nitritos y nitratos en octubre	60
Figura 28	Concentración de nitritos y nitratos en noviembre	60
Figura 29	Dinámica de concentraciones alcalinidad y acidez en octubre	64
Figura 30	Dinámica de concentraciones alcalinidad y acidez en noviembre	65
Figura 31	Relación de dureza total y dureza de calcio en octubre	67
Figura 32	Relación de dureza total y dureza de calcio en noviembre	68

CONTENIDO DE IMÁGENES

		pg
Imagen 1	Material vegetal a la orilla del río Cacalotenango	58
Imagen 2	Grasas y aceites observadas en el río Cacalotenango	59
Imagen 3	Desechos urbanos a la orilla del río Cacalotenango	62
Imagen 4	Talud que da directo al río desde el relave El Fraile	63
Imagen 5	Espumas presentes en el río Cacalotenango	63
Imagen 6	Ingreso de sólidos al río Cacalotenango	66

CONTENIDO DE TABLAS

		pg
Tabla 1	Clasificación de ríos	15
Tabla 2	Indicadores de calidad del agua	22
Tabla 3	Contexto socioeconómico de los sitios de referencia	28
Tabla 4	Parámetros que se realizan con muestras simples	33
Tabla 5	Parámetros que requieren muestras conservadas	34
Tabla 6	Parámetros realizados in situ	34
Tabla 7	Parámetros realizados en el laboratorio	35
Tabla 8	Parámetros añadidos al diseño experimental	36
Tabla 9	Intervalos de valores obtenidos de cada parámetro en las dos épocas del año	54
Tabla 10	Valores totales obtenidos en el ICOMI	54
Tabla 11	Valores totales obtenidos en el ICOMO	55
Tabla 12	Valores totales obtenidos en el ICOSOS	55
Tabla 13	Niveles tróficos del río obtenidos de ICOTRO	55
Tabla 14	Resultados finales de los cuatro índices de contaminación en las dos temporadas del año	55

1. Resumen

Los ríos son sistemas dinámicos que generan importantes servicios ecosistémicos, sin embargo, las actividades antropogénicas los han deteriorado, alterando su estructura, y funciones, por lo que es necesario la valoración de su calidad, entendida como la evaluación química, física y biológica. La presente investigación, tuvo como objetivo evaluar la calidad del agua del río Cacalotenango en el tramo El Fraile-Taxco El Viejo, así como identificar los tipos de descarga y su posible origen en los diferentes sitios de referencia, conforme a los indicadores de calidad de agua, para analizar la dinámica de autodepuración durante las temporadas seca y húmeda del año, utilizando los índices de contaminación propuestos por Ramírez (1997).

El río Cacalotenango está catalogado como *maduro de quinto orden*; su morfología es recta con estabilidad estática y transporte depositante mixto, se ubica al suroeste del municipio de Taxco de Alarcón en la porción norte del estado de Guerrero y su región superior se ubica en la localidad de El Fraile, atravesando zonas impactadas por depósitos mineros y localidades como Santa Rosa, Dolores y Taxco El Viejo. Pertenece a la subregión Medio Balsas de la Región Hidrológica (RH) No. 18 y a la región administrativa bIV Balsas, la cual ocupa una extensión territorial de 118 268 km².

Los registros obtenidos muestran una disminución importante del caudal del río, lo que influye considerablemente en el incremento de la contaminación química, física y biológica; es relevante la presencia de compuestos inorgánicos, derivada de la erosión de los taludes del relave “El Fraile”, lo cual, afecta la dinámica del río, ya que, al disminuir el caudal, disminuye también su capacidad de amortiguamiento y autodepuración. Por lo que es necesario la aplicación correcta inmediata de la legislación ambiental a los pasivos ambientales generados por residuos mineros, esto para proteger los sitios y ecosistemas afectados, así como una mayor difusión para la educación ambiental en la zona, con el fin de que los pobladores participen y tengan conciencia de un correcto cuidado y manejo de su entorno, además es recomendable la aplicación de índices de calidad del agua, ya que se ahorra tiempo de análisis con la síntesis de información, arrojando la principal problemática que presentan este tipo de cuerpos de agua, ayudando así a agilizar la toma de decisiones y que se pueda dar prioridad a ciertas políticas públicas.

2. Introducción

Los ríos son sistemas dinámicos que generan importantes servicios ecosistémicos ya que funcionan como barreras, corredores, fuentes y sumideros. Sin embargo, las actividades antropogénicas en diferentes regiones del país los han contaminado, alterando su estructura, y funciones, disminuyendo los servicios ambientales de los cuales depende la población. Debido a su importancia, estos sistemas deben ser objeto de protección y valoración de su calidad, química, física y biológica con relación a su calidad natural por efecto de la actividad humana y por sus usos posibles (Torres y Patiño, 2009; Espinosa, 2014).

Los efectos que causa la contaminación de las fuentes de abastecimiento de agua están relacionados con el agotamiento del recurso y que cada vez se disminuya la calidad de este, trayendo como consecuencia la pérdida de la biodiversidad acuática existente. Cuando se vierten contaminantes antropogénicos que rebasan el nivel de autopurificación del cauce, las fuentes de suministro de agua se ven amenazadas (Almazán, *et al.*, 2016).

Guerrero es uno de los estados de la república mexicana que presenta un deterioro ambiental importante, en cuanto al agua, los problemas son causados por las descargas de aguas residuales, la degradación de sus acuíferos, pérdida de bosques, la contaminación de sus cuencas hidrográficas, el uso excesivo de agroquímicos en zonas agrícolas y la presencia de metales tóxicos de origen minero (Almazán, *et al.*, 2016).

Los trabajos de restauración de relaves mineros y drenaje ácido de mina de la unidad minera de Taxco iniciaron en el año de 2016, los cuales consistieron en la instalación de un sistema piloto de tratamiento para lixiviados mediante barreras geoquímicas con el fin evitar la erosión recubriéndose con *material de préstamo* (rocas calizas y dolomitas) (Romero, 2016). Estos trabajos han tenido incidencia sobre la calidad del agua del río Cacalotenango ya que en sus márgenes se observa una gran cantidad de *material de préstamo*, el cual, se deslava con el agua de las lluvias.

La presente investigación tiene como objetivo evaluar la calidad del agua del Río Cacalotenango en el tramo El Fraile-Taxco El Viejo para identificar los tipos de descarga y su posible origen en los diferentes sitios, conforme a los indicadores de calidad de agua.

3. Marco teórico

3.1 Antecedentes

La Unidad Minera de Taxco (UMT) históricamente se caracterizó por su producción de plata. A partir de las dos primeras décadas del siglo XX con la introducción del proceso fisicoquímico de flotación, se convirtió en un importante productor de Zinc (Zn) y Plomo (Pb). La industria minera ha generado gran cantidad de desechos mineros o relaves, que se definen como lodos residuales que se originan durante el proceso de beneficio del mineral económicamente aprovechable (Gómez, *et al.*, 2010). Los relaves "La Concha" y "El Fraile" se encuentran a 12 km aproximadamente del Suroeste de la ciudad de Taxco, ambos resguardan relaves originados desde 1940 a 1970 (Gómez, *et al.*, 2010).

Una masa de 15×10^6 metros cúbicos de desechos mineros concentrados en un relave de 20 hectáreas se ha convertido para los habitantes de la localidad El Fraile, desde hace 75 años en un problema de contaminación ambiental ya que este relave ha contribuido con la filtración de los lixiviados y metales pesados en temporada de lluvias a contaminar el río Cacalotenango, provocando que no exista vida acuática (OCMAL, 2015). La población y los mineros de la sección 17 del sindicato del ramo, han persistido ante autoridades gubernamentales estatales y federales para remediar la problemática ambiental, lo que obligó a la empresa dueña del predio Grupo México (GM), a emprender acciones para indemnizar los daños (OCMAL, 2015).

Durante años, el gobierno municipal, Organizaciones No Gubernamentales (ONG), activistas, pobladores y agrupaciones sociales, insistieron para que los relaves sean retirados, sin embargo, las leyes mineras no permiten su reubicación, sino únicamente la aplicación de estrategias ambientales para evitar filtraciones mayores. Francisco Martín Romero, del Instituto de Geología de la UNAM, asesor de GM indicó que el saneamiento del relave se lleva a cabo mediante trabajos que se ejecutan para la estabilidad física del mismo, tales como erosión hídrica y eólica, control de filtraciones, y el impedimento de la dispersión de drenaje ácido en el ambiente, escurrimientos y lixiviados, así como su reintegración al paisaje (OCMAL, 2015). En el año 2015 se comenzó con la hidrosiembra con semillas de la región, un plan piloto para cubrir el relave con una malla de yute. Martín

Romero comunicó que la construcción de veredas en los relaves consiste en el corte del mismo para formar un talud 1:1, dejando una base de cinco metros de ancho para la circulación vehicular. Así mismo, el relleno a volteo y tendido de tierra vegetal en las mesetas y en taludes que confinen y faciliten el crecimiento vegetal y el recubrimiento del *vaso de la presa* (OCMAL, 2015).

3.2 Generalidades

3.2.1 Cuencas hidrográficas

Las cuencas hidrográficas son espacios territoriales delimitados por un parteaguas (parte más alta de la montaña) donde confluyen los escurrimientos (ríos y arroyos), y desembocan en un punto en común denominado *punto de salida de la cuenca*, los cuales pueden ser, un lago o una laguna (formando un sistema cerrado delimitado por montañas denominado cuenca endorreica) o el mar (formando un sistema denominado cuenca exorreica) (Cotler, *et. al.* 2013). En estas regiones existe una interrelación e interdependencia temporal y espacial entre el medio biofísico (estructura geológica y geomorfológica, suelo, agua, cultivos, ecosistemas terrestres y acuáticos, biodiversidad), las instituciones (cultura, organización social, reglas y/o leyes), y los modos de apropiación (tecnología y/o mercados) (Cotler, *et. al.* 2013).

Los asentamientos humanos, generan actividades productivas las cuales causan impactos acumulativos a lo largo de los escurrimientos, los cuales van impactando su calidad, cantidad y temporalidad (Burgos, *et.al.*,2015). La interacción entre el sistema natural y el medio social se da bajo los siguientes aspectos: el medio natural actúa como un sistema de soporte de las actividades de los sistemas sociales; es la fuente de recursos naturales; y finalmente es el receptor de residuos y efluentes (Figura 1) (García, 2002).

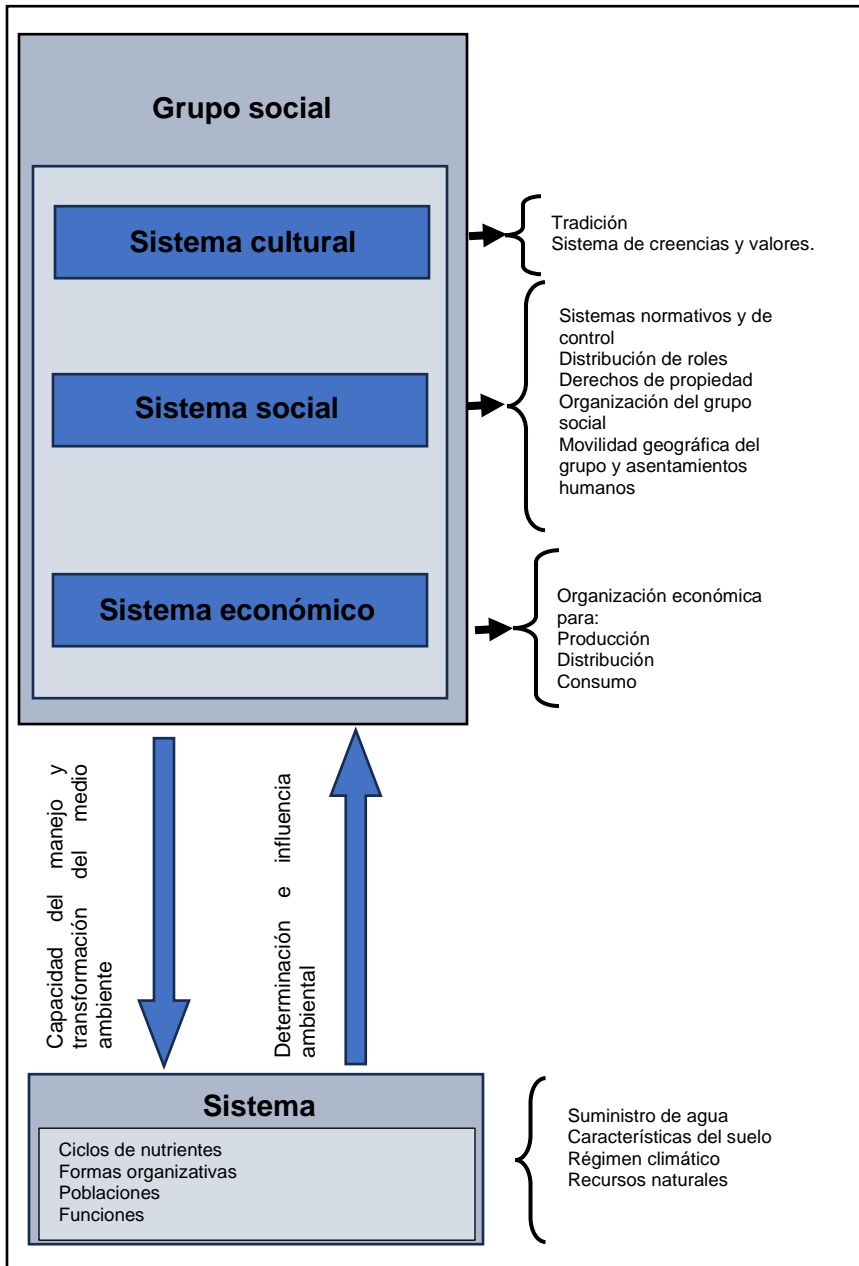


Figura 1: Relaciones entre el sistema social y la cuenca hidrográfica (García, 2002).

Cotler y colaboradores (2013) indican que las cuencas hidrográficas permiten comprender espacialmente el ciclo hidrológico, así mismo, identificar y cuantificar los impactos acumulados derivados de las actividades humanas (contaminantes, sedimentos y nutrientes) a lo largo del sistema hidrográfico, que afectan de manera positiva o negativa la cantidad y la calidad del agua, la capacidad de resiliencia de los ecosistemas y la calidad de vida de sus habitantes.

Es importante destacar que el funcionamiento de una cuenca hidrográfica no es homogéneo en toda su extensión. Tomando en cuenta la dinámica hidrológica, podemos identificar tres zonas funcionales al interior de una cuenca (Figura 2):



Figura 2. Impactos acumulados de las actividades humanas en una cuenca hidrográfica (Cotler, et.al. 2013)

1. Zona de captación, de cabecera o cuenca alta: zonas que colindan al parteaguas en el área altimétrica más elevada; incluye lomeríos y sistemas de montaña. Es donde se forman los primeros escurrimientos (arroyos) una vez que los suelos absorben y retienen el agua según su capacidad.

2. Zona de almacenamiento, de transición o cuenca media: es un área de transporte y erosión, se caracteriza por ser la transición entre la cuenca alta y la cuenca baja, donde los primeros escurrimientos se unen generando diferentes caudales cuyas concentraciones de materia orgánica, contaminantes, y sedimentos, dependerá en función de las actividades realizadas en la subcuenca.

3. Zona de descarga, de emisión o cuenca baja: se caracteriza por albergar ecosistemas importantes, tales como humedales costeros y terrestres, y por ser una zona muy productiva para la agricultura, pues es el sitio donde el río principal desemboca en el mar o en un lago, por lo que es donde se acumulan los impactos de toda la cuenca.

De acuerdo con lo anterior, la gravedad es la principal fuerza que rige lo que naturalmente sucede en una cuenca, todo aquello que se encuentra en la parte alta puede ser arrastrado superficialmente cuenca abajo, originando una clara vinculación entre la parte alta, media y baja. Además; las corrientes de agua superficial no siempre tienen los mismos límites, ya que responden a dinámicas hidrológicas tanto temporal como espacialmente distintas (SEMARNAT, 2013).

La cuenca hidrológica en conjunto con los acuíferos, constituyen la unidad de gestión de los recursos hídricos. La Ley de Aguas Nacionales (DOF, 2016) define a los acuíferos como cualquier formación o conjunto de formaciones geológicas conectados hidráulicamente entre sí, mediante las cuales, transitan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su uso, explotación o aprovechamiento y cuyos límites se establecen regularmente para fines de manejo, administración y evaluación de las aguas nacionales.

3.2.2 Ríos

Los ríos son sistemas acuáticos sobre la superficie terrestre en movimiento unidireccional constante. Se reabastecen de agua con los escurrimientos superficiales, la precipitación, los mantos freáticos y el deshielo de las altas montañas, formando parte del ciclo hidrológico (Biodiversidad mexicana, 2022).

De Vicuña y colaboradores (1983) describen que los ecosistemas están constituidos por dos componentes fundamentales, la biocenosis, formado por todos los seres vivos que habitan en el ecosistema, y la parte no viva, el biotopo, que es el soporte físico. En un río, el biotopo está formado por el cauce por el cual viaja el agua con todos sus elementos minerales y demás características. La constante interacción entre estos componentes que conforman al ecosistema lo vuelven una unidad funcional. La estrecha relación existente entre las comunidades vivientes y su soporte físico, se hace patente cuando las características de este último se ven alteradas.

De Vicuña y colaboradores (1983) explican cómo los ríos se van constituyendo por el

agua que corre a través de las vaguadas de la superficie terrestre. El origen de estos cursos de agua pueden ser los manantiales que dan paso a la generación de arroyos que, cuando se unen, forman un río; en ocasiones también pueden formarse por el deshielo de los glaciares; así como aquellos ríos que se inician en un lago al cual le sirven de desagüe.

Siguiendo con lo anterior, las *aguas de escorrentía* (AE) son aguas superficiales que se deslizan por las vertientes, libremente o encauzadas. Estas AE provienen de grandes precipitaciones que no pueden infiltrarse en la tierra, o de afloramientos de aguas de infiltración. Todas las AE convergen en un sistema de desagüe, formando así, cursos de agua cada vez más grandes y de mayor dinamismo. Por la forma en la que las AE discurren a lo largo de las pendientes, podemos reconocer dos tipos:

- a) Aguas de arroyada: serán aquellas que se deslizan en forma de hilillos más o menos dispersos, arrastran finas partículas minerales del suelo con mayor o menor intensidad de acuerdo a la velocidad de la corriente y a la fuerza con la que dichas partículas estén retenidas al suelo. Además de material sólido, el agua puede transportar otras sustancias que se encuentran disueltas. Formando parte de los fenómenos de erosión o denudación de las masas continentales.
- b) Aguas encauzadas: son las que viajan por causes pequeños y que tienen márgenes laterales bien delimitados (De Vicuña, *et. al.*, 1983).

Siguiendo con las ideas de De Vicuña, *et. al.* (1983), el cauce de un río se define como un canal prolongado modelado por la acción del agua y que permite el movimiento de esta de una manera efectiva y ordenada. El término caudal, se utiliza para denominar el flujo de una corriente de agua y este se define como la cantidad de agua que fluye en un tiempo dado por una sección transversal de un cauce. El caudal varía, fundamentalmente, de acuerdo con el clima.

A lo largo del curso del río, se pueden diferenciar varias zonas, segmentos o regiones atendiendo a la variación espacial de ciertas características, como son: pendiente, velocidad de corriente, temperatura del agua y otros factores físicos, químicos y biológicos (De Vicuña, *et.al.*,1983). Así pues, empezando desde el origen del río o cabecera, distinguimos los tramos que se describen a continuación:

1. Región superior o alta: situada normalmente en la cabecera, en las regiones montañosas de fuertes pendientes, los ríos presentan aspecto de torrentes, con corrientes impetuosas. Las acciones erosivas y de transporte alcanzan aquí sus valores máximos. El agua tiene una temperatura baja.

2. Región media: la fuerza de la corriente es menor al ser las pendientes más suaves; la erosión no es significativa y comienza la sedimentación. De este modo el sustrato se hace menos rocoso y aparece una fina capa de sedimento. La temperatura del agua es normalmente menor a 25 °C.

3. Región baja: se caracteriza por tener una pendiente nula o inapreciable, por lo que la velocidad del agua es muy pequeña en este tramo. El principal proceso llevado a cabo por el río en esta región es la sedimentación o deposición de los materiales arrastrados según el tamaño de las partículas. La temperatura del agua es generalmente alta.

De acuerdo con Márquez (2014), los diferentes tipos de ríos se pueden clasificar con base en su caudal, actividad, morfología, geometría o composición de las aguas (Tabla 1).

Clasificación	Tipos de ríos	Descripción
Por periodo de actividad.	Estacionales	Localizados en zonas donde las estaciones son variables, alternando temporadas de lluvia y de sequías.
	Perennes	Se suelen ubicar en lugares con abundantes precipitaciones. Regularmente no se presentan grandes cambios de caudal durante el año, debido a que cuentan con un aporte constante de agua.
	Alóctonos	Ríos que fluyen a través de zonas áridas, secas o desérticas.
	Transitorios	Ríos que fluyen libremente por varios kilómetros y posteriormente desaparecen durante varios meses, resurgiendo cuando caen lluvias abundantes.
Por geometría o morfología.	Meandriformes	Cuenta con un único canal, pero que, en su camino, tiene o forma una gran cantidad de meandros. Adquiriendo una forma característica sinuosa.

	Anatomosados	Se reconocen por tener diferentes canales y ser capaces de transportar una gran cantidad de materiales y sedimentos.
	Rectilíneos	Este tipo de ríos están formados por un canal principal y pequeñas bifurcaciones inestables.

Tabla 1. Clasificación de ríos.

Para De Vicuña y colaboradores (1983), existen factores que deben ser considerados para clasificar a los ríos, como el número de meandros y bifurcaciones que presenta.

Complementando lo anterior, un sistema diferente para clasificar los tipos de ríos se basa en la manera en que se dividen o ramifican dentro de la cuenca hidrográfica (Figura 3). Esta clasificación es de acuerdo con su orden, de acuerdo con la siguiente jerarquía: ríos de primer orden que son aquellos que no cuentan con tributarios; ríos de segundo orden: se originan a partir de la unión de los de primer orden; ríos de tercer orden: se van a formar al converger los de segundo orden y así sucesivamente (FAO, 1980).

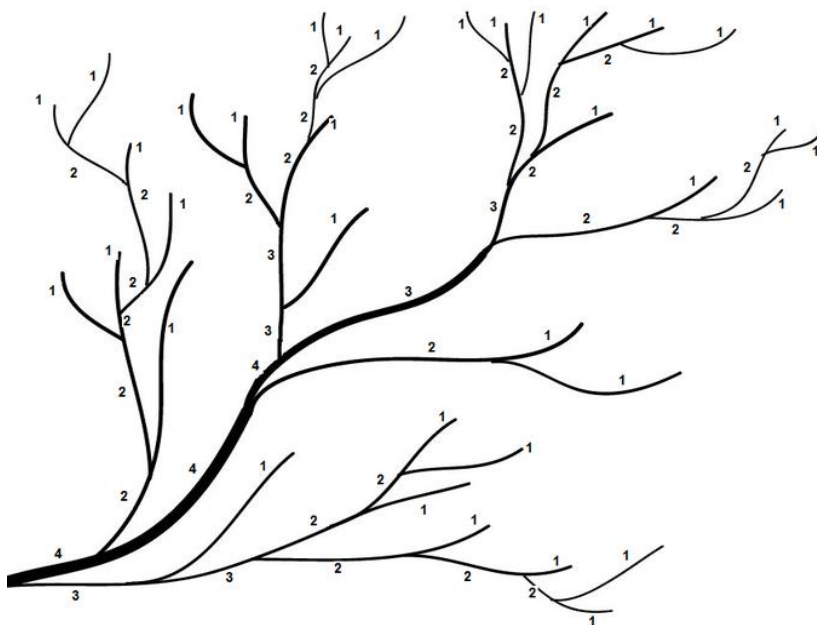


Figura 3. Orden de los sistemas fluviales. Tomado de:
http://www2.udc.cl/~lpalma/documentos/clasificacion_ecologica.html

3.2.3 Contaminación

Según la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), (2022) la contaminación es la presencia de uno o más contaminantes en el ambiente, o de cualquier combinación de éstos, que pueda causar desequilibrio ecológico. Existen diferentes tipos de contaminación, los cuales se describieron en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-001-SEMARNAT-2021 que establecen los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la Nación como:

Contaminantes básicos: Aquellos parámetros y compuestos que se encuentran en las descargas de aguas residuales, los cuales pueden ser estabilizados o removidos mediante tratamientos específicos. Respecto a esta NOM sólo se toman en cuenta los siguientes parámetros: sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, grasas y aceites, demanda bioquímica de oxígeno al quinto día, materia flotante, nitrógeno total (suma de las concentraciones de nitrógeno amoniacal y orgánico, de nitratos y de nitritos), fósforo total, pH y temperatura.

Contaminantes patógenos y parasitarios: son los microorganismos, huevos y quistes de parásitos que pueden estar presentes en las aguas residuales y que representan un riesgo sanitario y ecológico. Dentro de esta NOM sólo se consideran a *Escherichia coli*, huevos de helmintos y enterococos fecales.

Concentración Efectiva Media (CE50): es la concentración de un material, una sustancia o la mezcla entre estos, puras o combinadas en una muestra ambiental o de proceso, que genera efectos adversos al 50% de los organismos que fueron expuestos o en el parámetro biológico que fue analizado para evaluar la toxicidad.

Los residuos de origen orgánico vertidos consumen gran cantidad de oxígeno, debido a que se degradan por la acción bacteriana. Un elemento crítico para la supervivencia de los animales y las plantas acuáticas es el oxígeno, por lo que la falta de oxígeno disuelto es dañina para estos, además de ser un indicador de polución. Algunos organismos acuáticos son más susceptibles que otros a la falta de oxígeno (SIAC, 2002).

Los contaminantes inorgánicos son productos dispersos o disueltos en el agua provenientes de residuos domésticos, industriales, agrícolas o de la erosión del suelo; entre ellos, se destacan los iones nitrogenados que se encuentran en forma de NO_3^- , NO_2^- , NO_4^+ y N orgánico (Armijo, *et.al.* 2019). Estos pueden provocar un descenso en el pH y aumento de concentración de sales; algunos de los elementos pesados (como los metales), tienen propiedades tóxicas, peligrosas al acumularse.

Sudre (2008) sugiere que los impactos de los contaminantes pueden diferir en el tiempo y el espacio, de acuerdo con el tipo de contaminante. De esta manera podemos distinguir:

Contaminantes de efecto inmediato: corresponde a los efectos que surgen una vez que el agua residual fue vertida al medio y es acompañado por fenómenos de mezcla y dilución. Una vez sobrepasado la concentración umbral aparecen los efectos negativos, como la toxicidad aguda; que se define en la NOM-001-SEMARNAT-2021 como el impacto adverso manifestado en los organismos expuestos a las muestras problema en una única ocasión durante un tiempo definido.

Contaminantes con efecto diferido en el espacio: los impactos de un vertido específico se visualizan aguas abajo en el río, lejos de la zona de origen. Como la materia orgánica, por ejemplo, que provoca una disminución en los niveles de oxígeno disuelto (OD) aguas abajo.

Contaminantes con efecto diferido en el tiempo: el impacto no se origina de manera inmediata, éste va a estar sujeto a fenómenos de acumulación y a la generación condiciones específicas en el sistema acuático (Sudre, 2008).

3.2.4 Procesos de autodepuración.

Los ríos pueden asimilar ciertas cantidades de contaminantes antes de que sus impactos negativos sean detectables. Generalmente, mientras más rápidos, caudalosos y más lejanos se encuentren los cursos de agua y no hayan sido explotados, mayor será su

capacidad de tolerar cantidades considerables de aguas residuales; pero es importante destacar que la autodepuración de un río tiene sus límites, y que su capacidad para limpiarse a sí mismo puede verse comprometida si se introduce una gran de contaminantes ya que se supera su capacidad natural para recuperarse.

Una vez que la contaminación, en múltiples presentaciones, llega al sistema acuático, se produce un fenómeno de autodepuración, en el que se llevan a cabo principios físicos como la sedimentación, flotación y transporte, principios químicos y biológicos (Structuralia, 2017).

Cuando se incorpora una descarga al cauce, si se colectaran muestras de aguas abajo a intervalos establecidos, se puede observar la variabilidad de algunos parámetros indicadores de contaminación a lo largo del río (Sudre, 2008). Por lo que se establecen cuatro zonas de influencia para un vertido (Figura 4):

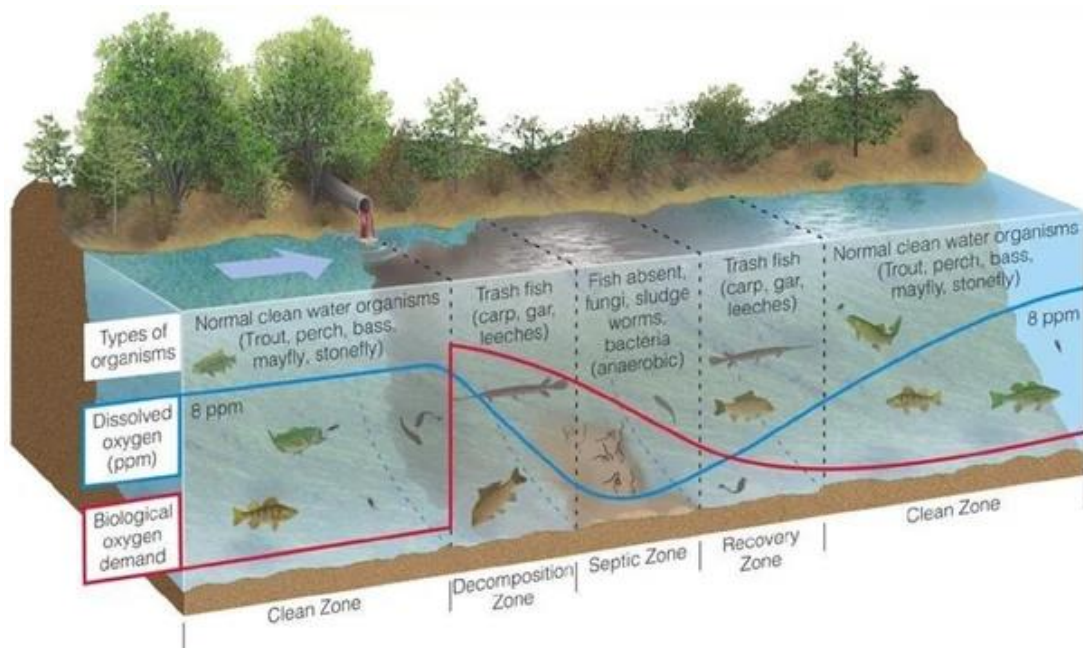


Figura 4. Zonas de influencia de un vertido. Tomado de: <https://blog.structuralia.com/como-se-produce-la-autodepuracion-de-los-rios>.

1. **Zona de degradación:** área aledaña a la incorporación de las aguas residuales al río. Es la zona con mayor concentración de contaminación. Desaparecen animales y plantas; en el fango surgen gusanos tubíficeos, protozoos ciliados y hongos. Es factible la existencia de animales que se alimentan de materia orgánica y que no

requieren mucho oxígeno.

2. **Zona de descomposición activa:** área donde el oxígeno disminuye a niveles mínimos, pudiendo llegar a cero. No existen animales, y los organismos encargados de descomponer la materia orgánica laboran continuamente. Se desprenden gases (hidrógeno, metano, ácido sulfhídrico, nitrógeno, entre otros). Pueden observarse espumas en la superficie.
3. **Zona de recuperación:** área donde aumenta la concentración del oxígeno, el agua es más clara, reaparece la vida acuática macroscópica, disminuye la aparición de algas y hongos. Se pueden localizar sulfatos, fosfatos, carbonatos y nitratos. Se observan animales resistentes.
4. **Zona de agua limpia:** En la corriente natural, el oxígeno disuelto se encuentra cercano a la saturación. Animales útiles para la pesca. Pueden permanecer bacterias patógenas resistentes y compuestos metálicos no alterados debido a los procesos bioquímicos existentes (Sudre, 2008).

No todos los cursos de agua tienen la misma capacidad de autodepuración. Características del río como caudal, temperatura, pendiente, oxigenación principalmente son determinantes de la capacidad de digestión de los detritos orgánicos vertidos (De Vicuña, *et. al.* 1983).

El agua residual porta materia orgánica, inorgánica y microorganismos, los cuales una vez en el agua, se pueden someter a fenómenos físicos descritos a continuación:

Algunos elementos se depositan en el fondo a raíz de la diferencia de densidad con el agua, evitando ser arrastrados por la corriente. Son sólidos decantables de origen tanto orgánico como inorgánico.

Otros compuestos inorgánicos y orgánicos, debido a la corriente y a su densidad similar con el agua, se mantienen en suspensión.

Algunos elementos llegan a la superficie y se concentran en ella después de un tiempo (flotantes, grasas y detergentes) gracias a su densidad baja. En las zonas de la corriente, los microorganismos pueden ser anaerobios, aerobios o facultativos, y adaptan su metabolismo a condiciones de falta o de existencia de oxígeno (Sudre, 2008).

3.2.5 Calidad del agua

La calidad del agua se define socialmente dependiendo del uso que requiera, debido a que cada uso requiere estándares de calidad específicos (PAOT, 2000). De igual forma, desde el punto de vista ambiental, podemos entender la calidad del agua como la condición que debe presentar este líquido para poder mantener el ecosistema equilibrado y para que cumpla objetivos establecidos (calidad ecológica), o bien, como el conjunto de características químicas, físicas y microbiológicas que la definen (Ministerio de Medio Ambiente, 2000).

El termino calidad se entiende como una expresión cabal que es posible estimar a través de diferentes parámetros los cuales reflejan las condiciones y cualidades existentes en el ecosistema acuático, que no únicamente indica el grado de contaminación de sus aguas, sino que también los diversos factores por los que es afectada, como la producción industrial y agrícola, los usos del suelo, el tratamiento que se le da antes de ser vertida nuevamente a los cuerpos de agua y la cantidad presente en ríos y lagos, ya que su capacidad de purificación depende de está (PAOT, 2000; Hernández, 2014).

Desde hace varias décadas se ha propuesto y empleado Índices de Calidad del Agua (ICA), que tienen como objetivo reducir a una expresión numérica las características positivas o negativas de cualquier fuente hídrica (Martínez de Bascarán, 1976, Prat *et.al.*,1986, MOPT, 1992). El propósito de los ICAs es la estimación de un número regularmente entre 0 y 1, o 0 y 100, para definir el nivel de calidad de un cuerpo lótico continental. Con ello se trata de reconocer, de una forma práctica, problemas de contaminación, sin la necesidad de observar individualmente determinadas variables fisicoquímicas. Las ventajas aumentan cuando se evalúa una gran cantidad de ríos, o incluso, si solamente se estudia uno de manera habitual (Ramírez *et. al* 1997).

A principios de los años 70, en México se desarrolló un sistema para calcular de calidad del agua, por lo que se requirió medir parámetros físicos de contaminación y el uso de una escala de medición estandarizada, para interpretar la relación existente entre una gran cantidad de contaminantes y la magnitud del impacto en los diferentes usos de esta.

Dicho sistema se nombró Índice de Calidad del Agua (ICA) y permitía comparar los niveles de contaminación en diferentes espacios, este se define como el grado de contaminación presente en el agua a la fecha de un muestreo, que se expresa en porcentaje de agua pura, por lo que el agua con un alto grado de contaminación tendrá un ICA cercano o igual a 0 y para el agua en excelentes condiciones un valor de 100% (SEMARNAT, 2015).

El ICA mexicano consideró 18 parámetros con pesos relativos (W_i) cada uno de ellos según la importancia que se le adjudica a cada uno en la evaluación total (Tabla 2).

Tabla 2.

PARÁMETRO	PESO (W_i)	PARÁMETRO	PESO (W_i)
Demanda Bioquímica de Oxígeno	5.0	Nitrógeno en nitratos	2.0
Oxígeno Disuelto	5.0	Alcalinidad	1.0
Coliformes Fecales	4.0	Color	1.0
Coliformes Totales	3.0	Dureza Total	1.0
Sustancias Activas al Azul de Metileno	3.0	Potencial de Hidrógeno	1.0
Conductividad eléctrica	2.0	Sólidos Suspendidos	1.0
Fosfatos Totales	2.0	Cloruros	0.5
Grasas y Aceites	2.0	Sólidos disueltos	0.5
Nitrógeno Amoniacal	2.0	Turbiedad	0.5

Tabla 2. Indicadores de la calidad del agua (SEMARNAT, 2015)

A lo largo de los últimos años, el crecimiento poblacional e industrial ha impactado los cuerpos de agua con sus descargas, las cuales traen consigo una gran cantidad de contaminantes tóxicos como metales pesados y los compuestos orgánicos, los cuales anteriormente no estaban considerados en el ICA, por lo que la evaluación que se lleva a cabo actualmente con dicho índice es parcial y no representa la realidad (SEMARNAT, 2015).

Actualmente, para evaluar la calidad del agua se ha decidido utilizar tres parámetros indicadores de la misma, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), utilizada para medir la materia orgánica biodegradable; Demanda Química de Oxígeno (DQO), la cual mide la materia orgánica ocasionada por descargas de agua residuales industriales; y Sólidos

Suspendidos Totales (SST), que tienen su origen en las aguas residuales y la erosión de suelo (CONAGUA, 2018). El incremento de la concentración de estos parámetros trae consigo la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua permitiendo reconocer gradientes que van desde una condición relativamente natural, hasta indicios o aportaciones importantes de descargas de aguas residuales municipales y no municipales, así como áreas con deforestación severa.

Cabe mencionar que el desarrollo de un nuevo ICA, no impide realizar evaluaciones de calidad del agua de forma específica, que incluyen diversos parámetros como la detección de metales pesados o compuestos orgánicos, puesto que se relacionan directamente con los estándares y/o normatividad nacional e internacional (SEMARNAT, 2015).

Si bien el desarrollo de los ICA es de suma importancia en el contexto ecológico y medio ambiental, también cuenta con debilidades, ya que al concentrarse en un único número la cualidad de un cuerpo de agua, existe una considerable pérdida de información (Behar *et al.* 1997), lo cual lo convierte en un obstáculo importante para su aplicación, ya que no se refleja la condición real y los cambios que se suceden sobre el caudal (Ramírez *et. al* 1997).

Debido a las limitaciones presentes en los ICA, Ramírez y colaboradores (1997), formularon cuatro índices de contaminación (ICO) de fácil estimación matemática y gráfica, complementarios en sentido ecológico, que permiten precisar problemas ambientales calificando diferentes cualidades del agua:

- Selección de variables de variables químicas y físicas
- Asignación de valores de calidad (0 al 1) dependiendo de las concentraciones de las variables, o establecimiento de una relación entre índice variable (ecuación), con base en parámetros o legislaciones definidos por diversos autores para diferentes usos del agua.

El resultado obtenido de estos análisis dio origen a los siguientes índices de contaminación: índice de Contaminación Mineral (ICOMI) o de mineralización, Índice de Contaminación de Materia Orgánica (ICOMO) o de contaminación orgánica, Índice de Contaminación de Sólidos Suspendidos (ICOSUS) relativo a los sólidos suspendidos, e Índice de Contaminación Trófico (ICOTRO) o eutrofia el sistema, como se describen a continuación.

Índice de Contaminación por Mineralización (ICOMI): Se basa en la concentración de cationes de calcio y magnesio y alcalinidad que se expresa a través del contenido de los aniones de carbonato y bicarbonato. Es el valor promedio de los índices de cada una de las tres variables elegidas (dureza, sólidos disueltos y conductividad eléctrica) las cuales se definen en un rango de 0.0 -1.0; índices próximos a cero (0.0) reflejan muy baja contaminación por mineralización, e índices cercanos a uno (1.0), lo contrario.

Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO): Es el valor promedio de los índices de cada una de las tres variables elegidas (demanda bioquímica de oxígeno, coliformes totales y porcentaje de saturación del oxígeno).

Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos (ICOSUS): Este índice trabaja con la concentración de sólidos suspendidos, que se definen como partículas sólidas orgánicas o inorgánicas que se mantienen en suspensión en una solución.

Índice de Contaminación Trófico (ICOTRO): Se calcula sobre la base de la concentración de Fósforo Total en mg L^{-1} . El fósforo total incluye distintos compuestos como diversos ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico. La determinación se hace convirtiendo todos ellos en ortofosfatos que son los que se determinan por análisis químicos.

Es necesario conocer la calidad del agua para mantener un equilibrio en los elementos naturales que actúan en el ciclo hidrológico, así como permitir la protección y preservación de los ecosistemas acuáticos, garantizar un régimen de caudal ecológico dado que, no existe una normatividad específica al respecto, por lo que, el régimen de caudal no ha sido

considerado para que se puedan otorgar concesiones y asignaciones, así como los permisos de descarga (NMX-AA-159-SCFI-2012).

3.2.6 Relaves mineros

Los residuos mineros, conocidos como relaves, son un subproducto de los procesos de recuperación de metales a partir de minerales polimetálicos después de triturar las rocas originales que los contienen y mezclar con agua y pequeñas cantidades de reactivos químicos las partículas que se forman, lo que facilita la liberación de metales presentes. La disposición final de estos es la causa de diversos problemas ambientales, entre los que se encuentran la pérdida de cobertura vegetal, la creación de estructuras poco consolidadas susceptibles a la erosión eólica e hídrica, la generación de acidez y la liberación de elementos potencialmente tóxicos debido a la exposición de los minerales en los yacimientos a un ambiente oxidante. La mayoría de los relaves se encuentra como una mezcla líquida de materiales finos o en forma de lodos y actualmente son acumulados en grandes terrenos conocidos como presas de jales, cuya obra de ingeniería es únicamente la cortina de retención formada por el propio descapote del suelo (Medel, 2009).

La peligrosidad de los relaves se estima en función de la capacidad de generar el drenaje ácido de mina (DAM), que se origina a partir de la oxidación de pirita; lo cual genera aguas ácidas, con concentraciones altas en sulfatos, metales y metaloides, en forma de iones disueltos. En la literatura científica el DAM ha sido calificado como un factor crítico causante de la contaminación en los ecosistemas naturales (Corrales & Marín, 2013).

4 . Zona de Estudio

4.1 Ubicación

El río Cacalotenango, se ubica al suroeste del municipio de Taxco de Alarcón en la porción norte del estado de Guerrero (Figura 5), ocupa una extensión territorial de 341 Km², colinda al norte con los municipios de Tetipac y Pilcaya, al sur con Iguala de la Independencia, al este con Buenavista de Cuéllar y el Estado de Morelos, al suroeste con Teloloapan, al oeste con Ixcateopan y Cuauhtémoc y al noroeste con Pedro Ascencio.

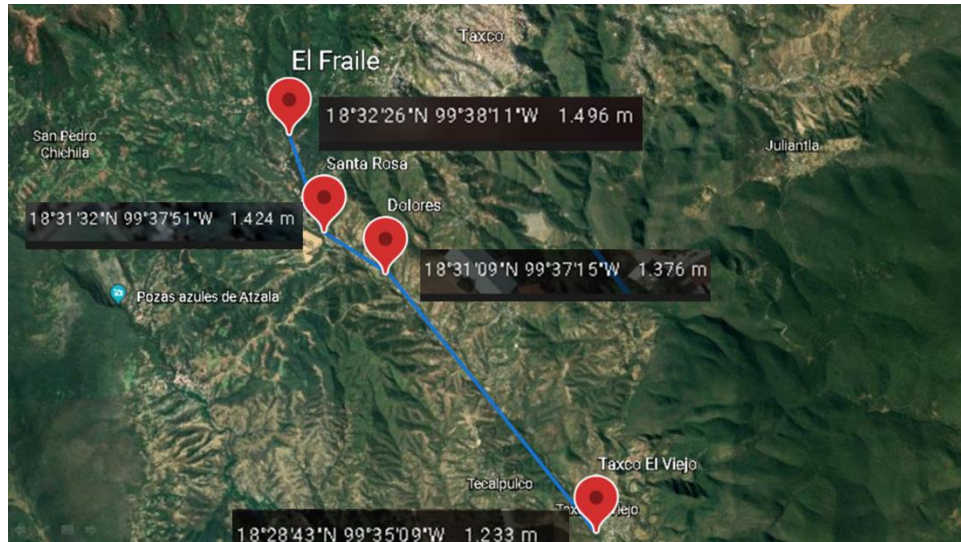


Figura 5. Mapa de georreferenciación de los puntos de muestreo en el río Cacalotenango, Elaborado a partir de Google Earth

4.2 Clima

Con variaciones de semicálido subhúmedo a templado subhúmedo con una muy bien definida época de lluvias de una duración de 4.4 meses que va de finales de mayo a principios de octubre, acentuándose a finales de junio con un promedio de 165 mm. La duración del periodo del año sin lluvia es de 7.6 meses que comprende desde principios de octubre a finales de mayo, siendo este último el que presenta la temperatura más cálida. La temperatura mínima registrada anualmente es de 17.3 °C y la máxima de 26.6 °C (Dótor *et al.*, 2014).

4.3 Fisiografía

La hondonada del río Balsas está delimitada por dos provincias fisiográficas: la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) al norte con el 32% de la superficie, La Sierra Madre del Sur al sur con una superficie del 67.8% y una subprovincia geológica: la Sierra Norte de Oaxaca al oriente. La FVT cuenta con formaciones integradas por calizas, esquistos y areniscas del Cretácico Inferior, las cuales estuvieron sujetas a levantamientos por plegamientos y a grandes fracturas por donde se colaron materiales ígneos, que a fines del Mesozoico y principios del Cenozoico, cubrieron una ancha faja que modifico profundamente el relieve (INECC, 2007).

4.4 Hidrología

Pertenece a la subregión Medio Balsas de la Región Hidrológica (RH) No. 18 y a la región administrativa IV Balsas, la cual ocupa una extensión territorial de 118 268 km², su precipitación normal anual es de 947 mm, el escurrimiento natural medio superficial interno es de 16 798 hm³/año, el escurrimiento medio superficial total es de 16 798 hm³/año y la precipitación pluvial normal anual es de 962 mm (CONAGUA, 2018). Comprende desde la estación hidrométrica San Juan Tetelcingo hasta la estación La Caimanera. El río Cacalotenango está catalogado como maduro de quinto orden; su morfología es recta con estabilidad estática y transporte depositante mixto. Su región superior se ubica en la localidad del Fraile, atravesando zonas impactadas por depósitos mineros.

4.5 Contexto socioeconómico

La población de la RH No. 18 Balsas está ampliamente distribuida en pequeñas localidades de aproximadamente 2,500 habitantes, aunque también existen concentraciones urbanas grandes como la Ciudad de Puebla de Zaragoza, parte de la Ciudad de México, Taxco, entre otras. En cuanto se refiere al agua, existen serios problemas para su dotación ya que la distribución de la población (concentración excesiva de asentamientos humanos) implica muchos esfuerzos para la localización, explotación de fuentes de abastecimiento y construcción de redes de distribución de agua potable, así como la recaudación y tratamiento de las aguas residuales. En la subregión hidrológica medio Balsas la población económicamente activa total es de 458,263 personas, de las cuales 111,540 pertenecen al sector primario (Tabla 3), en actividades como la agricultura, la extracción de recursos naturales y la minería. Otras 111,298 personas pertenecen al sector secundario y 213,888 al sector terciario (DOF, 2016).

Mediante el DOF del 14 de julio de 1923, el poder Ejecutivo Federal-Estados Unidos Mexicanos-Secretaría de Agricultura y Fomento-Dirección de Aguas-Departamento de Concesiones-Sección de Tramitación, autorizan a los vecinos de La Cuadra, El Fraile, Santa Rosa y Dolores, localidades de Taxco de Alarcón en el estado de Guerrero para aprovechar el agua del río Cacalotenango en actividades de riego (DOF, 1923).

Tabla 3.

Localidad (número de habitantes)	Principal actividad económica	Fuente de abastecimiento de agua	Problema socioeconómico principal	Disponibilidad red pública drenaje	Viviendas con agua entubada
El Fraile (510)	Agricultura	Arroyo, río, lago o laguna	Carencia de agua y mala calidad	No	Reservado por confidencialidad
Santa Rosa (468)	Agricultura	Arroyo, río, lago o laguna	Carencia de agua y mala calidad	No	Reservado por confidencialidad
Dolores (666)	Agricultura	Canal o presa	Carencias o mal estado del drenaje	No	15
Taxco El Viejo (3 345)	Producción de artesanías y manufactura	Arroyo, río, lago o laguna	Desempleo, empleo deficiente	No	495

Tabla 3. Contexto socioeconómico de los sitios de referencia, (INEGI, 2010-2015).

4.6 Uso del suelo

El mayor porcentaje del suelo está conformado por bosque (cultivado, encino, encino-pino, oyamel, pino, pino-encino, táscate y mesófilo de montaña) concentrado en las grandes elevaciones ocupando el 27.59%. Para fines agrícolas es utilizado el 26.29% (30,844.33 Km²) de la región hidrológica, cabe mencionar que el 79% de esta área no está bajo riego, el 2% se riega eventualmente y el 19% es de riego (5,753.29 Km²), lo equivalente al 4.9% de la superficie total de la región hidrológica. La selva (baja caducifolia, baja espinosa y mediana subcaducifolia) abarca un 23.07% del territorio total de la región hidrológica (DOF, 2016).

4.7 Flora y fauna

La vegetación que está presente en la localidad es la selva baja caducifolia, caracterizada así por el cambio de follaje en la temporada de estiaje, algunas de las especies frecuentemente encontradas en este tipo de vegetación son: *Lysiloma bahamence*, *Bursera spp*, e *Ipomea spp*. En cuanto a la fauna aún subsisten especies delicadas como: venado, conejo, mapache, tejón, zorrillo, armadillo, rata, águila, gavilán,

paloma, pájaros, zopilote, tórtola, iguana, culebra, víbora de cascabel, lagartija, alacrán, entre otras (Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México, S/A).

5. Identificación del problema

La erosión del depósito de material químico (relaves mineros y sus recubrimientos) producida por las precipitaciones en la parte alta del río, así como la descarga de desechos urbanos en la parte baja del mismo, ocasiona cambios drásticos en las condiciones físicas y químicas del agua, impactando su calidad y representando un alto riesgo para la dinámica del ecosistema hídrico.

6. Justificación

Como sociedad se tiene un serio problema al dar por sentado la disponibilidad y calidad del agua. Mientras tanto, uno de los riesgos globales de mayor importancia y que fue incluido en el Foro Económico Mundial fue la crisis debido al gran impacto que generaría en la salud humana, producción de alimentos, los conflictos sociales y en el equilibrio y correcto funcionamiento de los ecosistemas (WEF,2020).

Pero no se necesita ver al futuro para dimensionar estos riesgos y sus impactos, de hecho, en el año 2021 se ha hecho notorio el tamaño de los impactos económicos y sociales causados por la crisis hídrica, lo que obliga a cambiar y evolucionar la manera en que se piensa la gestión del agua. La crisis que hoy se vive es una oportunidad para esta evolución. Una de las fallas identificadas en el mundo como el origen de grandes conflictos es que se considera la disponibilidad de agua estática en el tiempo (p. ej. a lo largo del año), sin tomar en cuenta que los cambios en el clima traen consigo innumerables consecuencias, una de ellas por ejemplo son las sequías cada vez más intensas y severas lo que hace evidente la falta de comprensión sobre cómo responde la disponibilidad de agua a diferentes procesos físicos (p. ej. cambios en el uso del suelo, deforestación, la extracción inmoderada de agua). Por esta razón, es necesario ver al agua como un bien común de interés público de todos los mexicanos (Pedrozo, 2022).

En México el desabasto de agua ha sido un problema desde hace muchos años atrás, no obstante, el abastecimiento sigue siendo limitado, sobre todo para centros de

población menores a 10,000 habitantes, en los que el abastecimiento del recurso puede ser inexistente o limitado a unas horas al mes. Existe un rezago aun mayor al hablar del saneamiento, ya que si bien los centros de población pequeños y localidades remotas, existe el reto para el actual paradigma nacional de abastecimiento de agua y saneamiento, se tienen que considerar opciones tecnológicas que permitan mejorar las condiciones de vida de esta población y para ello, es necesario la elaboración de estudios de esta índole en donde se evalúe la calidad del agua.

Los ICA tienen como propósito simplificar en una expresión numérica las características positivas o negativas de cualquier fuente hídrica (Martínez, 1976; Prat et al., 1986; MOPT, 1992) para reconocer de una forma ágil problemas de contaminación, sin tener que recurrir a la observación de cada una de las numerosas variables físicas, químicas y biológicas existentes, esto los vuelve de gran ayuda si se pretende evaluar un cuerpo de agua de forma periódica (Ramírez *et. al* 1997), dada la gran cantidad de cuerpos de agua de interés en México resulta necesario realizar estudios que caractericen las condiciones particulares, y aquellos que ayuden a entender las afectaciones que ocurren en los ciclos biogeoquímicos de los ecosistemas, tanto por actividades productivas como por cambios de uso del suelo.

7. Objetivos

7.2.1 Objetivo general

Identificar el tipo de contaminación en los diferentes sitios de referencia del río Cacalotenango en su tramo El Fraile-Taxco el Viejo, de acuerdo con los indicadores de calidad de agua, para analizar la dinámica de autodepuración del río en ambas épocas del año.

7.2.2 Objetivos particulares

- Monitorear la calidad del agua en los sitios de referencia del río, mediante los

indicadores de calidad que permitan identificar los tipos de descarga y su posible origen.

- Examinar los procesos de autopurificación del río, a partir del comportamiento del caudal entre época de lluvia y seca.
- Calcular los índices de contaminación a partir de los resultados de las pruebas realizadas, así como los límites máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-001-SEMARNAT-2021.

8. Método

8.1 Trabajo de gabinete

Se diseñó un plan de muestreo conforme a las normas: NMX-AA-003-1980; NMX-AA-014-1980 y NOM-001-SEMARNAT-1996, de acuerdo con las características del área de estudio y con los objetivos planteados en el trabajo.

8.2 Trabajo de campo

Los cinco muestreos se realizaron en las siguientes fechas:

7 al 9 de febrero; 2 y 3 de mayo; del 29 al 31 de agosto; del 29 al 31 de octubre y del 7 al 9 de noviembre del 2019.

Se diseñó un plan de muestreo con base en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

El tramo del río Cacalotenango se dividió en tres sitios de referencia (Figura 5): El Fraile ($18^{\circ}35.23'97''$ N; $99^{\circ}41.52'10''$ O; 2582 msnm), Santa Rosa ($18^{\circ}31.29'11''$ N; $99^{\circ}37.45'56''$ O; 1430 msnm) y Taxco El Viejo ($18^{\circ}28.41'34''$ N; $99^{\circ}37.45'56''$ O; 1232 msnm), ubicando el punto específico de referencia antes de una caída de agua, para evitar sesgos en la medición de oxígeno disuelto.

Se anotó la hora y la fecha del muestreo. Posteriormente se tomaron parámetros in situ: pH, Temperatura (agua y ambiental) y conductividad eléctrica utilizando el equipo conocido como multiparámetros.

Se registraron los datos del sitio y de las muestras en las cadenas de custodia, así como materiales y reactivos utilizados en campo para realizar un correcto muestreo y conservación de las muestras colectadas.

El caudal se calculó de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996, se empleó el método sección-velocidad y con la siguiente fórmula:

$$VMSi=VMC \times (Qi/Qt)$$

Donde: VMSi = volumen de cada una de las muestras simples “i”, litros.

VMC = volumen de la muestra compuesta necesario para realizar la totalidad de los análisis de laboratorio requeridos, litros.

Qi = caudal medido en la descarga en el momento de tomar la muestra simple, litros por segundo.

Qt= \sum Qi hasta Qn, litros por segundo.

$$Qt = \sum Qi \text{ hasta } Qn, \text{ litros por segundo.}$$

Después, realizaron las mediciones para el cálculo del caudal por el método Sección - Velocidad, como sigue:

1. A los puntos de muestreo se les midió el largo y se dividieron en tres secciones; inicial, media y final. A cada sección se le midió el ancho.
2. A cada ancho se le midieron 5 profundidades.
3. Se midieron 5 velocidades en el tramo delimitado para el muestreo

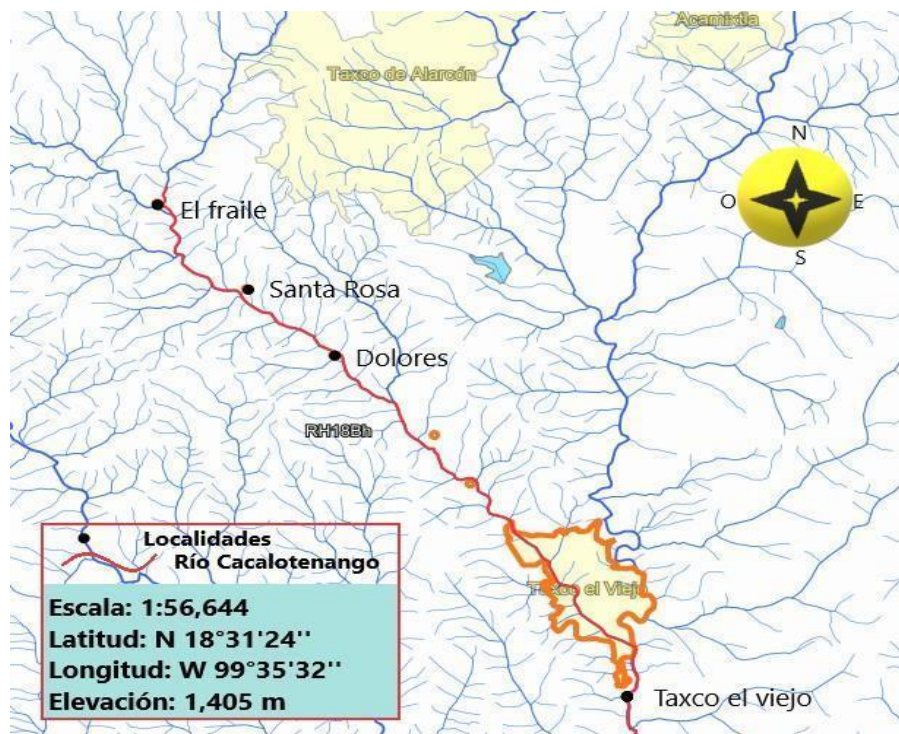


Figura 6. Río Cacalotenango. Imagen, procesada a partir de: Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas, INEGI, 2020

Se colectaron muestras simples de acuerdo con las especificaciones de cada una de las normas oficiales para los parámetros que se describen en la tabla 4:

Prueba	Norma para realizar las pruebas	Material de los recipientes colectores	Tratamiento de los recipientes de muestreo
Coliformes	NMX-AA-42-1987	Frasco de vidrio ámbar con tapa roscada	Estéril pretratado con tiosulfato de sodio
OD	NMX-AA-012-SCFI-2001	Botella Winkler con capacidad de 300mL	Pretratada con agua acidulada
DBO	NMX-AA-028-SCFI-2001	Botella Winkler con capacidad de 300mL	Pretratada con agua acidulada
Grasas y Aceites	NMX-AA-005-SCFI-2000	Frasco de vidrio ámbar de boca ancha	Previamente lavado y enjuagado con hexano

Tabla 4. Parámetros que se realizan con muestras simples.

Finalmente se colectaron tres muestras simples para integrar muestras compuestas destinadas a los parámetros de laboratorio; las cuales fueron colocadas en envases de polietileno de 1.0 L (a excepción de la muestra para color cuyo envase fue de 500 mL) previamente tratados con agua acidulada; y adecuadamente etiquetadas con los siguientes datos: Fecha y hora del muestreo, localidad, número de muestra, muestreador, tipo de muestra, conservador y análisis solicitado.

Las muestras que requerían conservación fueron tratadas de acuerdo con lo establecido en sus normas oficiales como se señala en el Tabla 5:

Prueba	Norma para realizar las pruebas	Tratamiento previo de los recipientes de muestreo	Conservador
Grasas y Aceites	(NMX-AA-005-SCFI-2000).	Enjuague con agua acidulada	H ₂ SO ₄ y CUSO ₄
Fósforo total	(NMX-AA-029- SCFI-2001).	Lavado con extrán y enjuague con agua acidulada	H ₂ SO ₄
Nitrógeno total	(NMX-AA-026-SCFI-2010)	Enjuague con agua acidulada	H ₂ SO ₄
SAAM	(NMX-AA-039-SCFI- 2001)	Lavado con extrán y enjuague con agua acidulada	H ₂ SO ₄

Tabla 5. Parámetros que requieren muestras conservadas.

Después del muestreo se realizaron los parámetros cuyo tiempo límite de análisis es menor a 5 días (Tabla 6):

Prueba	Norma	Tiempo límite de análisis
Coliformes	NMX-AA-42-1987	24 h
OD	NMX-AA-012-SCFI-2001	8h
DBO (Primera etapa)	NMX-AA-028-SCFI-2001	24h
Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001	5 días
Alcalinidad	Método Colorimétrico APHA	24h

Dureza	Método Colorimétrico APHA	24h
--------	---------------------------	-----

Tabla 6. Parámetros realizados in situ.

8.3 Trabajo de laboratorio

Se realizaron los análisis de los siguientes parámetros de acuerdo con lo establecido en las normas oficiales para la determinación analítica y dentro del lapso establecido (Tabla 7):

Prueba	Norma	Tiempo límite de análisis
SST	NMX-AA-034-SCFI-2015	8 días
SSD	NMX-AA-034-SCFI-2015	8 días
DQO	(Reflujo cerrado, Método colorimétrico. APHA)	Sin tiempo específico de análisis
SAAM	NMX-AA-039-SCFI-2001	1 semana
Nitrógeno	NMX-AA-026-SCFI-2010	28 días
Color	NMX-AA-026-SCFI-2010	8 días
Grasas y Aceites	NMX-AA-005-SCFI-2000	28 días
Fósforo	NMX-AA-029-SCFI-2001	28 días

Tabla 7. Parámetros realizados en el laboratorio.

Debido a las condiciones encontradas en la zona de estudio durante el muestreo y a los resultados de los parámetros determinados en octubre, se decidió añadir un nuevo sitio de muestreo: Dolores (18°31'03.6" N; 99°37'06.6" O; 1326 msnm), así como cinco nuevas pruebas con el fin de evaluar con mayor precisión la dinámica del río (Tabla 8):

Prueba	Norma	Tiempo límite de análisis
Dureza de Calcio	Método Colorimétrico APHA	Lo más pronto posible
Acidez	NMX-AA-036-SCFI-2001	24 h
Sulfatos	Método turbidimétrico-APHA	28 días
Nitritos	NMX-AA-099-SCFI-2006	48 h
Nitratos	NMX-AA-079-1986	48 h

Tabla 8. Parámetros añadidos al diseño experimental.

8.4 Índices de Contaminación.

En el presente trabajo se emplearon los índices de contaminación (ICO) esto debido a las limitaciones manifiestas en los ICA. Las fórmulas para su cálculo se elaboraron con base en tablas de concentraciones establecidas y las cuales se graficaron (Anexo 2.) dando como resultado las siguientes formulas:

i. Índice de Contaminación por Mineralización (ICOMI):

$$ICOMI = \frac{1}{3} (I_{Conductividad} + I_{Dureza} + I_{Alcalinidad})$$

Donde:

$$\begin{aligned} I_{Conductividad} &= \text{Log}_{10} I_{Conductividad} \\ &= -3.26 + 1.34 \text{Log}_{10} * \text{Conductividad } (\mu S/cm) \end{aligned}$$

$$I_{Conductividad} = 10^{\text{Log } I_{Conductividad}}$$

Conductividades mayores a 270 ($\mu S/cm$), tienen un índice de conductividad= 1.

$$I_{Dureza} = \text{Log}_{10} I_{Dureza} = -9.09 + 4.40 \text{Log}_{10} Dureza (mg/L)$$

$$I_{Dureza} = 10 \text{ Log}^{I_{Dureza}}$$

Durezas mayores a 100(mg/L), tienen un índice=1

Durezas menores a 30 (mg/L), tienen un índice=0

$$I_{Alcalinidad} = -0.25 + 0.005 [Alcalinidad (mg/L)]$$

Alcalinidades mayores a 250 (mg/L), tienen un índice =1

Alcalinidades menores a 50 (mg/L), tienen un índice =0

ii. **Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO):**

$$ICOMO = \frac{1}{3} (I_{DBO_5} + I_{Coliformes} + I_{Oxígeno\%})$$

Donde:

$$I_{DBO} = -0.005 + 0.70 \text{ Log}_{10} DBO (mg/L)$$

DBO >30 (mg/L) =1

DBO <2 (mg/L)=0

$$I_{Coliformes\ totales} = -1.44 + 0.56 [Log_{10} Col. Totales (NMP/100 mL)]$$

Coliformes totales mayores a 20.000 (NMP/100 mL)=1

Coliformes totales menores a 500 (NMP/100 mL)= 0

$$I_{Oxígeno\%} = 1 - 0.01(Oxígeno\%)$$

Oxígeno (%) mayor a 100 %, tienen un índice de Oxígeno= 0

iii. **Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos (ICOSUS):**

$$ICOSUS = -0.02 + 0.0003 [Sólidos Suspendidos (mg/L)]$$

Sólidos suspendidos mayores a 340 (mg/L) tienen un ICOSUS =1

Sólidos Suspendidos menores a 10 (mg/L) tienen un ICOSUS =0

Solamente aplicando el valor disponible de sólidos suspendidos a la fórmula presentada se puede obtener el índice de contaminación por sólidos suspendidos.

iv. **Índice de Contaminación Trófico (ICOTRO):**

- Oligotrofia: < 0.01
- Mesotrofia: 0.01- 0.02
- Eutrofia: 0.02 - 1.00
- Hipereutrofia: mayor a 1.00

9. Resultados

Los resultados de las muestras para los parámetros básicos: Temperatura (figura 7), grasas y aceites (figura 8), DBO (figura 9), nitrógeno total (figura 10) y fósforo total (figura 11), se encuentran por debajo de los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos tanto en la NOM-001-SEMARNAT-1996 como en la NOM-001-SEMARNAT-2021; en ambas épocas del año, sin embargo, en todos ellos, se puede observar un aumento en las concentraciones al transcurrir los meses de febrero-noviembre de 2021, sobre todo en los meses de la temporada de lluvia.

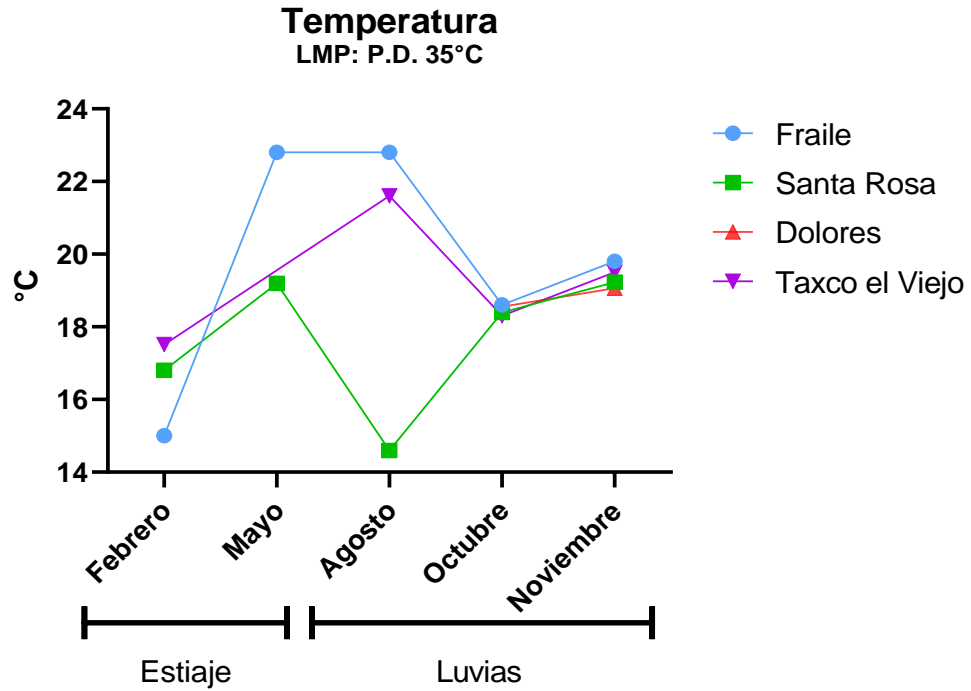


Figura 7. Comparación del promedio diario de la temperatura en los diferentes sitios de muestreo del río Cacalotenango en las épocas de lluvia y estiaje.

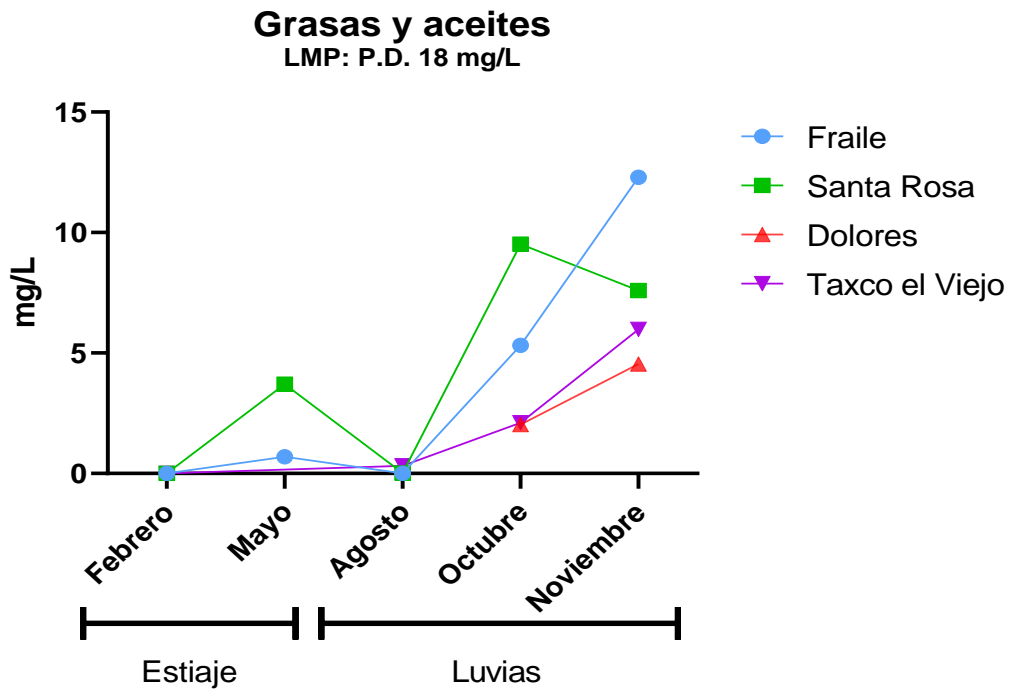


Figura 8. Comparación en las concentraciones de grasas y aceites en el río Cacalotenango en la época de estiaje y lluvias.

Demanda Bioquímica de Oxígeno

LMP: P.D. 200 mg/L

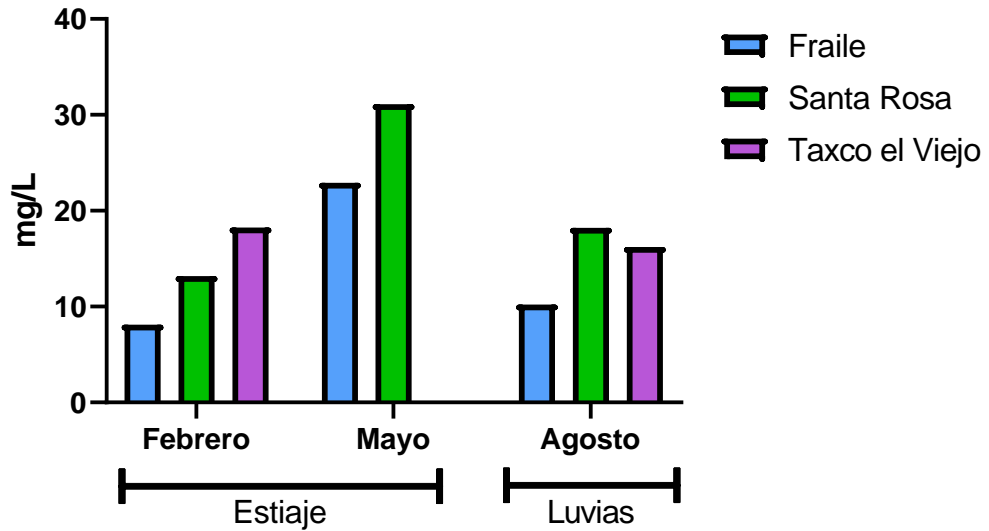


Figura 9. Comparación de las concentraciones de DBO entre la época de estiaje y de lluvias en los sitios de muestreo.

Nitrogeno total

LMP: P.D. 30 mg/L

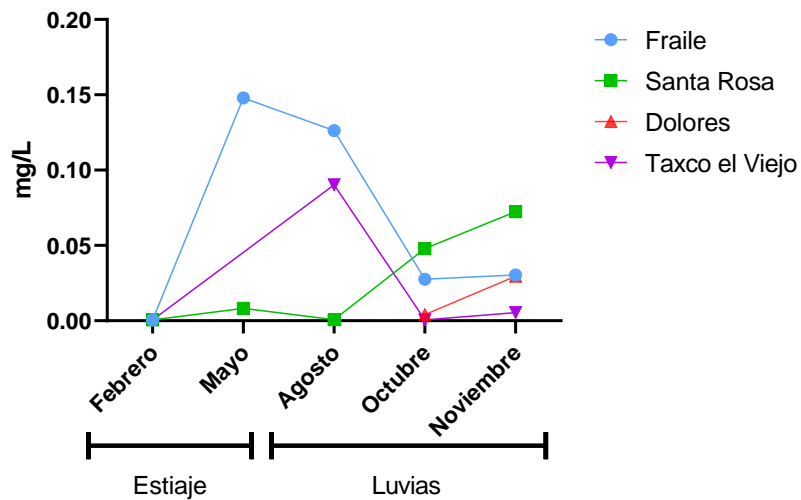


Figura 10. Comparación del promedio diario de nitrógeno total en época de lluvias y época de estiaje en el río Cacalotenango.

Fosforo total LMP: P.D. 18 mg/L

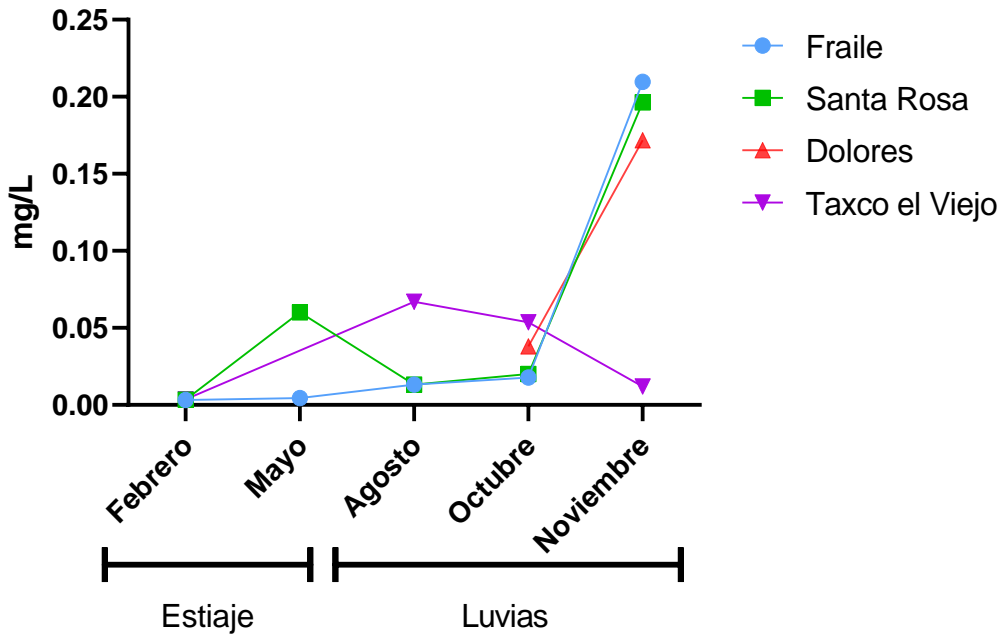


Figura 11. Comparación del promedio diario de fósforo total en los diferentes sitios de muestreo del río Cacalotenango en la época de lluvias y época de estiaje.

Los diferentes sitios monitoreados en el río registraron valores de pH entre 6.21 y 8.81 (figura 12) dentro del intervalo del LMP (5.0-10.0) establecido en la NOM-001-ECOL-1996 y (6.0-9.0) de la NOM-001-SEMARNAT-2021. En aguas naturales el principal regulador de pH es el sistema carbonato (dióxido de carbono, ion bicarbonato y ácido carbónico). La principal fuente de bicarbonato en el agua natural proviene de rocas calizas, el lavado de estas, causa que parte del carbonato que contienen pase al agua, aumentando de forma natural el pH, ya que hidroliza parcialmente al agua dando OH^- , lo que lo convierte en una base moderadamente fuerte. Que un agua sea ligeramente básica, como es lo habitual en un agua natural, se debe a la existencia de más carbonatos en disolución que ácido carbónico, lo que hace que el grado de hidrólisis para otorgar OH^- , sea superior. La concentración de pH puede romper el balance de los químicos del agua y movilizar a los contaminantes, esto depende de que tan alta o baja sea, causando condiciones tóxicas.

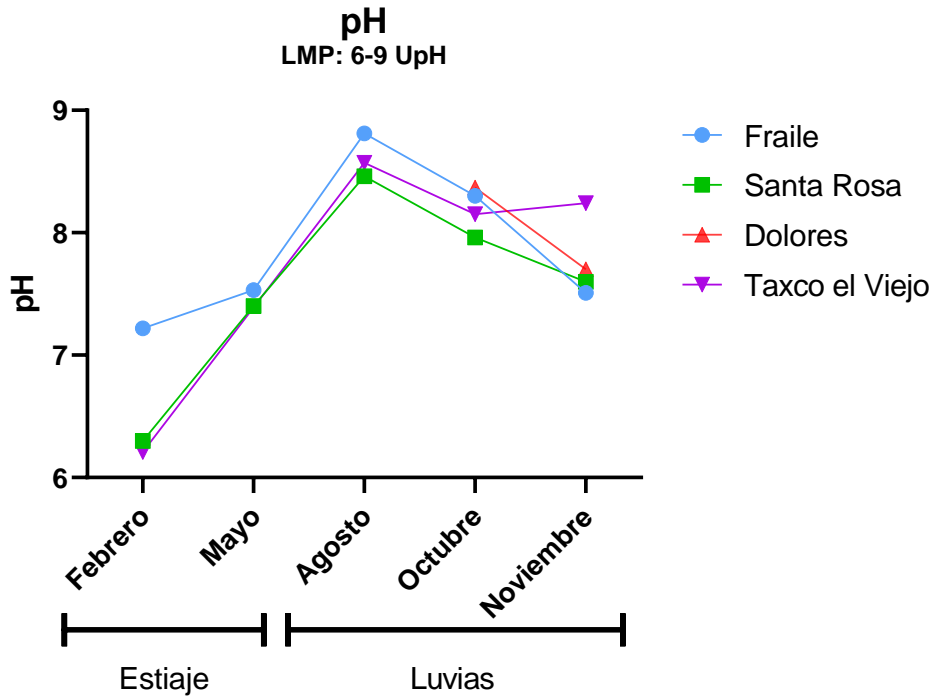


Figura 12. Comparación de los promedios de pH en los diferentes sitios de muestreo del río Cacalotenango en época de lluvias y de estiaje.

De igual forma, las muestras presentan valores por debajo del LMP para coliformes fecales (Figura 13) (< 2000 NMP/100ml) establecido en la NOM-001-ECOL-1996; sin embargo, a lo largo del año, las muestras presentan un incremento cada vez mayor en cada muestreo, de tal forma que Taxco el Viejo se acerca cada vez más a dicho límite. Las coliformes fecales y la *E. coli* son bacterias peligrosas que provienen de los excrementos de los animales y los seres humanos que, por lo general, se encuentran presentes en la proximidad de una fuente de agua, a través de sistemas sépticos mal mantenidos o construidos y de grietas en las tuberías de aguas negras (Mora, *et.al.*,2012). Al ser indicadores de contaminación fecal también advierten la posible presencia de otros patógenos como virus, bacterias, protozoos y fases enquistadas de metazoarios, por lo que su aumento representa un riesgo sanitario para las personas del lugar (Harwood *et al.*, 2005; Savichtcheva & Okabe, 2006).

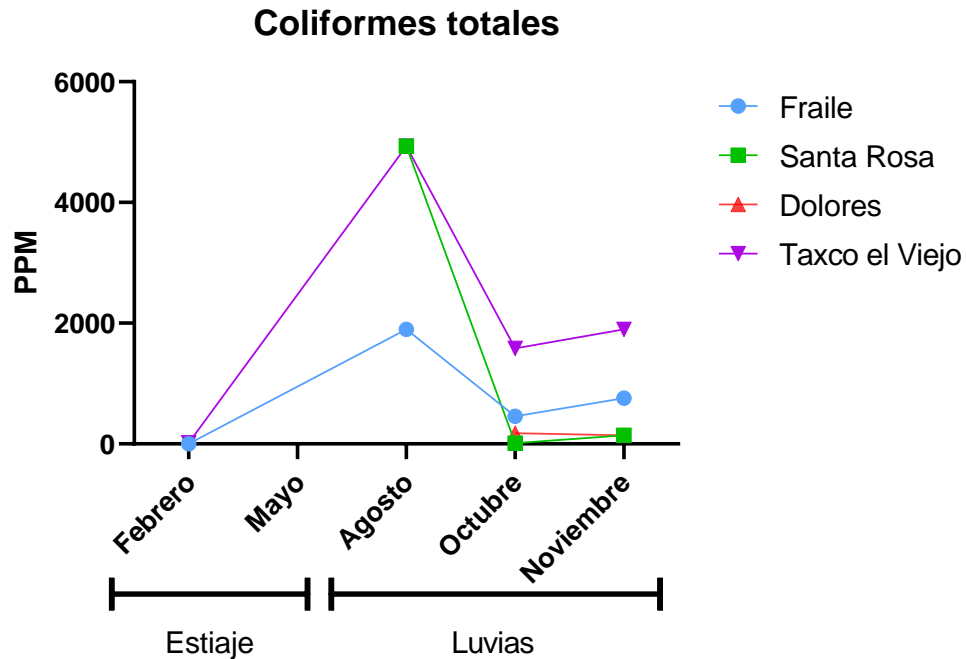


Figura 13. Comparación del NMP de coliformes totales en los diferentes sitios de muestreo del río Cacalotenango en época de lluvias y de estiaje.

La alcalinidad (Figura 14) como la dureza (Figura 15), presentan niveles bastante altos en la época seca, a comparación de la época de lluvias. La alcalinidad hace referencia a la presencia de sustancias hidrolizables y que, como productos de esta, generan el ion hidroxilo (OH⁻), como son las bases fuertes y los hidróxidos de los metales alcalinotérreos. Existen diversas bases en el agua, sin embargo, las preponderantes en aguas naturales son los bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos, también algunos fosfatos. Los niveles de alcalinidad total para aguas naturales de acuerdo con Arredondo (1986) pueden ser menores a 5 mg/L a más de 500 mg/L; un incremento en la alcalinidad dentro del intervalo anterior corresponde también a aumentos en la disponibilidad de fósforo, entre otros nutrientes por lo que se relaciona con aguas más productivas.

La dureza se va a referir a la concentración de iones metálicos divalentes en el agua, expresado como mg/L de equivalentes de carbonato de calcio. Normalmente la dureza total está relacionada con la alcalinidad total debido a que los aniones de la alcalinidad y los cationes de la dureza se derivan de carbonatos de algunos minerales. La dureza del agua resulta de la solución de rocas y minerales alcalinotérreos presentes en el suelo, y el aporte directo de

desechos que contienen carbonato de calcio y magnesio como dolomitas o piedra caliza. La ingeniería sanitaria clasifica el agua con respecto a la dureza dependiendo de la concentración de CaCO_3 como Agua blanda, Agua moderadamente dura, Agua Dura y Agua muy dura. La importancia de esta en un cuerpo de agua consiste en que cada constituyente (calcio y magnesio) tienen una función importante en el metabolismo de los organismos.

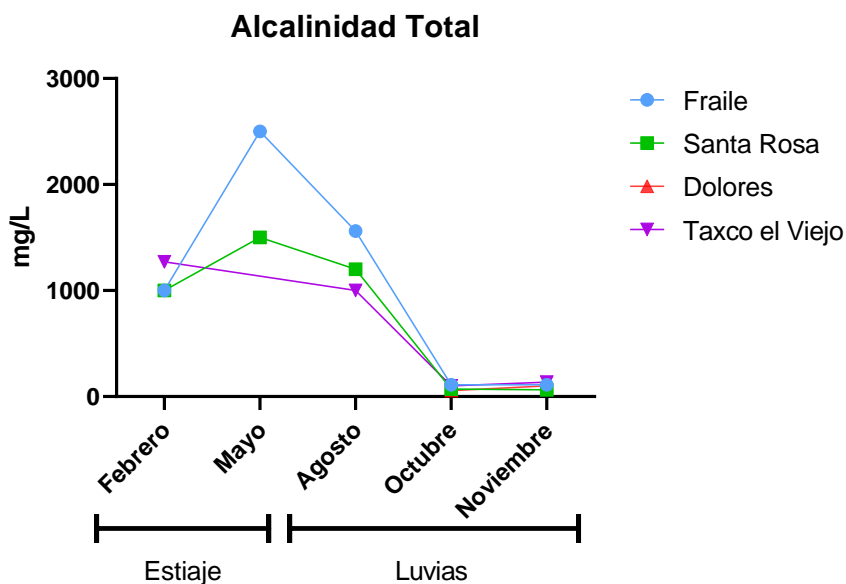


Figura 14. Comparación del promedio diario de alcalinidad en los diferentes sitios de muestreo del río Cacalotenango en época de lluvias y de estiaje.

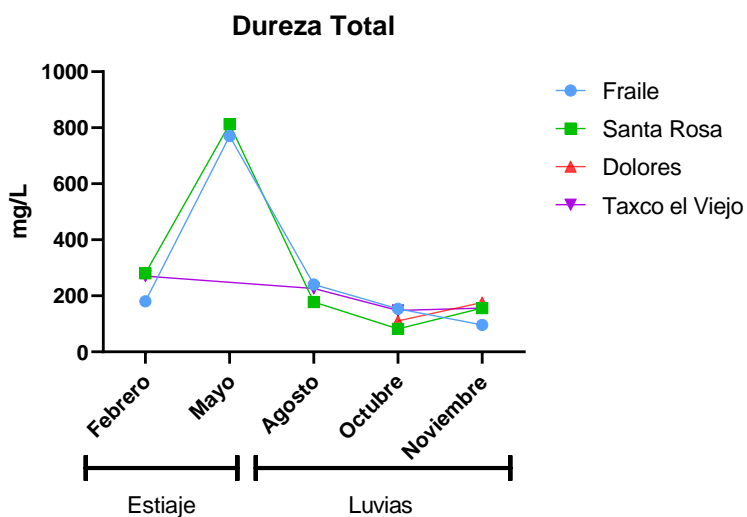


Figura 15. Comparación del promedio diario de Dureza Total en el Río Cacalotenango.

El oxígeno disuelto (Figura 16), se presentó en concentraciones mayoritariamente menores en la época de lluvias en comparación con la época seca. El oxígeno disuelto es uno de los parámetros más importantes que se determina en un cuerpo acuático, ya que este gas participa en diferentes funciones, como diversas reacciones de óxido-reducción, la respiración de los organismos. Los niveles de oxígeno disuelto van a depender de las actividades físicas, químicas y bioquímicas del cuerpo de agua y su solubilidad de factores como la presión atmosférica, la temperatura, y el contenido de las sales disueltas, por lo que, lo ideal es encontrar las mayores concentraciones de oxígeno disuelto en las zonas del río con mayor altitud. La concentración también puede variar dependiendo de los cambios estacionales resultado de las condiciones biológicas y ambientales.

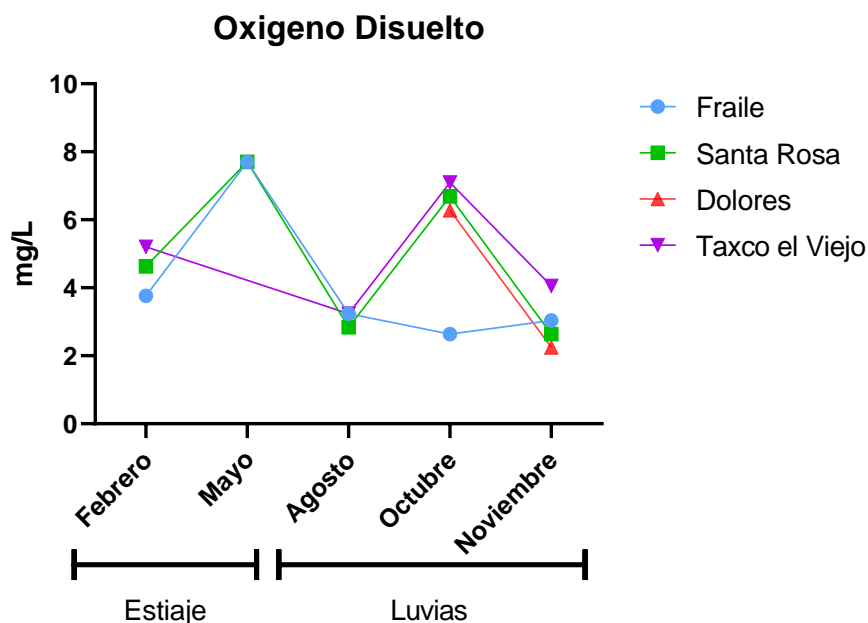


Figura 16. Comparación en las concentraciones de Oxígeno disuelto en los diferentes sitios de muestreo del río Cacalotenango.

En cloruros (Figura 17), podemos observar el mismo comportamiento anterior. El contenido de cloruros es muy variable en las aguas naturales, esto va a depender de las características de los terrenos por lo que pasa el caudal. El aumento en la concentración de estos en el cuerpo de agua puede tener orígenes como las descargas de aguas residuales o el lixiviado de los suelos. El contenido en cloruros de las aguas naturales no sobrepasa los 50-60 mg/L, como es el caso de nuestros resultados obtenidos a lo largo del año en el río Cacalotenango.

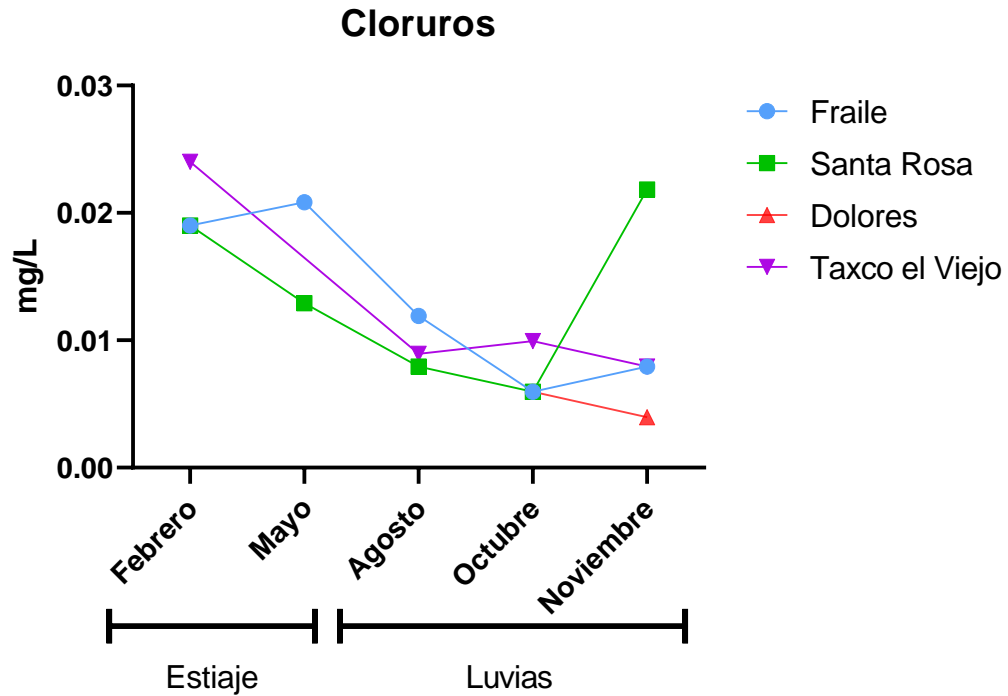


Figura 17. Comparación del promedio diario de concentración de cloruros en el río Cacalotenango.

Los sólidos suspendidos totales tienen su origen en las aguas residuales y la erosión del suelo, son partículas sólidas de pequeño tamaño que permanecen en suspensión en agua como un coloide. Son relevantes ya que los contaminantes y patógenos se transportan en la superficie de estas. Cuanto menor sea el tamaño de partícula, mayor será el área de superficie total por unidad de masa de partícula en gramos, y por consecuencia, mayor será la carga de contaminantes que es probable que se transporte. Estos parámetros permiten identificar gradientes que pueden representar una condición sin influencia de actividad humana hasta agua que muestra indicios o aportaciones de descargas de aguas residuales municipales y no municipales, así como áreas con deforestación (Conagua, 2011). Durante el mes de febrero se encontraban dentro de los LMP (60 promedio diario) establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996, después de este tiempo, los datos arrojados resultaron muy por encima de estos límites (Figuras 18 y 19).

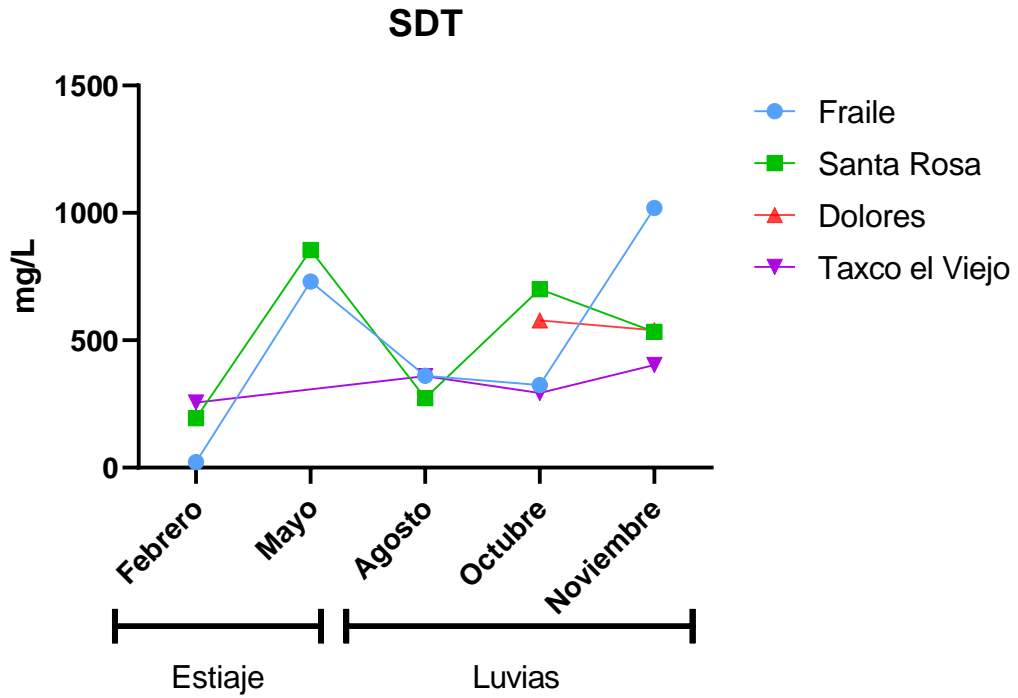


Figura 18. Comparación en las concentraciones de SDT en el río Cacalotenango.

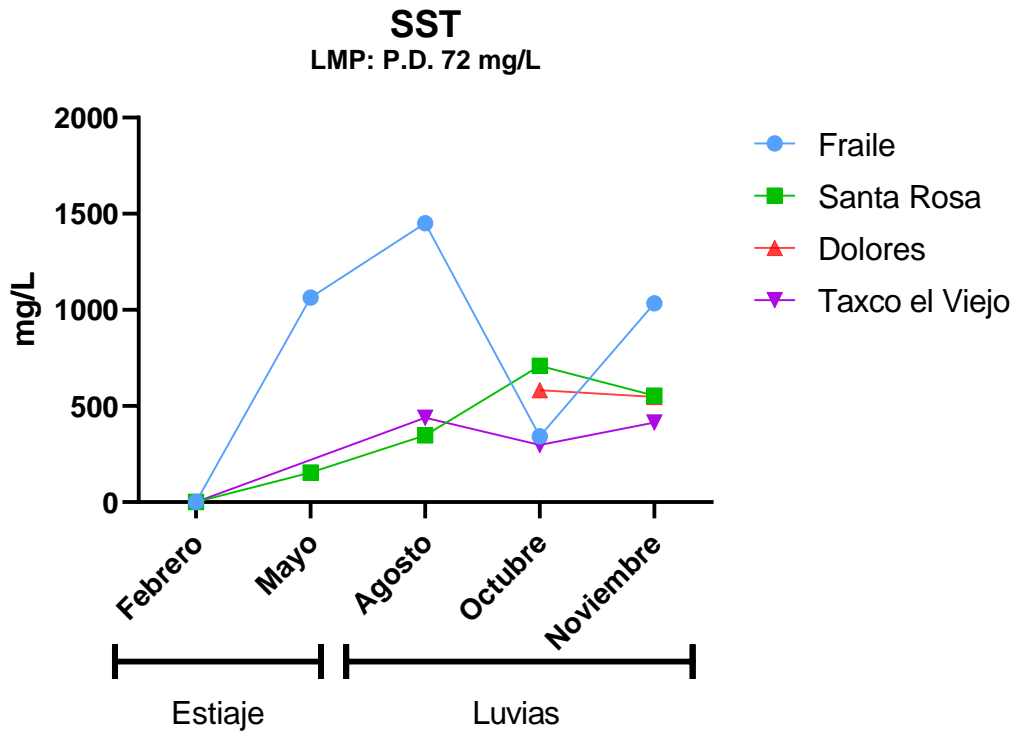


Figura 19. Comparación de las concentraciones de SST a lo largo delo año en el río Cacalotenango.

Para las sustancias activas al azul de metileno SAAM (Figura 20) se observan niveles que van en incremento gradual al paso de los meses por arriba de 0.1 mg/L, teniendo los niveles más altos en el sitio de Santa Rosa en octubre. Los tensoactivos llegan a las aguas limpias y residuales debido a descargas de residuos acuosos principalmente del lavado doméstico o industrial de ropa entre otras actividades de limpieza. Un tensoactivo es una sustancia que en una sola molécula cuenta con un grupo hidrófobo con uno hidrófilo. Dichas moléculas tienden a agruparse en las interfases entre el medio acuoso y las otras fases del sistema, como líquidos oleosos, aire y partículas, otorgando propiedades tales como emulsificación, formación de espuma y suspensión de partículas. La mayoría de los tensoactivos de las aguas residuales domésticas se combinan con cantidades proporcionales de las partículas adsorbidas. La concentración de tensoactivos en las aguas suele ser inferior a 0,1 mg/L a excepción de las que se encuentran en las proximidades de una desembocadura u otra fuente de entrada puntual. Una alta concentración de detergentes en el agua provoca formación de espuma, toxicidad para la vida acuática y crecimiento excesivo de la flora acuática por el aporte de fosfatos (NMX-AA-039-SCFI-2001). La determinación de las SAAM consiste en la extracción de compuestos aniónicos y entre los más comunes de estos compuestos podemos encontrar sulfatos, sulfonatos, fosfatos, fosfanatos y carboxilatos.

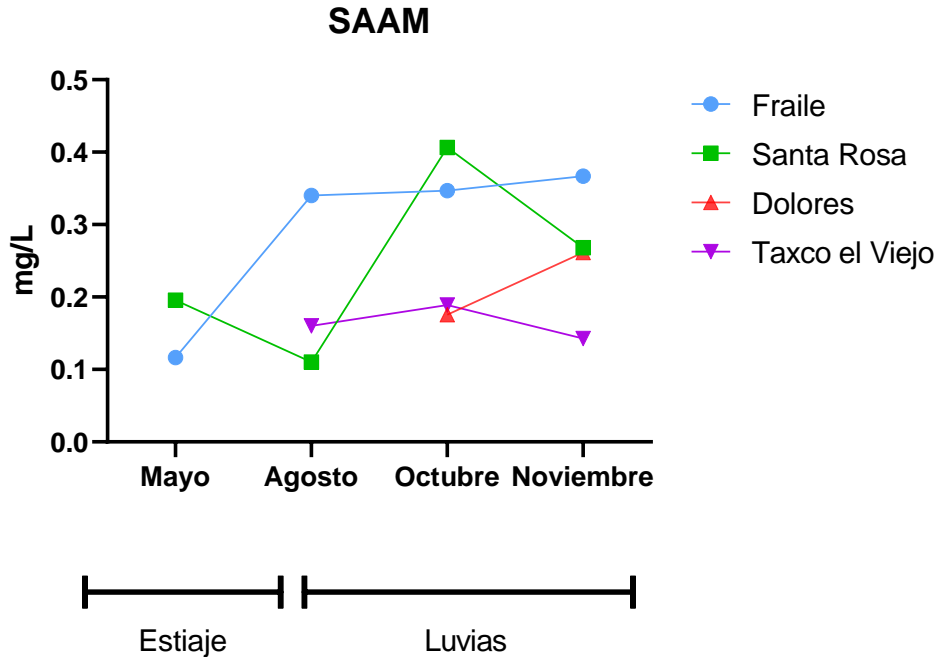


Figura 20. Comparación de las concentraciones de SAAM en época de estiaje y época de lluvias en el Río Cacalotenango.

Los resultados obtenidos en el caso del nitrógeno amoniacal (Figura 21), los nitritos (NO_2^-) (Figura 22) y nitratos (NO_3^-) (Figura 23), se mantienen en concentraciones considerablemente bajas. De acuerdo con Arredondo y Ponce (1998), en la mayoría de los hábitats acuáticos el amonio (NH_4^+) es la forma dominante, sin embargo, nuestros resultados arrojan una dominancia en las formas de nitrógeno orgánico (Figura 22), ya que el proceso de nitrificación es más rápido a pH de 7 y 8 y a su vez la oxidación del NH_4^+ es una fuente potencial de acidez en los sistemas acuáticos. El nitrógeno en forma de NO_3^- , aunque usualmente está en concentraciones muy bajas en aguas naturales, es frecuentemente la forma inorgánica más abundante del elemento, como en el caso del río Cacalotenango. Las concentraciones rara vez exceden los 10 mg/L y las concentraciones más constantes son menores a 1 mg/L y para el caso de NO_2^- en aguas superficiales bien oxigenadas, la concentración no suele superar los 0.1 mg/L (Romero *et al*, 1982, Arredondo, 1986).

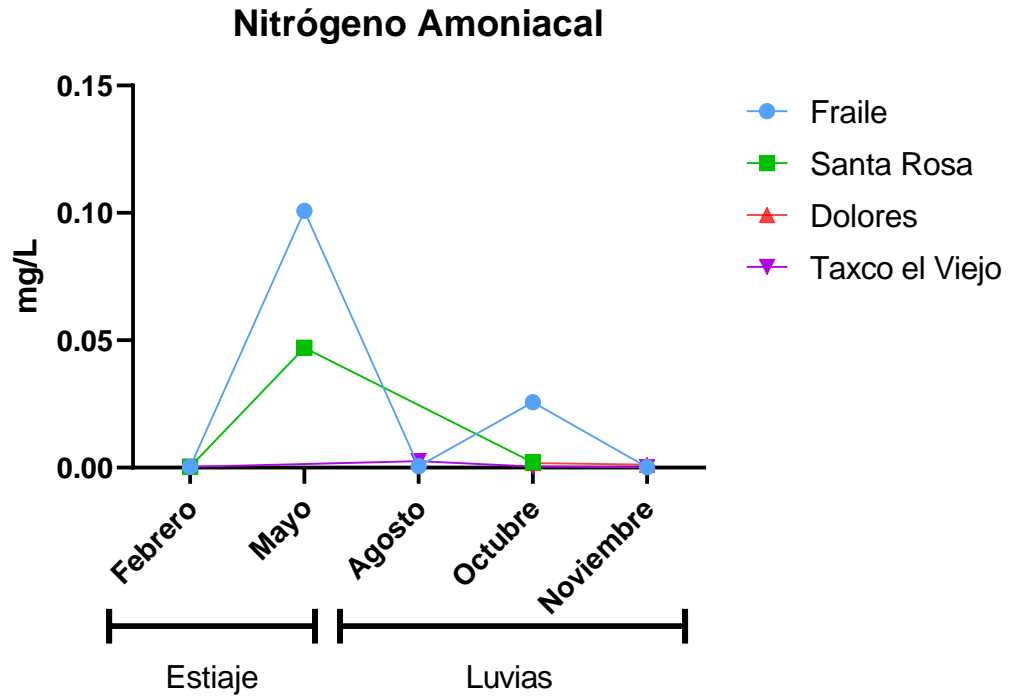


Figura 21. Comparación del promedio diario de la concentración de nitrógeno amoniacal en la época de estiaje y lluvias en el río Cacalotenango.

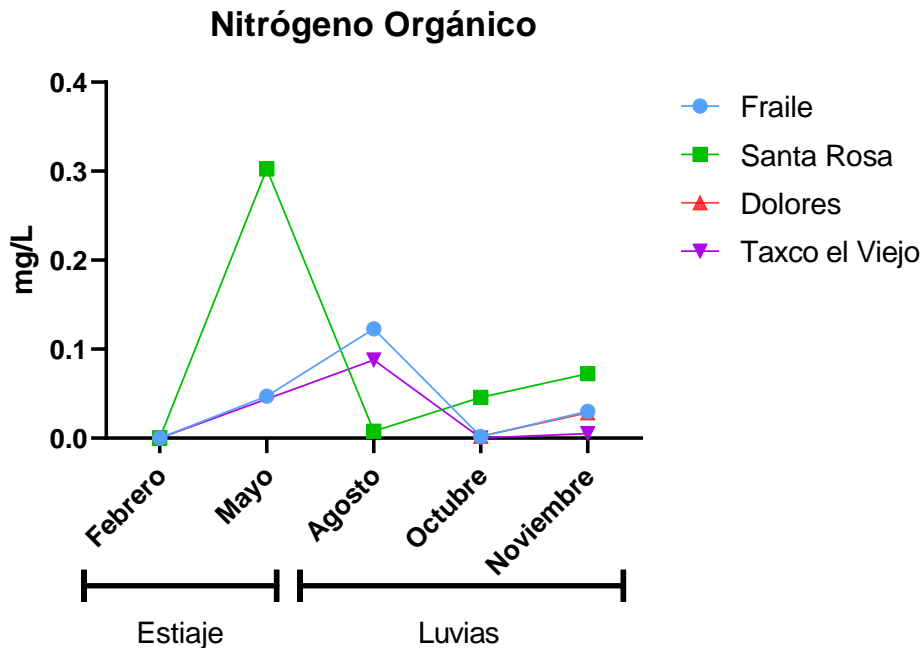


Figura 22. Comparación del promedio diario de la concentración de Nitrógeno orgánico en la época de estiaje y lluvias en el río Cacalotenango.

Así mismo, los resultados obtenidos en Sulfatos (SO_4^{2-}) (Figura 23) se encuentran dentro de lo normal para aguas naturales: entre 10 y 80 mg/L (Arredondo y Ponce, 1998); pues es uno de los aniones más comunes en aguas naturales; los desechos de drenaje de minas pueden contribuir con grandes cantidades de iones SO_4^{2-} . Es la forma más común de azufre en el agua y sus concentraciones en los sistemas acuáticos pueden variar de acuerdo con la naturaleza geológica e hidrológica de la cuenca.

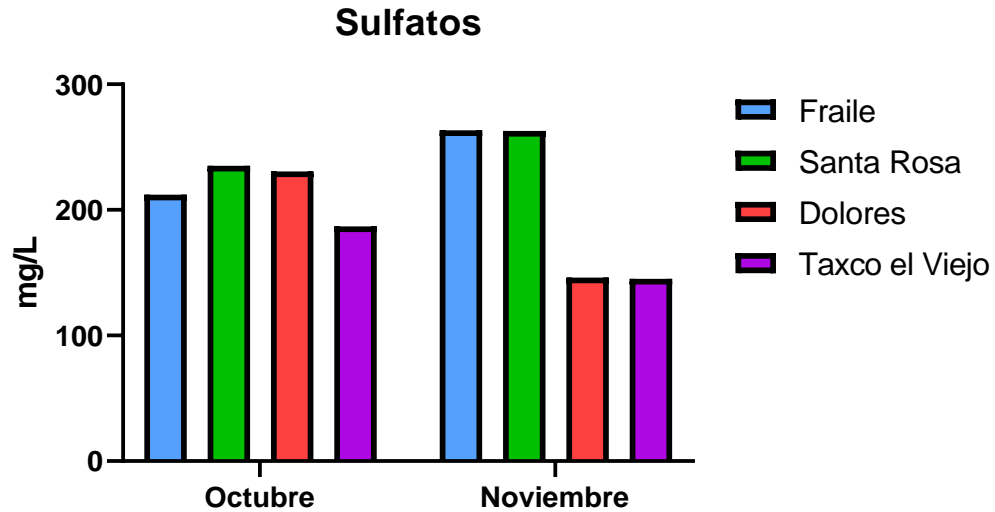


Figura 23. Grafica comparativa de las concentraciones de sulfatos en el río Cacalotenango entre los meses de octubre y noviembre .

La conductividad es la capacidad de una solución acuosa para conducir la corriente eléctrica expresada en un número. Esta capacidad está sujeta a la presencia de los iones, de su concentración, movilidad, valencia y concentración relativa, así como de la temperatura a la que se haga la medición y la cantidad de sólidos suspendidos totales. La mayoría de los ácidos inorgánicos, las bases y las sales, son buenos conductores, en tanto que los compuestos orgánicos no disociables son malos conductores. Ésta presenta sus niveles más altos al final de la época seca e inicios de la época de lluvias para luego descender abruptamente en adelante (Figura 24). Finalmente se pueden observar cambios abruptos en el caudal (Figura 25) que indican una gran disminución en la cantidad del agua en el río a pesar de las lluvias.

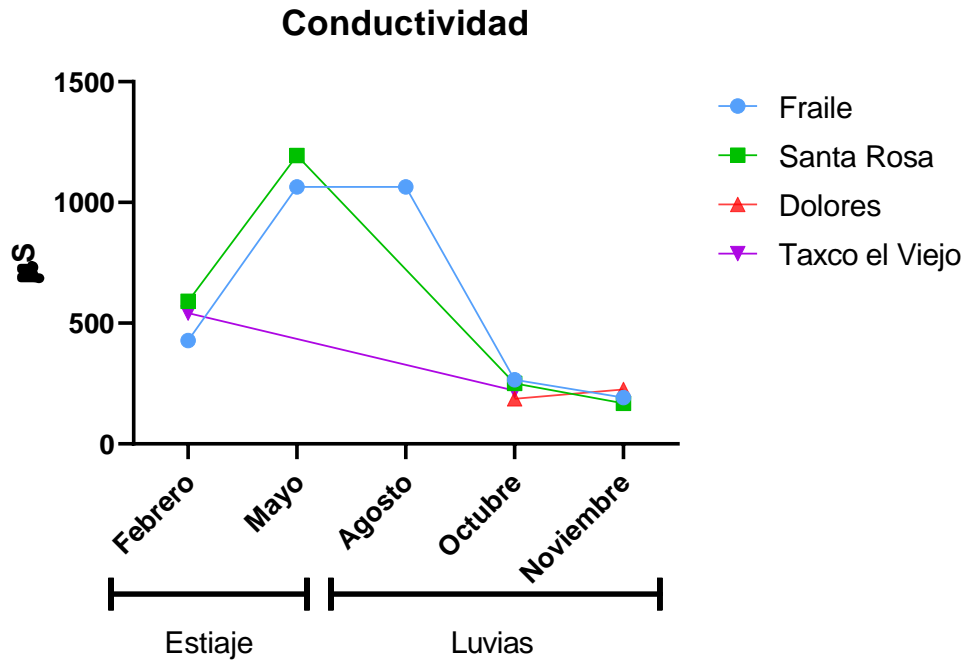


Figura 24. Comparación entre las conductividades en los diferentes sitios de muestreo del río Cacalotenango, en época de lluvias y de estiaje.

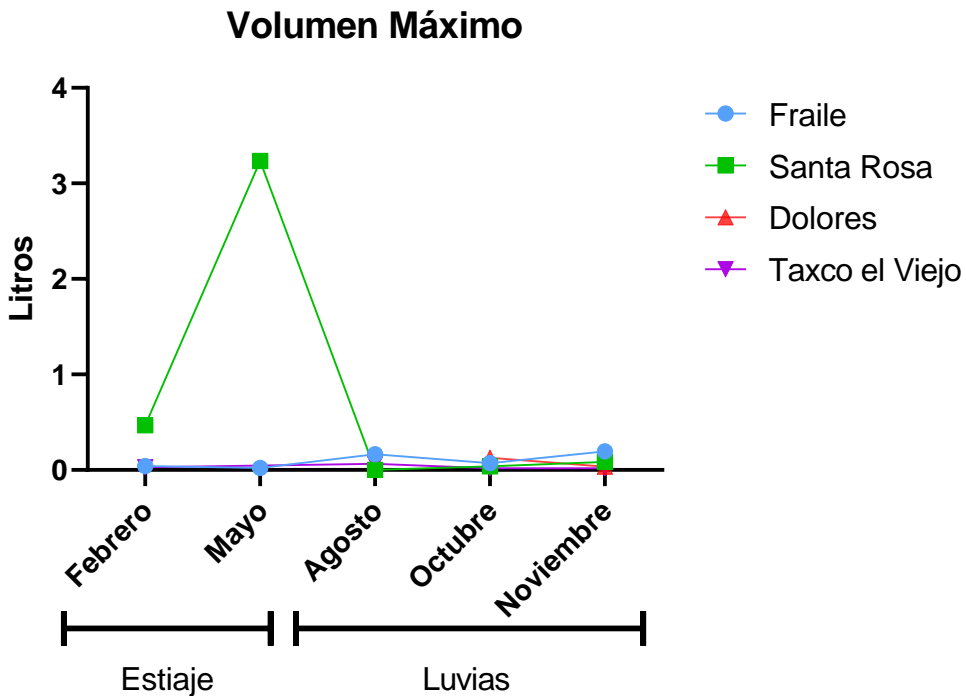


Figura 25. Comparación del caudal en época de lluvias y de estiaje en los diferentes sitios de muestreo del río Cacalotenango.

Con los datos generados de los parámetros físicos y químicos realizados en diferentes épocas a lo largo del año, se aplicaron los cuatro Índices de Contaminación para poder comparar y analizar de manera más específica lo que está sucediendo en el sistema acuático, para ello, se tomaron las variables necesarias para poder desarrollar cada índice: Sólidos Suspendidos Totales, Conductividad, Dureza Total, DBO, Coliformes Totales, Oxígeno, Fósforo Total y Alcalinidad, ya que se consideraron las más importantes por el papel ecológico que cumplen, además de que están muy relacionadas y al compararlas, nos indican de manera más fácil la problemática del sistema acuático.

Al aplicar las fórmulas de los cuatro índices, se obtuvo lo siguiente:

PRUEBA	S	LL
Conductividad (mS/ cm)	192-1194	1064-1865
Dureza Total (mg/L)	96-812.812	82-240.24
Alcalinidad (mg/L)	64-1500	56-1560
DBO (mg/L)	8.105-31.1	10.2-18.2
Coliformes Totales (NMP/100 mL)	2-1898	4931- 11
Oxígeno %	2.24 - 7.7	2.63 - 7.09
SST (mg/L)	0.012 - 1034	297 - 1450
Fósforo total (mg/l)	0.003227 - 0.02097	0.0133- 0.05355

Tabla 9. Intervalos de valores obtenidos de cada prueba en las dos épocas del año (S.- Temporada seca & LL.- Temporada de Lluvia)

ICOMI	S	LL
<i>I Conductividad</i>	1	1
<i>I Dureza</i>	1	1
<i>I Alcalinidad</i>	1	1
<i>Total</i>	1	1

Tabla 10. Valores totales obtenidos del ICOMI

ICOMO	S	LL
I DBO	1	1
I Coliformes	0.3958	0.628
I Oxígeno	0.923	0.929
Total	0.773	0.8523

Tabla 11. Valores totales obtenidos del ICOMO

ICOSUS	S	LL
I Sólidos Suspendidos	1	1

Tabla 12. Valores totales obtenidos del ICOSUS

ICOTRO	S	LL
I Fósforo		
Total	Mesotrofia	Eutrofia

Tabla 13. Niveles tróficos del río obtenidos de ICOTRO

Índice de Contaminación	Siglas	Resultado (T. Seca)	Resultado (T. Lluvia)
Índice de contaminación por mineralización	ICOMI	1	1
Índice de contaminación por materia orgánica	ICOMO	0.773	0.8523
Índice de contaminación por sólidos suspendidos	ICOSUS	1	1
Índice de contaminación por trofia	ICOTRO	Mesotrofia	Eutrofia

Tabla 14. Resultados finales de los cuatro índices de contaminación en las dos épocas del año

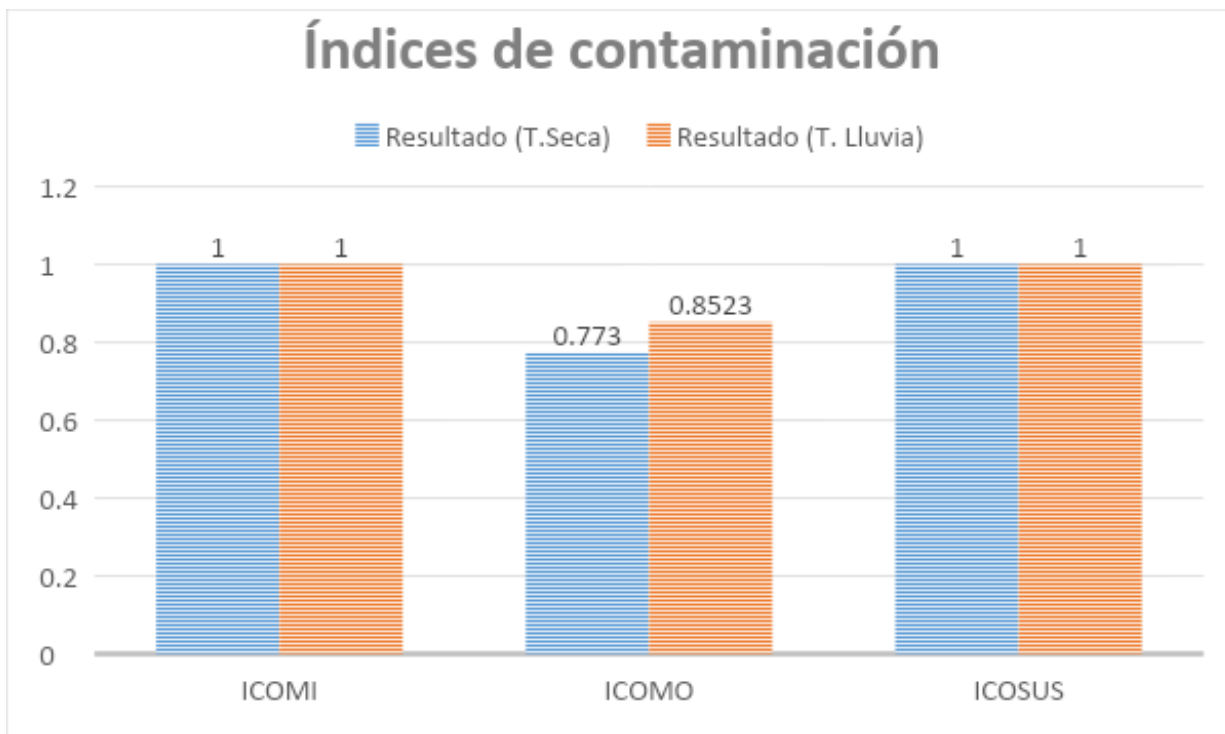


Figura 26. Resultados finales de los cuatro índices de contaminación en las dos épocas del año.

En el Índice de Contaminación por Mineralización (ICOMI) (Tabla 2) , en ambas épocas del año se obtuvieron valores de 1, lo que indica, que existe un alto contenido de sales de magnesio y calcio, responsables del incremento de la dureza en un cuerpo de agua, también es importante anotar que, el fenómeno de mineralización en aguas, está ampliamente ligado a la capacidad del cuerpo de agua de disolver tanto cationes como aniones, y esto se puede ver reflejado en la cantidad de sólidos disueltos que se pueden presentar.

En el resultado obtenido para el Índice de Contaminación por Materia Orgánica (ICOMO) (Tabla 3), se obtuvieron valores cercanos a 1, sobre todo en la temporada de lluvias, lo cual nos indica que el sistema presenta una problemática grave de contaminación orgánica, lo cual, podría incrementar sus valores, pero al no llegar a 1 también indica que aún se están degradando los contaminantes orgánicos, aunque cada vez más lentamente y en menor medida.

El Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos (ICOSUS) (Tabla 4), confirma al ser de un valor de 1, que existe un elevado número de material suspendido y que la principal problemática del río es de carácter inorgánico, coincidiendo así con el primer Índice.

Por último, en el Índice de Contaminación por Trofia (Tabla 5), se obtuvo que en la época seca el río se encuentra en mesotrofia y en época de lluvia en eutrofia, lo que nos indica que en esa época del año se incrementó la cantidad de nutrientes.

10 Discusión.

La contaminación de los cuerpos de agua es resultado de las descargas de aguas residuales sin previo tratamiento, estos pueden ser de tipo industrial, agrícola, pecuario, domestico o minero. En las Estadísticas del Agua en México edición 2011, más de 70% de los cuerpos de agua del país presentaba algún indicio de contaminación (CONAGUA, 2017), lo cual se comprobó con el cuerpo de agua estudiado, ya que, con base a los resultados obtenidos, este cuerpo de agua se encuentra contaminado y la principal problemática es debida a la contaminación inorgánica ya que los índices de contaminación arrojan valores de 1 tanto en el ICOSUS como en el ICOMI (Tabla 14).

Existen descargas del tipo doméstico, las grasas y los aceites presentes (Imagen 1) son indicadores de esto. Estas van presentando un incremento a lo largo del año, acumulándose en los márgenes del río y a su vez aumentando a la par de los desechos urbanos. A pesar de que los niveles siguen permaneciendo por debajo del LMP, los líquidos flotantes dan un aspecto desagradable al agua, descendiendo su valor potencial, impiden el paso de luz a través de esta siendo tóxicas para la vida acuática y su presencia atrae animales que pueden ser vectores de transmisión de enfermedades como roedores e insectos, su importancia sobre todo radica en el hecho de que interfieren en la reaireación natural, lo que se observó en el tramo de Santa Rosa, en el cual se encontró una mayor concentración de grasas y aceites y una menor concentración del oxígeno disuelto (figuras 8 y 16).

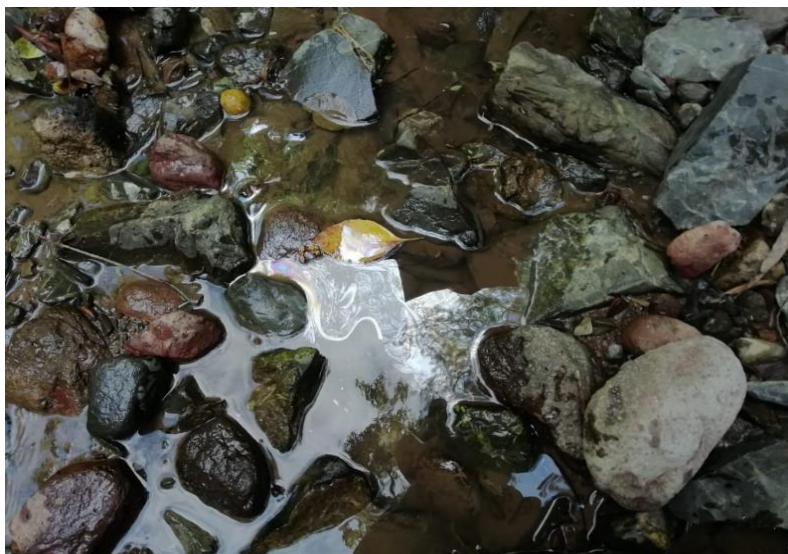


Imagen 1. Grasas y aceites observados en el río Cacalotenango

La DBO_5 es un parámetro que indica la cantidad de materia orgánica presente en el agua y que es determinante para la capacidad de autodepuración del río. Si bien el ICOMO indica que la mayor problemática del río no es la carga orgánica y los resultados obtenidos no alcanzan los LMP (figura 9) se observa un incremento en la recepción de desechos orgánicos como se señaló anteriormente y se puede observar también en los incrementos repentinos de nitrógeno amoniacal y coliformes totales y fecales, es importante, pues la demanda y consumo oxígeno se incrementa, causando la disminución del contenido de oxígeno disuelto en el cuerpo de agua, provocando condiciones de “anoxia” que dañan a los ecosistemas acuáticos afectando a las comunidades biológicas, originan olores desagradables.

Un nutriente fundamental para los organismos fotosintéticos es el nitrógeno, por lo que es importante monitorear el comportamiento de su ciclo, sobre todo si existen descargas externas al cuerpo acuático, y el río Cacalotenango no es la excepción (Imagen 2). A pesar de que los datos obtenidos se mantienen debajo de sus LMP, podemos destacar el incremento gradual tanto en las formas orgánicas por intervención antrópica, como en las inorgánicas por la transformación durante el proceso de nitrificación. En los datos obtenidos se puede apreciar que existe una mayor cantidad de nitrógeno en su forma orgánica, lo cual puede deberse a desechos orgánicos sólidos, ya que el nitrógeno en esta forma se encuentra asociado a moléculas orgánicas como las proteínas, los ácidos nucleicos o metabolitos finales.



Imagen 2. Desechos urbanos a la orilla del río Cacalotenango

El nitrógeno amoniacal depende mucho del pH, ya que en sistemas que van de neutros a alcalinos, el ion amonio se transforma en gas amoníaco, volatilizándose al ambiente, provocando que bajen a su vez los niveles de pH al momento de la reacción.

Se monitoreó la parte inorgánica del nitrógeno, comprobando así, que los nitratos se encuentran en una mayor concentración que los nitritos presentes (Figuras 27 y 28), lo cual quiere decir que la oxidación biológica del nitrito se está llevando a cabo de forma correcta.

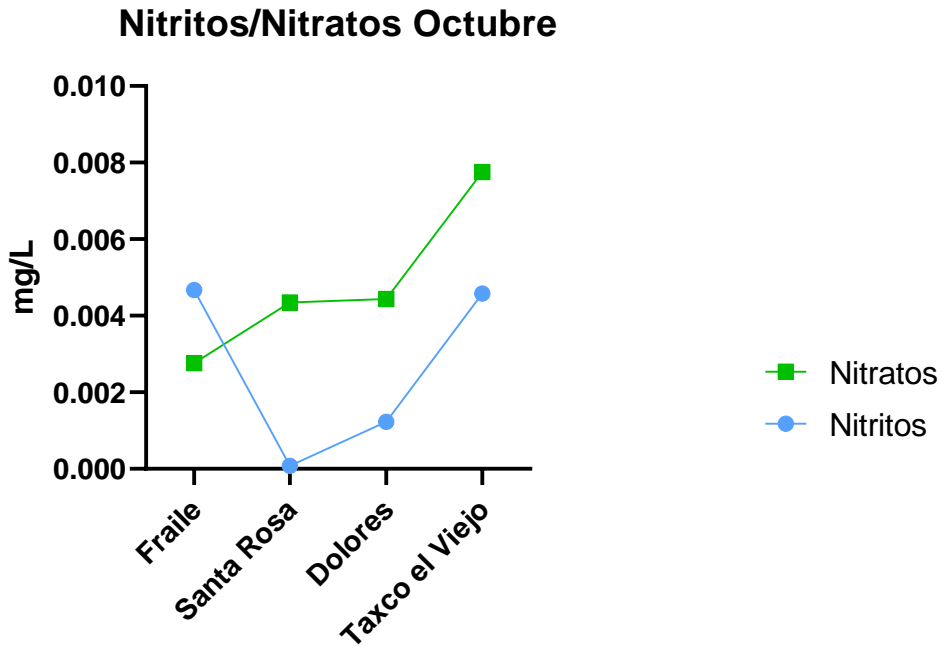


Figura 27. Comparación de las concentraciones de nitritos y nitratos en cada sitio de muestreo en el mes de octubre.

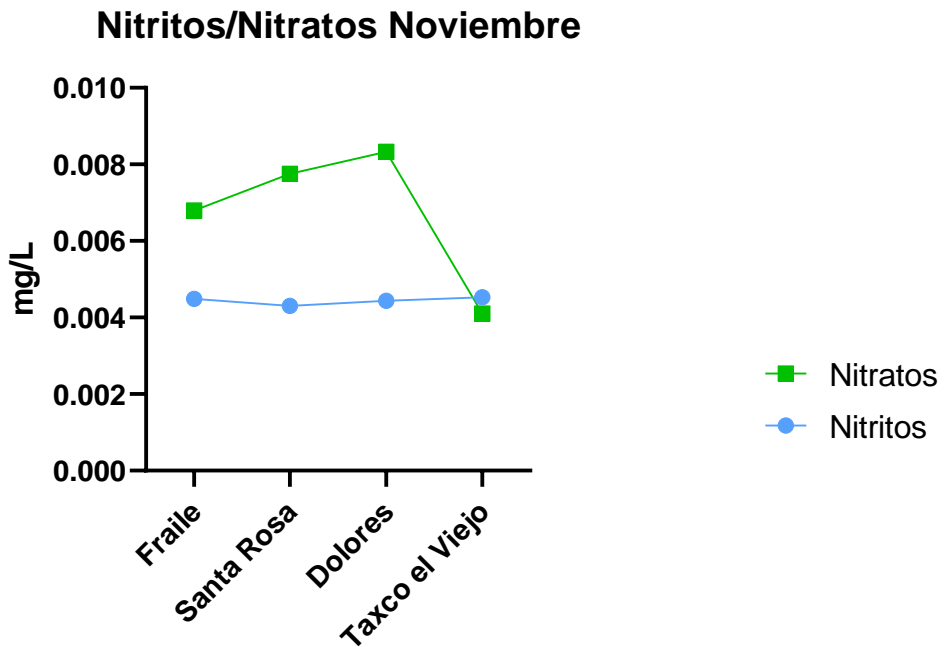


Figura 28. Comparación de las concentraciones de nitritos y nitratos en cada sitio de muestreo en el mes de noviembre.

La calidad del agua se establece mediante la caracterización química y física de muestras de agua y su comparación con las Normas Oficiales Mexicanas que determinan los estándares de calidad y los niveles máximos permisibles de descargas de contaminantes en aguas nacionales. De esta forma se puede establecer si el agua es adecuada para los requerimientos de calidad asociados a un uso determinado, como por ejemplo para el equilibrio ambiental o consumo humano y en su caso, los procesos eventuales de saneamiento requeridos para la remoción de elementos riesgosos o indeseables (ONU 2016). El deterioro de la calidad del agua se da mediante procesos tanto naturales como antrópicas por lo que, a partir del 2005, CONAGUA inició la Red Nacional de Monitoreo para la evaluación de la calidad del Agua en los cuerpos acuáticos del país utilizando únicamente tres indicadores: los Sólidos Suspendidos Totales (SST), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO5). Los sitios con monitoreo de calidad del agua se encuentran ubicados en zonas con una influencia antrópica alta (CONAGUA, 2017) y de acuerdo con sus resultados para el 2016, la zona hidrográfica del Balsas es la segunda con mayores porcentajes de contaminación en todo el país detrás de las Aguas del Valle de México, por lo cual es urgente tomar en cuenta medidas de mitigación para cumplir con el caudal ecológico.

En el río Cacalotenango se presentan aumentos en la temperatura que van desde los 15°C hasta los 22.8°C aún con la presencia de lluvia, que sólo logra bajar la temperatura hasta 19.8°C en la zona de mayor altitud del río que corresponde al Fraile, la cual debería ser más fría ya que la temperatura depende de la latitud, altitud y la regionalidad del sistema acuático sin embargo, la temperatura está influenciada por las condiciones ambientales de la zona y la incidencia de luz solar, ya que la energía luminosa es absorbida exponencialmente con respecto a la profundidad; tomando en cuenta esto, podemos destacar que en el sitio de muestreo correspondiente al Fraile en comparación con los demás, debido a la creciente tala de árboles que se encontraban en la orilla del río (Imagen 3), ocasiona que el calor absorbido se concentre elevando la temperatura, si bien estos niveles se encuentran por debajo del LMP, es importante, ya que la temperatura es determinante en aspectos relevantes de la dinámica química y física del sistema acuático y en la fisiología y el metabolismo de los organismos que lo habitan pues influye indirectamente en la solubilidad del oxígeno disuelto como se puede apreciar en el mes de agosto en la figura 16. En donde al aumentar la temperatura se redujeron los valores de

concentración del oxígeno disuelto a valores cercanos a los 4 mg/L, además de que la temperatura influye también en la disponibilidad de los nutrimentos y el nivel en el que se lleva a cabo la descomposición de la materia orgánica.



Imagen 3. Material vegetal a la orilla del Río Cacalotenango

El fósforo, al igual que el nitrógeno, es un elemento esencial para el crecimiento biológico, se presenta de forma natural por erosión de las rocas y degradación de la materia orgánica, pero sus valores pueden aumentar por residuos de fertilizantes y productos de limpieza. Sin embargo, las recientes obras realizadas en El Fraile, han formado una pendiente de sedimentos que da directamente a las orillas del río (Imagen 4), destruyendo gran parte de la vegetación de alrededor, derivado de esto, han aumentado las actividades antrópicas en la zona, por lo que se ha incrementado la erosión de las rocas, del suelo y se aumentó la adición de fósforo en el agua, de igual manera el incremento de los datos obtenidos a lo largo del río se puede asociar tanto con lo anterior como con el incremento gradual en los resultados de SAAM (Imagen 5), el aumento en las concentraciones es de gran importancia, pues los niveles de fósforo asimilable (ortofosfatos) son bastante pequeños en comparación con el fósforo total, por lo que el proceso de transformación se lleva a cabo lentamente; con el paso del tiempo y la adición constante se irá acumulando e incidiendo en cambios en el nivel trófico del sistema.



Imagen 4. Talud que da directo al río desde el jal El Fraile



Imagen 5. Espumas presentes en el río Cacalotenango

Los valores del pH se vieron en aumento durante la temporada de lluvias, ya que la adición y disolución de sólidos por arrastre fue en aumento, debido a las obras mencionadas anteriormente, estos valores van cambiando a lo largo del día debido a las múltiples descargas de distinto origen, las cuales no son constantes, por lo que el pH general se mantiene en intervalos de 7-8 dentro del LMP. Los cambios en pH son soportados por un sistema amortiguador de carbonato / dióxido de carbono. En los sistemas acuáticos existen carbonato

de calcio, levemente soluble, y al ocurrir la hidrólisis del ion carbonato, aumenta la solubilidad del carbonato calcio y, por ende, el pH.

La alcalinidad tiende a subir en época seca, pues los sólidos se encuentran en mayor concentración por la falta de disolvente y esto se puede ver en su relación con la acidez, pues con el hidrógeno la lluvia y el dióxido de carbono van a reaccionar con los carbonatos presentes en el agua formando ácido carbónico, acidificando así el agua en el río y disminuyendo la alcalinidad (Figuras 29 y 30); siguiendo esto, al final del río se presentan procesos de acumulación y sedimentación, por lo que la concentración de bicarbonatos aceleran su transformación a carbonatos incrementando nuevamente la alcalinidad.

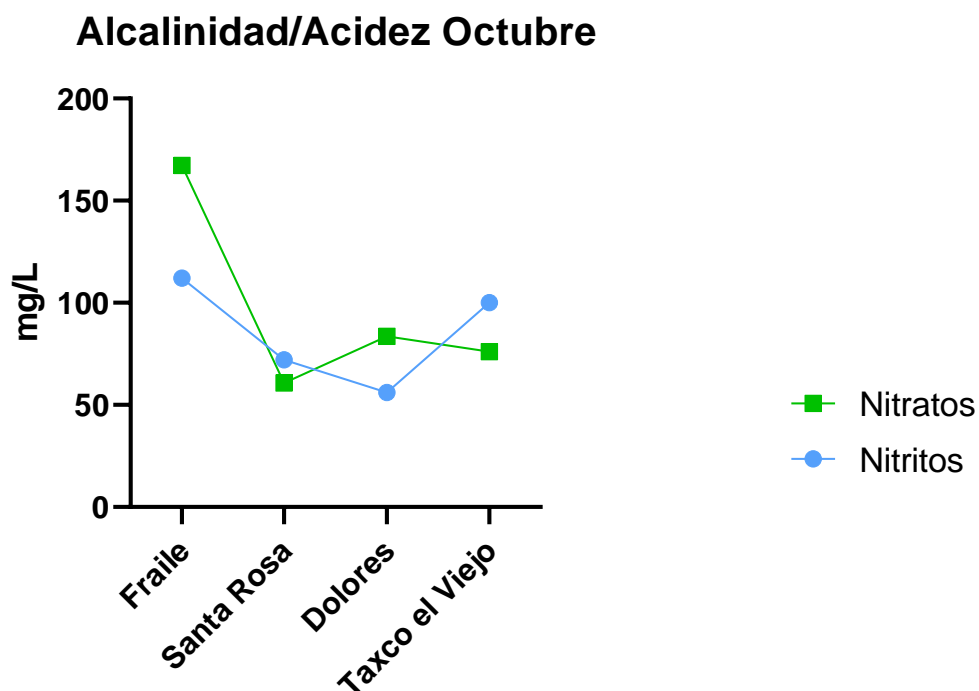


Figura 29. Dinámica de concentraciones de alcalinidad total y acidez en octubre.

Alcalinidad/Acidez Noviembre

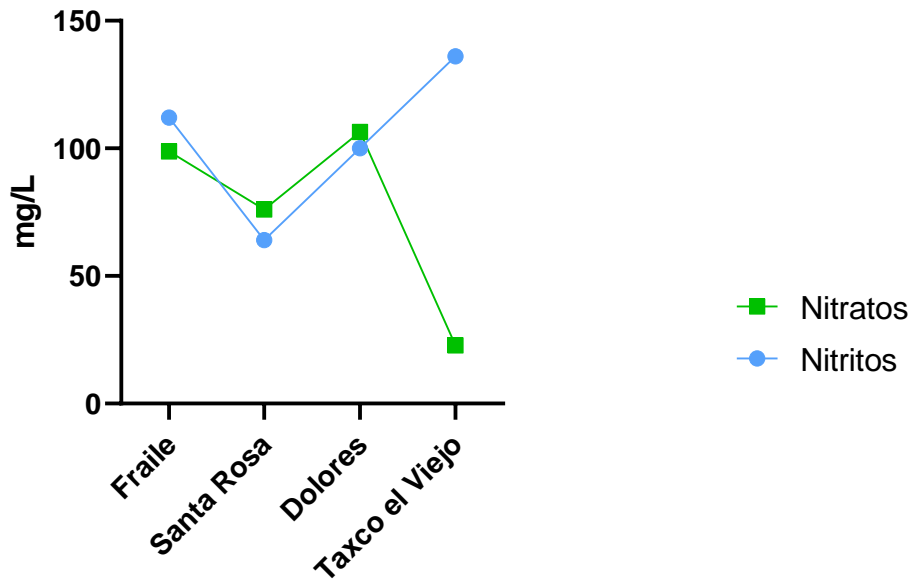


Figura 30. Dinámica de concentraciones de alcalinidad total y acidez en noviembre.

Para el caso del oxígeno disuelto, la concentración disminuye cuando aumenta la temperatura, la materia orgánica y los microorganismos que habitan en el agua, bajo ese criterio, las variaciones en las concentraciones a lo largo del año en el río Cacalotenango se deben al cambio de concentraciones en los SST, puesto que están formando parte de la materia orgánica que requiere oxígeno para su descomposición, de igual manera con el incremento bacteriano observado, la demanda de oxígeno va en aumento así como el riesgo sanitario.



Imagen 6. Ingreso de sólidos en el río Cacalotenango.

El incremento de sólidos tanto en disolución como en suspensión se origina indiscutiblemente a raíz de las obras realizadas en El Fraile como intento de restauración para la reincorporación de los jales mineros al paisaje, pues la erosión como la lixiviación de las pendientes tan pronunciadas del talud (Imagen 6) los incorporan en grandes cantidades, al grado de llevar sus concentraciones muy por encima de los LMP. Los sólidos se precipitan en el fondo o se acumulan en las orillas y forman fangos con mucha materia orgánica que demanda oxígeno disuelto para su oxidación. Un fango con las características anteriores produce anaerobiosis, creando gases (metano, sulfúrico), con el aumento de sólidos se incluyen también, como hemos mencionado antes, cambios en el pH por la adición de carbonatos y bicarbonatos, aumento en las concentraciones de fósforo y cloruros y por consecuente aumento de la alcalinidad y dureza e incremento de la conductividad.

Al aumentar la descarga de sólidos en el agua, se incrementa la disolución de iones de calcio y magnesio en forma de carbonatos y bicarbonatos aumentando así las concentraciones de dureza en el agua (Figuras 30 y 31), por los resultados obtenidos, se han catalogado las aguas del río Cacalotenango entre moderadamente duras y duras. El contenido de calcio en las aguas puede variar presentándose en formas de bicarbonatos, sulfatos y cloruros, lo que viene de la mano con los datos obtenidos para estos dos últimos.

Generalmente, la presencia de sustancias activas al azul de metileno se deben a descargas de origen doméstico por el desecho de productos de limpieza, sin embargo, el método de prueba para SAAM, determina la concentración de compuestos aniónicos, entre los que podemos encontrar, además de sustancias tensoactivas (jabones) sulfatos y fosfatos que no necesariamente tienen origen en descargas urbanas, pues como ya hemos mencionado, estos compuestos se han visto añadidos por las obras realizadas en los relaves mineros junto al río, lo que podría explicar su presencia en zonas no tan urbanizadas y su aumento en las concentraciones encontradas a lo largo del año.

Dureza de Calcio/Dureza Total Octubre

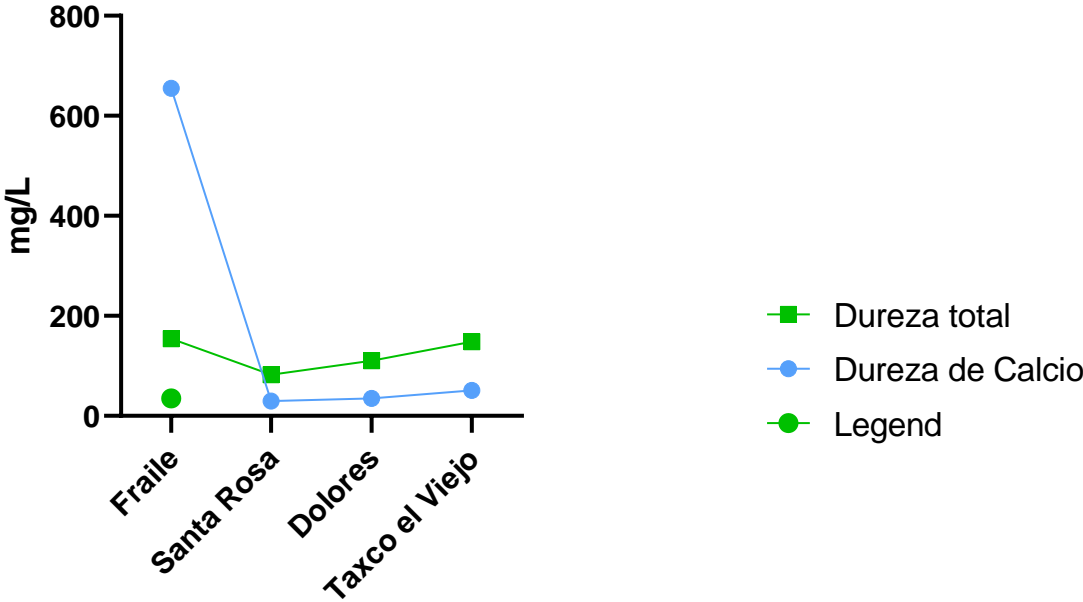


Figura 31. Relación de Dureza total y dureza de calcio en octubre.

Dureza de Calcio/Dureza Total Noviembre

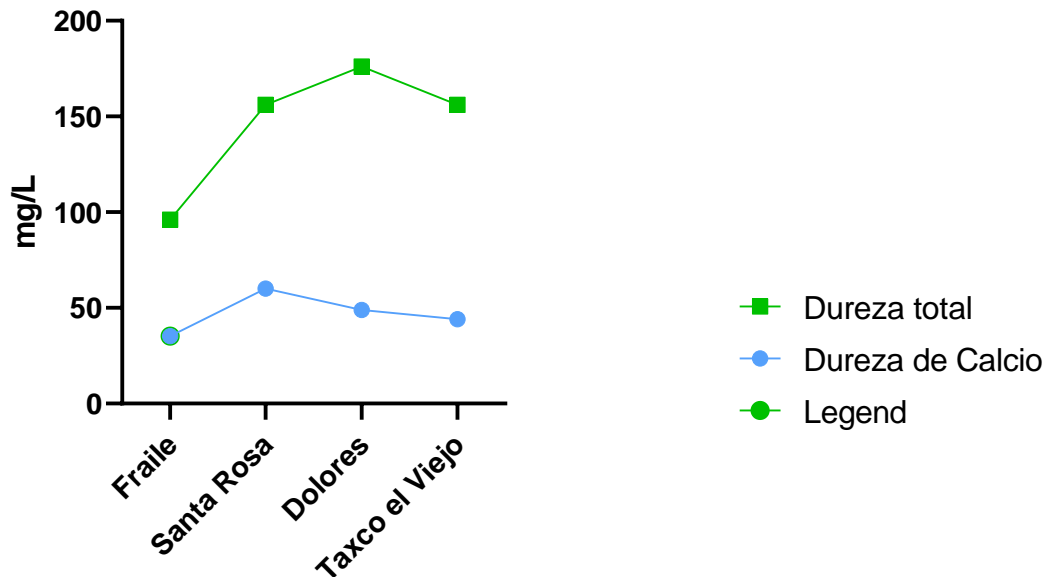


Figura 32. Relación de Dureza total y dureza de calcio en noviembre.

Uno de los parámetros organolépticos que indican la calidad del agua es el color, debido a que se relaciona con las partículas en suspensión y las sustancias disueltas que contiene. Su medición es importante para determinar los niveles de materia orgánica natural que hay en el agua, residuos orgánicos o humus, plancton, la presencia de metales o iones metálicos en disolución, o desechos industriales, por ello se incluye el parámetro en la NOM-001-SEMARNAT-2021. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede notar un cambio de color entre la época seca y de lluvia, probablemente por la disolución de residuos orgánicos que también aumentó con el cambio de época.

Es importante hacer resaltar los registros obtenidos en los cálculos para caudal, pues este presenta una disminución importante al transcurrir el tiempo debido a efectos de cambio climático y esto afecta de manera importante en la dinámica del río, ya que al disminuir el caudal, disminuye también su capacidad de amortiguamiento y autodepuración, poniendo en peligro la sobrevivencia del ecosistema y representando una pérdida en cuanto a los servicios ambientales, debido también a las múltiples descargas que llegan al cuerpo de agua tanto inorgánicas como orgánicas.

Finalmente, podemos destacar la importancia de evaluar los distintos tipos de contaminación presentes y sus distintos orígenes de una manera más particular como lo permiten los ICO, pues gracias a esto se puede reafirmar un problema grave de tipo inorgánico en El Río Cacalotenango (Cuadro 7), pues éste ha sido capaz de amortiguar los problemas de contaminación orgánica gracias a su dinámica a lo largo de su caudal, presentando así Niveles altos de contaminación por mineralización y por Sólidos en suspensión (Figura 23), lo que con el paso del tiempo, podría representar también un riesgo para la capacidad buffer del sistema si las condiciones se mantienen como hasta ahora, si esta capacidad se rompe se daría por perdido este ecosistema.

La composición iónica de las aguas superficiales es un reflejo de la geoquímica de la cuenca y puede brindar información sobre la presencia de fuentes de contaminación allí presentes. Los carbonatos (alcalinidad) presentes en el agua del río provienen principalmente de la disolución de minerales carbonáticos (calcita, dolomita, etc.) y silicatos presentes en rocas del material de recubrimiento de los relaves, que, en los meses de agosto fue arrojado al cauce del río por el aumento de actividades en los trabajos de recubrimiento.

La meteorización de los silicatos provee al río de grandes cantidades de sodio y en menor grado potasio. El potasio puede ser tan abundante como el sodio en los ríos, esto se debe a que el potasio es retenido de manera más fuerte que el sodio en sitios de intercambio catiónico.

Los compuestos del magnesio son más solubles que los de calcio y en la mayoría de los casos el hidróxido y el carbonato de magnesio precipitan en forma significativa sólo a pH muy elevado (>10).

El sulfato es la forma predominante del azufre en el agua y básicamente se asimila bajo esta forma. La descomposición de la materia orgánica provoca la liberación del azufre principalmente como ácido sulfhídrico que en condiciones aeróbicas se oxida con bastante rapidez.

El silicio, es un elemento químico de la familia del carbono presente prácticamente en todas las rocas, de entre todos los silicatos, los de mayor solubilidad son los de Na y K que se disuelven tras meteorizarse el mineral de origen; el sílice en el agua responde a dos estados, sílice coloidal o disuelta en ácido sílico, estas se hallan en equilibrio de polimerización y despolimerización siendo afectado por los iones en disolución y por disociación a un pH mayor a 9.0, ya que se incrementa su solubilidad. Dando lugar a procesos de sustitución isomórfica por la capacidad de intercambio catiónico de los compuestos de sílice. Estos procesos han aumentado por la alta presencia de sólidos en suspensión por lixiviación, lo que ha ocasionado el aumento de contaminación por mineralización en el agua del río Cacalotenango.

A pesar del alto grado de contaminación por mineralización, podemos observar un alto nivel de contaminación por materia orgánica, el cual, no es tan representativo como el anterior, sin embargo, llama la atención el posible incremento de ambos en conjunto, pues este puede ser causado por la formación de complejos organominerales, por lo tanto, la materia orgánica tiene una gran facilidad para unirse con fracciones minerales si se encuentra descompensada eléctricamente, en particular con los cationes, arcillas y óxidos de hierro y aluminio. Las uniones de la materia orgánica con los grupos hidroxilos de los bordes del mineral que se encuentran débilmente coordinados pueden ser disociados o protonizados en medios con pH básicos. Los hidroxilos protonizados otorga una carga positiva a las superficies del mineral y atraen a las moléculas de materia orgánica con carga negativa por sus grupos carboxilos. Los filosilicatos, los óxidos de Fe y Al presentan superficies cargadas positivamente que atraen a las moléculas de materia orgánica.

11 Conclusión

El impacto que se genera por la presencia de los relaves mineros y las obras realizadas en estos cerca del río Cacalotenango es evidente de acuerdo con los índices calculados, provocando contaminación principalmente de tipo inorgánico en los cuatro sitios de referencia, siendo mayor en El Fraile. Existe también contaminación de tipo orgánico de origen antrópico en la mayoría de los sitios de referencia cuyos niveles son relevantes a pesar de ser menores, pues la dinámica de autodepuración del río resulta lenta ante las concentraciones presentes,

provocando procesos químicos que generan acumulación de compuestos sobre todo en Dolores y Taxco el Viejo, dicha acumulación puede no ser tan relevante en época de lluvias, pues es en la época en la que el río tiene mayor capacidad de amortiguamiento, sin embargo, dicha capacidad se verá enormemente afectada por la disminución del caudal en época seca; esto es muy importante, ya que tanto el nivel de eutrofización, como la capacidad buffer del sistema se ponen en riesgo, lo que representaría la pérdida irremediable del ecosistema, por lo que es necesario la aplicación correcta inmediata de la legislación ambiental para los pasivos ambientales, protección y remediación, así como una mayor difusión para la educación ambiental en la zona, con el fin de que los pobladores participen y tengan conciencia de un correcto cuidado y manejo de su entorno. Es importante resaltar que se deben mejorar las actividades de restauración o al menos contar con una supervisión adecuada, ya que son estas las que están afectando en gran medida al cuerpo de agua.

Los índices de Contaminación con los que se trabajó son de gran ayuda ya que sintetizan la información y arrojan rápidamente el resultado de la problemática que se está presentando en el cuerpo de agua, ahorrando mucho tiempo de análisis individual para cada parámetro, agrupando los que están relacionados.

Los resultados arrojados por los índices de contaminación nos indican que si no se mejoran los trabajos de restauración de los relaves en el Fraile y que además no se mejora la infraestructura en estas zonas rurales (control de descargas de aguas residuales), el problema en el río podría agravarse rebasando los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad vigente, ya que la población crece cada vez más y el cambio climático ha provocado que la época de lluvias cada vez sea más corta, afectando el sistema de auto purificación del río.

Es importante que se busque dar apoyo, continuidad y prioridad a estudios como este, ya que dan a conocer importantes resultados y datos que podrían servir para una correcta planeación de los programas de monitoreo de calidad y control de las condiciones ambientales generales de los ríos del país.

12 Referencias

Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas.
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166772/NMX-AA-026-SCFI-](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166772/NMX-AA-026-SCFI-2010.pdf)

[2010.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166772/NMX-AA-026-SCFI-2010.pdf)

Almazán, M., Almazán, A., Carreto, B., Hernández, E., Nava, A., Almazán, R. (2016). Calidad y clasificación de usos del agua en la cuenca baja del río Papagayo, Guerrero, México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 3(9), 293-305.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282016000300293&lng=es&tlng=es

Armijo, M.R., Basegio, C.N., Cofrade. R.B. y Ramos, C.T. (2019). Contaminantes Químicos del Agua: Contaminación Antropogénica. *Molecula Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*. 35, 39-47.
<https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/moleqla/documentos/Numero35/Numero-35.pdf>

Arredondo, F.J., Ponce, P.J. (1998). Calidad del agua en acuicultura. Conceptos y aplicaciones. AGT Editores, 22pp

Barrera, E.G., Fernández, R.C., Wong, C., Ramírez, R.P. (2013). La sensibilidad del grupo coliforme como indicador de la presencia de enterobacterias patógenas en cuatro cuerpos acuáticos de México. 01/12/2019, de Hidrobiológica
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972013000100009

Biodiversidad mexicana. (10 de junio de 2022). *Ríos y lagos*.
<https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/ecosismex/rios-y-lagos>

Comisión Nacional del Agua. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Buenavista de Cuéllar.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103667/DR_1204.pdf

Comisión Nacional del Agua (2018) <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php>

Consejo de Europa. (1968). Carta del Agua, Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C. <https://agua.org.mx/contaminacion-del-agua/?fbclid=IwAR3lxaZzM0CifYmIjzEDzrJpuo7iA7rSKmXiWtacs3hIN1rPslo441WQ> fDU

Comisión Nacional del Agua. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Iguala. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103668/DR_1205.pdf

Comisión Nacional del Agua. (2017). Estadísticas de Agua en México

Welcomme, R.L., Cuencas fluviales. *FAO, Doc, 1980 Téc.Pesca*, (202):62 p.

Pedrozo A. (23 de enero de 2022). *La crisis hídrica, señal para transformación*. <https://www.gob.mx/imta/es/articulos/la-crisis-hidrica-senal-para-la-transformacion?idiom=es>

Corrales, P., Martín, R. (2013). Evaluación de la peligrosidad de jales de zonas mineras de Nicaragua y México y alternativas de solución. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* Volumen 65, número. 3, 2013, p. 427-446.

Cotler, Á., Galindo, A., González, M., Pineda, L., Ríos P. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. SEMARNAT.

De Vicuña, R., Amor, M., Escudero, B. (1983). *El Río. Aspectos Limnológicos*. Centro de edafología y Biología aplicada.

Dótor, A., Armienta, H., Árcega, C., Talavera, M. (2014). Procesos de transporte de arsénico y metales en aguas superficiales del distrito minero de Taxco, México: Aplicación de isótopos estables. UNAM. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972014000300008

Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México, Estado de Guerrero. <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM12guerrero/mediofisico.html>

Espinosa, A. (2014). Calidad del agua. Impluvium. Periódico digital de divulgación de la red del agua UNAM. http://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/impluvium/numero03.pdf?fbclid=IwAR2IJyz5ZL2S9NR1_MDcbvzhlyNv3algXieJa3MluNvouv0Uw80XxHgU5Ek

García, W. (2002), *El Sistema Complejo de la Cuenca Hidrográfica*, Universidad Nacional de Colombia. http://www.medellin.unal.edu.co/~poboyca/documentos/documentos1/documentos-Juan%20Diego/Plnaifi_Cuencas_Pregado/Sistema%20CuencaHidrogr%E1fica.pdf

Gómez, B, Santana, C, Romero, M, Armienta, H, Morton, B, Ruiz, H. (2010). Plantas de sitios contaminados con desechos mineros en Taxco, Guerrero, México. UNAM. *Boletín de la*

Sociedad Botánica de México. No. 87.

J Sundre. (2008). Modelos de calidad de aguas, Tema 5: Calidad de aguas en ríos, autodepuración. Universidad da Coruña.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Última reforma. DOF 11-04-2022. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>

Medel, R.A. (2009). Caracterización Físicoquímica de Jales Mineros y Evaluación de Biosólidos como Propuesta de Remediación. Cideteq.

Mora, B. D., Sánchez, P. L., , Del Razo .L.M., González, A. C., Medina, D. I., Robledo, M. M., Rojas, G. A. (2012). Presencia de arsénico y coliformes en agua potable del municipio de Tecuala, Nayarit, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(2), 127-135. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000200003&lng=es&tlng=pt.

NMX-AA-029-SCFI-2001. Análisis de Aguas - Determinación de Fósforo Total en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166773/NMX-AA-029-SCFI-2001.pdf>

NMX-AA-039-SCFI-2001. Análisis de Aguas - Determinación de Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM) En Aguas Naturales, Potables, Residuales y Residuales Tratadas. <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa039-01.pdf>

NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de Agua - Determinación de Cloruros Totales en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166789/NMX-AA-073-SCFI-2001.pdf>

NMX-AA-17-1980. AGUAS.- Determinación De Color. <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa017.pdf>

NMX-AA-17-1980. AGUAS.- Determinación De Color. <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa017.pdf>

NMX-AA-026-SCFI-2010 Análisis de Agua - Medición de Nitrógeno Total Kjeldahl en Ramírez Corrales José Miguel. (2006). Detergentes orgánicos sintéticos y ambiente. Hidrogénesis, Vol.4, 22-27.

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

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166147/nmx-aa-042-scfi-2015.pdf>

Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina OCMAL. (2015). 15 millones de metros cúbicos de desechos de minas contaminan la comunidad de Taxco.

<https://www.ocmal.org/15-millones-de-metros-cubicos-de-desechos-de-minas-contaminan-comunidad-de-taxco/>

Ramírez, A., Restrepo, R., Viña, G. (1997). Cuatro Índices De Contaminación Para Caracterización De Aguas Continentales. Formulaciones y Aplicación. Ciencia, Tecnología y Futuro - Vol. 1 Núm. 3

Romero, L. (2016). La UNAM al rescate ambiental de Taxco. <http://www.gaceta.unam.mx/20160905/la-unam-al-rescate-ambiental-de-taxco/>

Santos, J., Coria, J., Huerdo, J., Rodríguez, G. (2013) Influencia de jales mineros sobre el río Maconí, Querétaro, y evaluación del proceso de atenuación natural por dispersión. Boletín de la sociedad Geológica Mexicana. <http://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v65n3/v65n3a15.pdf>

Secretaria de Gobernación. (1923). Diario Oficial de la Federación, Tomo XXIV, No.80. http://dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?codnota=4535187&fecha=3/08/1923&cod_diario=193533

SEMARNAT, Dirección General de Estadística e Información Ambiental, noviembre, 2015, http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AGUA05_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce.

Semarnat, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. México, DF, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de www.biblioteca.semarnat.gob.mx

Structuralia. 2017. Structuralia. [En línea] 27 de Marzo de 2017. <https://blog.structuralia.com/como-se-produce-la-autodepuracion-de-los-rios>.

13 Anexo 1

Especie	Especie		Especie		Especie		Especie		Especie		Especie		Especie		Especie		Especie		
	Parámetros	Unidad	Frías	Verde	Frías	Verde	Frías	Verde	Frías	Verde	Frías	Verde	Frías	Verde	Frías	Verde	Frías	Verde	
Alcalinidad Total	mg/L	31	40	30	50	10	44	20	24	14	24	12	12	32	40	11	12	21	
Acidez	mg/L	4000	1000	1270	2500	1500	1580	1200	1000	112	60.8	56	56	100	64	64	112	100	
Dureza Calcio	mg/L	180.18	280.28	270.27	0.02084	812.812	240.24	178.178	226.226	634.2	28.95	35.26	35.26	57.29	58.28	60.17	48.89	106.4	
Cloruros	mg/L	0.019	0.019	0.034	0.02884	0.0128838	0.019112	0.007406	0.009334	0.006556	0.006556	0.006556	0.006556	0.0093468	0.0218372	0.0039304	0.0079408	22.8	
DDO	mg/L	37.136	27.116	23.84	3.95.14	3.88.17	74.87	54.425	84.075	94.7562	89.7125	64.50625	10.4825	16.53125	19.5125	170.5862	180.2812	44.08	
SD	mg/L	8.105	13.17	18.25	2.2	3.1	10.2	18.2	16.2	34.3	7.1	5.2	5.2	10.4	5.2	5.2	5.2	15	
SAAM	mg/L	0.2	0.28	0.26	1.98	1.54	3.6	2.7	3.9	3.6	7.09	5.82	2.97	10.34	5.54	5.54	5.82	14.4	
Nitrogeno Ammoniacal	mg/L	0.000266	0.00283	0.00036	0.1464055	0.1846833	0.0405424	0.007317	0.002821206	0.34701209	0.4608143	0.17570389	0.1888802	0.3667853	0.2679483	0.28158749	0.14273811	0.00168	
Nitrogeno Organico	mg/L	0.000274	0.00305	0.00032	0.1004824	0.14706512	0.1228314	0.007317	0.00727988	0.02571	0.002035	0.00184	0.00218	0.0016	0.0022	0.0017	0.0021	0.0021	
Nitrogeno Total	mg/L	0.000304	0.00338	0.000328	0.14797052	0.204801238	0.12932633	0.0072394	0.00922914	0.006467	0.0000757	0.00444	0.00458	0.00449	0.0043	0.0044	0.0044	0.0043	
Nitratos	mg/L	0.00011	0.0013	0.00015	0.0005	0.0007	0.0023	0.00153	0.0002	0.0153	0.00255	0.00435	0.00444	0.00751	0.00751	0.00751	0.00751	0.0091	
Fosforo Hidrolizable	mg/L	0.00013	0.00163	0.00017	0.0016	0.0016	0.0049	0.008	0.063	0.089724	0.089706	0.01812328	0.0202098	0.03670791	0.1142889	0.172826	0.102413	0.010413	
Grasas y Aceites	mg/L	0.00059	0.0082	0.0087	0.7	3.7	0.0098	0.022	0.33	5.3179	9.518	2.03639	12.286	12.286	7.8	4.539	5.853	14.52	
Sulfatos	mg/L	0.0059	0.0082	0.0087	0.7	3.7	0.0098	0.022	0.33	5.3179	9.518	2.03639	12.286	12.286	7.8	4.539	5.853	14.52	
Coliformes Totales	PKM	2	2	15	2	2	1898	4931	4931	457	11	176	1581	1581	144.53	141.42	188.8159	188.8159	
Coliformes Fecales	PKM	2	2	15	2	2	1898	4931	4931	457	11	176	1581	1581	144.53	141.42	188.8159	188.8159	
Long de onda Dominante	nm	550	20	500	550	550	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	570
Pureza con pH ajustado	%	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
M Temp. Ambiente	°C	7.22	6.3	5.19	7.53	7.4	8.81	8.46	8.57	8.3	7.96	8.37	8.15	7.51	7.6	7.7	7.7	8.24	8.24
M Temp. Del Agua	°C	19	6.8	17.51	24.1	23.4	24.1	20.03	23.09	19.6	19.4	18.55	18.3	18.5	19.23	19.06	19.06	21	21
M Conductividad	µS/cm	0.2463	0.5918	0.5941	0.573	0.2874	1.3363	1.3896	0.68751	0.8431	1.01	0.7205	0.6843	0.848	1.0294	1.0294	1.8074	1.8074	1.8074
Vol. Mue	L	0.042851923	0.481120429	0.027728495	0.021688697	3.233927212	0.1837462	0.07380193	0.08427189	0.0718584	0.0378389	0.12822745	0.018797949	0.19545403	0.08484617	0.035426214	0.017280395	0.017280395	0.017280395

En Mayo no habia agua en la estacion de referencia Tanco el Viejo

Muestra dañada

Dato no existente

Anexo 2. Tablas de concentraciones y graficas para el cálculo de los ICO.

Tabla 1. Concentraciones de referencia de conductividad para el ICOMI.

CONDUCTIVIDAD ($\mu\text{S/cm}$)		
Concentración	Fuente	Calidad
300 – 18.000	CFS	Salobres
3.500 – 100.000	CFS	Saladas
Hasta 400	RD	Deseable potable
Hasta mineralización	RD	Tolerable potable
400	CEE	Consumo humano
20 - 50	R	Alta montaña
150 - 200	R	Cuenca baja

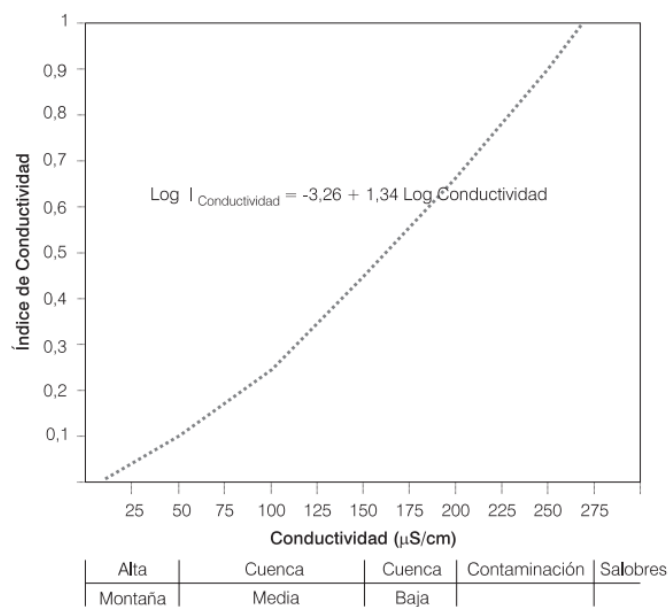


Figura 1. Índice de contaminación para la conductividad.

Tabla 2. Concentraciones de referencia de dureza para el ICOMI.

DUREZA ($g \cdot m^{-3}$)		
Concentración	Fuente	Calidad
150	R.D.	Deseable potable
60	CEE	Potable mínimo
60 – 120	USA	Abastecimiento humano (deseable)
300 – 500	USA	Abastecimiento humano (permisible)
< 10	N y V	Oligotrofia
10 - 20	N y V	Productividad débil
20 – 40	N y V	Productividad mediocre
40 - 80	N y V	Productividad media
80 – 110	N y V	Eutrofia
110 - 150	N y V	Aguas duras
>150	N y V	Aguas incrustantes muy duras

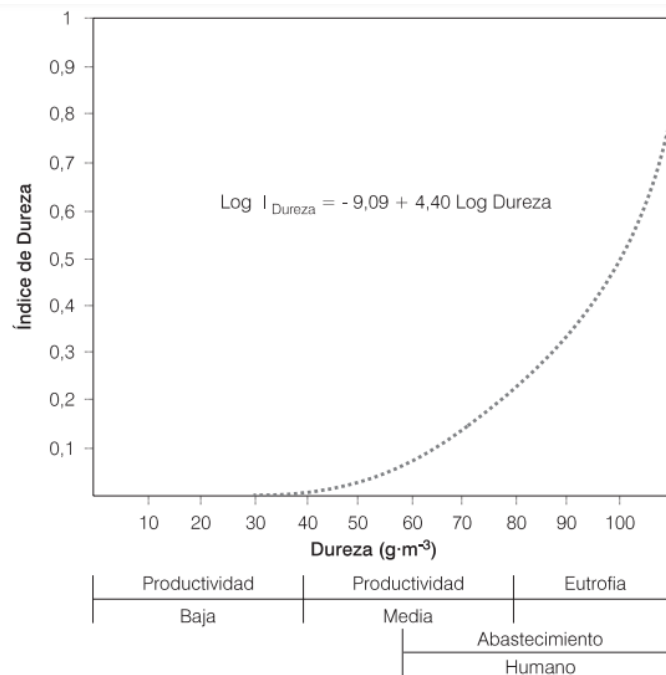


Figura 2. Índice de contaminación para Dureza.

Tabla 3. Concentraciones de referencia de Alcalinidad para el ICOMI.

ALCALINIDAD ($g \cdot m^{-3}$)		
Concentración	Fuente	Calidad
0 – 40	CFS	Dulces blandas
41 – 200	CFS	Dulces blandas
>200	CFS	Salobres
>200	CFS	Saladas
30	CEE	Potable mínimo
20 - 200	USA	Vida piscícola
30 – 500	USA	Abastecimiento humano
<25	N y V	Alta montaña
25 - 50	N y V	Curso medio
50 – 100	N y V	Macizos cristalinos
100-150	N y V	Curso interior
150 – 250	N y V	Aguas muy productivas
2580 - 350	N y V	Aguas contaminadas
>350	N y V	Aguas contaminadas

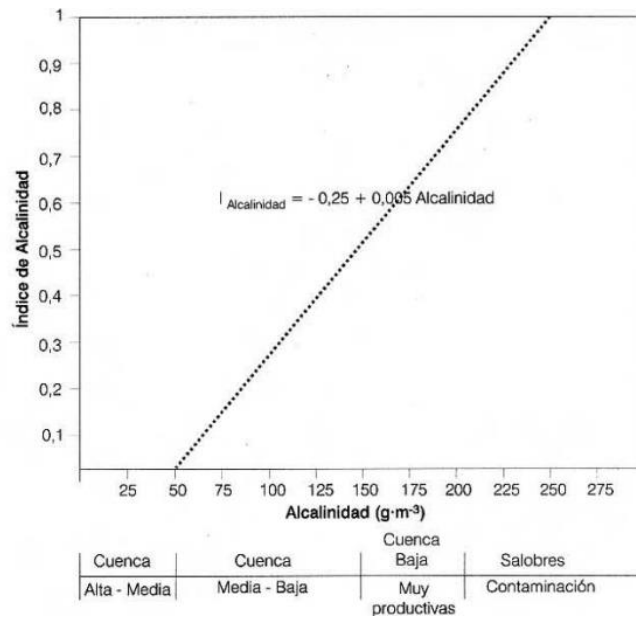


Figura 3. Índice contaminación por Alcalinidad.

Tabla 4. Concentraciones de referencia de DBO para el ICOMO.

DBO ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)		
Concentración	Fuente	Calidad
0.75 – 2	TVA	Recreación
1.5 – 3.5	TVA	Recreo, Pesca
<1	N y V	Normal
1 – 3	N y V	Aceptable
3 - 6	N y V	Calidad dudosa
>6	N y V	Anormal
1 – 3	M	Oligosaprobio
3.5 – 12	M	Mesosaprobio
15 – 100	M	Polisaprobio
>100	M	Eusaprobio

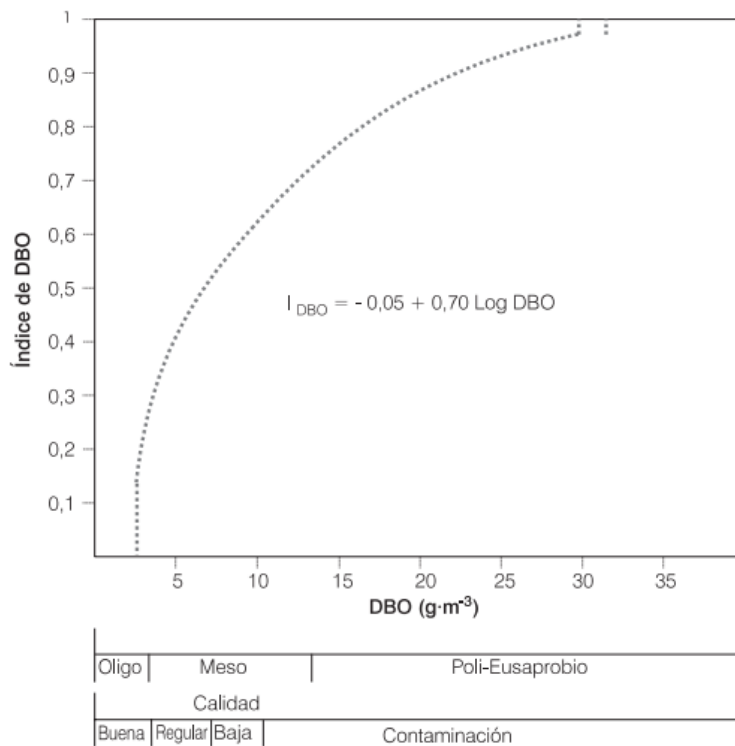


Figura 4. Índice de contaminación para la DBO.

Tabla 5. Concentraciones de referencia de coliformes totales para el ICOMO.

COLIFORMES TOTALES (NPM*100cm ⁻³)		
Concentración	Fuente	Calidad
50 – 100	TVA	Recreación
100 – 1000	TVA	Recreo, pesca
0	RD	Potable. (desinfección).
1000	MS	Agrícola. Contacto secundario.
5000	MS	Potable (tratamiento convencional)
20000	MS	Potable (tratamiento convencional)

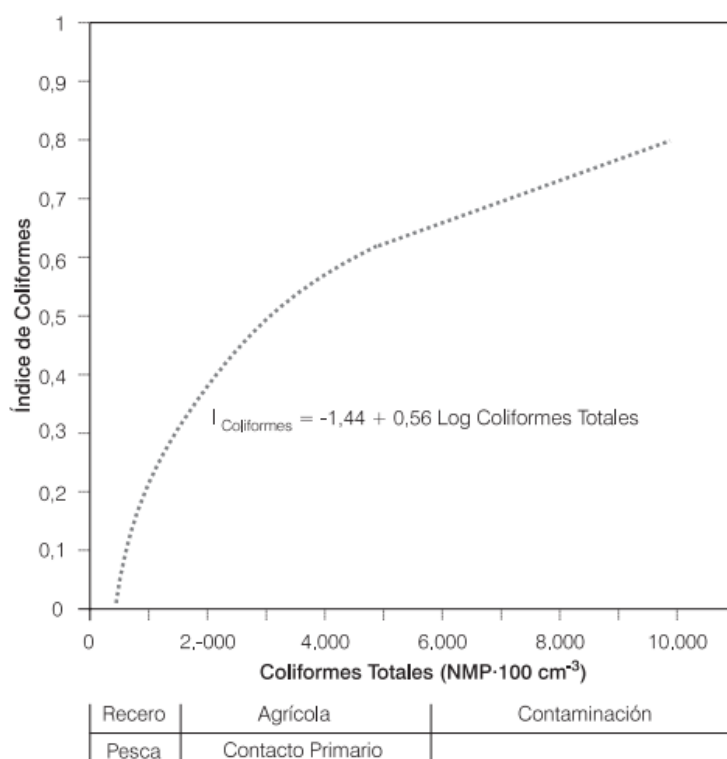


Figura 5. Índice de contaminación para coliformes.

Tabla 6. Concentraciones de referencia de oxígeno para el ICOMO.

OXÍGENO ($g \cdot m^{-3}$)		
Concentración	Fuente	Calidad
6.5 – 7.5	TVA	Recreación
5 – 7	TVA	Recreo, pesca
>3	USA	Abastecimiento humano
>4	USA	Vida piscícola
>4	MS	Preservación flora y fauna. Aguas cálidas.
>5	MS	Aguas frías
>75	CEE	Consumo humano
>70	MS	Contacto primario y secundario (recreación).

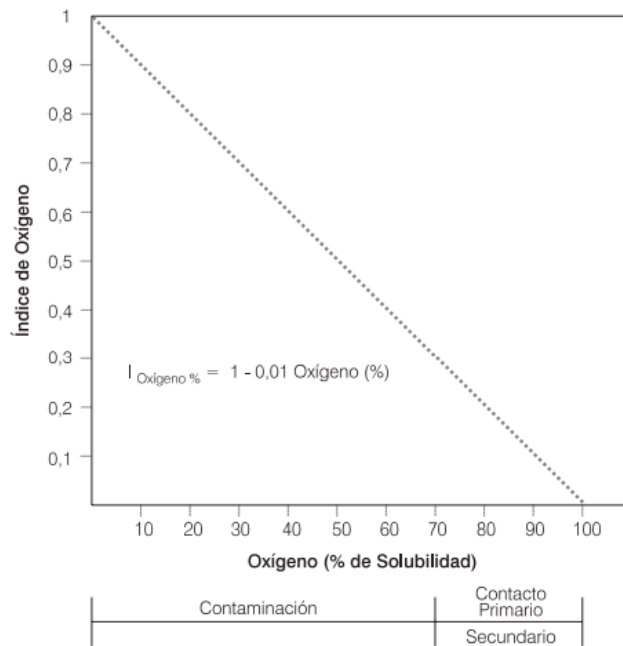


Figura 7. Índice de contaminación para el oxígeno (%).

Figura 6. Índice de contaminación para el oxígeno.

Tabla 7. Concentraciones de referencia de solidos suspendidos para el ICOSUS.

SÓLIDOS SUSPENDIDOS ($g \cdot m^{-3}$)		
Concentración	Fuente	Calidad
<10	N y V	Muy buena cuenca alta
10 – 25	N y V	Normal, cuenca alta – media
25 – 50	N y V	Buena. Cuenca media- baja
50 – 75	N y V	Buena. Cuenca baja.
75 – 150	N y V	Media. Contaminados.
150 – 300	N y V	Mediocre, Contaminados
>300	N y V	Muy contaminados..

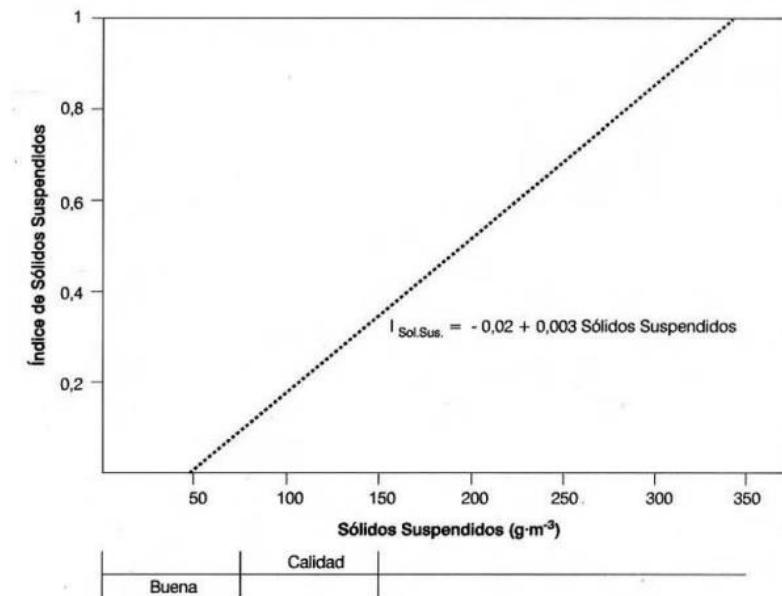


Figura 7. Índice de contaminación de solidos suspendidos.

Tabla 8. Concentraciones de referencia de fosforo para el ICOTRO.

FÓSFORO TOTAL ($g \cdot m^{-3}$)		
Concentración	Fuente	Calidad
0.17	RD	Deseable potable
<0.01	USEPA	Oligotrófica
0.01 – 0.02	USEPA	Mesotrófica.
>0.02	USEPA	Eutrófica.

Los parámetros tomados como guía provienen de: Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. España 1992(1).

- (1) TVA: Tennessee Valley Authority
- (2) CFS: Canadian Forestry Service
- (1) RD: Real Decreto
- (1) CEE: Comunidad Económica Europea
- (1) N y V: Nisbet y Vermeaux
- (2) M: Margalef, 1983.
- (3) MS: Ministerio de Salud, 1984.
- (4) USEPA: Thomann y Mueller, 1987.
- (5) R: Roldan, 1987.