

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA EDUCATIVO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS

**Caracterización fisicoquímica y microbiológica
del río Sabinal en dos épocas del año (lluvia y
estiaje) para la determinación de la calidad del
agua por medio de la aplicación de Índices de
Calidad (ICA)**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA

**Alicia Adriana Encizo Ramos
Mónica Márquez Castellanos**

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Hugo Alejandro Nájera Aguilar

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Octubre 2020



FORMATO F4

DEDICATORIAS

Primeramente, a Dios y al universo por permitirme concluir una etapa más en mi vida llena de crecimiento personal y profesional. A mi abue Clara Lesvia, por brindarme todo su cariño y por cuidarme desde el cielo.

A mi mamá, Clara Elvira, por ser un ejemplo para mí como mujer y profesionista, por su apoyo incondicional para alcanzar todas mis metas. Eres mi motivación.

A mi papá, Abraham por su apoyo siempre y todo el ánimo que me ha dado en todo momento a pesar de la distancia y por siempre creer en mí.

A mi familia, tíos y primos que estuvieron siempre presentes con palabras de aliento hacia mí.

A mis amigos, Vero, Jesús y Alicia por todos los momentos que hemos pasado juntos que sin duda siempre recordaré. A Chus, por su alegría y por ser mi amigo incondicional.

Mónica Márquez Castellanos

DEDICATORIAS

A mis padres, Octavio y Dolores, quienes han dado todo para darme una educación plena, por estar siempre presentes, por el aliento, la confianza y el cariño.

A mi hermano, Tavin, por apoyarme y estar presente con una sonrisa.

A mis amigos, Vero, Moni y Jesús, por todo el apoyo, por todas las risas, y los buenos momentos compartidos en los últimos años.

Alicia Adriana Encizo Ramos

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas por formarnos académica y profesionalmente, por sus instalaciones, por sus docentes, por el espíritu de investigación y el conocimiento otorgado.

Al Doctor Hugo Alejandro Nájera Aguilar por su gran apoyo, confianza, instrucción y compromiso durante la elaboración de este trabajo.

A nuestros sinodales, Dra. Rebeca Isabel Martínez Salinas y Dr. José Manuel Gómez Ramos, quienes dedicaron su tiempo para realizar invaluable y acertadas observaciones

A los profesores del programa educativo de Ingeniería Ambiental por sus enseñanzas y la formación que nos han conferido, que nos han permitido llegar a la culminación de nuestra carrera universitaria.

A la Mtra. Flor de Magaly González Hilerio y a la Ing. Fabiola Velasco Ruíz, por su apoyo durante nuestro tiempo en laboratorio y su guía.

A la coordinación de Ingeniería Ambiental, por su capacidad humana y por su respaldo a lo largo de nuestro tiempo en la universidad.

A la Licenciada Heidy Selene Montejo Bautista, por siempre involucrarse en nuestro desempeño académico, ofrecernos la ayuda necesaria y alentarnos a continuar con nuestros estudios y dar lo mejor de cada uno.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
JUSTIFICACIÓN	4
ANTECEDENTES.....	5
MARCO TEÓRICO	6
1. CALIDAD DEL AGUA	6
1.1. DINÁMICA DEL CICLO HIDROLÓGICO	6
1.2. CONTAMINACIÓN DEL AGUA	8
1.2.1. FUENTES DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA.....	8
1.2.2. CONTAMINANTES DEL AGUA.....	9
1.3. CALIDAD DEL AGUA	10
1.4. AGUAS RESIDUALES.....	10
1.4.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES	11
1.4.2. COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	13
2. EL RÍO SABINAL	13
2.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA	13
2.2. FISIOGRAFÍA Y RELIEVE.....	16
2.3. GEOLOGÍA.....	16
2.4. CLIMA.....	16
2.5. FLORA.....	16
3. CARACTERIZACIÓN.....	17
3.1. PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS	17
3.1.1. TEMPERATURA.....	17
3.1.2. POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH).....	18
3.1.3. OXÍGENO DISUELTO (OD)	19
3.1.4. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	19
3.1.5. POTENCIAL REDOX	19
3.1.6. COLOR.....	20

3.1.7. TURBIEDAD	21
3.1.8. ACIDEZ TOTAL.....	21
3.1.9. ALCALINIDAD TOTAL	21
3.1.10. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	22
3.1.11. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅)	22
3.1.12. SÓLIDOS	22
3.2. PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS	24
3.2.1. HUEVOS DE HELMINTO	24
4. ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA.....	24
4.1. ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA EN ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA.....	26
4.1.1. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA DE LA FUNDACIÓN NACIONAL DE SANIDAD (NSF WQI).....	26
4.1.2. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA DE DINIUS (1987)	27
4.2. ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA EN LATINOAMÉRICA.....	29
4.2.1. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA PARA MÉXICO.....	29
4.2.2. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA EN CORRIENTES SUPERFICIALES DEL INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (ICA IDEAM) PARA COLOMBIA	32
4.3. ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA EN EUROPA Y ASIA.....	33
4.3.1. ÍNDICE SIMPLIFICADO DE CALIDAD DEL AGUA (ISQA) (ESPAÑA)	33
4.3.2. ESTRATEGIA AMOEBA (A GENERAL METHOD OF ECOLOGICAL AND BIOLOGICAL ASSESSMENT)	35
5. ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN	42
5.1. ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN (ICO) (COLOMBIA).....	42
5.1.1. ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR MINERALIZACIÓN (ICOMI).....	43
5.1.2. ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR MATERIA ORGÁNICA (ICOMO)	44
5.1.3. ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR SÓLIDOS SUSPENDIDOS (ICOSUS)	45
5.1.4. ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR TEMPERATURA (ICOTEMP)	45
5.1.5. ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR pH (ICOpH).....	45
OBJETIVOS.....	47

METODOLOGÍA	48
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	52
APLICACIÓN DE ÍNDICES DE CALIDAD.....	66
APLICACIÓN DE ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN	77
DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	85
CONCLUSIONES.....	91
RECOMENDACIONES.....	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos generales de contaminantes del agua.....	9
Tabla 2. Características físicas, químicas y biológicas del agua residual y sus procedencias.	11
Tabla 3. Contaminantes de importancia en el tratamiento de las aguas residuales.....	12
Tabla 4. Subcuencas y superficies de la Cuenca del río Sabinal.	15
Tabla 5. Municipios y superficies que integran la Cuenca del río Sabinal	15
Tabla 6. Flora del río Sabinal.	17
Tabla 7. Niveles de Calidad de OD.....	19
Tabla 8. Valores Típicos de ORP de las Aguas Residuales en una PTAR.	20
Tabla 9. Pesos de los nueve parámetros incluidos en el índice de calidad	26
Tabla 10. Clasificación de la calidad del agua.....	27
Tabla 11. Pesos y subíndices del índice de calidad del agua de Dinius.....	28
Tabla 12. Variables y ponderaciones para el caso de 5 variables.	32
Tabla 13. Calificación de la calidad del agua según los valores que tome el ICA.....	33
Tabla 14. Clasificación de la Calidad de Agua del ICA – ISQA.....	35
Tabla 15. Valores para la Estrategia AMOEBA	37
Tabla 16. Valores Objetivos sugeridos para la estrategia AMOEBA.....	38
Tabla 17. Clasificación del índice AMOEBA de acuerdo a condición, valores y color.....	42
Tabla 18. Índices de contaminación.	43
Tabla 19. Significancia de los Índices de Contaminación (ICOs).	46
Tabla 20. Ubicación de los Puntos de Muestreo.	48
Tabla 21. Distancia entre los Puntos de Muestreo.....	48
Tabla 22. Metodología utilizada para la medición de los parámetros.	50
Tabla 23. Caracterización fisicoquímica y microbiológica del río Sabinal.....	52
Tabla 24. Valores para el agua potable de la OMS de los parámetros determinados.....	65
Tabla 25. Comparación con la composición típica del agua residual doméstica.....	65
Tabla 26. Pesos finales y valores de los subíndices para el cálculo del NSF WQI.....	66
Tabla 27. Calidad del Agua del río Sabinal de acuerdo con el NSF WQI.	66
Tabla 28. Pesos finales y valores de los subíndices para el cálculo del Índice de Dinius.....	67
Tabla 29. Calidad del Agua del río Sabinal de acuerdo con Dinius (1987).	67
Tabla 30. Valores de los pesos específicos y calidad de los parámetros medidos para el río Sabinal.....	71
Tabla 31. Calidad del agua del río Sabinal de acuerdo con León (1992).	72
Tabla 32. Comportamiento de los parámetros en el río Sabinal respecto a los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-1996.....	73

Tabla 33. Comportamiento de los parámetros en el río Sabinal respecto a los LMP de la NOM-002-SEMARNAT-1996.....	73
Tabla 34. Comportamiento de los parámetros en el río Sabinal respecto a los LMP de la NOM-003-SEMARNAT-1996.....	73
Tabla 35. Resultados del índice de CONAGUA de acuerdo con los datos del río Sabinal. ...	74
Tabla 36. Valores de los pesos ponderados y valor de los subíndices para el río Sabinal (ICA IDEAM).....	74
Tabla 37. Calidad del Agua del río Sabinal de acuerdo con el ICA IDEAM.....	75
Tabla 38. Resultados del índice ISQA de acuerdo con los datos del río Sabinal.....	75
Tabla 39. Resultados del índice AMOEBA (OPI) de acuerdo con los datos los del río Sabinal.	75
Tabla 40. Resultados de los puntos de muestreo en las dos épocas del año del índice ICOpH.....	77
Tabla 41. Resultados de los puntos de muestreo en las dos épocas del año del índice ICOMI.....	79
Tabla 42. Resultados de los puntos de muestreo en las dos épocas del año del índice ICOMO.....	81
Tabla 43. Resultados de los puntos de muestreo en las dos épocas del año del índice ICOSUS.....	83
Tabla 44. Valores de los parámetros analizados.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución Global del Agua.....	6
Figura 2. Esquematación del Ciclo Hidrológico y sus Etapas.....	7
Figura 3. Ubicación geográfica de la Cuenca del río Sabinal.....	14
Figura 4. Subcuencas del río Sabinal.....	14
Figura 5. Escala de pH.....	18
Figura 6. Rangos de calificación del ICA en función del uso del agua.....	29
Figura 7. Usos del agua en la Estrategia AMOEBA	37
Figura 8. Ubicación de los puntos de muestreo.	48
Figura 9. Puntos de muestreo del río Sabinal. Poniente (A), Centro (B) y Oriente (C).....	49
Figura 10. Gráfica de AMOEBA en el punto de muestreo Poniente en época de Lluvias.	76
Figura 11. Gráfica de AMOEBA en el punto de muestreo Centro en época de Lluvias.	76
Figura 12. Gráfica de AMOEBA en el punto de muestreo Centro en época de Estiaje.	76
Figura 13. Gráfica de AMOEBA en el punto de muestreo Oriente en época de Lluvias.	76
Figura 14. Gráfica de AMOEBA en el punto de muestreo Oriente en época de Estiaje.	77
Figura 15. Gráfica de ICOpH en el punto de muestreo Poniente en época de Lluvias.	78
Figura 16. Gráfica de ICOpH en el punto de muestreo Centro en época de Lluvias.	78
Figura 17. Gráfica de ICOpH en el punto de muestreo Centro en época de Estiaje.....	78
Figura 18. Gráfica de ICOpH en el punto de muestreo Oriente en época de Lluvias.....	78
Figura 19. Gráfica de ICOpH en el punto de muestreo Oriente en época de Estiaje.	79
Figura 20. Gráfica de ICOMI en el punto de muestreo Poniente en época de Lluvias.....	80
Figura 21. Gráfica de ICOMI en el punto de muestreo Centro en época de Lluvias.	80
Figura 22. Gráfica de ICOMI en el punto de muestreo Centro en época de Estiaje.....	80
Figura 23. Gráfica de ICOMI en el punto de muestreo Oriente en época de Lluvias.	80
Figura 24. Gráfica de ICOMI en el punto de muestreo Oriente en época de Estiaje.	81
Figura 25. Gráfica de ICOMO en el punto de muestreo Poniente en época de Lluvias.	82
Figura 26. Gráfica de ICOMO en el punto de muestreo Centro en época de Lluvias.....	82
Figura 27. Gráfica de ICOMO en el punto de muestreo Oriente en época de Lluvias	82
Figura 28. Gráfica de ICOSUS en el punto de muestreo Poniente en época de Lluvias.	83
Figura 29. Gráfica de ICOSUS en el punto de muestreo Centro en época de Lluvias.	83
Figura 30. Gráfica de ICOSUS en el punto de muestreo Centro en época de Estiaje.	84
Figura 31. Gráfica de ICOSUS en el punto de muestreo Oriente en época de Lluvias.....	84
Figura 32. Gráfica de ICOSUS en el punto de muestreo Oriente en época de Estiaje.	84

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Comportamiento del pH en el río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	53
Gráfico 2. Comportamiento del Oxígeno Disuelto en el río Sabinal, en época de lluvias con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	53
Gráfico 3. Comportamiento del Potencial Redox en el río Sabinal, en época de lluvias con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	54
Gráfico 4. Valores de la Conductividad Eléctrica en el río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	55
Gráfico 5. Comportamiento de la Temperatura en el río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	55
Gráfico 6. Valores de Color Aparente en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	56
Gráfico 7. Valores de Color Verdadero en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con marcadores para los puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	56
Gráfico 8. Valores de Turbiedad en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	57
Gráfico 9. Concentraciones de Sólidos Sedimentables en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	58
Gráfico 10. Concentraciones de Sólidos Totales en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	59
Gráfico 11. Concentraciones de Sólidos Volátiles Totales en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	59
Gráfico 12. Concentraciones de Sólidos Suspendedos Totales en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	60

Gráfico 13. Concentraciones de Sólidos Suspendidos Volátiles en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	60
Gráfico 14. Concentraciones de Sólidos Disueltos Totales en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	61
Gráfico 15. Acidez total en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	62
Gráfico 16. Alcalinidad total en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	62
Gráfico 17. Concentraciones de DQO en el río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	63
Gráfico 18. Concentraciones de DBO ₅ en el río Sabinal, en época de lluvias con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	63
Gráfico 19. Índice de biodegradabilidad para las aguas del río Sabinal, en época de lluvias con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).....	64
Gráfico 20. Huevos de helminto encontrados en los puntos de muestreo del río Sabinal...	64
Gráfico 21. Índice de Dinius para uso como suministro de agua.....	68
Gráfico 22. Índice de Dinius para uso recreacional.....	69
Gráfico 23. Índice de Dinius para uso en vida acuática.....	69
Gráfico 24. Índice de Dinius para uso de vida marina.	70
Gráfico 25. Índice de Dinius para uso en la agricultura.	70
Gráfico 26. Índice de Dinius para uso en la industria.....	71

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital e insustituible que permite y potencializa la vida en la tierra. Su contaminación es un grave problema que reduce y encarece el suministro de agua potable en la población. Este recurso natural es esencial para la vida humana y es la parte más delicada del ambiente (Das y Acharya, 2003).

Dicho recurso es esencial para la vida, y todas las personas deben disponer de un suministro satisfactorio (suficiente, inocuo y accesible). Debe realizarse el máximo esfuerzo para lograr que la inocuidad del agua de consumo sea la mayor posible (Organización Mundial de la Salud, OMS, 2006).

Debido a su naturaleza, el agua es un sistema complejo, sobre el que habrá que realizar análisis tanto cualitativos como cuantitativos con objeto de conocer el tipo y grado de alteración que ha sufrido, buscando determinar su calidad.

La calidad del agua, es un término que engloba las características químicas, físicas y biológicas del agua, determinando así su condición en relación con el uso o propósito que se tenga para ella. El agua contiene diversas sustancias químicas, biológicas disueltas o suspendidas y una serie de microorganismos vivos que reaccionan con sus elementos físicos y químicos. Por estas razones es necesario tratarla para hacerla adecuada para su uso como abastecimiento a la población (Jiménez, 2007).

La seguridad del agua se mejora mediante la implantación de barreras múltiples, como la protección de los recursos hídricos, la selección y aplicación correctas de una serie de operaciones de tratamiento, y la gestión de los sistemas de distribución (por tuberías o de otro tipo) para mantener y proteger la calidad del agua tratada (OMS, 2006).

Para determinar la calidad del agua del río Sabinal, este estudio se enfocó en obtener valores de parámetros físicoquímicos, biológicos y bacteriológicos, en dos diferentes épocas del año (época de lluvias y estiaje) con la finalidad de observar y comparar los valores resultantes a causa de los cambios en las condiciones climáticas. Posteriormente, los resultados obtenidos se compararon con valores estandarizados de varias fuentes (diversos autores, instituciones especializadas, normatividad, etc.); para finalmente, aplicar los índices de calidad del agua para comprender la magnitud de la problemática actual.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La importancia de cuidar, preservar y manejar correctamente los cuerpos de agua radica no solamente en el importante papel que estos tienen en el funcionamiento adecuado de los ecosistemas donde se encuentran, sino también al representar una de las principales fuentes de suministro de agua para nuestras ciudades, ser de gran relevancia para las actividades como la pesca, agricultura y recreación, regular el clima, poseer una belleza paisajística, además de ser el hogar de diversas especies vegetales y animales, entre otras (SEMARNAT, 2002).

El problema más grande que ataca a los cuerpos de agua es la contaminación, ya que altera la calidad de un recurso de suma importancia para la vida en nuestro planeta y produce alteraciones en diferentes escalas afectando a todos los integrantes del medio que requieren de sus servicios (CONAGUA, 2010)

El agua provee diversos servicios ecosistémicos tales como almacenamiento de aguas dulces, la regulación de procesos naturales, un hábitat para especies faunísticas y florísticas, además de beneficiar a los seres humanos, a través del aprovechamiento de los cuerpos hídricos en actividades productivas, como la agricultura, la ganadería, la generación de energía, el turismo y recreación (Global Water Partnership, 2014)

El alto crecimiento demográfico de los últimos años y la falta de educación ambiental de las nuevas generaciones han propiciado que las descargas de aguas residuales y la producción de residuos sólidos aumenten; generando así, mayores afectaciones a nuestros ríos, lagos y océanos (Global Water Partnership, 2017).

La generación de aguas residuales se destaca dado que en la mayoría de los casos su disposición es incorrecta, lo que afecta a cuerpos de agua superficiales, ejemplo de ello es el caso del río Sabinal en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. A pesar de que en la ciudad en la última década se ha impulsado la operación de dos plantas tratadoras de aguas residuales, esta acción no ha sido suficiente para frenar las descargas de aguas residuales domésticas hacia el río en su travesía por la ciudad, propiciando su degradación a lo largo de los años ante la percepción de la sociedad chiapaneca (Hombre, Naturaleza, A.C., 2014).

Históricamente, la cuenca del río Sabinal se ha visto afectada por: descarga de drenajes, plagas, incendios, deforestación, sobrepoblación, etc., problemática relacionada con permisos indebidos de cambio de uso de suelo, así como al crecimiento urbano que se ha registrado principalmente en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, cuyo crecimiento demográfico ha sido del 13% en los últimos años (Hernández, 2013).

De acuerdo con Castañón y Abraján (2009), el agua superficial del río Sabinal se encuentra altamente contaminada en su zona media y final. Se registraron altas concentraciones de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno Amoniacal, Sólidos Suspendidos y Sedimentables, así como de Coliformes Totales y Fecales. Dichas concentraciones se encuentran fuera de los límites máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-127-SSA1-1994. Sin embargo, esta investigación únicamente se realizó en un solo periodo.

Por lo anterior, es necesario establecer un diagnóstico sobre la calidad del agua del río Sabinal, que permita saber el tipo de contaminantes presentes y sus niveles, lo que marcaría la pauta de las acciones a tomar para mitigar, reducir y/o recuperar la calidad del agua en el río.

JUSTIFICACIÓN

El agua es un elemento esencial para el desarrollo de la vida en nuestro planeta ya que es parte fundamental del equilibrio ecológico de los ecosistemas, interviene en gran parte de los procesos biológicos, satisface las necesidades básicas del ser humano y es utilizada en la mayoría de sus actividades productivas; además de ser un factor de suma importancia en el desarrollo y bienestar económico y productivo de todos los países (Paredes, 2015).

En la búsqueda de su bienestar, el ser humano ha dado origen a las grandes ciudades que hoy en día conocemos, las cuales, al paso del tiempo, se han poblado más y, como se ha mencionado anteriormente, esto puede ocasionar problemas de contaminación.

Para el caso de Tuxtla Gutiérrez y el río Sabinal, el problema de la contaminación está relacionado con los vertidos continuos de origen doméstico, liberando en el agua muchas sustancias que superan su capacidad para eliminarlas por medios naturales, afectando las comunidades que viven en ella (Jiménez *et al.*, 2004).

Como todo problema, antes de estar en condiciones de proponer alternativas de solución, necesita ser estudiado y analizado a fondo, por lo que conocer la calidad del agua del río representará uno de los primeros pasos en la búsqueda de soluciones.

Por esta razón, se generarán datos en cuanto a su calidad fisicoquímica y microbiológica; para de esta manera, aportar nueva información sobre la situación del agua del río Sabinal (Castañón y Abraján, 2009; SEMAHN, 2020); contribuyendo al archivo histórico de este tema, que pudiera ayudar a futuras investigaciones que pretendan continuar con el monitoreo de este cuerpo de agua.

Asimismo, este trabajo evaluará el estado del río Sabinal bajo diferentes índices de calidad del agua tanto nacionales como internacionales.

ANTECEDENTES

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) reportó para 2018 un volumen de 7.43 miles de hm³/año de aguas residuales provenientes de descargas municipales de los centros urbanos en México. De dicho volumen, 6.81 miles de hm³/año son recolectados por el alcantarillado y de estas, 4.34 miles de hm³/año son tratadas.

Derivado de lo anterior, se reporta una carga contaminante generada de 2.01 millones de toneladas de DBO₅ al año, donde únicamente 1.84 millones de toneladas pertenecen a las aguas recolectadas por el alcantarillado y 0.93 millones de toneladas se remueven en los sistemas de tratamiento.

Lo anterior indica que un porcentaje de las aguas residuales generadas y su correspondiente carga orgánica no es contabilizado, y que, del volumen de aguas residuales colectado, 36.27% fue vertido sin previo tratamiento (CONAGUA, 2018; INECC, 2018), junto con la carga orgánica que trae consigo, lo cual puede causar contaminación a los cuerpos de agua naturales y suelos.

Para el caso del río Sabinal, existen investigaciones en cuanto a su calidad biótica como la realizada por Jiménez *et al.* (2004), que aporta datos importantes sobre las características físicas de lugar (tipo de suelo, clima, etc.) y sobre los efectos de la mancha urbana en las comunidades de peces que habitan ese ecosistema. En el aspecto microbiológico, Torres *et al.* (2010) estudian la presencia de Protozoarios y Rotíferos de diferentes especies en el agua residual del río Sabinal.

El trabajo realizado por Castañón y Abraján (2009) en el cuerpo de agua a muestrear es el más cercano a la estructura del presente proyecto, ya que realizaron una caracterización fisicoquímica y compararon los valores obtenidos con los de las Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-127-SSA1-1994.

De igual manera, la Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural informa que realizaron una caracterización fisicoquímica y bacteriológica del río Sabinal en el año 2019, con el fin de conocer la calidad actual del agua del río Sabinal, comparando los valores obtenidos con los indicadores de la CONAGUA, y la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMAHN, 2020).

MARCO TEÓRICO

1. CALIDAD DEL AGUA

1.1. DINÁMICA DEL CICLO HIDROLÓGICO

Podemos pensar en el ciclo hidrológico como una serie de reservas o áreas de almacenamiento, y una serie de procesos que causan que el agua se mueva entre estas reservas. Las reservas más grandes son los océanos, que contienen aproximadamente un 97% del agua de la Tierra. El 3% restante es el agua dulce, tan importante para nuestra sobrevivencia. De ésta, aproximadamente el 78% está almacenada en la Antártica y en Groenlandia.

Aproximadamente, el 21% de agua dulce en la Tierra está almacenada en sedimentos y rocas debajo de la superficie de la tierra. El agua que vemos en los ríos, arroyos, lagos y en la lluvia constituye menos del 1% del agua dulce de la Tierra y menos que el 0.1% de toda el agua del planeta (Egger, 2003).

En la Figura 1, se presenta una descripción detallada de la distribución global del agua.

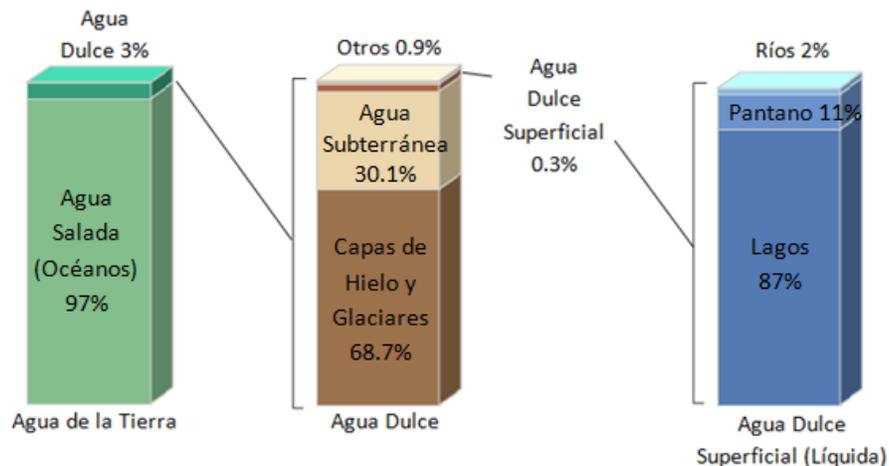


Figura 1. Distribución Global del Agua.
Fuente: United States Geological Survey (USGS).

El ciclo del agua (o ciclo hidrológico) es un fenómeno en donde el agua se mueve a través de sus tres estados (gas, líquido y sólido) sobre la atmósfera, la litósfera, la hidrósfera y la biósfera.

El ciclo hidrológico se encarga de regular la temperatura, cambiar el clima, crear las lluvias, circular los minerales del suelo y crear las formas geográficas de la Tierra (icebergs, ríos, lagos, etc.) (Advanced Purification Engineering Corp (APEC), 2013). En la Figura 2 podemos observar las 7 etapas de este ciclo:

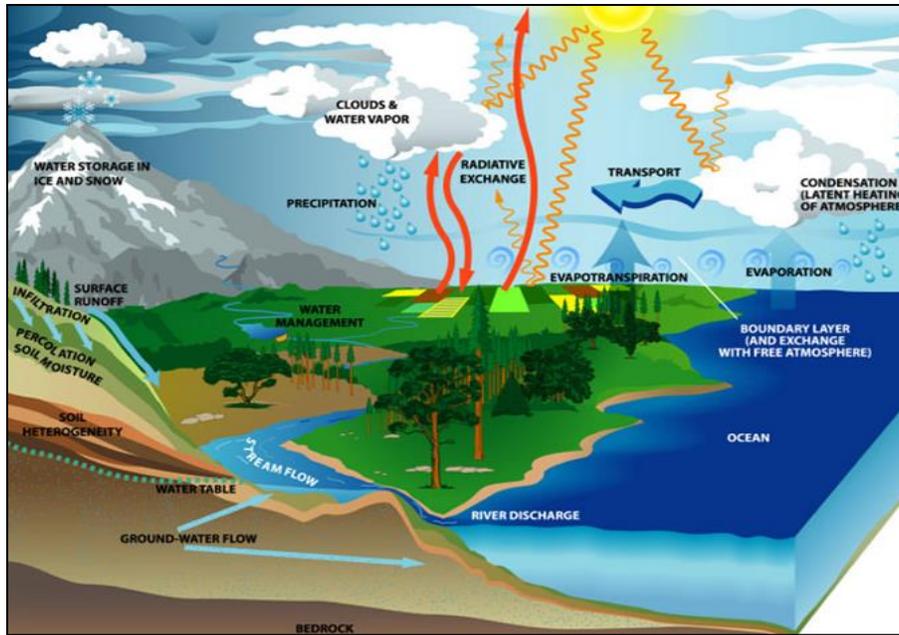


Figura 2. Esquemización del Ciclo Hidrológico y sus Etapas.

Fuente: APEC, 2013

1. **Evaporación:** Es un proceso en donde el agua superficial se transforma en vapor de debido al calor del Sol y se mueve de la hidrósfera a la atmósfera. Al momento de evaporarse, se reduce la temperatura de los cuerpos de agua.
2. **Condensación:** Al convertirse en vapor, este llega a la atmósfera. En altitudes grandes, el vapor de agua se convierte en pequeñas partículas de hielo/gotas debido a las bajas temperaturas presentes. Estas partículas se juntan y forman las nubes y neblinas.
3. **Sublimación:** Es el proceso en donde el hielo, directamente se convierte en vapor de agua sin haber pasado por el estado líquido. Este fenómeno se acelera cuando la temperatura es baja o la presión es alta.
4. **Precipitación:** Las nubes se vierten como precipitación debido al viento o a los cambios de temperatura. Esto ocurre porque las gotas de agua se combinan para hacer otras más grandes y el aire no puede contener más agua. A grandes altitudes, la temperatura es baja y por lo tanto las gotas pierden su energía térmica y caen como lluvia. Si la temperatura es muy baja (por debajo de 0°C), las gotas caen como nieve. De esta forma, el agua entra en la litósfera.
5. **Transpiración:** A medida que el agua precipita, parte de ella es absorbida por el suelo y entra en este proceso. La transpiración es un fenómeno donde el agua líquida es convertida en vapor de agua por las plantas. Las raíces de las plantas absorben el agua y la empujan hacia las hojas donde se usa para la fotosíntesis. Así, el agua entra en la biósfera y sale en forma de gas.

- 6. Escorrentía:** Es el proceso en donde el agua corre sobre la superficie de la Tierra. Cuando la nieve se derrite, también conduce a la escorrentía. Cuando el agua corre sobre el suelo, desplaza el suelo superior con él y mueve los minerales junto con el flujo de agua. Este escurrimiento se combina para formar canales y luego ríos; y termina en lagos, mares y océanos. En esta fase, el agua entra en la hidrósfera.
- 7. Infiltración:** Parte del agua que precipita no escurre hasta los cuerpos de agua, sino que se mueve profundamente en el suelo, es decir, se infiltra; y de esta manera aumenta el nivel de la capa freática (APEC, 2013).

El agua dentro del sistema dinámico del ciclo hidrológico precipita hacia la hidrósfera y litósfera a través de la lluvia por enfriamiento de las nubes. Durante este proceso arrastra impurezas presentes en el aire atmosférico, que al circular por la superficie o a nivel de capas profundas, se le añaden otros contaminantes químicos, físicos o biológicos generando con ello una contaminación natural, al paso del tiempo, pueden existir otras fuentes contaminantes de procedencia humana, debido a las actividades agrícolas, ganaderas o industriales, que hacen sobrepasar la capacidad de autodepuración de la naturaleza (Romero, 1999).

1.2. CONTAMINACIÓN DEL AGUA

Por contaminación se entiende generalmente una presencia de sustancias químicas o de otra naturaleza en concentraciones superiores a las condiciones naturales. Entre los contaminantes más importantes se encuentran los microbios, los nutrientes, los metales pesados, los químicos orgánicos, aceites y sedimentos; el calor también puede ser un agente contaminante, al elevar la temperatura del agua. Los contaminantes constituyen la principal causa de la degradación de la calidad de agua en el mundo (UNESCO, 2009).

La contaminación del agua se define como la presencia de sustancias u organismos extraños en un cuerpo de agua en tal cantidad y con tales características que impiden su utilización con propósitos determinados (Arellano, 2002).

1.2.1. FUENTES DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA

La contaminación del agua es a menudo discutida en términos de su fuente:

- 1. Contaminación de Fuentes Puntuales:** Proviene de una fuente discreta, como una tubería o drenaje que fluye de una actividad industrial. Puede ser crítica para la salud de una vía de agua, ya que se produce independientemente de las condiciones de flujo y, por lo tanto, puede afectar a una vía de agua cuando tiene la menor capacidad para acomodar la contaminación, especialmente en condiciones secas (New South Wales Environment Protection Authority (NSW EPA), 2015).

2. Contaminación de Fuentes Difusas: Surge de una multitud de diversos usos de tierras urbanas y rurales a través de una cuenca, en lugar de una fuente puntual discreta. Se debe principalmente a las lluvias, especialmente por las tormentas, aunque la contaminación de los sistemas de agua subterránea y acuíferos puede ocurrir durante largos periodos independientemente de las precipitaciones, y puede estar vinculada al uso actual o pasado del suelo (NSW EPA, 2015).

1.2.2. CONTAMINANTES DEL AGUA

De acuerdo con la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) (2017), un contaminante es toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural.

Generalmente, la mayor preocupación sobre la seguridad del agua es la presencia potencial de contaminantes químicos. Estos pueden incluir productos químicos orgánicos e inorgánicos y metales pesados, procedentes de fuentes industriales, agrícolas y de la escorrentía urbana (Manahan, 2007). Los contaminantes del agua pueden agruparse en algunas categorías generales, tal y como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos generales de contaminantes del agua.

Tipo de Contaminante	Impacto
Elementos Traza	Salud, Biota Acuática, Toxicidad
Metales Pesados	
Metales enlazados orgánicamente	Transporte de Metales
Radionúclidos	Toxicidad
Contaminantes Inorgánicos	Toxicidad, Biota Acuática
Asbesto	Salud Humana
Nutrientes de Algas	Eutrofización
Sustancias que proporcionan Acidez, Alcalinidad y/o Salinidad (en exceso)	Calidad del Agua, Biota Acuática
Contaminantes Orgánicos Traza	Toxicidad
Medicamentos, Anticonceptivos, etc.	Calidad del Agua, Biota Acuática
Bifenilos Policlorados	Posibles efectos biológicos
Plaguicidas	Toxicidad, Biota Acuática, Fauna
Residuos de Petróleo	Efectos en la Fauna, Contaminación Visual
Alcantarillado, Residuos Humanos y de Animales	Calidad del Agua, Niveles de Oxígeno
Materia Orgánica (medida como Demanda Bioquímica de Oxígeno)	
Patógenos	Efectos en la Salud

Tipo de Contaminante	Impacto
Detergentes	Eutrofización, Fauna, Contaminación Visual
Sedimentos	Calidad del Agua, Biota Acuática, Fauna

Fuente: Manahan, 2007.

1.3. CALIDAD DEL AGUA

La calidad del agua se refiere a las características físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, que cumplan con ciertas condiciones de seguridad. Para conocer esta información se requieren datos puntuales como la determinación de ciertos parámetros fisicoquímicos relacionados con la presencia de materia orgánica como la Demanda Química de Oxígeno y Demanda Bioquímica de Oxígeno; presencia de nutrientes por medio de Nitrógeno y Fósforo Total; y otros parámetros de interés como son: la Alcalinidad, el pH, la Temperatura, la Conductividad Eléctrica, los Sólidos Suspendidos, el Oxígeno Disuelto, entre otros (Foster *et al.* 2003).

Es importante conocer los requisitos de calidad para cada uso, a fin de determinar si se requiere tratamiento y qué proceso se debe aplicar para alcanzar la calidad deseada; asimismo, los estándares de calidad también se usan para vigilar los procesos de tratamiento y corregirlos si es necesario (Colín *et al.* 2014).

Por lo general, la calidad del agua se determina comparando las características físicas, químicas y bacteriológicas del agua con directrices de calidad del agua o estándares. Para ello, se mide la concentración de sus componentes y los efectos o propiedades causadas por la presencia de estas sustancias. El riesgo más grave para la salud humana relacionada con la calidad del agua de beber es el que deriva de la contaminación microbiológica, particularmente la fecal. Por lo que la protección de la salud exige que las fuentes de contaminación microbiológicas estén situadas lo bastante lejos de las fuentes de agua potable para eliminar o reducir el riesgo que representan (PNUMA, 2008).

1.4. AGUAS RESIDUALES

De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, se definen como las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

Las aguas residuales son una combinación de uno o más de los efluentes domésticos consistentes en aguas negras (orina, excreta y lodo fecal) y aguas grises (provenientes de la cocina y/o el baño), agua de establecimientos comerciales e instituciones (incluyendo hospitales), efluentes industriales, aguas pluviales y otros escurrimientos urbanos, agrícolas

y hortícolas, y los efluentes de la acuicultura (materia suspendida o disuelta) (Raschid-Sally y Jayakody, 2008).

1.4.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química y biológica. La Tabla 2 muestra las principales propiedades físicas del agua residual, así como sus principales constituyentes químicos y biológicos, y su procedencia (Metcalf y Eddy, 1998).

Tabla 2. Características físicas, químicas y biológicas del agua residual y sus procedencias.

Características	Procedencia
Propiedades Físicas:	
Color	Aguas Residuales Domésticas e Industriales, degradación natural de materia orgánica
Olor	Agua Residual en descomposición, residuos industriales
Sólidos	Agua de suministro, aguas residuales domésticas e industriales, erosión del suelo, infiltración y conexiones incontroladas
Temperatura	Aguas Residuales Domésticas e Industriales
Constituyentes Químicos:	
Orgánicos:	
Carbohidratos	Aguas Residuales Domésticas, Industriales y Comerciales
Grasas Animales, Aceites y Grasa	
Pesticidas	Residuos Agrícolas
Fenoles	Vertidos Industriales
Proteínas	Aguas Residuales Domésticas, Industriales y Comerciales
Contaminantes Prioritarios	
Agentes Tensoactivos	
Compuestos Orgánicos Volátiles	
Inorgánicos:	
Alcalinidad	Aguas Residuales Domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea
Cloruros	
Metales Pesados	Vertidos Industriales
Nitrógeno	Residuos Agrícolas y aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
pH	Aguas Residuales Domésticas, Industriales y Comerciales
Fósforo	Aguas Residuales Domésticas, Industriales y Comerciales; aguas de escorrentía
Azufre	Agua de suministro; aguas residuales domésticas e industriales

Características	Procedencia
Gases:	
Sulfuro de Hidrógeno	Descomposición de Residuos Domésticos
Metano	
Constituyentes Biológicos:	
Animales	Cursos de agua y plantas de tratamiento
Plantas	
Protista (Eubacterias y Archeobacterias)	Aguas Residuales Domésticas, infiltración de agua superficial, plantas de tratamiento
Virus	Aguas Residuales Domésticas

Fuente: Metcalf y Eddy, 1998.

En la Tabla 3, se describen los contaminantes de interés en el tratamiento del agua residual. Las normas que regulan los tratamientos secundarios están basadas en las tasas de eliminación de la materia orgánica, sólidos en suspensión y patógenos presentes en el agua residual (Metcalf y Eddy, 1998).

Tabla 3. Contaminantes de importancia en el tratamiento de las aguas residuales.

Contaminantes	Razón de la importancia
Sólidos en Suspensión	Pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al medio acuático.
Materia Orgánica Biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales. Si se descargan al entorno sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones antisépticas.
Patógenos	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos presentes en el agua residual.
Nutrientes	Tales como el Nitrógeno, Fósforo y Carbono. Cuando se vierten al entorno acuático, pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, pueden provocar la contaminación del agua subterránea.
Contaminantes Prioritarios	Compuestos orgánicos o inorgánicos determinados con base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechada.
Materia Orgánica Refractaria	Tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento. Ejemplos típicos son los agentes tensoactivos, los fenoles y los pesticidas.
Metales Pesados	Son frecuentemente dañinos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales.
Sólidos Inorgánicos Disueltos	Tales como el Calcio, Sodio y los Sulfatos, se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua, y es posible que se deban eliminar si se va a reutilizar el agua residual.

Fuente: Metcalf y Eddy, 1998.

1.4.2. COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

De acuerdo con Metcalf y Eddy (1998), la composición de los caudales de aguas residuales de una comunidad depende del tipo de sistema de recogida que se emplee, y puede incluir los siguientes componentes:

- a) **Agua Residual Doméstica o Sanitaria:** Procedente de zonas residenciales o instalaciones comerciales, públicas y similares.
- b) **Agua Residual Industrial:** Agua residual en la cual predominan vertidos industriales.
- c) **Infiltración y Aportaciones Incontroladas:** Agua que entra tanto de manera directa como indirecta en la red de alcantarillado. La infiltración hace referencia al agua que penetra en el sistema a través de juntas defectuosas, fracturas y grietas, o paredes porosas. Las aportaciones incontroladas corresponden a aguas pluviales que se descargan a la red por medio de alcantarillas pluviales, drenes, bajantes de edificios y tapas de pozos de registro.
- d) **Aguas Pluviales:** Agua resultante de la escorrentía superficial.

En la Tabla 1 de anexos, se presenta la composición típica del agua residual doméstica bruta en diferentes concentraciones.

2. EL RÍO SABINAL

En el estado de Chiapas, uno de los principales cuerpos de agua es el río Sabinal (llamado así porque alrededor de los años 20's y 30's existían en sus orillas muchos árboles de la especie denominada *Sabino*), que forma parte de la subcuenca del mismo nombre, con una longitud total de 35 km (Hernández, 2013).

2.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La cuenca del río Sabinal está ubicada en la Región Hidrológica No. 30 denominada "Grijalva–Usumacinta", en la Cuenca Administrativa "Grijalva-Tuxtla Gutiérrez" (Hernández, 2013; CONAGUA, 2010). Sus coordenadas geográficas son: Latitud Norte 16°52'02", donde limita con la localidad de Álvaro Obregón, municipio de San Fernando; a los 16°43'29" en la porción Sur con el Cerro Mactumactzá, longitud Oeste 93°20'13" limitando con el Cerro "Charro Negro", municipio de Berriozábal y a los 93°04'07" en la porción Este con el Río Grijalva y el Cañón del Sumidero, municipio de Tuxtla Gutiérrez (Instituto Estatal del Agua (INESA), 2013). En la Figura 3 se muestra dicha ubicación.

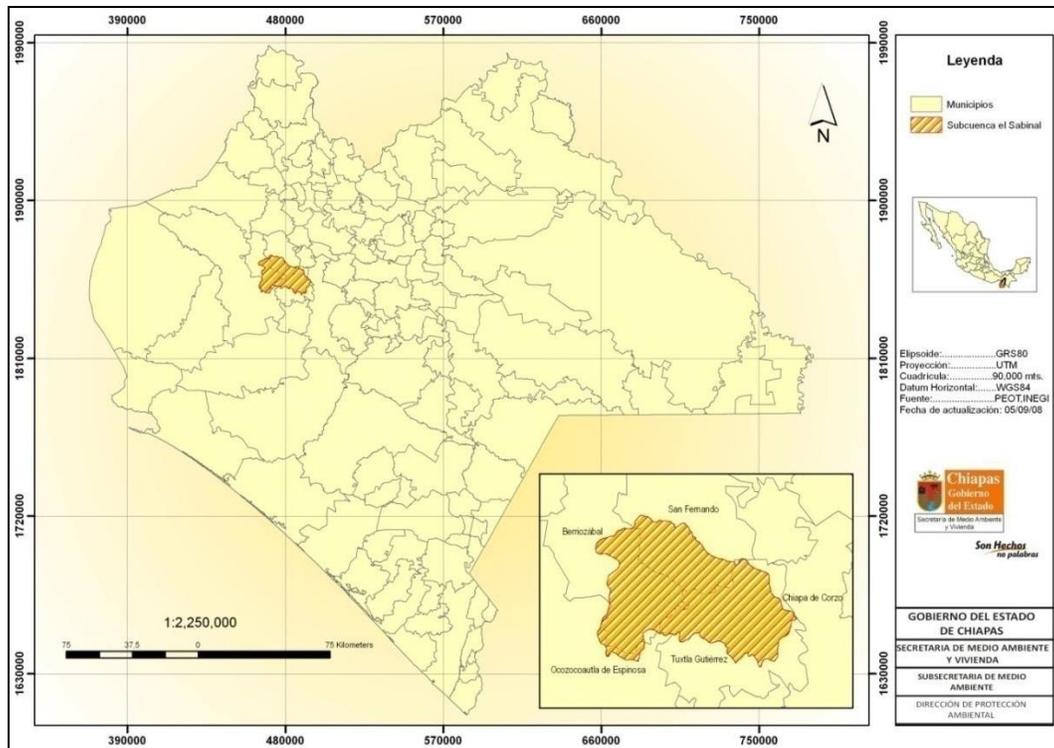


Figura 3. Ubicación geográfica de la Cuenca del río Sabinal.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Vivienda (SEMAVI) (2009).

Está integrada por 15 subcuencas como se muestra en la Figura 4, las cuales son: 24 de Junio, Arroyo Centro Sur, Cerro Hueco, Chacona, Potinaspák, Patria Nueva, Poc-Poc, Pomarroza, San Agustín, San Francisco, San José "El Arenal", San Roque, Santa Ana, Berriozábal y Totoposte (Hernández, 2013; INESA, 2013). En la Tabla 4 se enlistan dichas subcuencas y la superficie que abarcan dentro de la cuenca.

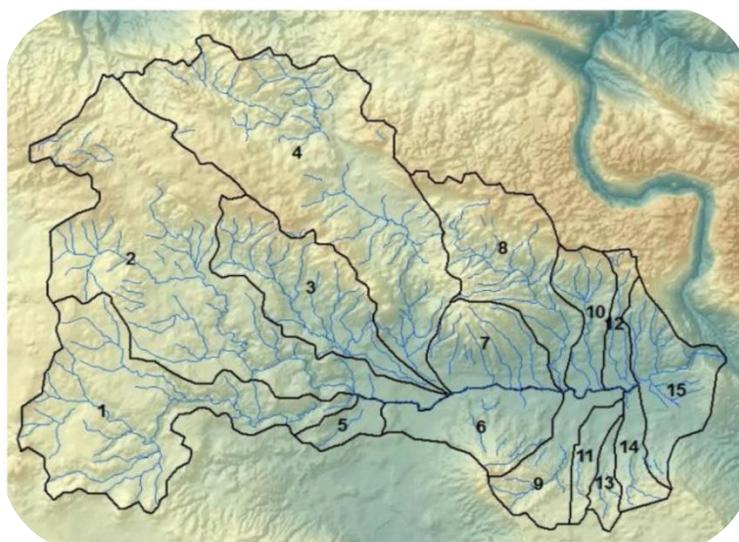


Figura 4. Subcuencas del río Sabinal.

Fuente: INESA, 2013.

Tabla 4. Subcuencas y superficies de la Cuenca del río Sabinal.

ID	Subcuenca	Área	
		Ha	Km ²
1	San Francisco	55.81	5,580.80
2	Berriozábal	88.35	8,834.80
3	San Agustín	30.97	3,096.80
4	Chacona	86.62	8,661.80
5	San José "El Arenal"	5.80	579.80
6	Arroyo Centro Sur	19.08	1,907.80
7	Pomarrosa	17.48	1,747.80
8	Potinaspák	30.90	3,089.80
9	San Roque	13.99	1,398.80
10	Totoposte	12.10	1,209.80
11	Poc-Poc	6.29	628.80
12	24 de Junio	7.05	704.80
13	Santa Ana	5.06	505.80
14	Cerro Hueco	7.71	770.80
15	Patria Nueva	19.82	1,981.80
TOTAL		407.3	40,700.00

Fuente: INESA, 2013.

Se localiza en la Depresión Central del Estado de Chiapas y ocupa de manera parcial los municipios de San Fernando, Berriozábal, Ocozocoautla de Espinosa y Tuxtla Gutiérrez. (Programa de Ordenamiento Ecológico y Territorial de la Subcuenca del río Sabinal (POETSAB), 2011). En la Tabla 5, se presentan las superficies y municipios que integran la cuenca del río Sabinal.

Tabla 5. Municipios y superficies que integran la Cuenca del río Sabinal

Municipio	Área o Superficie		Cobertura (%)
	Ha	Km ²	
Berriozábal	13,799.75	138	33.91
Ocozocoautla de Espinosa	1,768.75	17.69	4.35
San Fernando	10,233	102.34	25.14
Tuxtla Gutiérrez	14,897.75	148.98	36.6
TOTAL	40,699.25	407.1	100

Fuente: INESA, 2013.

El cauce del río Sabinal nace en la loma "El Chupadero", 5 km al Noroeste de Berriozábal, a una altitud de 1,100 msnm y atraviesa la capital del estado de Poniente a Oriente teniendo una longitud, medida desde la confluencia con el Río San Francisco hasta su desembocadura en el Río Grijalva, de 21 km y un desnivel en pendiente de 800 metros (CONAGUA, 2010).

Esta zona posee una alta diversidad de flora y fauna, con presencia de especies contempladas dentro de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, debido a que el 40.78% de la superficie de la subcuenca, se encuentra dentro de áreas naturales protegidas como el Parque Nacional Cañón del Sumidero, Zona Protectora Forestal Vedada de los terrenos forestales de Villa Allende, Reserva Estatal "Cerro Mactumactzá", Centro Ecológico Recreativo "El Zapotal" y la Zona Sujeta a Conservación Ecológica "La Pera" (POETSAB, 2011).

2.2. FISIOGRAFÍA Y RELIEVE

La cuenca del río Sabinal se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierras de Chiapas y Guatemala, subprovincia Altos de Chiapas (POETSAB, 2011). Se caracteriza por estar delimitada por una serie de mesetas en su parte sur, entre las que destacan Tierra Colorada, Loma Larga y Nido de Águilas; en el parteaguas Norte, prevalece un conjunto de sierras cuya altitud no rebasa los 1200 msnm, lo cual motiva que el relieve presente una serie de lomeríos de pendientes suaves, que originan un modelo erosional representativo de una baja densidad de drenaje (CONAGUA, 2010). Para Tuxtla Gutiérrez se cuenta con formas de Sierra Alta con Laderas Tendidas, de Llanura con Aportes Aluviales y Mesetas por Erosión (SEMAVI, 2009).

2.3. GEOLOGÍA

La cuenca está conformada por seis unidades de suelo con sus diversas subdivisiones de acuerdo a materiales que lo forman: Feozem Háplico, Feozem Lúvico, Litosol, Luvisol Crómico, Regosol, Rendzina y Vertisol Pélico (POETSAB, 2011).

Los últimos acontecimientos geológicos están representados por los depósitos aluviales que se encuentran a lo largo del río Sabinal y están constituidos por una capa de suelo vegetal arcilloso de color negro de alta plasticidad, a la que subyacen limos y limos arenosos. Únicamente en el centro del cauce aparecen arenas y gravas (Alonso *et al.*, 1995).

2.4. CLIMA

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García (2004), el clima perteneciente a la cabecera municipal de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez es: cálido subhúmedo con lluvias en verano **Aw0 (w)**, y semicálido subhúmedo con lluvias en verano **A(C) w0 (w)**; ocupando el 99.92% y 0.08% de la superficie municipal respectivamente.

2.5. FLORA

En los márgenes del río Sabinal se pueden encontrar las especies vegetativas que se enlistan en la Tabla 6.

Tabla 6. Flora del río Sabinal.

Nombre Común	Nombre Científico	Nombre Común	Nombre Científico
Pochota	<i>Ceiba aesculifolia</i>	Palo Chombo	<i>Guatteria anomala</i>
Pomposhuti	<i>Cochlospermum vitifolium</i>	Corozo	<i>Scheelea liebmanii</i>
Palo Mulato	<i>Bursera simaruba</i>	Guaje	<i>Leucanena shannoni</i>
Plimajillo	<i>Alvaradoa amorphoides</i>	Guamuchil	<i>Acacia pringlei</i>
Sospó	<i>Bombax ellipticum</i>	Guanacastle	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>
Cuajote	<i>Guazuma tomentosa</i>	Copalchi	<i>Croton guatemalensis</i>
Caobilla	<i>Swietenia humilis</i>	Matilisquate	<i>Tabebuia rosea</i>
Moju	<i>Brosimum alicastrum</i>	Nambimbo	<i>Ehretia tinifolia</i>
Uña de Gato	<i>Pisonea aculeata</i>	Sabino	<i>Taxodium mucronatum</i>
Lombricillo	<i>Tabebuia chrysantha</i>		

Fuente: POETSAB, 2011.

3. CARACTERIZACIÓN

Las propiedades físicas del agua son las que definen las características que responden a los sentidos de la vista, del tacto, gusto y olfato, como pueden ser los Sólidos Suspendidos, Turbiedad, Color, Sabor, Olor y Temperatura. Por su lado, los parámetros químicos están relacionados con la capacidad del agua para disolver diversas sustancias, entre estos podemos mencionar la Alcalinidad, Dureza, Fluoruros, Materia Orgánica, Oxígeno Disuelto, Metales y Nutrientes (Arellano, 2002).

Por último, los parámetros biológicos se relacionan con la presencia de especies biológicas en el agua, y su evaluación es de gran importancia ya que son un indicador de la calidad del recurso hídrico (Arellano, 2002).

3.1. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

Los parámetros fisicoquímicos dan una información extensa de la naturaleza de las especies químicas del agua y sus propiedades físicas, sin aportar información de su influencia en la vida acuática. Los métodos biológicos aportan esta información, pero no señalan nada acerca del contaminante o los contaminantes responsables, por lo que muchos investigadores recomiendan la utilización de ambos en la evaluación del recurso hídrico (Orozco *et al.*, 2005).

3.1.1. TEMPERATURA

Es un parámetro de gran importancia dada su influencia, tanto en el desarrollo de la vida acuática como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción, así como sobre la aptitud del agua para ciertos usos. Además, las temperaturas anormalmente elevadas pueden dar lugar a una indeseada proliferación de plantas acuáticas y hongos (Metcalf y Eddy, 1998).

Afecta fundamentalmente a los sistemas debido a su efecto sobre el metabolismo de las bacterias; también afecta la solubilidad de los gases, pues con su aumento, disminuye la solubilidad del oxígeno en el agua, desfavoreciendo la aireación del sistema. También afecta la velocidad de sedimentación de los sólidos (Guevara, 1996).

La temperatura del agua residual suele ser siempre más elevada que la del agua de suministro, hecho principalmente debido a la incorporación de agua caliente procedente de las casas y los diferentes usos industriales. Dado que el calor específico del agua es mucho mayor que el del aire, las temperaturas registradas de las aguas residuales son más altas que la temperatura del aire durante la mayor parte del año, y solo son menores que ella durante los meses más calurosos del verano (Metcalf y Eddy, 1998).

3.1.2. POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)

El pH o la actividad del ión hidrógeno indican a una temperatura dada, la intensidad de las características ácidas o básicas del agua. El pH se define como el logaritmo de la inversa de la actividad de los iones hidrógeno: $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$ donde $[\text{H}^+]$ es la actividad de los iones hidrógeno en mol/L (American Public Health Association -APHA-, 1992).

El agua de los ríos que no está afectada por la contaminación presenta un pH entre 6.5 y 8.5. Dentro de dichas condiciones, los organismos acuáticos capturan y liberan Dióxido de Carbono durante la fotosíntesis y respiración, respectivamente (Hem, 1985). En la Figura 5 se presenta la escala de valores de pH de acuerdo a la Environmental Protection Agency (EPA) (2011) así como su efecto en el medio ambiente y algunos ejemplos de sustancias de la vida cotidiana poseedoras de dichos valores.



Figura 5. Escala de pH.

Fuente: EPA, 2011

3.1.3. OXÍGENO DISUELTO (OD)

Cantidad efectiva de Oxígeno gaseoso (O_2) en el agua, expresada en términos de su presencia en el volumen de agua (mg de O_2/L) o de su proporción en el agua saturada (porcentaje) (Naciones Unidas -UN-, 2005).

Su presencia es esencial en el agua; proviene principalmente del aire. Niveles bajos o ausencia de Oxígeno en el agua puede indicar contaminación elevada, condiciones sépticas de materia orgánica o una actividad bacteriana intensa (Tamani, 2014).

Este parámetro es un indicador de la capacidad de un cuerpo para mantener la vida acuática (Zhen, 2009). De acuerdo a Behar *et al.*, (1996), existen niveles de OD con base en su calidad para mantener la vida acuática, los cuales se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Niveles de Calidad de OD.

OD (mg/L)	Nivel de calidad
0 – 2	Oxígeno Insuficiente para propiciar la vida acuática.
2 – 4	Algunos peces e insectos pueden sobrevivir.
4 – 7	Buena para la mayoría de las especies acuáticas. Baja para peces de aguas frías.
7 – 11	Muy buena para la mayoría de los peces de corriente.

Fuente: Behar et al., 1996.

La concentración de OD es importante para evaluar la calidad del agua superficial y para el control del proceso de tratamiento de desechos (Comunidad Andina (CAN), 2008). Debe medirse *"in situ"* ya que las concentraciones pueden cambiar en un corto tiempo. Un adecuado nivel de OD es necesario para una buena calidad del agua (Tamani, 2014).

3.1.4. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Es la medida de la capacidad del agua para conducir electricidad. Indica la materia ionizable total presente en el agua. Las sales disueltas son las que permiten que el agua conduzca electricidad. Para el agua ultra pura, el valor ideal es de $0.05483 \mu S/cm$ a $25^\circ C$ (Colín *et al.*, 2014).

Es un parámetro relacionado con la presencia de iones en un líquido, lo que se relaciona de forma empírica con los Sólidos Disueltos Totales y da una idea del grado de mineralización del agua (Martínez *et al.*, 1994).

3.1.5. POTENCIAL REDOX

Esta magnitud mide la capacidad global de un agua de proceder por sí misma a la oxidación o reducción de sustancias. Es decir, un agua con un elevado Potencial Redox (E_H) contendrá apreciable cantidad de Oxígeno, siendo "rica" en compuestos en estado

oxidado: Hierro y Magnesio en sus estados superiores de oxidación, Sulfatos, Nitratos, Fosfatos y materia orgánica (fuertemente mineralizada). Por el contrario, un agua con bajo Potencial Redox (E_H) contendrá abundantes compuestos en estado reducido, apenas Oxígeno, y Sulfuros, Amoníaco y materia orgánica difícilmente mineralizable (Marín, 2003).

La OMS en 1971, declara la importancia de este parámetro de la siguiente manera: "Existe una relación exponencial entre la velocidad de inactivación de los virus y el Potencial Redox (ORP). Un ORP de 650 mV (medido con un electrodo Platino/Calomel) provocará la casi instantánea desactivación de los virus incluso en altas concentraciones".

Dependiendo de la ubicación de las aguas residuales en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) -influyente, cuenca de aireación, nitrificación/desnitrificación- las muestras de efluentes pueden mostrar diferentes valores de ORP (Bier, 2009). En la Tabla 8 se muestran los valores típicos de ORP de las aguas residuales en una PTAR.

Tabla 8. Valores Típicos de ORP de las Aguas Residuales en una PTAR.

Potencial REDOX (ORP) (mV)	Proceso
-280 hasta -150	Desarrollo de Metano
-200 hasta +100	Reducción de Sulfatos
+180 hasta +400	Reducción de Hierro
+220 hasta +500	Reducción de Manganeso
+300 hasta +600	Reducción de Nitratos

Fuente: Bier, 2009.

Mientras que el influente a menudo viene con lecturas de ORP alrededor de -200 mV, la corriente cambia el ORP a valores positivos de alrededor de +50 mV debido a la oxidación de las especies reductoras (Bier, 2009).

3.1.6. COLOR

El color se debe a la presencia de sustancias en solución (*color verdadero o real*), sustancias en suspensión (*color aparente*) y materia coloidal como los minerales de hierro y manganeso, el contacto del agua con la materia orgánica (hojas, madera, raíces, etc.) en diferentes estados de descomposición, y los residuos coloridos de las industrias. También puede ser causado por taninos y ácidos húmicos (Colín *et al.*, 2014; Romero, 2009).

Dos tipos de color se reconocen en el agua: el Color Verdadero (el color de la muestra una vez que se ha removido su turbidez) y el Color Aparente (que incluye no solamente el color de las sustancias en solución y coloidales, sino también el color debido al material suspendido). El Color Aparente se determina sobre la muestra original, sin filtración o centrifugación previa (Romero, 2009).

3.1.7. TURBIEDAD

Como medida de las propiedades de transmisión de la luz del agua, es otro parámetro que se emplea para indicar la calidad de las aguas vertidas o de las aguas naturales en relación con la materia coloidal y residual en suspensión (Metcalf y Eddy, 1998).

La turbiedad es causada por partículas suspendidas o materia coloidal que obstruye la transmisión de luz a través del agua. Puede contener materia orgánica o inorgánica, o una combinación de ambas (World Health Organization (WHO), 2011).

3.1.8. ACIDEZ TOTAL

Es la capacidad del agua para neutralizar iones hidroxilo (OH^-). Generalmente, es el resultado de la presencia de ácidos débiles, particularmente Dióxido de Carbono (CO_2), pero a veces incluye otros como el Ácido Fosfórico (H_2PO_4^-), Ácido Sulfhídrico (H_2S), proteínas y ácidos grasos. Otros ácidos presentes son los ácidos húmicos y fúlvicos, así como los ácidos carboxílicos formados por la descomposición de materia orgánica. Los iones metálicos ácidos, particularmente el Fe^{3+} , también pueden contribuir a la acidez (Manahan, 2007; Domènech y Peral, 2006). Se determina por valoración con una base al punto final de la fenolftaleína (pH 8.2) (Manahan, 2007).

3.1.9. ALCALINIDAD TOTAL

Es una medida de la capacidad para neutralizar ácidos, viene favorecida por la presencia de los iones Bicarbonato (CO_3H^-), Carbonato (CO_3^{2-}) y Oxhidrilo (OH^-), asimismo por los fosfatos y los ácidos de carácter débil (Colín *et al.*, 2014). Otras especies que también contribuyen, aunque en menor grado, son el Amoníaco y las bases conjugadas de los Ácidos Fosfórico, Silícico, Bórico y los Ácidos Orgánicos (Manahan, 2007).

Frecuentemente, debe conocerse la alcalinidad del agua para calcular las cantidades de productos químicos que deben agregarse para su tratamiento. Sirve para amortiguar el pH y como depósito o resumidero para el carbono inorgánico, ayudando así a determinar la capacidad del agua de fomentar la proliferación de algas y otras formas de vida acuática, por lo que puede usarse como una medida de la fertilidad del agua (Manahan, 2007).

La alcalinidad de un agua residual está provocada por la presencia de Hidróxidos, Carbonatos y Bicarbonatos de elementos como el Calcio, el Magnesio, el Sodio, el Potasio o el Amoníaco. De entre todos ellos, los más comunes son el Bicarbonato de Calcio y el Bicarbonato de Magnesio. Normalmente, el agua residual es alcalina, propiedad que adquiere de las aguas de tratamiento, el agua subterránea y los materiales añadidos en los usos domésticos (Metcalf y Eddy, 1998).

Se determina por valoración con un ácido al punto final del anaranjado de metilo (pH 4.3), donde el Bicarbonato y el Carbonato, se han convertido en CO₂ o ácido carbónico (H₂CO₃) (Manahan, 2007).

3.1.10. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Este parámetro nos proporciona una medida del oxígeno equivalente a aquella porción de material orgánico contenido en una muestra susceptible de ser oxidada por un agente químico fuerte. Este análisis es utilizado para medir la fortaleza contaminante de las aguas residuales domésticas e industriales (Navarro *et al.*, 2005).

Su determinación permite medir en un residuo la cantidad total de Oxígeno que se requiere para la oxidación de la materia orgánica a Dióxido de Carbono y Agua. La prueba se basa en que todos los compuestos orgánicos, con unas pocas excepciones, pueden ser oxidados por la acción de agentes oxidantes fuertes en condiciones ácidas. Una de sus principales limitaciones es la imposibilidad de diferenciar entre materia biológicamente oxidable y materia orgánica biológicamente inerte (Sawyer *et al.*, 2001).

3.1.11. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅)

La DBO mide la cantidad de oxígeno necesario o consumido para la descomposición microbológica (oxidación) de la materia orgánica en el agua. Se define como la cantidad total de oxígeno requerido por los microorganismos para oxidar la materia orgánica descompuesta (CAN, 2008).

El parámetro de contaminación orgánica más ampliamente empleado, aplicable tanto a aguas residuales como a aguas superficiales, es la DBO a 5 días (DBO₅). La determinación del mismo está relacionada con la medición del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica (Metcalf y Eddy, 1998).

3.1.12. SÓLIDOS

Los sólidos estiman la cantidad de materia sólida, suspendida o disuelta (residuo filtrable), presente en el agua, entre la que se encuentra la materia flotante, coloidal y en solución (Colín *et al.*, 2014).

3.1.12.1. Sólidos Totales (ST)

El contenido de Sólidos Totales (ST) se refiere a la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación de entre 103 y 105°C. No se define como sólida aquella materia que se pierde durante la evaporación debido a su alta presión de vapor (Metcalf y Eddy, 1998).

3.1.12.2. Sólidos Volátiles Totales (SVT)

Los Sólidos Volátiles Totales (SVT) corresponden a los compuestos perdidos durante la calcinación a $550 \pm 50^{\circ}\text{C}$. Se determinan por diferencia de peso entre sólidos totales y fijos (APHA, 1992). Son básicamente, la fracción orgánica de los sólidos o porción de los sólidos que se volatilizan a temperaturas de $550 \pm 50^{\circ}\text{C}$.

Su determinación es muy importante en lodos activados, lodos crudos y lodos digeridos. El residuo de la calcinación se conoce como sólidos fijos y constituyen la porción inorgánica o mineral de los sólidos (Molina y Tigreros, 2005).

3.1.12.3. Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Los Sólidos Suspendidos Totales (SST) es la cantidad de residuo retenido en un filtro de fibra de vidrio con tamaño de poro nominal de un micrón y hace referencia al material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual (CAN, 2008).

3.1.12.4. Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)

Los Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) corresponden a los compuestos perdidos durante la calcinación a $550 \pm 50^{\circ}\text{C}$ de la muestra retenida en el filtro. Se determinan por diferencia de peso entre sólidos suspendidos totales y fijos (APHA, 1992).

3.1.12.5. Sólidos Disueltos Totales (SDT)

Sólidos Disueltos Totales (SDT) es el término utilizado para describir a las sales inorgánicas y pequeñas cantidades de materia orgánica presentes en el agua. Sus principales constituyentes son el Calcio, Magnesio, Sodio, Carbonatos de Potasio, Bicarbonatos, Cloruros, Sulfatos y Nitratos (WHO, 2003).

Proviene de fuentes naturales, alcantarillado, esorrentía urbana y agrícola, y aguas residuales industriales. Algunos de sus componentes tales como Cloruros, Sulfatos, Magnesio, Calcio y Carbonatos, afectan la corrosión o la incrustación en los sistemas de distribución de agua. La presencia de concentraciones altas de SDT en el agua de consumo (superiores a 1200 mg/l) puede resultar desagradable para los consumidores. El agua con concentraciones muy bajas de SDT también puede ser inaceptable debido a su falta de sabor (WHO, 2003).

3.1.12.6. Sólidos Sedimentables (S_{sed})

Se definen como aquellos que sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono Imhoff) en el transcurso de un periodo de 60 minutos. Se expresan en ml/L, y

constituyen una medida aproximada de la cantidad de fango que se obtendrá en la decantación primaria del agua residual (Metcalf y Eddy, 1998).

3.2. PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS

Son los microorganismos indicadores de contaminación y/o microorganismos patógenos para el ser humano analizados en el agua de consumo humano (Ministerio de Salud de Perú (MINSA), 2011). Algunos considerados son: Bacterias Heterotróficas, Virus, Huevos y Larvas de Helmintos, Quistes y Ooquistes de Protozoarios Patógenos; y organismos de vida libre como Algas, Protozoarios, Copépodos, Rotíferos y Nematodos en todos sus estadios evolutivos (MINSA, 2011).

3.2.1. HUEVOS DE HELMINTO

Un indicador de riesgo microbiológico a la salud son los Helmintos, que son gusanos parasitarios causantes de las infecciones más comunes que afectan al ser humano y otros animales, esto teniendo en cuenta que una vía de transmisión de huevos de helminto (HH) es el agua, ya que dichos huevos son liberados en las heces de las personas que han sido infectadas, llegando así a las aguas residuales, y con gran capacidad para sobrevivir por largos periodos (Escobar-Megchún *et al.* 2014).

Se incluyen los anélidos y los traquelmintos que comprenden los rotíferos y los Nematelmintos, entre los cuales hay varias especies patógenas para el hombre: *Dracunculus medinensis*, *Ascaris lumbricoides*, *Trichuris trichiura*, *Enterobius vermicularis*, *Necator americans* y *Ancylostoma duodenale* (Colín *et al.*, 2014).

En la Tabla 2 de anexos, se enlistan algunas especies de helmintos de implantación a nivel mundial que se pueden presentar en el agua residual doméstica bruta.

4. ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA

Un índice de calidad de agua consiste básicamente en una expresión simple de una combinación más o menos compleja de un número de parámetros, los cuales sirven como una medida de la calidad del agua. El índice puede ser representativo por un número, por un rango, una descripción verbal, un símbolo o un color. Su ventaja radica, en que la información puede ser mejor interpretada que una lista de valores numéricos. Consecuentemente, un índice de calidad de agua es una herramienta comunicativa para transmitir información (Fernández y Solano, 2005).

Para reforzar los análisis de calidad del agua, se han desarrollado diferentes índices alrededor del mundo, mismos que serán aplicables dependiendo de los parámetros

analizados, escenarios, épocas del año, etc. Estos índices son fundamentales para evaluar cuerpos de agua superficial, pero no todos proporcionan la exactitud necesaria. A continuación, se mencionan algunos de ellos y sus principales características.

Jiménez y Vélez (2006) aplicaron el Water Quality Index (WQI) de la National Sanitation Foundation (NSF) de Estados Unidos y concluyeron que dicho índice caracteriza de manera muy general la situación real de los ríos; ya que no toma en cuenta aspectos más específicos y, por lo tanto, el grado de contaminación podría ser enmascarado.

Amado *et al.* (2006) utilizan modelos matemáticos para establecer su propio ICA con los parámetros de Potencial de Hidrógeno (pH), Oxígeno Disuelto (OD), Turbidez, Sólidos Disueltos Totales (SDT) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO); para comparar sus resultados con los Límites Máximos Permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Valencia (2007) se apoya en datos recopilados desde hace 20 años y se enfoca en ICAs que basan su cálculo en la presencia de Sodio, debido a los problemas de sobreexplotación por regadíos en tierras salinas que presentaba la zona de estudio.

Por otro lado, algunos autores no aplican los ICAs, sino que realizan comparaciones de los parámetros muestreados con valores estandarizados por alguna normatividad u otros autores. Martínez (1995) compara los parámetros que obtuvo con los presentados en la Norma Oficial Mexicana NOM-031-SEMARNAT-1993, al existir la presencia de industrias en la zona urbanizada que el río atravesaba. El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) (2007) compara los valores obtenidos de Temperatura, pH, Conductividad Eléctrica y OD con los Estándares de Calidad Ambiental para el Agua para el uso en Agricultura, Explotación y Crianza de Animales que estableció dicha dependencia.

Un factor importante para caracterizar un cuerpo de agua es la temporada en la que se muestrea, por lo que en muchas investigaciones se realizan las determinaciones de los parámetros tanto en época de lluvias como de estiaje. Gil (2014) a través del Método Horton de Chavarro y Ramos (2000), estudia varios ríos en un año (en época de lluvia y secas) y determina las causas para las altas y bajas de los parámetros medidos en cada zona muestreada. Calvo y Mora (2007) determinan OD (estableciéndolo como un parámetro de vital importancia), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y pH, para conocer la salud de un cuerpo de agua en época de lluvias y secas.

En seguida, se presentan a detalle diversos Índices de Calidad del Agua utilizados a nivel nacional e internacional, clasificados por región:

4.1. ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA EN ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

4.1.1. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA DE LA FUNDACIÓN NACIONAL DE SANIDAD (NSF WQI)

Del inglés "National Sanitation Foundation Water Quality Index", fue desarrollado en 1970 por Brown, McClelland, Deininger y Tozer (Brown, *et al.*, 1970; Ott, 1987) con apoyo de la Fundación Nacional de Saneamiento de los Estados Unidos. El índice fue estructurado haciendo uso del Método Delphi de la Corporación Rand, el cual busca la opinión de un panel de expertos en la materia, combinando y comparando las respuestas provenientes de diversos cuestionarios y la retroalimentación del grupo, a fin de encontrar un consenso fiable, minimizando los problemas asociados con las opiniones arbitrarias (Reguant-Álvarez y Torrado-Fonseca, 2016).

Para la composición del NSF WQI, se estableció un panel con 142 personas provenientes de diversos lugares a lo largo de los Estados Unidos con experiencia en el manejo de calidad de aguas.

Como resultado, se obtuvo el listado con las variables consideradas como las más importantes para la evaluación de calidad del agua (Tabla 9) junto a los pesos ponderados de cada uno, los cuales representan la importancia de cada parámetro; así como las curvas de valor medio para cada una de las variables estudiadas (subíndice) con un límite de confianza del 80%, las cuales se muestran en el Anexo.

Tabla 9. Pesos de los nueve parámetros incluidos en el índice de calidad

Parámetro	Unidades	Pesos finales (W _i)
Oxígeno disuelto	% Saturación de oxígeno	0.17
Coliformes fecales	No. de organismos/100 ml	0.15
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidades de pH	0.12
DBO ₅	mg/L	0.10
Nitratos	mg/L	0.10
Fosfatos	mg/L	0.10
Diferencia de temperatura	°C	0.10
Turbiedad	UTN	0.08
Solidos Totales	mg/L	0.08
Total		1.00

Fuente: Brown, et al. (1970).

Para su formulación, se aplica la fórmula de Promedio Aritmético Ponderado, en la cual se multiplican cada uno de los parámetros por su peso ponderado, para luego sumarlos, obteniendo la suma ponderada:

$$NSF\ WQI = \sum_{i=1}^n W_i I_i \dots\dots\dots [1]$$

En dónde:

- W_i : Peso ponderado al i -ésimo parámetro.
- I_i : subíndice del i -ésimo parámetro.

En caso de no contar con la información necesaria para el análisis de uno o varios parámetros, su peso específico se reparte en forma proporcional entre los restantes (Fernández y Solano, 2005).

Con el resultado final del cálculo del índice, que debe encontrarse entre 0 y 100 (donde 0 representa una calidad pobre y 100 un agua excelente), se procede a interpretar dicho dato en la siguiente escala de clasificación:

Tabla 10. Clasificación de la calidad del agua.

Valores del NSF WQI	Calificación	Color
91 – 100	Excelente	Blue
71 – 90	Buena	Green
51 – 70	Media	Yellow
26 – 50	Mala	Orange
0 – 25	Muy mala	Red

Fuente: Ott, 1978.

El NSF WQI es ampliamente aceptado y usado en múltiples estudios ambientales alrededor del mundo, y es tomado como base para el diseño y desarrollo de nuevos índices de calidad del agua (Álvarez, *et al.*, 2006; Torres, *et al.*, 2010; Sutadian, *et al.*, 2016).

4.1.2. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA DE DINIUS (1987)

En 1972, en un esfuerzo por diseñar un índice que podría medir los costos y el impacto del control de contaminación en la sociedad, Dinius desarrollo un índice de calidad, basándose en el NSF WQI y el Índice de Horton (1965), conformado por 11 parámetros con pesos establecidos que varían de 0.5 a 5 en una escala básica de importancia, y subíndices representados por funciones matemáticas explícitas resultado de la revisión de diversos trabajos científicos publicados en la materia, calculando el índice con la fórmula de Promedio Aritmético Ponderado.

En 1987, Dinius publicó modificaciones a su Índice de Calidad, aplicando el Método Delphi con 7 expertos participando en los cuestionarios. De esta manera, se tienen 12 parámetros de contaminación, con pesos de importancia relativos cuya sumatoria es igual a la unidad y subíndices representados por funciones matemáticas explícitas (Tabla 11).

Tabla 11. Pesos y subíndices del índice de calidad del agua de Dinius.

Parámetro	Unidades	Fórmulas	Pesos relativos (Wi)
Oxígeno disuelto	% de Saturación	0.82OD + 10.56	0.109
DBO ₅	mg/L	108(DBO ₅) ^{-0.3494}	0.097
Coliformes	Organismos/100 ml	136(COLI) ^{-0.1311}	0.090
Coliformes fecales	Organismos/100 ml	106(e.coli) ^{-0.1286}	0.116
Alcalinidad	Ppm equiv. a CaCO ₃	110(ALK) ^{-0.1342}	0.063
Dureza	Ppm equiv. a CaCO ₃	552(HA) ^{-0.4488}	0.065
Cloruros	mg/L	391(CL) ^{-0.3480}	0.074
Conductividad específica	μS/cm	506(SPC) ^{-0.3315}	0.079
pH	Unidades de pH	pH < 6.9 = 10 ^{0.6803+0.1856(pH)}	0.077
		pH = 6.9-7.1 = 1	
		pH > 7.1 = 10 ^{3.65-0.2216(pH)}	
Nitratos	NO ₃ , mg/L	125(N) ^{-0.2718}	0.090
Diferencia de temperatura	°C	10 ^{2.004-0.0382 T_a-T_s x}	0.077
Color	Unidades de Color Pt-Co	127(C) ^{-0.2394}	0.063
Total			1.000

Fuente: Dinius, 1987.

*T_a-T_s=Air temperature-Surface water temperature (Temperatura del aire-Temperatura de agua superficial)

Finalmente, se decide utilizar la fórmula de Promedio Geométrico Ponderado, que representa la operación multiplicativa de las variables I_i, elevada a la W_i:

$$I = \prod_{i=1}^n I_i^{W_i} \dots\dots\dots [2]$$

En dónde:

- I: Índice de calidad
- W_i: Peso ponderado al i-ésimo parámetro.
- I_i: subíndice del i-ésimo parámetro.

El uso de la Fórmula 2 disminuye la probabilidad de que el mal desempeño de uno solo de los parámetros eclipse al resto, disminuyendo la calidad final.

Con los datos finales, se realiza la clasificación de acuerdo con el tipo de uso que se pretenda dar al agua evaluada. La escala general de clasificación puede encontrarse en la Tabla 3 de anexos.

4.2. ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA EN LATINOAMÉRICA

4.2.1. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA PARA MÉXICO

Con apoyo del Instituto Mexicano del Agua, León (1992) diseñó un índice de calidad (ICA) para las aguas mexicanas con base en el Índice de Dinius (1987) agrupando los parámetros representativos dentro de un marco unificado, aplicando las determinaciones de calidad del agua de la Red Nacional de Monitoreo en el sistema de la cuenca Lerma-Chapala.

La evaluación numérica del ICA se realiza haciendo uso de la fórmula para el Promedio Geométrico Ponderado (Fórmula 3), considerando 15 parámetros de evaluación con pesos específicos modificados para su aplicación en México, los cuales se muestran en la Tabla 4 de anexos.

$$ICA = \prod_{i=1}^n Q_i^{W_i} \dots\dots\dots [3]$$

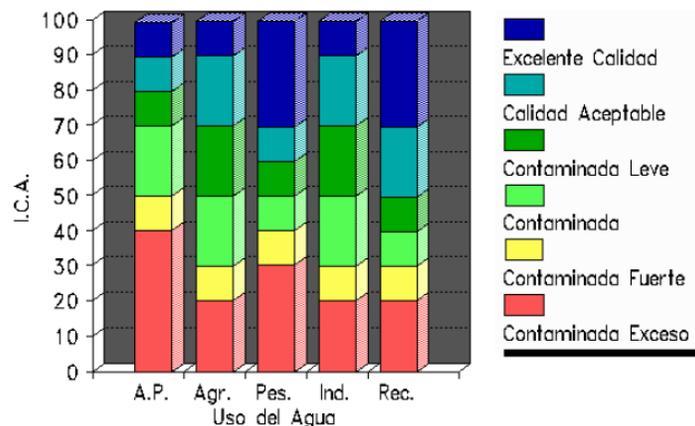
En dónde:

- ICA: Índice de calidad.
- W_i : Peso específico asignado a cada parámetro.
- Q_i : calidad del parámetro.

Respecto a los subíndices, León obtiene los valores de calidad de cada parámetro en trabajos previamente publicados en materia de calidad del agua, citando a autores como Brown, *et al.* (1970), Dinius (1987), y estudios previos realizados en la Cuenca Lerma-Chapala.

El resultado de la aplicación del ICA arroja un valor numérico del 0 al 100, siendo 0 un agua excesivamente contaminada y 100 un agua de excelente calidad. Al igual que Dinius, la calidad del agua varía de acuerdo con el uso al que se destine, indicando los límites aconsejables.

Figura 6. Rangos de calificación del ICA en función del uso del agua.



Fuente: León, 1992.

De igual manera, León recomienda acompañar los resultados de la aplicación del ICA con los valores límites permisibles de los parámetros involucrados en el cálculo del índice, como aquellos no incluidos que se relacionen. En el caso de México, estos se encuentran en la Normas Oficiales Mexicanas.

4.2.1.1. NORMAS OFICIALES MEXICANAS

De acuerdo con la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, se define a las Normas Oficiales Mexicanas como *“la regulación técnica de observancia obligatoria expedida por las dependencias competentes, (...), que establece reglas, especificaciones, atributos, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado y las que se refieran a su cumplimiento o aplicación”*. En este sentido, en cuestiones ambientales, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) ha emitido diversas Normas con el objetivo de promover el mejoramiento y preservación del medio ambiente y los recursos naturales.

En materia de aguas, se identifican 4 Normas Oficiales Mexicanas que establecen límites máximos permisibles de contaminantes en aguas superficiales. A continuación, se enlistan las normas aplicables, sus objetivos y límites estipulados:

- I. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

La NOM-001-SEMARNAT-1996 tiene por objeto proteger la calidad de las aguas y bienes nacionales, así como posibilitar sus usos; considerándose de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas.

- II. Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal

Esta Norma Oficial Mexicana tiene como objetivo prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales por las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado municipal, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas. Sin embargo, esta norma no se aplica a la descarga de las aguas residuales domésticas, pluviales, ni a las generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado.

- III. Norma Oficial Mexicana NOM-03-SEMARNAT-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público

Con el fin de proteger el medio natural y la salud de la población, esta norma indica los límites de contaminantes para las aguas residuales tratadas que tengan como uso a futuro el uso en servicios al público. Es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y su reúso.

A pesar de que las normas enlistadas no fueron diseñadas para el control de la calidad de aguas superficiales, sino para las descargas dirigidas a los sistemas hídricos, son elementos regulativos que dictaminan límites para parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, por lo que son utilizados como elementos suplementarios para evaluar el estado de las aguas superficiales.

4.2.1.2. INDICADORES DE CALIDAD DEL AGUA DE LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA)

A principios de los años setenta, ante la necesidad de encontrar un método uniforme y consistente para dar a conocer la calidad del agua de manera accesible a la población, se desarrolló un sistema estimativo de calidad del agua que requirió la medición física de los parámetros de contaminación del agua y el uso de una escala estandarizada de medición para expresar la relación entre la existencia de varios contaminantes en el agua y el grado de impacto en los diferentes usos de la misma (Gerencia de Calidad del Agua, 2019).

Este sistema más tarde se le denominó Índice de Calidad del Agua (ICA) y permitía hacer comparaciones de niveles de contaminación en diferentes áreas. Según la Gerencia de Calidad del Agua (2019) "El ICA se define como el grado de contaminación existente en el agua a la fecha de un muestreo, expresado como un porcentaje de agua pura". Por lo anterior, se considera que el agua altamente contaminada tendrá un ICA cercano o igual a 0% y de 100% para el agua en excelentes condiciones.

Con el fin de conocer la calidad de las aguas superficiales de la República Mexicanas, y en sustitución del Índice de Calidad internacional, la Comisión Nacional del Agua establece cinco indicadores para dicha evaluación:

- Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO₅),
- Demanda Química de Oxígeno (DQO),
- Sólidos Suspendidos Totales (SST)
- Porcentaje de saturación de Oxígeno Disuelto (%OD) y,
- Coliformes Fecales (CF).

La escala de clasificación de los cuatro indicadores enlistados se presenta en las Tablas 5, 6, 7, 8 y 9 de anexos, respectivamente.

Con la aplicación de los parámetros mencionados como indicadores para evaluar la calidad del agua, se muestra la influencia humana desde el punto de vista de la afectación por la presencia de centros urbanos e industriales, dado que de su establecimiento se producen más desechos líquidos que afectan la calidad de agua.

4.2.2. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA EN CORRIENTES SUPERFICIALES DEL INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (ICA IDEAM) PARA COLOMBIA

De acuerdo con el IDEAM (2013) el índice de calidad del agua en corrientes superficiales corresponde a una expresión numérica agregada y simplificada surgida de la sumatoria aritmética equiponderada de los valores que se obtienen al medir la concentración de cinco o seis variables fisicoquímicas básicas que evalúan la calidad del agua en corrientes superficiales

La fórmula del cálculo del índice es por el Promedio Aritmético Ponderado:

$$ICA_{ntj} = \left(\sum_{i=1}^n W_i \cdot I_{ijkt} \right) \dots\dots\dots [4]$$

En donde ICA_{ntj} es el Índice de calidad del agua de una determinada corriente superficial en la estación de monitoreo de la calidad del agua j en el tiempo t , evaluado con base en n variables. W_i es el ponderador o peso relativo asignado a la variable de calidad i . I_{ijkt} es el valor calculado de la variable i , en la estación de monitoreo j , registrado durante la medición realizada en el trimestre k , del período de tiempo t . n , es el número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador; n es igual a 5, o 6 dependiendo de la medición del ICA que se seleccione.

Tabla 12. Variables y ponderaciones para el caso de 5 variables.

Variable	Unidad de medida	Ponderación
Oxígeno disuelto, OD	% Saturación	0,2
Sólidos suspendidos totales, SST	mg/L	0,2
Demanda química de oxígeno, DQO	mg/L	0,2
Conductividad eléctrica, C.E.	µS/cm	0,2
pH	Unidades de pH	0,2

Fuente: IDEAM, 2013.

Los valores calculados de cada variable I_{ikjt} son determinados con el uso de las fórmulas presentadas en la Tabla 10 de Anexos.

Los valores de cada indicador podrán clasificarse en categorías (Tabla 13), con lo cual se determina la calidad del agua de las corrientes superficiales:

Tabla 13. Calificación de la calidad del agua según los valores que tome el ICA.

Valores	Calificación de la calidad del agua	Señal de alerta
0,00-0,25	Muy mala	
0,26-0,50	Mala	
0,51-0,70	Regular	
0,71-0,90	Aceptable	
0,91-1,00	Buena	

Fuente: IDEAM, 2013.

4.3. ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA EN EUROPA Y ASIA

4.3.1. ÍNDICE SIMPLIFICADO DE CALIDAD DEL AGUA (ISQA) (ESPAÑA)

En España, Queralt en el año 1982 desarrolló el Índice Simplificado de Calidad del Agua (ISQA) para las cuencas de Cataluña, el cual se basó en 5 parámetros fisicoquímicos y planteó una clasificación de la calidad del agua para 6 usos específicos del recurso, entre los cuales se destaca el abastecimiento para consumo humano (Torres, *et al.*, 2009). Se obtiene a partir de una sencilla fórmula que combina 5 parámetros fisicoquímicos:

$$ISQA = T \cdot (A + B + C + D) \dots\dots\dots [5]$$

En donde:

- T: Temperatura del Agua (T en °C). Puede tomar valores comprendidos entre 0,8 y 1 según:
 - $E = 1$ si $T \leq 20$ °C
 - $E = 1 - (T - 20) \cdot 0,0125$ si $T > 20$ °C

- A: Demanda Química de Oxígeno según la oxidabilidad al Permanganato (DQO-Mn en mg/l). Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 30 según:
 - $A = 30 - DQO-Mn$ si $DQO-Mn \leq 10$ mg/l
 - $A = 21 - (0,35 \cdot DQO-Mn)$ si 60 mg/l $\geq DQO-Mn > 10$ mg/l
 - $A = 0$ si $DQO-Mn > 60$ mg/l

Tradicionalmente ésta ha sido la forma de obtener el parámetro A, pero a partir de 2003 se empezó a calcular mediante el carbono orgánico total (COT en mg/l), que también estima la cantidad de materia orgánica presente en el agua, pero de una manera más reproducible y fiable. En este caso el parámetro A puede tomar valores comprendidos entre 0 y 30 según:

- $A = 30 - \text{COT}$ si $\text{COT} \leq 5 \text{ mg/l}$
 - $A = 21 - (0,35 \cdot \text{COT})$ si $12 \text{ mg/l} \geq \text{COT} > 5 \text{ mg/l}$
 - $A = 0$ si $\text{COT} > 12 \text{ mg/l}$
-
- B: Sólidos en Suspensión Totales (SST en mg/l). Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 25 según:
 - $B = 25 - (0,15 \cdot \text{SST})$ si $\text{SST} \leq 100 \text{ mg/l}$
 - $B = 17 - (0,07 \cdot \text{SST})$ si $250 \text{ mg/l} \geq \text{SST} > 100 \text{ mg/l}$
 - $B = 0$ si $\text{SST} > 250 \text{ mg/l}$
-
- C: Oxígeno Disuelto (O_2 en mg/l). Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 25 según:
 - $C = 2,5 \cdot \text{O}_2$ si $\text{O}_2 < 10 \text{ mg/l}$
 - $C = 25$ si $\text{O}_2 \geq 10 \text{ mg/l}$
-
- D: Conductividad Eléctrica (CE en $\mu\text{S/cm}$ a 18 °C). Si la conductividad se mide a más de 25 °C, para obtener la conversión a 18 °C se multiplicará por 0,86. Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 20 según:
 - $D = (3,6 - \log \text{CE}) \cdot 15,4$ si $\text{CE} \leq 4000 \mu\text{S/cm}$
 - $D = 0$ si $\text{CE} > 4000 \mu\text{S/cm}$

Actualmente, existe una variante del ISQA, en la que se utiliza Carbono Orgánico Total (COT) como parámetro A y Turbidez como parámetro B. Los valores de los parámetros se obtienen de redes automáticas de control, lo que facilita resultados en tiempo real y en continuo (Ros, 2011).

CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA DEL ICA

Tabla 14. Clasificación de la Calidad de Agua del ICA – ISQA.

Valor del ICA - ISQA	Categoría	Uso del agua
90 - 100	Todos los usos	Estado natural del agua de excelente calidad. Purificación menor para consumo y no requiere tratamiento para riego.
70 - 90	Consumo humano con tratamientos convencionales	Agua levemente contaminada, pero de buena calidad. Dudoso para consumo sin purificación y utilizable para cultivos poco resistentes.
50 - 70	Consumo humano con tratamiento especial, riego, industrial	Agua de calidad regular. Apta para tratamiento de potabilización. Tratamiento para ciertos cultivos.
25 - 50	Recreación y refrigeración	Mala calidad. Agua altamente contaminada. Dudosa para tratamiento con fines de consumo y solo para cultivos muy resistentes.
0 - 25	No puede usarse	Muy mala calidad. Ha sobrepasado la capacidad de autodepuración del agua. Inaceptable para consumo y riego.

Fuente: Torres, Cruz y Patiño (2009) y Reyes (2017) citado por Terán (2019).

4.3.2. ESTRATEGIA AMOEBA (A GENERAL METHOD OF ECOLOGICAL AND BIOLOGICAL ASSESSMENT)

AMOEBA, en idioma holandés, significa "Método general de descripción y evaluación del ecosistema." la estrategia AMOEBA es una herramienta para ayudar a quienes toman decisiones políticas a comprender mejor el estado ecológico de un área de interés (Wefering, Danielson y White, 2000).

Dicha estrategia nace como resultado de un proyecto de cooperación internacional entre la Oficina Central para el Control de la Contaminación de la India y el Programa de Cooperación Internacional del Gobierno Holandés, el cual se enfocó a establecer un programa de monitoreo en el Río Yamuna en la India, debido a la urgente necesidad de implementar técnicas adecuadas de monitoreo para determinar la calidad del agua (Fernández y Solano, 2005).

Según Brink y Colijn (1991) citados por Fernández y Solano (2005) para el Tercer Plan de Gestión del Agua de los Países Bajos ha desarrollado un modelo conceptual denominado enfoque AMOEBA para descripción y evaluación de los ecosistemas marinos, dicho enfoque se basa en el concepto de desarrollo sostenible y en la Comisión Brundtland.

Sin embargo, la estrategia AMOEBA actualmente se utiliza como una herramienta para establecer investigaciones físicas, químicas, toxicológicas y biológicas de tal manera que brinda información adecuada e integrada para la formulación de políticas ambientales, con el objetivo de lograr un desarrollo sostenible.

AMOEBA se ha enfocado en los ecosistemas acuáticos, soportado en los signos de deterioro de los sistemas hídricos, evidenciados en enfermedades en peces, toxicidad algal, mortabilidad de focas y desaparición de especies (Fernández y Solano, 2005).

El índice AMOEBA se compone de los siguientes índices:

- Índice de Contaminación Bacterial (BPI: Bacterial Pollution Index)
- Índice de Contaminación por Nutrientes (NPI: Nutrient Pollution Index)
- Índice de Producción – Respiración (PRI: Production Respiration Index)
- Índice de Contaminación Orgánica (OPI: Organic Pollution Index)
- Índice de Saprobio Bentónico (BSI: Benthic Saprobity Index)
- Índice de Diversidad Biológica (BDI: Biological Diversity Index)
- Índice de Contaminación Industrial (IPI: Industrial Pollution Index)
- Índice de Contaminación por Pesticidad (PPI: Pesticide Pollution Index)

En la Tabla 11 de Anexos, se muestran la relación de índices con los tipos de contaminación y variables de la Estrategia AMOEBA.

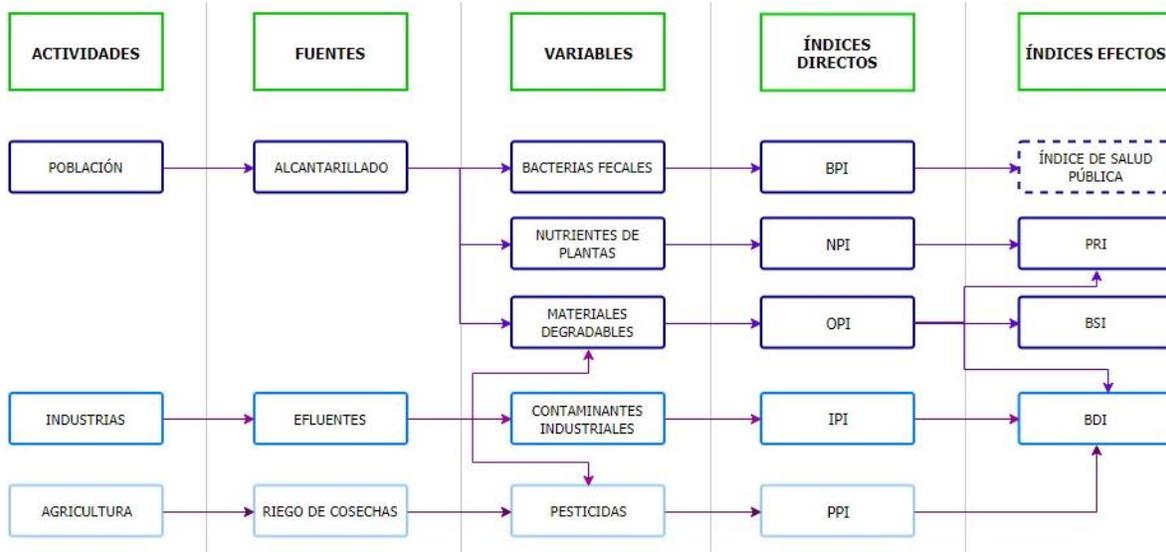
METODOLOGÍA DE LA ESTRATEGIA AMOEBA

Según Fernández y Solano (2005), la metodología del índice AMOEBA consiste en:

- El peso dado cada una de las variables por índices es igual, así como el peso de cada índice relativo a otros índices.
- Todos los índices individuales son expresados en una escala de 0 – 100. Donde 0 indica la peor condición ambiental imaginable, y 100 demuestra un ambiente completamente natural que no está influenciado por el hombre.
- El valor deseable no necesariamente debe ser de 100%, debido a que se considera la presencia de los seres humanos y las actividades antropogénicas que causan un deterioro ambiental.
- En cuanto al valor deseable (objetivo), es el valor deseable de cada índice en el cual la protección ambiental y el desarrollo sustentable se logran. Cuando el valor índice se incrementa o llega a su valor deseado, la calidad del agua mejora.

A continuación, se muestra un diagrama mostrando los usos del agua en la Estrategia AMOEBA:

Figura 7. Usos del agua en la Estrategia AMOEBA



Fuente: De Zwart y Trivedi, (1992) citados por Fernández y Solano (2005).

Según Fernández, Ramírez y Solano (2004), para la estrategia AMOEBA se contemplan los siguientes valores por índice:

Tabla 15. Valores para la Estrategia AMOEBA

Índice	Valor agua potable	Valor objetivo	Valor vertimiento
BPI	99.80	90	0
NPI	42.43	70	20.39
OPI	57.84	70	3.81
IPI	17.41	70	7.11
BSI	66.70	60-80	3.80
BDI	0.847	N.D.	3.106
PRI	70.50	70	10.00

Fuente: Fernández, Ramírez y Solano (2004).

N.D.: No determinado

De acuerdo con Fernández y Solano (2005) se debe realizar una selección de valores objetivos o deseables previa a realizar los cálculos correspondientes.

SELECCIÓN DE VALORES OBJETIVOS O DESEABLES

La selección de valores deseables apropiados es el paso más difícil en el análisis de la escala, al estar sujeta a la opinión política por lo que:

- Los métodos de monitoreo por los que los valores del parámetro son obtenidos, deben ser correctamente descritos y deben ser objetos de control de calidad.

- Las curvas de calidad de los variables individuales, deben basarse en razonamientos científicos defendibles, donde al menos, los valores más altos sean reflejo de referencias y consideren un marco o condiciones seguras.
- El cálculo de índices individuales basados en promedios geométricos.
- Para cada índice, se debe seleccionar un valor deseable diferente, de manera que considere eventos regionales como ríos de cuenca altas versus cuencas bajas.

La siguiente tabla muestra los valores sugeridos para condiciones de aguas dulces incluyendo algunas consideraciones ambientales:

Tabla 16. Valores Objetivos sugeridos para la estrategia AMOEBa.

Índice	Valor Deseable	Consideraciones
OPI: Organic Pollution Index	70	Un valor del 70% es un objetivo más bien bajo. Sin embargo, al asumir alta densidad de contaminantes en áreas urbanas y la ausencia de plantas de tratamiento de aguas residuales, este objetivo aún permite mejoramientos futuros.
NPI: Nutrient Pollution Index	70	Ver OPI
BPI: Bacterial Pollution Index	90	Este es un estándar relativamente alto y refleja el riesgo para la salud pública de cargas fecales.
PPI: Pesticide Pollution Index	90	Este estándar alto, refleja la magnitud ecológica de la acción del tóxico, especialmente cuando se da la presencia de mezclas de tóxicos.
IPI: Industrial Pollution Index	90	Ver PPI
BSI: Benthic Saprobity Index	60 - 80	Este valor deseable refleja la situación que tiene el nivel de los ríos o las mareas estuarinas por lo que los valores de saprobiedad nunca alcanzan niveles óptimos.
BDI: Biological Diversity Index	70	Un valor de 70 implica que por lo menos algo de diversidad genética está supuestamente disponible.
PRI: Production Respiration Index	70	Un PRI alrededor de 70 parece producir un balance de sostenibilidad en el ecosistema.

Fuente: Fernández y Solano (2005).

La Estrategia AMOEBA puede ser útil para que administradores ambientales puedan entender fácilmente, según Fernández y Solano (2005):

- La calidad del agua, sus cambios y tendencias
- El grado de desviación de los objetivos y las acciones prioritarias
- La relación entre los resultados del cálculo de los índices, con el tipo y causas de la contaminación, proporciona a información y facilidades para la integración de los resultados del monitoreo y el establecimiento de políticas ambientales adecuadas.
- Con esta información es posible proponer y desarrollar acciones de saneamiento, prevención y control.

4.3.2.1. DESCRIPCIÓN DE LOS ÍNDICES DE LA ESTRATEGIA AMOEBA SEGÚN UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

4.3.2.1.1. Índice de Contaminación Bacteriana (Bacterial Pollution Index – BPI)

El número de bacterias termo – tolerantes suele ser evaluado mensualmente de acuerdo con la técnica de NMP (Número más probable) por tubos múltiples de fermentación.

El número hallado es transformado a un índice de calidad de agua de 0 a 100 por comparación con la presente función de calidad, donde 100 representa condiciones perfectas y 0 condiciones inaceptables de cargas de bacterias fecales.

4.3.2.1.2. Índice de Contaminación por Nutrientes (Nutrient Pollution Index – NPI)

El índice de Contaminación por nutrientes es calculado de medidas mensuales de las siguientes variables: Amonio, Nitrógeno Total (Kjeldahl), nitritos más nitratos, fósforo total, ortofosfatos, pH, clorofila a, conductividad y turbidez. La fórmula utilizada para la combinación de estos variables es:

$$NPI = e^{\sum_{i=1}^n Ln(PQI)_n * W_n} \dots\dots\dots [6]$$

En dónde:

- PQI= Índice de Calidad para el n-ésimo parámetro, consistente en un número adimensional entre 0 y 100.
- W_n= Factor de ponderación para el n-ésimo parámetro. Las variables deben ser igualmente ponderadas. W_n debe ser igual a 1/n = 1/9. En caso de valores no reportados o faltantes, W_n debe calcularse de acuerdo con el número de variables existentes. Se sugiere como valor objeto 70.

4.3.2.1.3. Índice de Contaminación Orgánica (Organic Pollution Index – OPI)

Este índice está relacionado con la disponibilidad de oxígeno en un río, y se calcula a partir de las siguientes variables: Amonio, DBO, DQO, OD, y Temperatura. Subsecuentemente, el amonio es influenciado por los niveles de nutrientes y oxígeno, esto está incluido en ambos índices: OPI y NPI.

$$OPI = e^{\sum_{n=1}^n \ln(PQI)_n * W_n} \dots\dots\dots [7]$$

En dónde:

- OPI= Índice de Contaminación Orgánica.
- PQILn= índice de calidad para el n-ésimo parámetro, el cual es un número adimensional entre 0 y 100.
- W_n = Factor de ponderación para el n-ésimo parámetro. Todos los variables tienen un peso igual 1/n. En caso de valores no registrados, W_n debe ser calculado de acuerdo con número de valores faltantes. Nótese que la suma de todos los factores de ponderación debe ser igual a 1.

Por su formulación idéntica al NPI, las abreviaciones son las mismas y su valor deseable de ponderación análogo a 70.

4.3.2.1.4. Índice de Contaminación Industrial (Industrial Pollution Index – IPI)

La fórmula anterior aplica igualmente a este índice:

$$IPI = e^{\sum_{n=1}^n \ln(PQI)_n * W_n} \dots\dots\dots [8]$$

Los variables a ser incluidos en el índice deben ser regionales o locales y deben ser seleccionados sobre la base de un estudio intensivo y de duración determinada de los contaminantes industriales. En adición a la fracción disuelta en agua, puede ser importante de incluir la fracción adherida a los sedimentos y la fracción acumulada en los organismos. Los variables son compuestos como: Metales Pesados, Aceites, PAH, Compuestos Fenólicos, Cianitas, PCB, etc., Igualmente, se recomienda su medición mensual. La misma fórmula puede ser aplicada para calcular índice para contaminación industrial por micro-contaminantes (excluidos los pesticidas).

4.3.2.1.5. Índice de Contaminación por Pesticidas (Pesticide Pollution Index – PPI)

La fórmula y las abreviaciones son las mismas que las empleadas en el índice de contaminación por nutrientes (NPI). Su ponderación debe ser ajustada al número de variables existentes.

$$PPI = e^{\sum_{i=1}^n Ln(PQI)_i * w_i} \dots\dots\dots [9]$$

Las variables que se incluyen en este índice son local o regionalmente seleccionados sobre la base de determinaciones de contaminantes industriales o agrícolas, como los organoclorados y fosforados. Las fracciones de estos contaminantes pueden ser determinadas en agua, sedimentos y organismos. Se recomiendan, además, evaluaciones mensuales. El valor objetivo aconsejado es de 90, su valor se da por la dificultad de estimar el grado de acción del tóxico con certeza.

4.3.2.1.6. Índice Saprobio de Contaminación (The Benthic Saprobity Index – BSI)

Este método involucra un inventario cualitativo de la presencia local de invertebrados bentónicos a nivel de familia. Todas las familias son clasificadas en una escala de 1 a 10, en relación con su referencia saprobio (disponibilidad de oxígeno) de calidad de agua.

En la clase 1, las familias están principalmente en cuerpos de agua con marcada deficiencia de oxígeno, mientras que la clase 10 representa organismos que se restringen a cuerpos de agua con altos niveles de oxígeno. Esta determinación se hace con la ayuda de claves taxonómicas gráficas, su dificultad consiste en la correcta identificación del organismo.

4.3.2.1.7. Índice Biológico de Diversidad (The Biological Diversity Index – BDI)

El índice BDI puede ser evaluado como el BSI y cuantificarse de acuerdo con la metodología de comparaciones secuenciales, el cual no necesita de herramientas taxonómicas, sólo la simple observación.

$$\text{Diversidad} = \frac{\text{Número Total de Muestras}}{\text{No Total de Organismos}} \dots\dots\dots [10]$$

4.3.2.1.8. Índice de Producción – Respiración (The Production- Respiration Index PRI)

Para el cálculo de este índice se tiene en cuenta el rango de producción – respiración descrito por Odun (1969), adoptado por la American Public Health Association (APHA, 1986) citado por Fernández y Solano (2005).

La producción primaria se estima por una medida de 24 horas de OD (oxígeno disuelto) de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$OD = \text{Producción} - \text{Respiración} + \text{Difusión} \dots\dots\dots [11]$$

CLASIFICACIÓN DEL ÍNDICE AMOEBA

Tabla 17. Clasificación del índice AMOEBA de acuerdo a condición, valores y color.

Condición	Valores	Color
Excelente	90 - 100	Blue
Muy buena	80 - 90	Green
Buena	50 - 80	Yellow
Media	30 - 50	Orange
Mala	5 - 30	Red
Muy mala	0 - 5	Black

5. ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN

5.1. ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN (ICO) (COLOMBIA)

Ramírez y Viña (1998) citados por Torres, Cruz y Patiño (2009), desarrollaron los índices de contaminación (ICO) a partir del análisis de componentes principales (ACP) aplicado a información fisicoquímica resultante de diferentes estudios limnológicos relacionados con la industria colombiana del petróleo, estos índices evalúan el nivel de contaminación del agua mediante la agrupación de variables fisicoquímicas que manifiestan la misma condición ambiental.

Los índices de contaminación (ICO) constituyen una herramienta poderosa de fácil determinación, que prestan gran utilidad en la caracterización de la calidad de las aguas continentales, tarea que realizan con mayor objetividad y claridad que los tradicionales índices de calidad (ICA) Ramírez, Restrepo y Viña (1997).

Han demostrado enormes ventajas sobre los ICA (WQI), debido a que como se ha ilustrado con anterioridad, los ICA generalmente, involucran en un solo parámetro, numerosas variables que conllevan a diversos problemas como los expuestos por Ramírez, Restrepo y Viña (1997), que se enlistan a continuación:

- No correspondencia del puntaje de la calidad de agua con el grado de contaminación en uno o entre dos o más cursos de agua.
- Falta de sensibilidad a fenómenos estacionales de unas u otras variables.
- Dificultad de correlación con procesos de bioindicación.
- Pérdida sustancial de información.

Según Ramírez, Restrepo y Cardeñosa (1999) en el desarrollo de las formulaciones de estos índices de contaminación, se tuvieron en cuenta diversas reglamentaciones, tanto colombianas, como internacionales, para diferentes usos del agua, así como registros de

aguas naturales colombianas y relaciones expuestas por otros autores en los ICA. El autor señala que con frecuencia en Colombia se observa que los valores de las variables de calidad de agua de las aguas naturales son comparados con los estándares de calidad de agua potable, lo que constituye una mala referencia para el estudio de las aguas naturales, hecho por el cual no fueron tenidos en cuenta en su formulación.

El procedimiento metodológico para las formulaciones de estos índices correspondió a las descritas en Ramírez, Restrepo y Viña (1997), la cual se describen a continuación:

- Asignación de valores de contaminación entre cero y uno a la escala de las variables.
- Selección de la ecuación que permita relacionar el valor de la variable y su incidencia en contaminación.
- Aplicación del análisis de regresión lineal por el método de mínimos cuadrados ordinarios a la relación entre el índice y el parámetro.
- Ajuste de la ecuación estimada.

Actualmente existen once ICO entre los cuales se destacan los siguientes: para materia orgánica (ICOMO); por mineralización (ICOMI); para sólidos (ICOSUS); para temperatura (ICOTemp) y para pH (ICOpH).

Tabla 18. Índices de contaminación.

Índice de Contaminación	VARIABLES UTILIZADAS
Índice de contaminación por mineralización (ICOMI)	Conductividad, Dureza y Alcalinidad
Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO)	Demanda bioquímica de oxígeno, coliformes totales, porcentaje de saturación de oxígeno
Índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS)	Sólidos suspendidos
Índice de contaminación trófico (ICOTRO)	Fósforo Total
Índice de contaminación por pH (ICOpH)	pH
Índice de contaminación por temperatura (ICOTemp)	Temperatura del vertimiento Temperatura del curso receptor

Fuente: Fernández y Solano, Ramírez et al., 1997 citados por Torres (2018).

5.1.1. ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR MINERALIZACIÓN (ICOMI)

Integra Conductividad, Dureza y Alcalinidad

$$ICOMI = \frac{1}{3} (I_{\text{Conductividad}} + I_{\text{Dureza}} + I_{\text{Alcalinidad}}) \dots\dots\dots [12]$$

Dónde:

$$I_{\text{Conductividad}} = \text{Log}_{10} I_{\text{Conductividad}} = 3.26 + 1.34 \text{Log}_{10} \text{Conductividad} (\text{mS} / \text{cm})$$
$$I_{\text{Conductividad}} = 10^{\text{Log} I_{\text{Conductividad}}}$$

..... [13]

Conductividades mayores a 270 $\mu\text{S}/\text{cm}$, tienen un índice de conductividad = 1

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

..... [14]

- Durezas mayores a 110 mg/L tienen un índice = 1
- Durezas menores a 30 mg/L tienen un índice = 0

$$I_{\text{Alcalinidad}} = -0.25 + 0.005 \text{Alcalinidad} (\text{mg} / \text{lt})$$

..... [15]

- Alcalinidades mayores a 250 mg/L tienen un índice de 1
- Alcalinidades menores a 50 mg/L tienen un índice de 0

5.1.2. ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR MATERIA ORGÁNICA (ICOMO)

Conformado por Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Coliformes Totales y Porcentaje de Saturación de Oxígeno.

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

..... [16]

Dónde:

$$I_{\text{DBO}} = -0.05 + 0.70 \text{Log}_{10} \text{DBO} (\text{mg} / \text{L})$$

..... [17]

- $\text{DBO} > 30$ (mg/L) = 1
- $\text{DBO} < 2$ (mg/L) = 0

$$I_{\text{Coliformes Totales}} = -1.44 + 0.56 \text{Log}_{10} \text{Col.Tot.} (\text{NMP} / 100 \text{ml})$$

..... [18]

- ▶ Coliformes Totales > 20.000 (NMP/100 ml) = 1
- ▶ Coliformes Totales < 500 (NMP/100 ml) = 0

$$I_{\text{Oxigeno}\%} = 1 - 0.01\text{Oxigeno}\% \dots\dots\dots [19]$$

- ▶ Oxígenos (%) mayores a 100% tienen un índice de oxígeno de 0

Para sistemas lenticos con eutrofización y porcentajes de saturación mayores al 100%, se sugiere reemplazar la expresión por:

$$I_{\text{Oxigeno}\%} = 0.01\text{Oxigeno}\% - 1 \dots\dots\dots [20]$$

5.1.3. ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR SÓLIDOS SUSPENDIDOS (ICOSUS)

$$ICOSUS = -0.02 + 0.0003\text{SólidosSuspendidos}(mg / L) \dots\dots\dots [21]$$

- ▶ Sólidos Suspendidos > a 340 mg/L tienen un ICOSUS = 1
- ▶ Sólidos Suspendidos < a 10 mg/L tienen un ICOSUS = 0

5.1.4. ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR TEMPERATURA (ICOTEMP)

El interés de la formulación de este índice está enfocado tácitamente a la evaluación de vertimientos, y no como en esos anteriores, a la caracterización de aguas naturales. Por lo tanto, el ICOTEMP se formuló sobre la base de la diferencia entre el vertimiento y el cuerpo receptor. Su formulación corresponde a:

$$ICOTEMP = -0.49 + 1.27\text{Log}(\text{TempVertimiento} - \text{TempCursoReceptor}) \dots\dots [22]$$

- ▶ Si la diferencia de Temperatura es menor a 2.5 °C (275.5°K), ICOTEMP = 0
- ▶ Si la diferencia de Temperatura es mayor a 15.0 °C (288.5°K), ICOTEMP = 1

5.1.5. ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR pH (ICOpH)

$$ICOpH = \frac{e^{-31.08+3.45pH}}{1 + e^{-31.08+3.45pH}} \dots\dots\dots [23]$$

Ramírez, Restrepo y Cardeñosa (1999), propusieron nuevos índices para la actividad petrolera en Colombia, los cuales son:

- Índice de Contaminación por Hidrocarburos Aromáticos en Peces y Sedimentos (ICOARO).

- Índice de Contaminación por Contaminación por Hidrocarburos Alifáticos en Sedimentos (ICOALRE).
- Índice de Contaminación por Hidrocarburos Alifáticos No Resueltos en Peces (ICOALNORE-P).
- Índice de Contaminación por Hidrocarburos Alifáticos No Resueltos en Sedimentos (ICOALNORE-S).
- Índice de Contaminación por Hidrocarburos Alifáticos No Resueltos en Sedimentos (ICOALTO).

Los índices de contaminación se caracterizaron por medio de los colores establecidos por Ramírez, Restrepo y Viña (1997) presentados en la Tabla 19, donde se muestran las escalas de valores y colores que expresan el grado de contaminación del agua.

Tabla 19. Significancia de los Índices de Contaminación (ICOs).

Grado de Contaminación	ICO	Color
Ninguno	0 - 0,2	Azul
Bajo	0,2 - 0,4	Verde
Medio	0,4 - 0,6	Amarillo
Alto	0,6 - 0,8	Naranja
Muy Alto	0,8 - 1	Rojo

Fuente: Ramírez, Restrepo y Cardeñosa (1999)

OBJETIVOS

Objetivo General:

Evaluar la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua del río Sabinal en dos épocas del año (lluvia y estiaje), aplicando los índices de calidad y contaminación del agua nacionales e internacionales.

Objetivos Particulares:

1. Examinar el agua del río Sabinal de tres zonas (Poniente, Centro y Oriente) a través de una caracterización fisicoquímica y microbiológica.
2. Comparar los valores de los parámetros de cada zona con indicadores y estándares de calidad del agua (normas, caracterizaciones de ríos, etc.).
3. Aplicar Índices de Calidad del Agua (ICA), nacional e internacionales, para establecer un diagnóstico del estado del agua del río Sabinal.

METODOLOGÍA

Los muestreos se llevaron a cabo en el río Sabinal, en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez; se seleccionaron tres puntos de muestreo y las muestras se recolectaron en las zonas Poniente, Centro y Oriente (Figura 8).

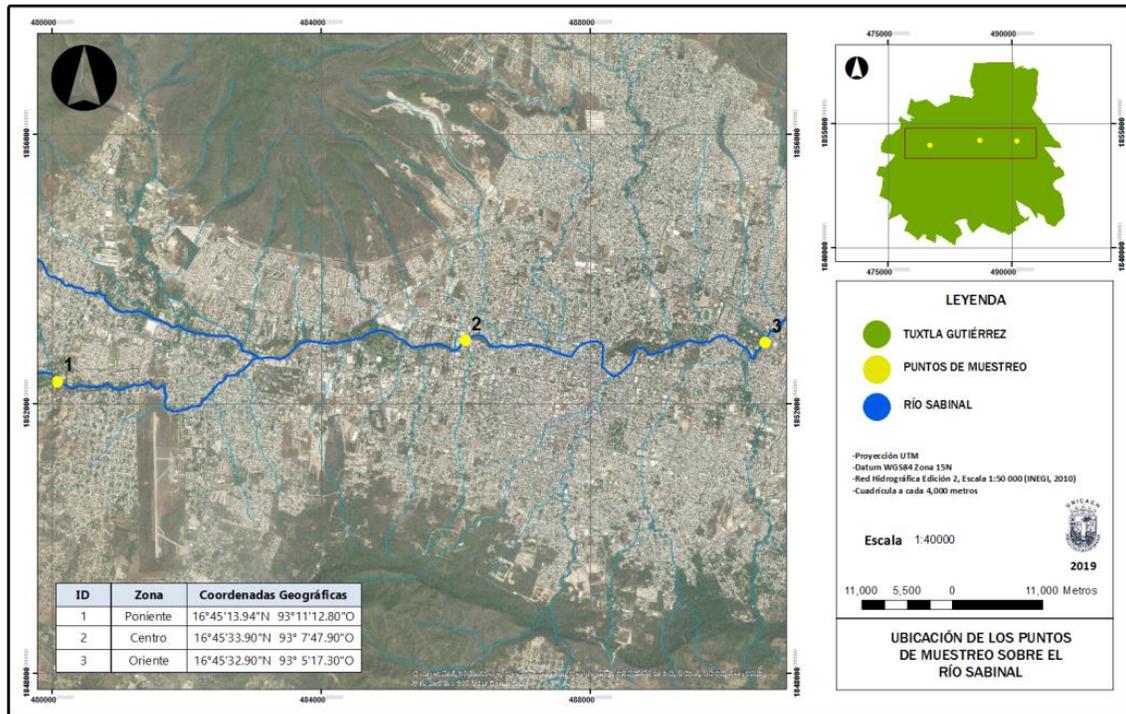


Figura 8. Ubicación de los puntos de muestreo.

Fuente: Elaboración propia.

Dichos muestreos se realizaron en cada época de lluvia y estiaje durante los años 2016 (Año 1) y 2017 (Año 2), en las coordenadas que se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Ubicación de los Puntos de Muestreo.

ID	Zona	Coordenadas Geográficas
1	Poniente	16°45'13.94" N; 93°11'12.80" O
2	Centro	16°45'33.90" N; 93° 7'47.90" O
3	Oriente	16°45'32.90" N; 93° 5'17.30" O

En la Tabla 21, se indica la distancia existente entre los puntos de muestreo:

Tabla 21. Distancia entre los Puntos de Muestreo.

Tramo	Zona	Distancia
1 – 2	Poniente - Centro	6.27 Km
2 – 3	Centro - Oriente	4.48 Km

A continuación, en la Figura 9, se ilustran el estado de los sitios muestreados:

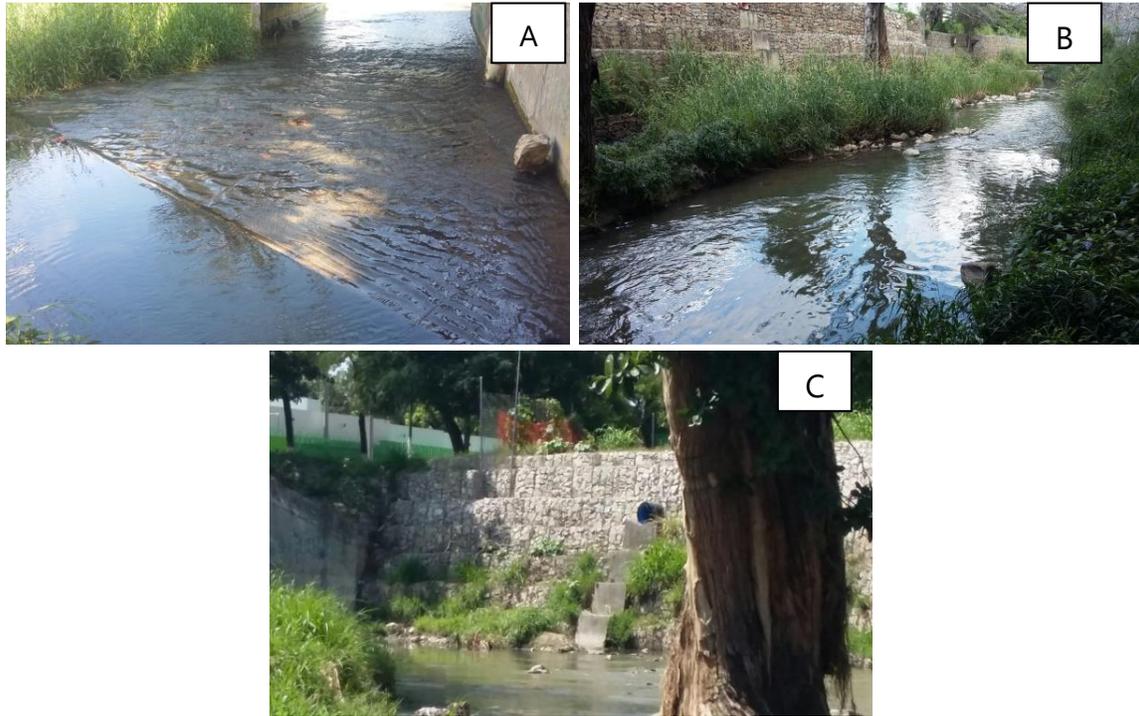


Figura 9. Puntos de muestreo del río Sabinal. Poniente (A), Centro (B) y Oriente (C).

Estos puntos fueron seleccionados por su ubicación y distribución sobre la longitud del cuerpo de agua y por su fácil accesibilidad para la toma de muestras.

Las tomas de muestras se efectuaron de acuerdo con lo planteado en el PROY-NMX-AA-121/1-SCFI-2008, se obtuvieron un total de 7 L por punto de muestreo; contenidos en envases de plástico, previamente lavados. Para la determinación de la parte microbiológica (Huevos de Helminto) se utilizaron 5 L según lo establecido en la NMX-AA-113-SCFI-2012; y los 2 L restantes para los parámetros fisicoquímicos que se muestran en la Tabla 31.

Las determinaciones se realizaron por triplicado para la confiabilidad de los resultados. Los parámetros de Temperatura, Potencial de Hidrógeno (pH), Oxígeno Disuelto (OD), Conductividad Eléctrica y Potencial Redox, se obtuvieron *in situ* con un equipo multiparamétrico que se compone de una interfaz HQ30D FLEXI y 3 sondas robustas de 5 m de largo marca HACH.

A continuación, en la Tabla 22, se muestra la metodología utilizada para la medición de parámetros:

Tabla 22. Metodología utilizada para la medición de los parámetros.

Parámetro	Unidad	Fundamento
Color Aparente y Verdadero	Unidades de Color Pt-Co	NMX-AA-045-SCFI-2001
Turbidez	UTN	NMX-AA-038-SCFI-2001
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	NMX-AA-030/1-SCFI-2012
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)		Método Respirométrico DBO Track
Acidez Total	(CaCO ₃) mg/L	NMX-AA-036-SCFI-2001
Alcalinidad Total		
Sólidos Totales (ST)	mg/L	NMX-AA-034-SCFI-2015
Sólidos Totales Volátiles (SVT)		
Sólidos Suspendidos Totales (SST)		
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)		
Sólidos Disueltos Totales (SDT)		
Sólidos Sedimentables	ml/L	NMX-AA-004-SCFI-2013

Tras cada medida se lavaron los electrodos con agua desionizada. Los equipos de medición del laboratorio fueron calibrados al comienzo de cada jornada de análisis de muestras, según las instrucciones de los manuales de cada equipo y con las correspondientes soluciones estándar.

Al finalizar las determinaciones de todos los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, se aplicaron las fórmulas descritas en las normas correspondientes a Acidez y Alcalinidad Total, Sólidos en todas sus formas y Demanda Química de Oxígeno (DQO) para obtener los valores pertinentes.

Además de la actualización del estado de la calidad del río Sabinal en lo relacionado a los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, la aportación del presente estudio radica en la comparación de los parámetros que se obtendrán con los indicadores de calidad del agua de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), otros valores estándar proporcionados por Metcalf y Eddy (1998) y las Normas Oficiales Mexicanas: NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-SEMARNAT-1996.

Aunado a lo anterior, se aplicó un software llamado ICATEST V 1.0, diseñado por la Universidad de Pamplona en el año 2000; este software es una herramienta de apoyo a la investigación que facilita los procedimientos de cálculos de cada gran número de índices

de calidad de agua y contaminación (Fernández, Ramos y Solano, 2004). Este software fue aplicado únicamente para el cálculo índice de calidad AMOEBA.

Los índices de calidad restantes, así como los índices de contaminación, fueron obtenidos con base a sus respectivas metodologías (Véase Apartado IV. Índices de Calidad del Agua).

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Los datos correspondientes a toda la caracterización se registraron en la Tabla 23. Del mismo modo, se presentan por temporada y por el punto de muestreo.

Tabla 23. Caracterización fisicoquímica y microbiológica del río Sabinal.

Parámetro	Unidades	Punto de Muestreo				
		Poniente	Centro		Oriente	
		Lluvia	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
pH	Unidades de pH	7.2	7.5	7.1	7.4	7.2
OD	mg/L	7.6	2.5	-	0.5	-
Potencial Redox	mV	40.7	34.9	-11.5	38	-17.3
Conductividad Eléctrica	μS/cm	716	1008	1199	1016	1130
Temperatura	°C	24.8	28.1	30.3	30.2	31.1
Color Aparente	Unidades de color Pt-Co	39	192	444.3	385.2	1678.6
Color Verdadero		13.5	187.6	219.1	407.5	1388
Turbiedad	UTN	2.2	25	5.3	43.3	82
S _{Sed}	ml/L	< 1	0.4	0.6	1.1	3.3
ST	mg/L	242	424	632.4	333	521.7
SVT		210	271	507.2	170	398.4
SST		118	124	385.5	121	406.9
SSV		44	43	179.6	70	298.7
SDT		154	300	236.7	212	45.9
Acidez Total		CaCO ₃ (mg/L)	48	73	151.6	84
Alcalinidad Total	304.6		336	376.2	386.6	463.0
DQO	mg/L	91	227	391.5	330	792.5
DBO ₅		15.4	35.8	-	57.5	-
Huevos de Helminto	H _L	-	1	2	2	3
IB	-	0.17	0.16	-	0.17	-

**Espacios sin valores (-), son datos que no pudieron ser obtenidos en el momento del muestreo por indisponibilidad de los equipos.*

En los gráficos siguientes, se puede apreciar el comportamiento de cada parámetro respecto a la época (de lluvias o estiaje) y el año en que fueron determinados:

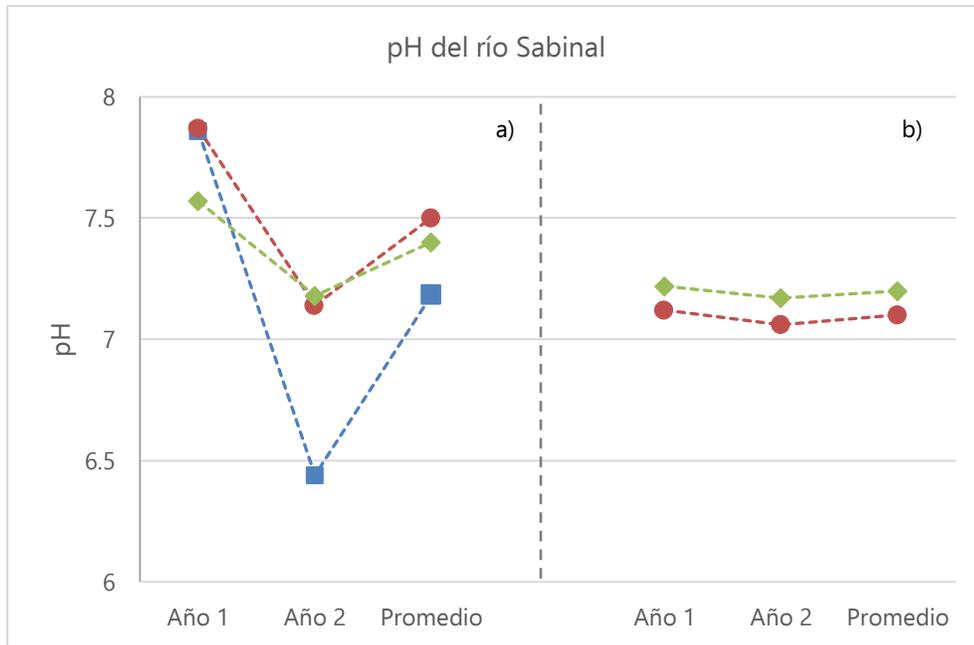


Gráfico 1. Comportamiento del pH en el río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

En el Gráfico 1, se puede observar que en la época de lluvia los comportamientos de los tres sitios de muestreo son similares. En esta misma época los sitios "poniente" (7.86 unidades de pH) y "centro" (7.87) convergen en el año 1 obteniendo el valor máximo el sitio "centro" (7.14) y por otro lado este mismo sitio casi converge con el sitio "oriente" (7.18) en el año 2.

El valor mínimo fue obtenido por sitio "poniente" (6.44) en el año 2, en época de lluvias. Para la época de estiaje los sitios "centro" (7.12 y 7.06) y "oriente" (7.22 y 7.17) denotan comportamientos similares en ambos años sin embargo no convergen entre sí.

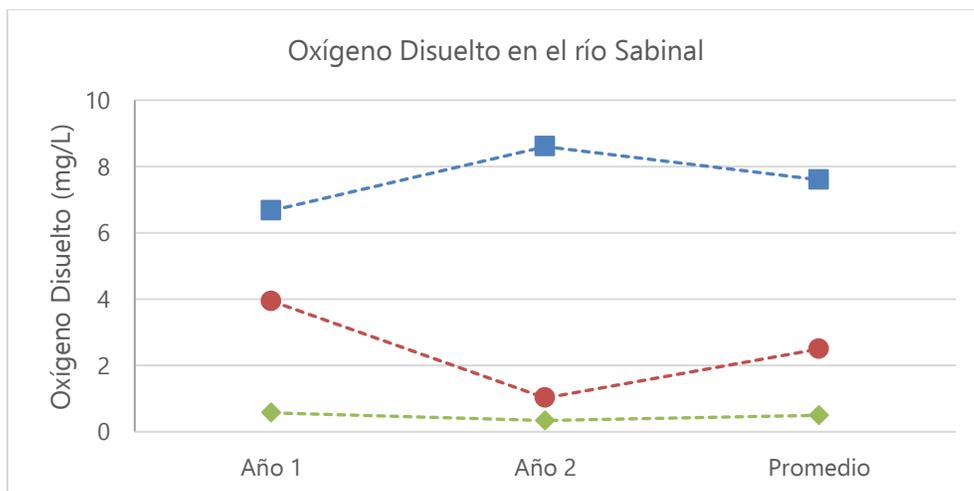


Gráfico 2. Comportamiento del Oxígeno Disuelto en el río Sabinal, en época de lluvias con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

Respecto al OD (Gráfico 2), no se observan comportamientos similares en la época de lluvias sólo aproximaciones entre los sitios "centro" (1.02 mg/L) y "oriente" (0.34 mg/L) en el año 2. El valor máximo lo obtuvo el sitio "poniente" con un valor de 8.6 mg/L en el año 2. Por otro lado, el sitio "oriente" con 0.57 mg/L en el año 1 y con 0.34 mg/L en el año 2 se destaca por presentar un comportamiento casi constante y de valores mínimos.

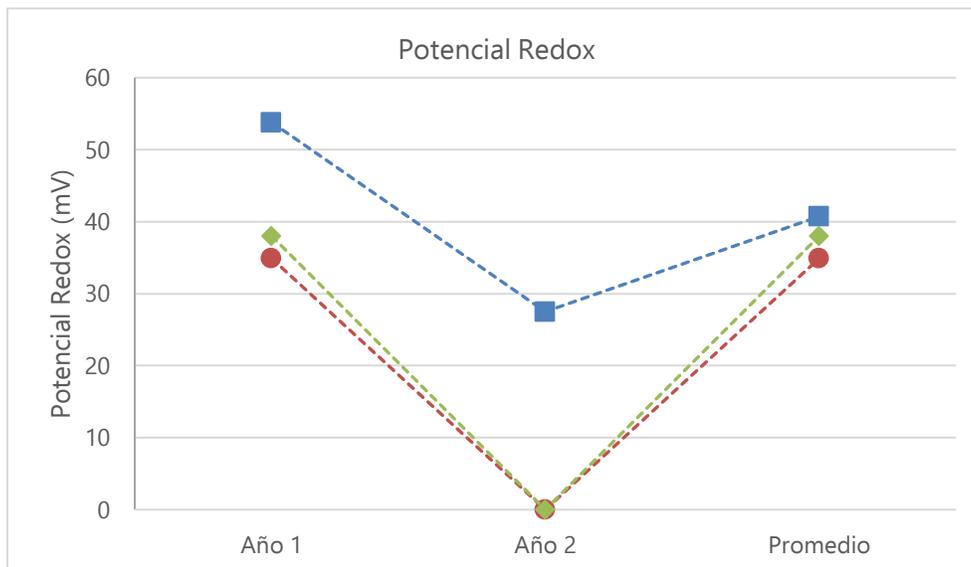


Gráfico 3. Comportamiento del Potencial Redox en el río Sabinal, en época de lluvias con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

Para el Gráfico 3, relacionado al potencial redox, se observa un comportamiento similar para los tres sitios de muestreo en época de lluvias. Los sitios "centro" (34.9 mV) y "oriente" (38 mV) obtuvieron una aproximación durante el año 1, mientras que para el año 2 coincidieron obteniendo ambos un valor de 0 mV. El sitio "poniente" obtuvo el valor más alto en ambos años con 53.8 mV en el año 1 y 27.5 mV en el año 2. Se destaca que los sitios obtuvieron los valores más bajos en el año 2.

Con respecto al Gráfico 4, referido al parámetro de conductividad eléctrica, se denota un comportamiento similar en los sitios "poniente" y "oriente" en época de lluvias, no obstante, el sitio "poniente" (682 $\mu\text{S}/\text{cm}$) obtuvo su valor más bajo en el año 1 al igual que el sitio "centro" (875 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Por otro lado, el sitio "centro" obtuvo su valor más alto con 1140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el año 2 al igual que el sitio "poniente" con un valor de 749 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En cuanto a la época de estiaje el sitio "centro" (1199 $\mu\text{S}/\text{cm}$) obtuvo un valor mayor al sitio "oriente" (1130 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en el año 1.

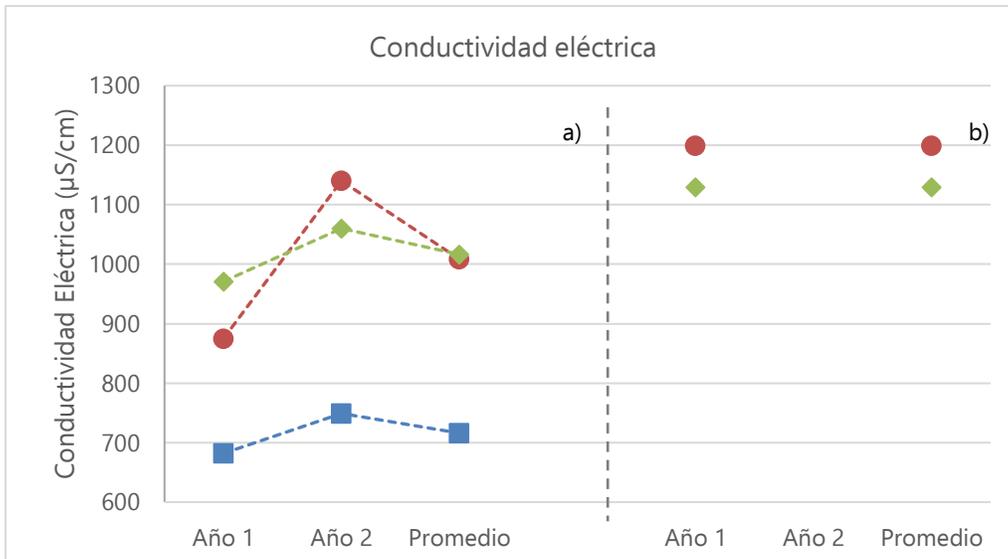


Gráfico 4. Valores de la Conductividad Eléctrica en el río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

En cuanto al parámetro de temperatura (Gráfico 5), el sitio "poniente" (24.8 y 24.7 °C) en época de lluvia obtuvo los valores más bajos y con un comportamiento casi constante durante los dos años. Para el sitio "centro" (28.7 °C) obtuvo su valor más alto en el año 1 con una aproximación al valor del sitio "oriente" (29.9 °C) en época de lluvias. El sitio "oriente" (29.9 °C y 30.5 °C) obtuvo los valores más altos con muy poca variabilidad entre los dos años de muestreo. Para época de estiaje en el año 1, los sitios "centro" (30.3 °C) y "oriente" (31.1 °C) presentaron una cercanía en cuanto al valor de sus datos sin embargo no coincidieron.

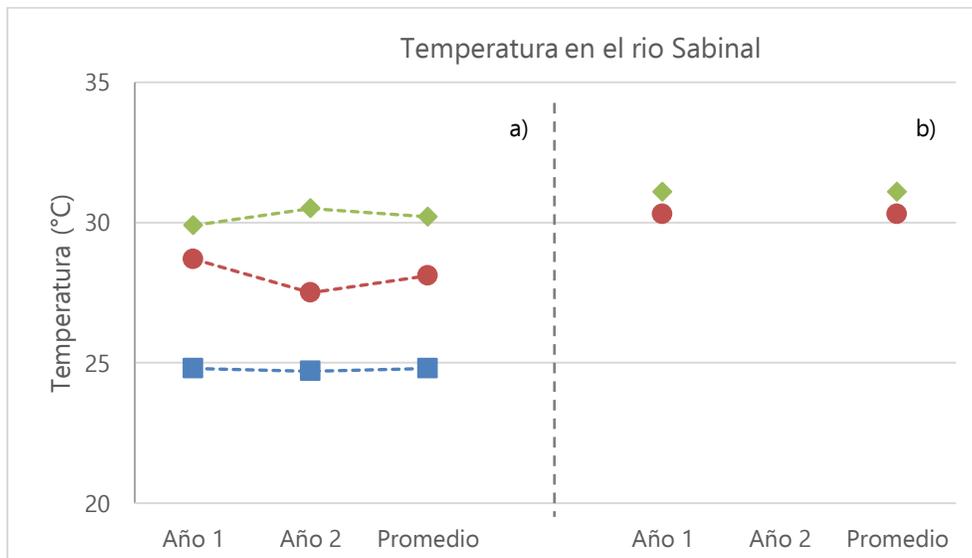


Gráfico 5. Comportamiento de la Temperatura en el río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

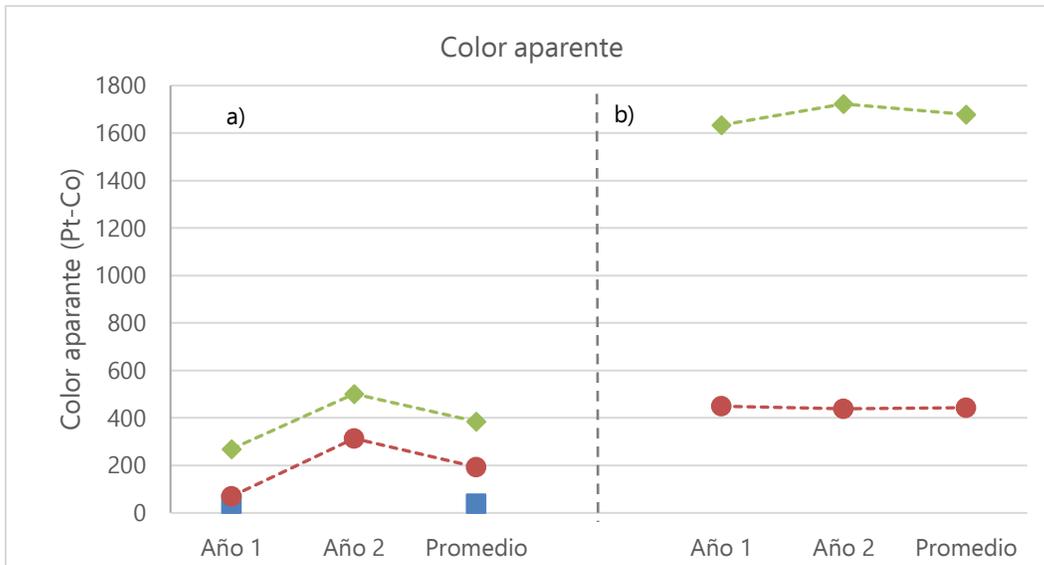


Gráfico 6. Valores de Color Aparente en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

Para el parámetro de color aparente (Gráfico 6), se observa un comportamiento similar entre los sitios "centro" (70 Pt-Co) y "oriente" (269.67 Pt-Co), sin embargo, no obtuvieron valores cercanos. El sitio "poniente" (39 Pt-Co) obtuvo el valor más bajo. El sitio "oriente" (1722.6 Pt-Co) obtuvo el valor más alto en año 2 en época de estiaje mientras que el sitio "centro" mostró un comportamiento casi constante además de que este mismo sitio obtuvo los valores más bajos en ambos años durante la época de estiaje.

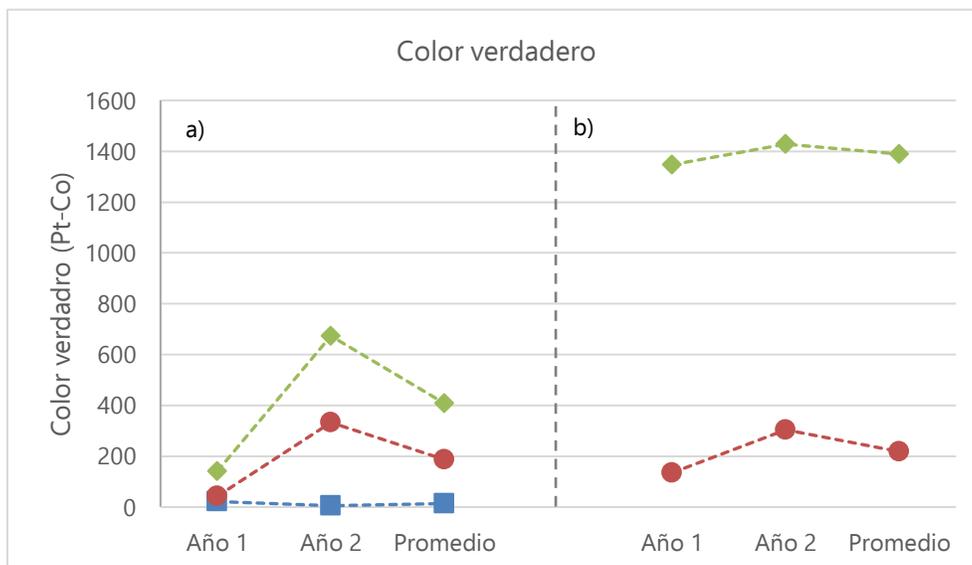


Gráfico 7. Valores de Color Verdadero en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con marcadores para los puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

Para el parámetro color verdadero (Gráfico 7) se observa que los sitios "poniente" (21.67 Pt-Co) y "centro" (42.67 Pt-Co) se encuentran muy próximos en el año 1. El sitio "poniente" obtuvo muy poca variabilidad en los dos años de muestreo. En cuanto al sitio "oriente" (674 Pt-Co) obtuvo el valor más alto en el año 2. Para la época de estiaje el sitio "oriente" (1428 Pt-Co) obtuvo el valor más alto en el año 2 mientras que el sitio "centro" el más bajo con un valor de 134.66 Pt-Co en el año 1.

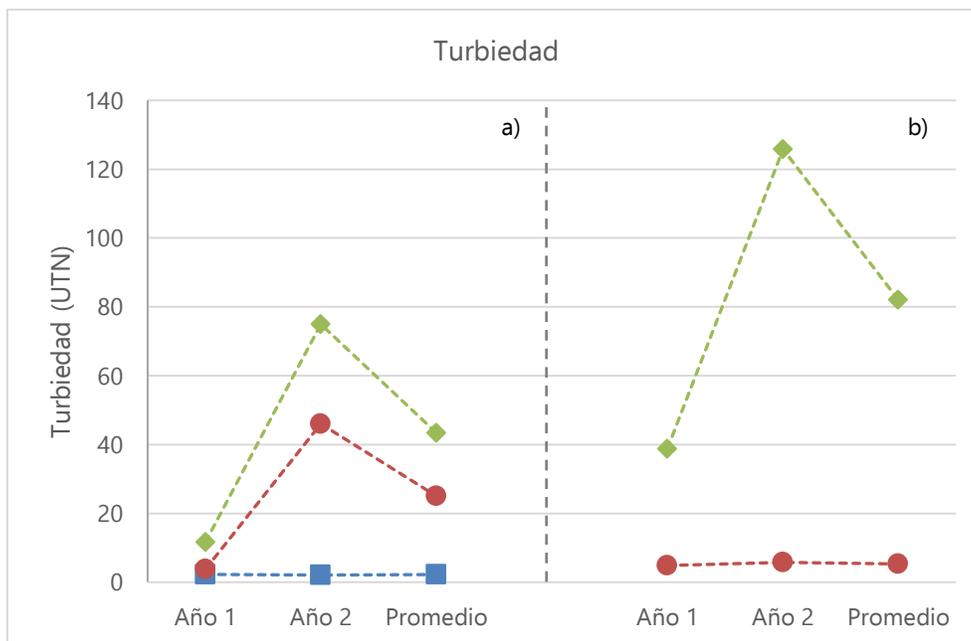


Gráfico 8. Valores de Turbiedad en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

En cuanto al Gráfico 8, el sitio "poniente" en los dos años en época de lluvia obtuvo muy poca variabilidad entre ambos muestreos (2.26 y 2.06 UTN). Sin embargo, para los sitios "centro" y "oriente" se observa una ligera aproximación en cuanto a valores (3.76 y 11.61 UTN respectivamente), estos mismos sitios para el año 2, mostraron los valores más elevados (46 y 74.95 UTN), encabezado por el sitio "oriente".

Para la época de estiaje, se muestra un comportamiento interesante para el sitio "oriente" donde en el año 1 se tuvo un valor de 38.74 UTN, pero para el año 2 fue más elevado (125.8 UTN). Se destaca que el sitio "centro" obtuvo los valores más bajos (4.8 y 5.7 UTN para los años 1 y 2, respectivamente).

Para el parámetro de sólidos sedimentables (Gráfico 9), en época de lluvias el comportamiento más destacable es para el sitio "oriente" que en su primer año obtuvo un valor de 0.5 ml/L mientras que para el año 2, obtuvo un valor de 1.7 ml/L, no obstante, los otros sitios "poniente" y "centro" obtuvieron valores más bajos que el sitio "oriente". Por otro lado, para la época de estiaje, el sitio "oriente" nuevamente obtiene los valores más altos en ambos años (2.8 y 3.8 ml/L) mientras que el sitio "centro" no rebasó el valor de 1 ml/L.

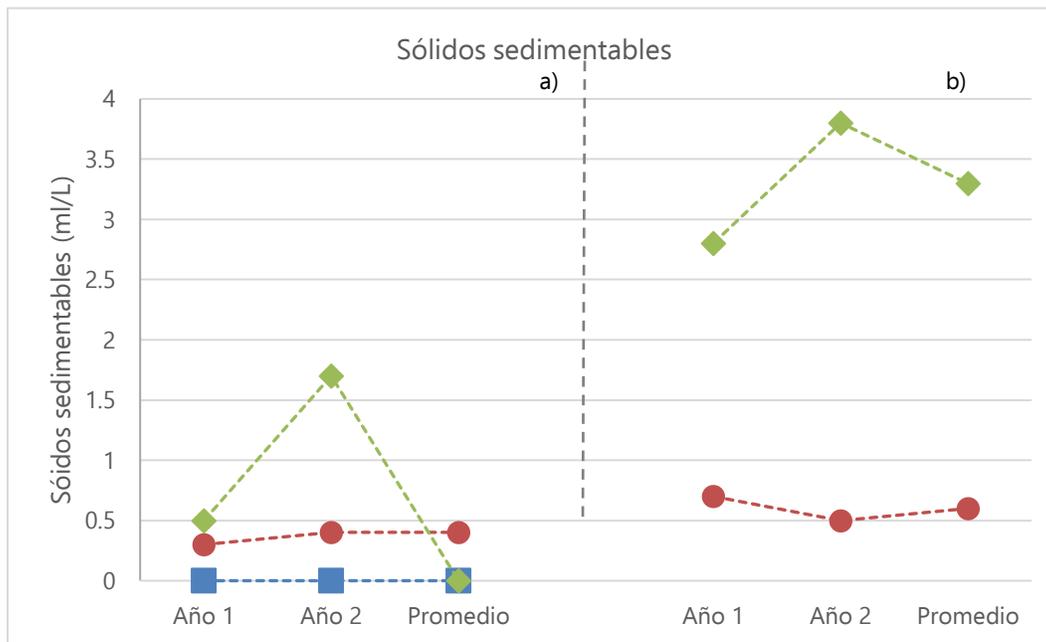


Gráfico 9. Concentraciones de Sólidos Sedimentables en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

Para el Gráfico 10, relacionado al parámetro de sólidos totales, se observa un comportamiento similar en los sitios "poniente" y "oriente" en el año 1 aunque en cuanto a valores no tuvieron una aproximación notable (276.67 y 390 mg/L), lo mismo para el año 2 (207 y 271.5 mg/L). Sin embargo, en este año el sitio "centro" y "oriente" se aproximaron con valores de 271.5 y 276.5 mg/L. En época de estiaje, el sitio "oriente" en el año 1 obtuvo 504.66 mg/L y 538.82 en el año 2, por lo que tuvo muy poca variación entre los dos muestreos. El sitio "centro" obtuvo en el año 1 un valor de 683.24 mg/L mientras que en año 2 obtuvo un valor de 538.82 mg/L por lo que se observa una variación más marcada.

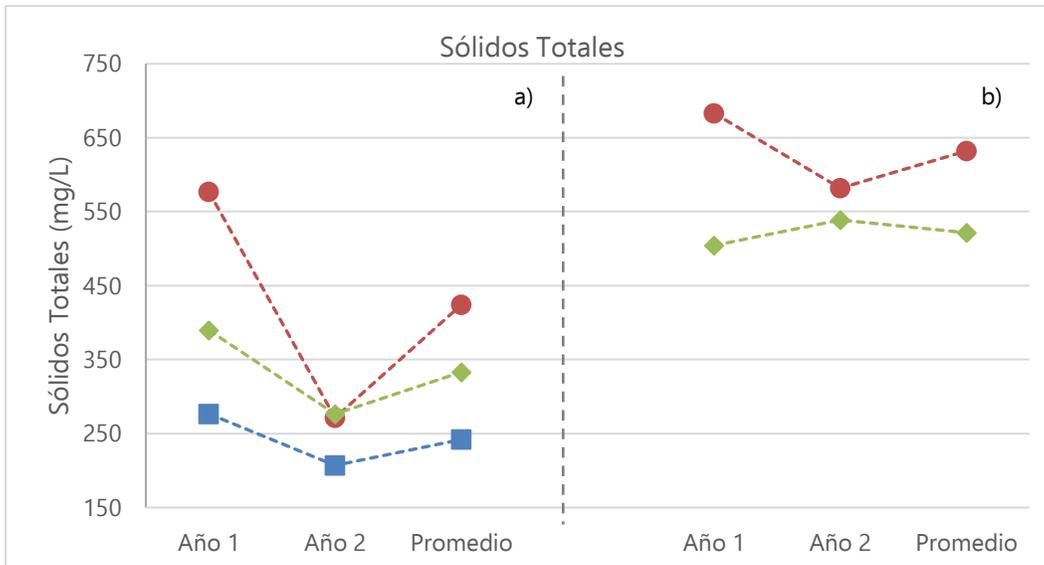


Gráfico 10. Concentraciones de Sólidos Totales en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

Para el Gráfico 11, referido al parámetro de SVT, los valores obtenidos en el año 1 en época de lluvias son más altos que los obtenidos en el año 2 para los tres sitios. Se destaca que el valor más alto se obtuvo en el año 1 en el sitio "centro" con un valor de 416.61 mg/L mientras que el valor más bajo se obtuvo en el año 2 en el sitio "oriente" con un valor de 169.75 mg/L. En cuanto a la época de estiaje, el sitio "centro" obtuvo durante los años 1 y 2 los valores más altos, esto es 526.12 y 488.32 mg/L, respectivamente. Se destaca el comportamiento similar en los sitios "centro" y "oriente" durante esta época del año.

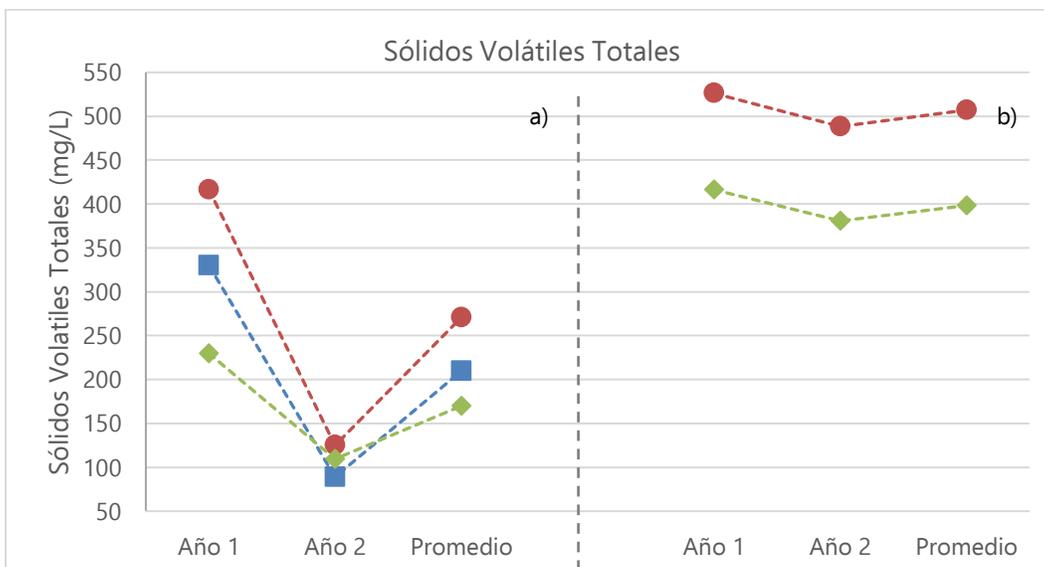


Gráfico 11. Concentraciones de Sólidos Volátiles Totales en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

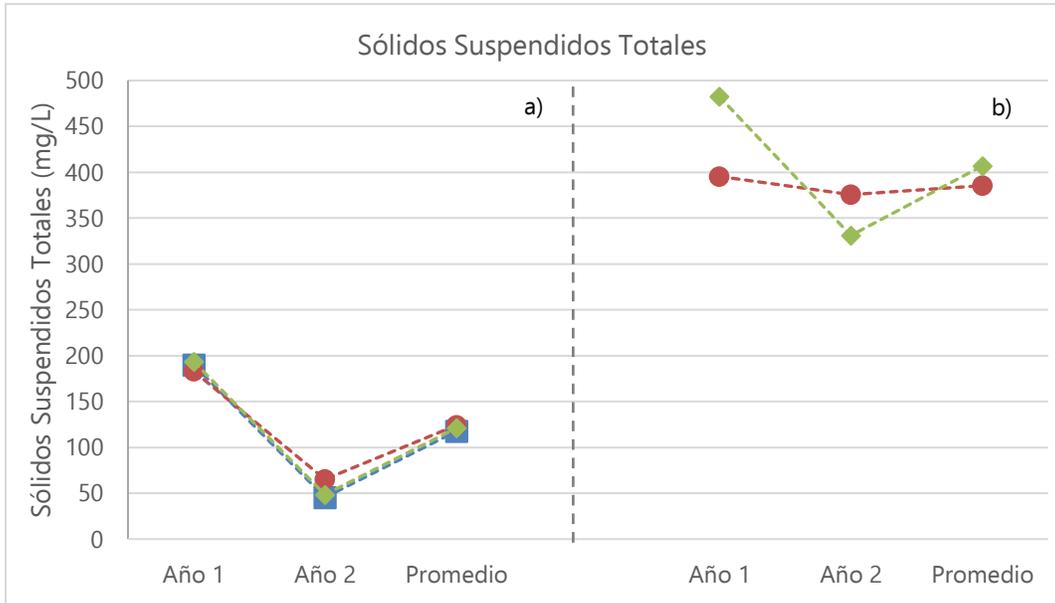


Gráfico 12. Concentraciones de Sólidos Suspendedos Totales en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

Para el parámetro de SST (Gráfico 12), se observa un comportamiento muy similar en los dos años de muestreo en época de lluvias. Para el año 1, los sitios "poniente", "centro" y "oriente", obtuvieron los valores de 190, 183.3 y 193.3 mg/L, respectivamente, lo que denota una proximidad destacable. El sitio "oriente" en época de estiaje obtuvo el valor más bajo en el año 2, sin embargo, para el año 1 obtuvo el valor más alto con 482.6 mg/L. Se denota que el sitio "centro" obtuvo valores sin tanta variabilidad (395.4 y 375.5 mg/L).

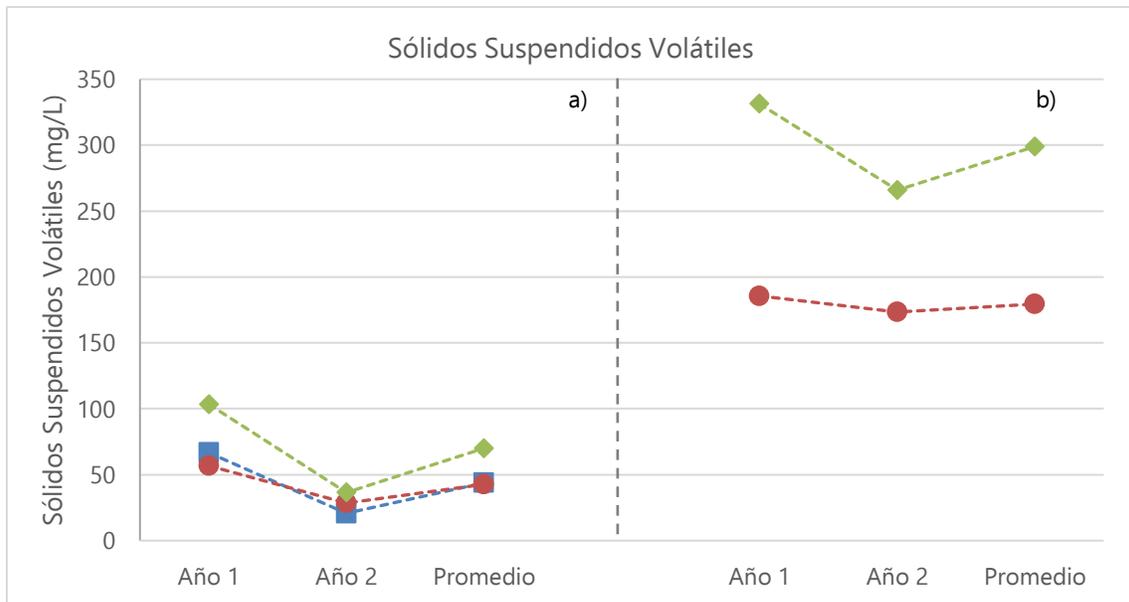


Gráfico 13. Concentraciones de Sólidos Suspendedos Volátiles en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

En el caso del Gráfico 13, en donde se muestra las concentraciones para SSV, en el año 1 se observa que dos sitios (poniente y centro) obtuvieron una aproximación en valores (66.67 y 56.67 mg/L), durante ese mismo año el sitio "oriente" obtuvo el valor más alto de ambos años (103.3 mg/L). Para el año 2 los tres sitios consiguieron valores más bajos que en el año 1 (20.74, 28.50 y 36.50 mg/L). En cuanto a la época de estiaje el año 2 obtuvo el valor más bajo en el sitio "centro" con un valor de 173.58 mg/L mientras que el sitio "oriente" obtuvo el valor más alto con 331.33 mg/L en el año 1.

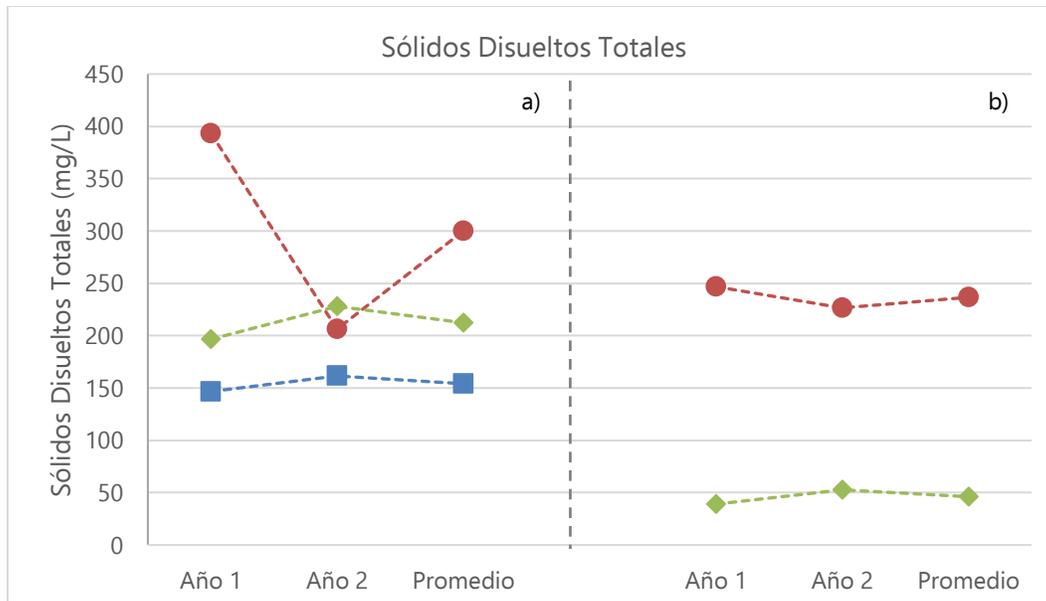


Gráfico 14. Concentraciones de Sólidos Disueltos Totales en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

En el Gráfico 14, se observan las concentraciones para los SDT, donde los sitios "poniente" y "oriente" muestran un comportamiento similar. Por otro lado, el sitio "centro" en el año 1 fue el de mayor valor con 393.33 mg/L, sin embargo, para el año 2 se observó una caída que consiguió un valor de 206.30 mg/L. Para la época de estiaje el lado "oriente" reportó los valores más bajos (39.06 y 52.83 mg/L) por otro lado el sitio "centro" obtuvo el valor más alto en el año 1 con 246.47 mg/L y nuevamente en el año 2 con 226.39 mg/L.

En cuanto al parámetro de Acidez, los valores más altos en época de lluvias se dieron en el año 1 de los cuales destacan los sitios "centro" (72 mg CaCO₃/L) y "oriente" (128 mg CaCO₃/L). Para el año 2 se observa una decaída en los valores de los tres sitios los cuales obtuvieron valores de 24.33, 38.33 y 40.33 mg CaCO₃/L. Sin embargo, en la época de estiaje los valores de los sitios "centro" y "oriente" aumentaron, destacándose el sitio "oriente" en el año 2 con un valor de 241.37 mg CaCO₃/L mientras que el sitio "centro" en el año 1 obtuvo el valor más bajo con 121 mg CaCO₃/L. Se denota que en ambas épocas del año los comportamientos de los sitios fueron similares.

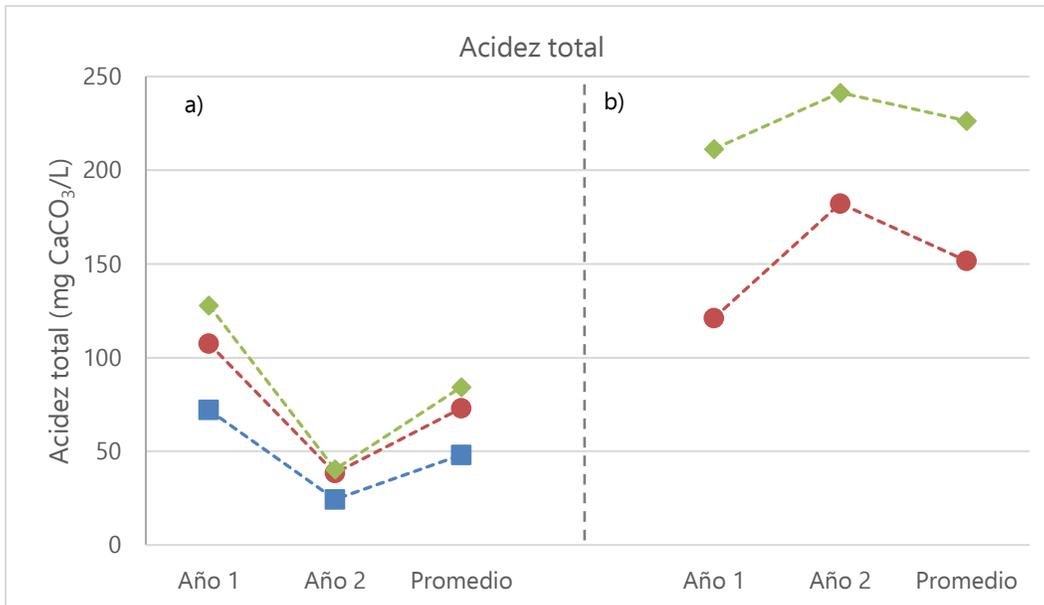


Gráfico 15. Acidez total en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

En el caso del parámetro de alcalinidad (Gráfico 16), para la época de lluvias se tuvieron valores no tan aproximados entre sí. Se destaca que el sitio "oriente" mostró el valor más alto (386.6 mg CaCO₃/L) mientras que el sitio "poniente" el valor más bajo (304.6 mg CaCO₃/L) durante el año 1. Para la época de estiaje los sitios "centro" (367.3 y 385.16 mg CaCO₃/L) y "oriente" (473.3 y 452.63 mg CaCO₃/L) obtuvieron valores semejantes en los dos años. Igualmente se destaca que el sitio "oriente" obtuvo su valor más alto en el año 1 al igual que el sitio "centro".

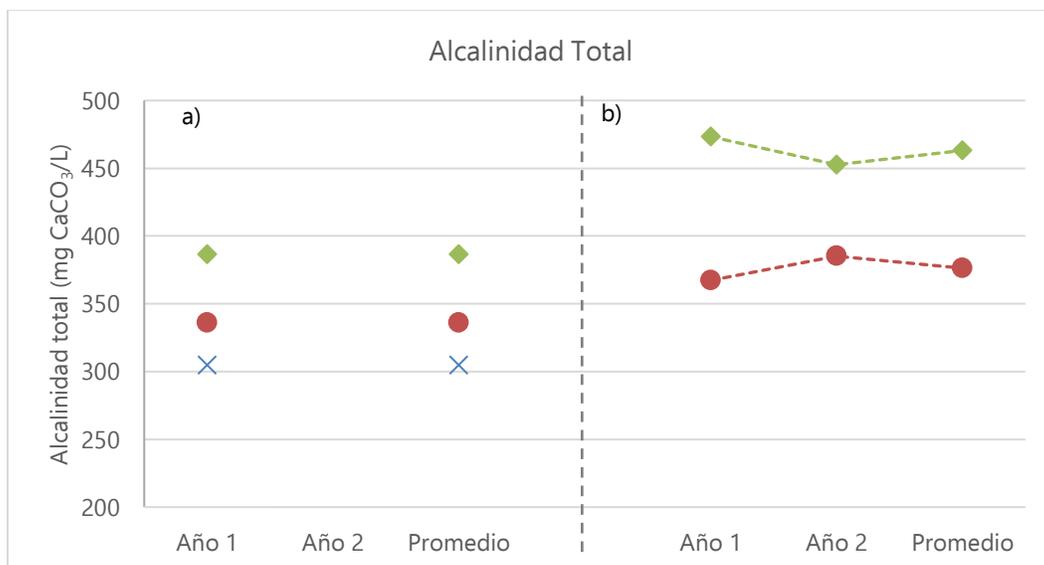


Gráfico 16. Alcalinidad total en las aguas del río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

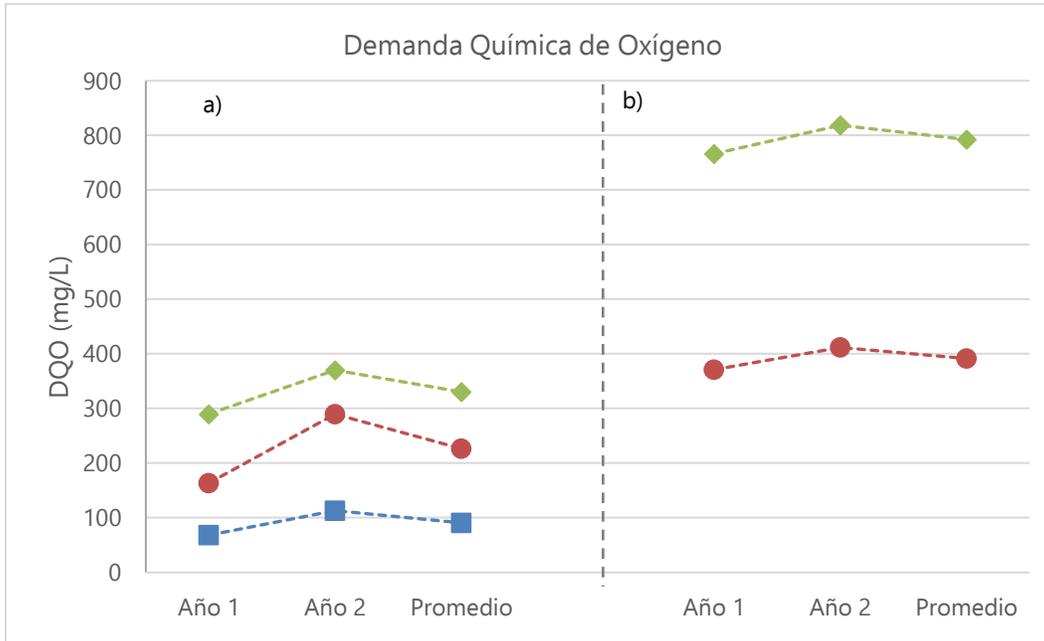


Gráfico 17. Concentraciones de DQO en el río Sabinal. Dónde: a) Época de lluvia, b) Época de estiaje; con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

En lo relacionado a la DQO, del gráfico 17, se observa una aproximación entre los tres sitios de muestreo, sin embargo, ninguno de estos consigue valores cercanos. Se destaca el sitio "oriente" por sus altos valores en los dos años de la época de lluvias (290.09 y 370.28 mg/L). En cuanto a la época de estiaje nuevamente el sitio "oriente" se destaca por sus valores altos en ambos años (766.45 y 818.46 mg/L).

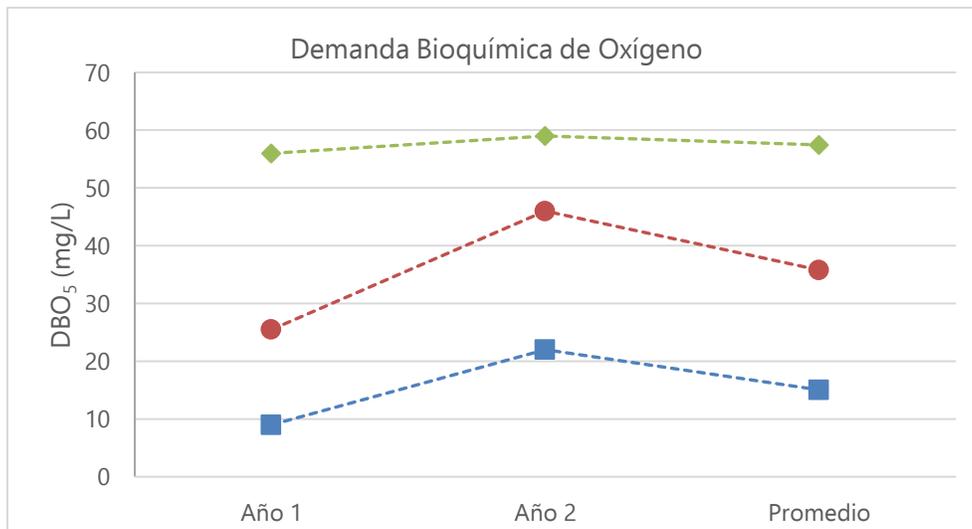


Gráfico 18. Concentraciones de DBO₅ en el río Sabinal, en época de lluvias con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

En cuanto al parámetro de DBO₅ (Gráfico 18), el sitio más destacable durante ambos años en épocas de lluvias es el sitio "oriente" con valores de 56 y 59 mg/L, respectivamente. Mientras que el sitio que consiguió los valores más bajos fue el sitio "poniente" con valores de 22 y 15 mg/L, además de que los valores más bajos para los tres sitios fueron obtenidos durante el año 1.

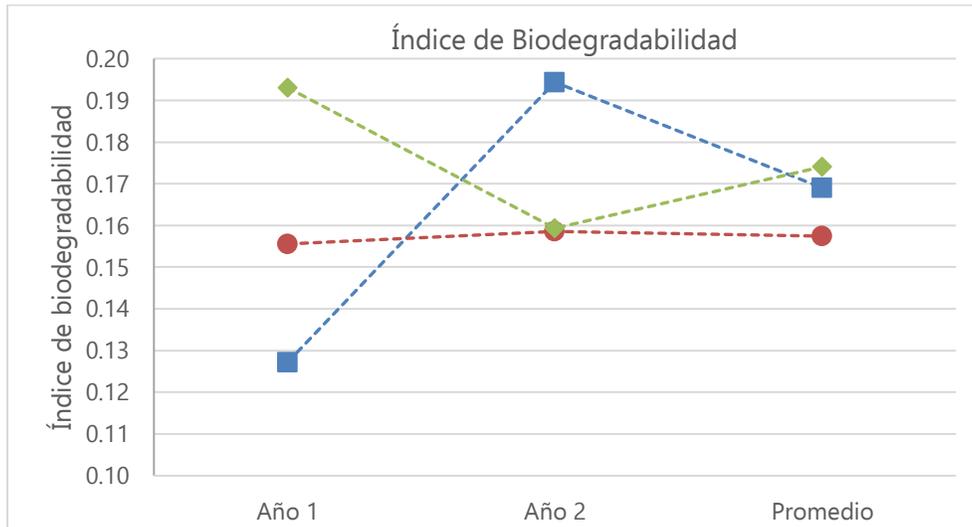


Gráfico 19. Índice de biodegradabilidad para las aguas del río Sabinal, en época de lluvias con puntos de muestreo: poniente (■), centro (●) y oriente (◆).

Para el índice de biodegradabilidad en época de lluvias, observamos del Gráfico 19 que, aunque hubo variabilidad entre los valores de los tres sitios, el sitio que permaneció constante en valores fue el sitio "centro" con 0.16 en los dos años. Por otro lado, el sitio "poniente" fue el de mayor variabilidad durante los dos años (0.13 y 0.19). Los sitios "poniente" en el año 2 y "oriente" en el año 1 obtuvieron el mismo valor (0.19).

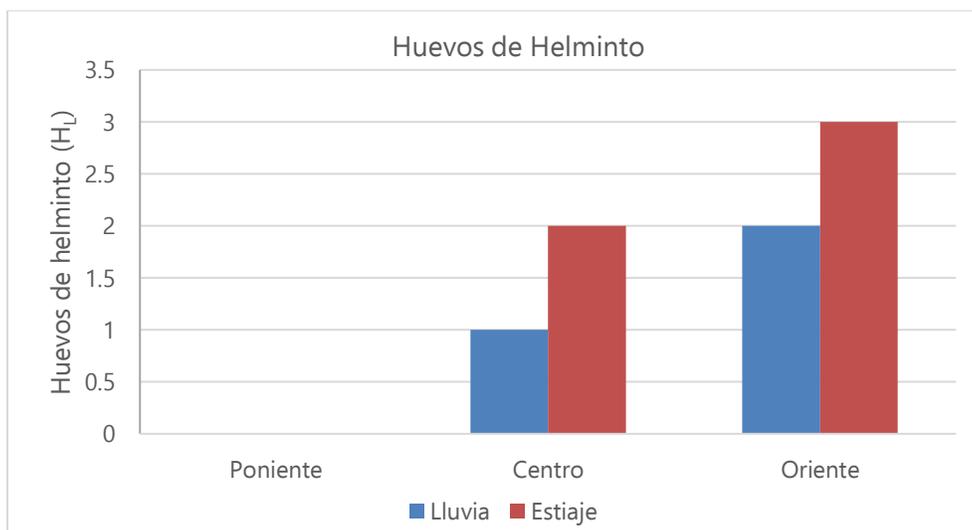


Gráfico 20. Huevos de helminto encontrados en los puntos de muestreo del río Sabinal.

Por último, para el único parámetro microbiológico determinado, se observa del Gráfico 20 que el sitio "oriente" obtuvo la mayor cantidad de huevos de helminto por litro, 2 H_L en época de lluvia y 3 H_L en época de estiaje, no obstante, el sitio "centro" obtuvo en época de estiaje 2 H_L y 1 H_L en época de lluvia, mientras que en el sitio "poniente" no se observó la presencia de este parásito.

Comparando los valores de los parámetros examinados en el estudio del río Sabinal con los valores de referencias de la Organización Mundial de la Salud para el Agua Potable (2017) (Tabla 24), únicamente el punto de muestreo en Poniente lograría ser utilizada para el consumo humano (para beber, actividades domésticas, cuidado personal). Sin embargo, la OMS no considera parámetros como la DQO o la DBO, ni establece límites para variables como OD y Temperatura.

Tabla 24. Valores para el agua potable de la OMS de los parámetros determinados.

Parámetro	Valor	Unidades
Color verdadero	<15	UTC
pH	6.5 – 8.0	Unidades de pH
SDT	<600	mg/L
Turbidez	<4	UTN

Fuente: OMS, 2017.

Sin embargo, al realizar la comparación con datos de aguas residuales domésticas (ARD) (Metcalf y Eddy, 1998), en donde se enlistan más parámetros de caracterización, se encontró que las características del agua en el río Sabinal para los Puntos Centro y Oriente se asemejan a aguas residuales domésticas, yendo desde una calidad de débil a media para parámetros como ST y DQO, hasta una calidad fuerte en parámetros como SST y Alcalinidad, lo que denota el nivel de contaminación del río en estos puntos de monitoreo.

Tabla 25. Comparación con la composición típica del agua residual doméstica.

Contaminantes	Unidades	Caracterización					Valores típicos de ARD (Metcalf & Eddy, 1998)		
		Poniente	Centro		Oriente		Débil	Media	Fuerte
		Lluvia	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje			
ST	mg/l	242	424	632.4	333	521.7	350	720	1200
SDT	mg/l	154	300	236.7	212	45.9	250	500	850
SST	mg/l	118	124	385.5	121	406.9	100	220	350
DBO ₅ , 20°C	mg/l	15.4	35.8	-	57.5	-	110	220	400
DQO	mg/l	91	227	391.5	330	792.5	250	500	1000
Alcalinidad (como CaCO ₃)	mg/l	304.6	336	376.2	386.6	463.0	50	100	200

ARD: Aguas Residuales Domésticas. *Espacios sin valores (-), son datos que no pudieron ser obtenidos en el momento del muestreo por indisponibilidad de los equipos.

APLICACIÓN DE ÍNDICES DE CALIDAD

ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA DE LA FUNDACIÓN NACIONAL DE SANEAMIENTO (NSF WQI)

Siguiendo la metodología establecida para este índice, se muestran los datos de los pesos ponderados ajustados para las temporadas de lluvias, dividiendo los valores ponderados de los parámetros con los que no se cuentan en este trabajo de manera equitativa entre el resto de las variables (Tabla 26):

Tabla 26. Pesos finales y valores de los subíndices para el cálculo del NSF WQI.

Parámetro	Unidades	Pesos iniciales (W _i)	Pesos finales		Valor de subíndice				
					Lluvia			Estiaje	
			Lluvia	Estiaje	Poniente	Centro	Oriente	Centro	Oriente
OD	% Sat	0.17	0.23	-	97	23	5	-	-
pH	Unidades de pH	0.12	0.18	0.22	90	93	92	90	91
DBO ₅	mg/L	0.10	0.16	-	19	5	5	-	-
ΔTemperatura	°C	0.10	0.16	0.20	82	90	81	74	70
Turbiedad	UTN	0.08	0.14	0.18	95	67	44	87	24
ST	mg/L	0.08	0.14	0.18	78	44	57	20	20
Total		0.65	1.00	1.00					

**Espacios sin valores (-), son datos que no pudieron ser obtenidos en el momento del muestreo por indisponibilidad de los equipos.*

En la Tabla 27, se exhiben los resultados de la aplicación del NSF WQI en las aguas del río Sabinal:

Tabla 27. Calidad del Agua del río Sabinal de acuerdo con el NSF WQI.

Parámetro	Unidades	NSF WQI				
		Lluvia			Estiaje	
		Poniente	Centro	Oriente	Centro	Oriente
OD	% Sat	22.15	5.25	1.14	-	-
pH	Unidades de pH	16.05	16.59	16.41	20.10	20.32
DBO ₅	mg/L	3.01	0.79	0.79	-	-
ΔTemperatura	°C	12.98	14.25	12.83	15.05	14.23
Turbiedad	UTN	13.14	9.27	6.09	15.95	4.40
ST	mg/L	10.79	6.09	7.89	3.67	3.67
Total		78.12	52.23	45.14	54.76	42.62

**Espacios sin valores (-), son datos que no pudieron ser obtenidos en el momento del muestreo por indisponibilidad de los equipos.*

Como se observa en la tabla anterior, únicamente el Punto Poniente en temporada de lluvias cuenta con una calidad con clasificación "Buena". El Punto Centro muestra una clasificación "Media" en ambas temporadas y el Punto Oeste se clasificó con una Calidad "Mala".

ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA DE DINIUS (1987)

En cuanto al índice de Dinius, para el cálculo de este, se determinaron los datos mostrados en la Tabla 28:

Tabla 28. Pesos finales y valores de los subíndices para el cálculo del Índice de Dinius.

Parámetro	Unidades	Pesos iniciales (W _i)	Pesos finales (W _i)		Valor de subíndice (I _i)				
			Lluvia	Estiaje	Lluvia			Estiaje	
					Poniente	Centro	Oriente	Centro	Oriente
pH	Unidades de pH	0.77	0.139	0.205	116.29	97.03	103.68	119.91	113.65
Color	Pt-Co	0.063	0.125	0.191	68.62	36.56	30.36	35.23	22.64
Conductividad	μS/cm	0.079	0.141	0.207	57.26	51.12	50.98	48.25	49.21
OD	% Sat	0.109	0.171	-	87.76	36.80	15.51	-	-
ΔTemperatura	°C	0.077	0.139	0.205	81.48	109.40	131.59	159.46	171.08
Alcalinidad	mg/L	0.063	0.125	0.191	46.42	45.81	44.96	45.12	43.88
DBO ₅	mg/L	0.97	0.159	-	76.01	68.18	64.14	-	-
Total		0.565	1.00	1.00					

**Espacios sin valores (-), son datos que no pudieron ser obtenidos en el momento del muestreo por indisponibilidad de los equipos.*

De igual manera, se modificaron los pesos ponderados iniciales, distribuyendo equitativamente el valor total de los parámetros coliformes, coliformes fecales, dureza, cloruros y nitratos, así como el oxígeno disuelto y la DBO en temporada de Estiaje, a falta de datos para completar el cálculo del índice original.

Continuando con el cálculo del índice, en la Tabla 29, se muestra la clasificación de la calidad del agua del río Sabinal de acuerdo con el Índice de Calidad de Aguas diseñado por Dinius (1987), con relación al uso que se podría dar a dicho recurso.

Tabla 29. Calidad del Agua del río Sabinal de acuerdo con Dinius (1987).

Parámetro	Unidades	Índice de Dinius				
		Lluvia			Estiaje	
		Poniente	Centro	Oriente	Centro	Oriente
pH	Unidades de pH	1.938	1.890	1.908	2.670	2.641
Color	Pt-Co	1.698	1.569	1.608	1.976	1.816
Conductividad	μS/cm	1.771	1.742	1.728	2.233	2.242
OD	% Sat	2.151	1.853	1.599	-	-

Parámetro	Unidades	Índice de Dinius				
		Lluvia			Estiaje	
		Poniente	Centro	Oriente	Centro	Oriente
ΔTemperatura	°C	1.845	1.922	1.972	2.831	2.872
Alcalinidad	mg/L	1.616	1.614	1.610	2.072	2.061
DBO ₅	mg/L	1.992	1.958	1.939	-	-
Total		74.426	58.154	52.163	69.098	63.638
Usos del agua	Suministro de agua	Necesidad de tratamiento se vuelve más extensiva				
	Recreación	Aceptable	En proceso de contaminación			
	Peces	Aceptable	Dudosa		Marginal	
	Mariscos	Aceptable	Dudosa		Marginal	
	Agricultura	No se necesita tratamiento para la mayoría de los cultivos				
	Industria	No se necesita tratamiento para industrias estándar				

**Espacios sin valores (-), son datos que no pudieron ser obtenidos en el momento del muestreo por indisponibilidad de los equipos.*

Como se muestra en la Tabla 29, la calidad del río Sabinal en sus distintos sitios de muestreo varía de acuerdo con el uso al que pueda destinarse las aguas, sin embargo, la mayoría de las clasificaciones dicta la necesidad de un tratamiento, en especial para el uso de las aguas para suministro.

Para una mejor visualización del Índice de Calidad, a continuación, se muestran las gráficas por cada uno de los usos que considera Dinius:

Gráfico 21. Índice de Dinius para uso como suministro de agua.

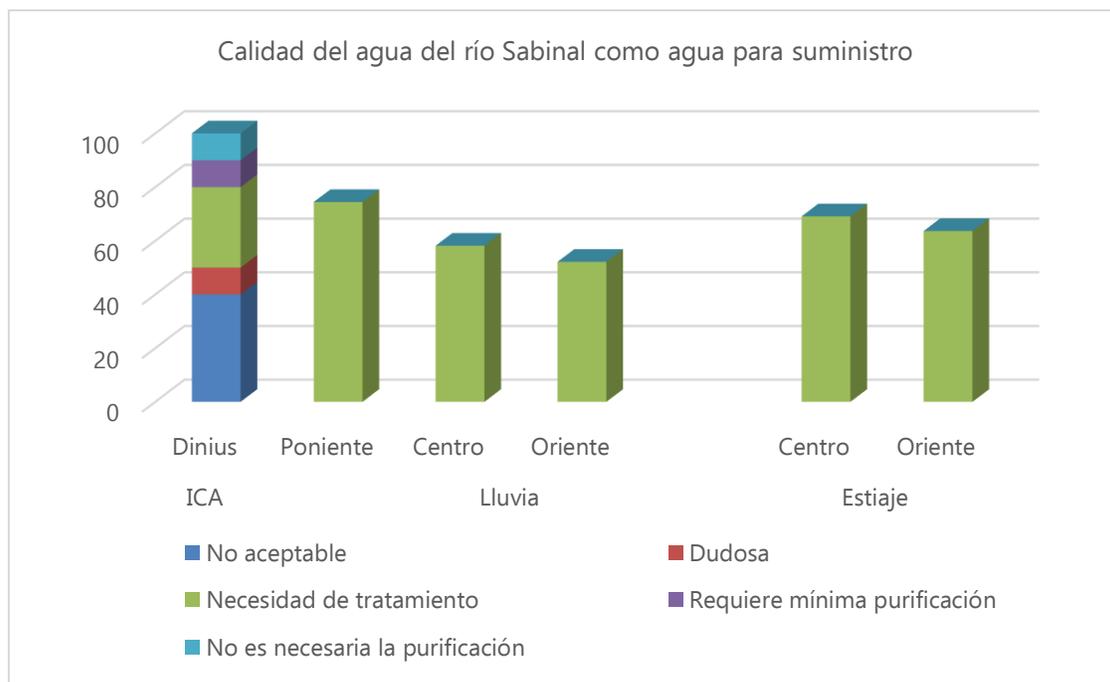


Gráfico 22. Índice de Dinius para uso recreacional.

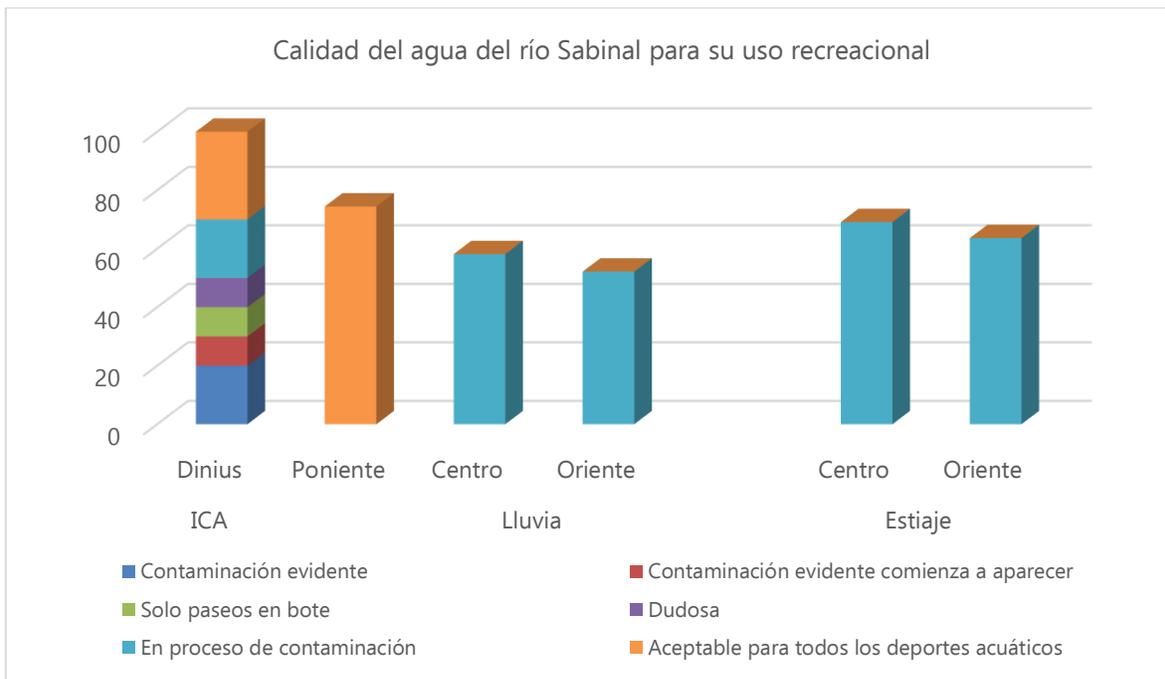


Gráfico 23. Índice de Dinius para uso en vida acuática.

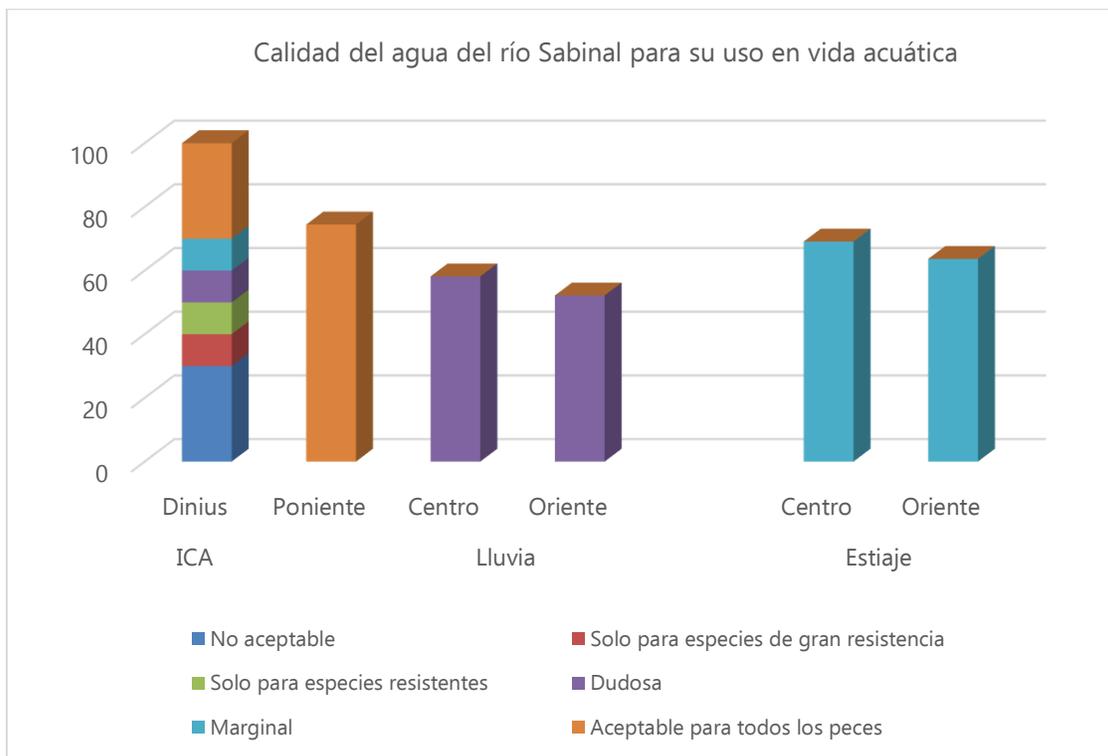


Gráfico 24. Índice de Dinius para uso de vida marina.

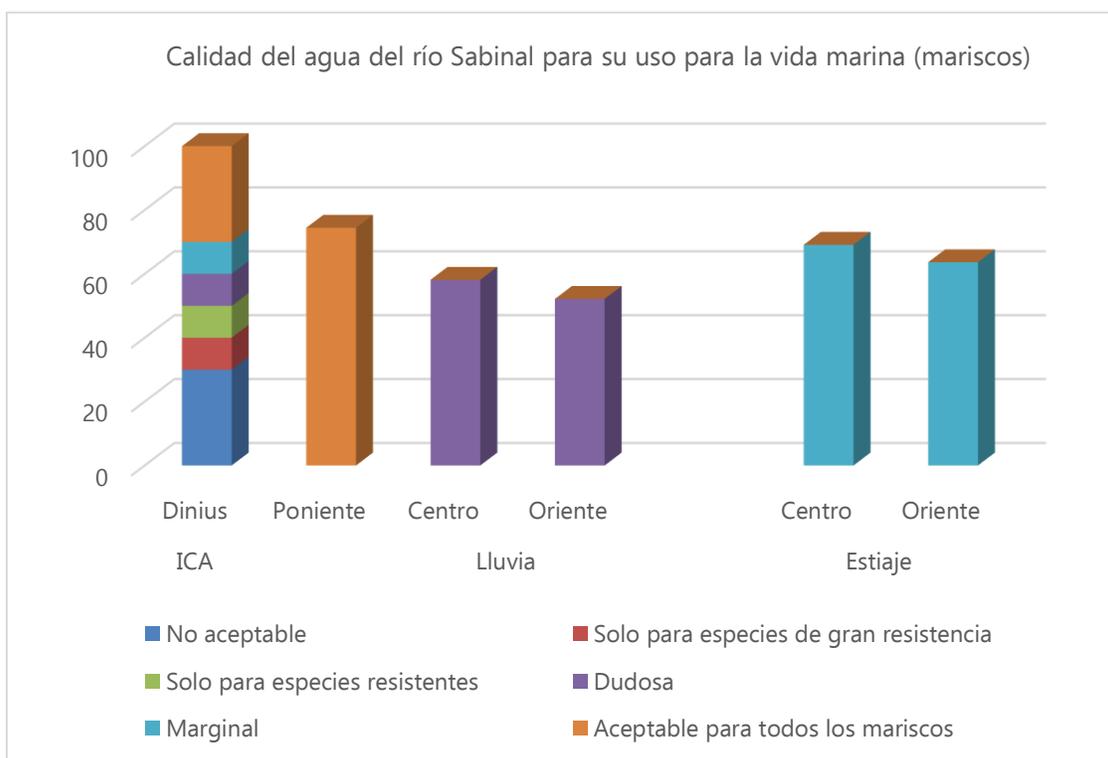


Gráfico 25. Índice de Dinius para uso en la agricultura.

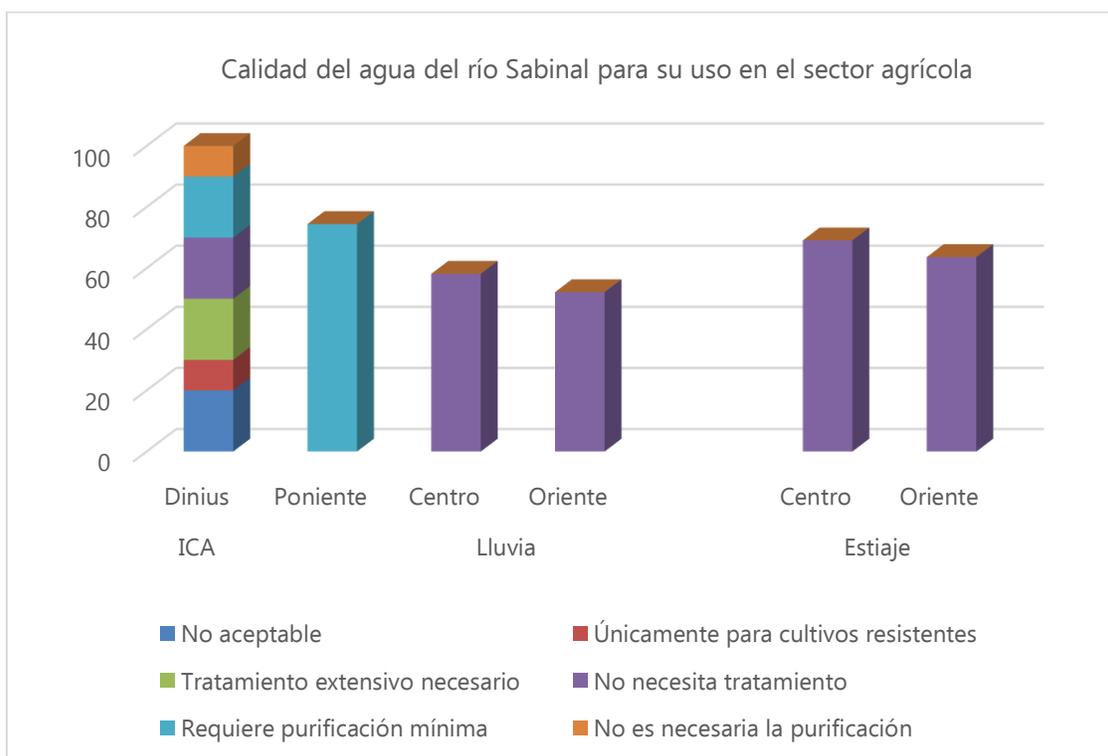
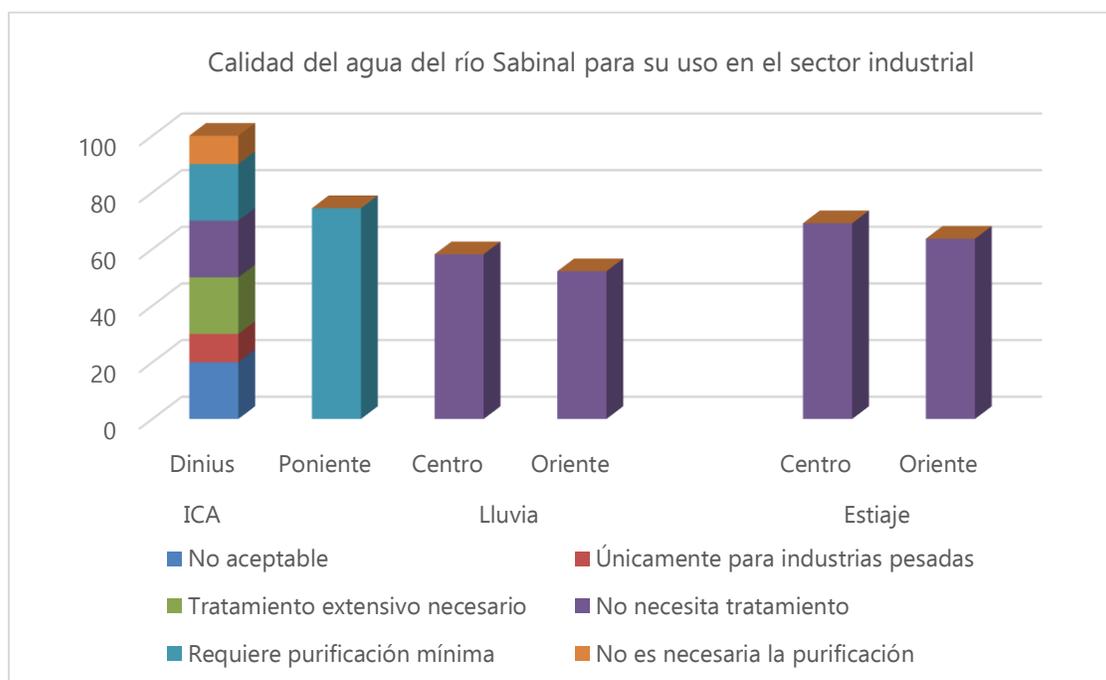


Gráfico 26. Índice de Dinius para uso en la industria.



ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA PARA MÉXICO

Con respecto al índice diseñado por León (1992), se utilizaron los siguientes datos para el cálculo de la calidad del agua (Tabla 30):

Tabla 30. Valores de los pesos específicos y calidad de los parámetros medidos para el río Sabinal.

Parámetro	Unidades	Pesos específicos (W _i)	Pesos finales (W _i)		Calidad de los parámetros (Q _i)				
			Lluvia	Estiaje	Lluvia			Estiaje	
					Poniente	Centro	Oriente	Centro	Oriente
pH	Unidades de pH	0.063	0.142	0.214	116.3	97.03	103.7	119.9	113.65
OD	% Sat	0.103	0.182	-	87.76	36.8	15.51	-	-
ΔTemperatura*	°C	0.043	0.122	0.194	81.48	109.4	131.6	159.5	171.08
ST	mg/L	0.033	0.112	0.184	63	44	56	20	20
Alcalinidad	mg/L	0.055	0.134	0.206	46.42	45.81	44.96	45.12	43.882
DQO	mg/L	0.053	0.132	0.204	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
DBO ₅	mg/L	0.096	0.175	-	76.01	68.18	64.14	-	-
Total		0.554	1.00	1.00					

*ΔTemperatura: Diferencia de temperatura. Espacios sin valores (-), son datos que no pudieron ser obtenidos en el momento del muestreo por indisponibilidad de los equipos.

Al igual que con los índices de Brown y Dinius, por la falta de datos para una parte de los parámetros enlistados para este índice, se tomaron los valores y fueron divididos

equitativamente entre las variables con datos disponibles para el río Sabinal, obteniendo así los resultados mostrados en la Tabla 31:

Tabla 31. Calidad del agua del río Sabinal de acuerdo con León (1992).

Parámetro	Unidades	ICA				
		Lluvia			Estiaje	
		Poniente	Centro	Oriente	Centro	Oriente
pH	Unidades de pH	1.966	1.916	1.934	2.780	2.748
OD	% Sat	2.259	1.928	1.648	-	-
ΔTemperatura	°C	1.712	1.774	1.815	2.670	2.706
ST	mg/L	1.591	1.529	1.571	1.733	1.733
Alcalinidad	mg/L	1.673	1.670	1.666	2.188	2.176
DQO	mg/L	1.396	1.396	1.396	1.672	1.672
DBO ₅	mg/L	2.135	2.095	2.073	-	-
Total		60.355	48.966	43.796	47.078	46.911
Usos del agua	Agua potable	Contaminada	Contaminado fuerte			
	Agricultura	Contaminado leve	Contaminada			
	Pesca	Aceptable	Contaminada			
	Industrial	Contaminado leve	Contaminada			
	Recreativo	Aceptable	Contaminado leve			

**Espacios sin valores (-), son datos que no pudieron ser obtenidos en el momento del muestreo por indisponibilidad de los equipos.*

Por la similitud de este índice con el diseñado por Dinius, se muestra que la Calidad de las Aguas del río Sabinal varían de acuerdo con el uso al que se destinen, encontrando en la mayor parte de ellos aguas clasificadas dentro de rangos denominados como contaminados, obteniendo únicamente una calidad aceptable en las aguas del punto poniente en temporada de lluvia para su uso en actividades de pesca y recreativas.

NORMAS OFICIALES MEXICANAS

Tomando en cuenta las recomendaciones realizadas por León (1992), así como la consulta de los valores establecidos en la normatividad mexicana, a continuación, se presentan los límites máximos permisibles (LMP) impuestos en las NOM para cuerpos de aguas aplicables para el río Sabinal.

Se consideraron los valores de Promedio Diario en las NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-SEMARNAT-1996, indicando los valores de los parámetros muestreados que se encuentran bajo los límites permisibles en color verde y aquellos que sobrepasan los límites en color rojo:

Tabla 32. Comportamiento de los parámetros en el río Sabinal respecto a los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Parámetro	Unidades	Punto de muestreo					NOM-001-SEMARNAT-1996	
		Poniente	Centro		Oriente		LMP	
		Lluvia	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Promedio Mensual	Promedio Diario
pH	Unidades de pH	7.150	7.505	7.090	7.375	7.195	5 a 10	
Temperatura	°C	24.750	28.100	30.300	30.200	31.100	40	
S _{Sed}	ml/L	< 1	0.350	0.600	1.100	3.300	1	2
SST	mg/L	117.750	124.260	385.490	120.915	406.930	75	125
DBO ₅		15.350	35.750	-	57.500	-	75	150

**Espacios sin valores (-), son datos que no pudieron ser obtenidos en el momento del muestreo por indisponibilidad de los equipos.*

Tabla 33. Comportamiento de los parámetros en el río Sabinal respecto a los LMP de la NOM-002-SEMARNAT-1996.

Parámetro	Unidades	Punto de muestreo					NOM-002-SEMARNAT-1996	
		Poniente	Centro		Oriente		LMP	
		Lluvia	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Promedio Mensual	Promedio Diario
pH	Unidades de pH	7.150	7.505	7.090	7.375	7.195	5.5	10
Temperatura	°C	24.750	28.100	30.300	30.200	31.100	40	
S _{Sed}	ml/L	< 1	0.350	0.600	1.100	3.300	5	7.5
SST	mg/L	117.750	124.265	385.490	120.915	406.930	75	125
DBO ₅		15.350	35.750	-	57.500	-	75	150

**Espacios sin valores (-), son datos que no pudieron ser obtenidos en el momento del muestreo por indisponibilidad de los equipos.*

En cuanto a la NOM-003-SEMARNAT-1996, se tomaron los valores determinados para "Contacto indirecto u ocasional", indicando los valores que cumplen con los LMP en color verde y aquellos que sobrepasan los límites en color rojo.

Tabla 34. Comportamiento de los parámetros en el río Sabinal respecto a los LMP de la NOM-003-SEMARNAT-1996.

Parámetro	Unidades	Punto de muestreo					NOM-003-SEMARNAT-1997	
		Poniente	Centro		Oriente		LMP (PM)	
		Lluvia	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Contacto directo	Contacto indirecto u ocasional
Huevos de Helminto	HH/L	0	1	2	2	3	≥1	≥5
SST	mg/L	117.750	124.265	385.490	120.915	406.930	20	30
DBO ₅		15.350	35.750	-	57.500	-	20	30

**Espacios sin valores (-), son datos que no pudieron ser obtenidos en el momento del muestreo por indisponibilidad de los equipos.*

INDICADORES DE CALIDAD DEL AGUA DE CONAGUA

En cuanto a los indicadores de calidad del agua para cuerpos de agua superficiales especificados por la CONAGUA, se encontró que la calidad del agua del río Sabinal para los puntos monitoreados sería como se muestra en la Tabla 35, donde se observa que el punto Oriente y el parámetro DQO muestran los valores más elevados.

Tabla 35. Resultados del índice de CONAGUA de acuerdo con los datos del río Sabinal.

Parámetro	Unidades	Resultados finales				
		Lluvia			Estiaje	
		Poniente	Centro	Oriente	Centro	Oriente
SST	mg/L	117.75	124.27	120.92	385.49	406.93
DQO	mg/L	90.80	227.00	330.19	391.51	792.46
DBO ₅		15.35	35.75	57.50	-	-
%OD	%Sat	94.14	32.00	6.03	-	-

Azul: Excelente; Amarillo: Aceptable; Naranja: Contaminada; Rojo: Fuertemente contaminada. Para más detalle, consultar el apartado 4.2.1.2. INDICADORES DE CALIDAD DEL AGUA DE LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA). Espacios sin valores (-), son datos que no pudieron ser obtenidos en el momento del muestreo por indisponibilidad de los equipos

ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA EN CORRIENTES SUPERFICIALES DEL INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (ICA IDEAM) PARA COLOMBIA

Para el cálculo del ICA IDEAM, se cuentan con los valores y ponderaciones que se muestran en la Tabla 36:

Tabla 36. Valores de los pesos ponderados y valor de los subíndices para el río Sabinal (ICA IDEAM).

Parámetro	Unidades	Pesos iniciales (W _i)	Pesos finales		Valor de subíndice				
			Lluvia	Estiaje	Lluvia			Estiaje	
					Poniente	Centro	Oriente	Centro	Oriente
pH	Unidades de pH	0.20	0.25	0.33	1	1	1	1	1
OD	% Sat	0.20	0.25	-	0.941	0.320	0.060	-	-
SST	mg/L	0.20	0.25	0.33	0.667	0.647	0.657	0	0
Conductividad	µS/cm	0.20	-	-	-	-	-	-	-
DQO	mg/L	0.20	0.25	0.33	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
Total		1.00	1.00	1.00					

**Espacios sin valores (-), son datos que no pudieron ser obtenidos en el momento del muestreo por indisponibilidad de los equipos.*

Siguiendo con el cálculo del índice, en la Tabla 37, se exhibe la Calidad del Agua del río Sabinal de acuerdo con el Índice de Calidad del Agua del IDEAM:

Tabla 37. Calidad del Agua del río Sabinal de acuerdo con el ICA IDEAM.

Parámetro	Unidades	Valor de subíndice				
		Lluvia			Estiaje	
		Poniente	Centro	Oriente	Centro	Oriente
pH	Unidades de pH	0.250	0.250	0.250	0.333	0.333
OD	% Sat	0.235	0.080	0.015	-	-
SST	mg/L	0.167	0.162	0.164	0.000	0.000
DQO	mg/L	0.031	0.031	0.031	0.042	0.042
Total		0.683	0.523	0.461	0.375	0.375
Calidad		Regular	Regular	Mala	Mala	Mala

**Espacios sin valores (-), son datos que no pudieron ser obtenidos en el momento del muestreo por indisponibilidad de los equipos.*

En concordancia con la información de la Tabla 37, los puntos poniente y centro en temporadas de lluvia muestran una calidad de agua regular, a diferencia de los puntos centro en temporada de estiaje y el punto oriente en ambas temporadas, que reflejan una calidad mala.

ÍNDICE SIMPLIFICADO DE CALIDAD DEL AGUA (ISQA)

Tabla 38. Resultados del índice ISQA de acuerdo con los datos del río Sabinal.

	Poniente	Centro		Oriente	
	Lluvia	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
		37.06	21.34	-1.59	16.50
ISQA	Contaminada	Agua Negra	Agua negra	Agua negra	Agua negra

De acuerdo con la clasificación del índice ISQA, el río Sabinal en su mayoría de puntos de muestreo y en épocas del año, se encuentra en una muy mala calidad. Exceptuando, el lado poniente que se encuentra contaminada en época de lluvias.

ÍNDICE DE CALIDAD AMOEBA

Tabla 39. Resultados del índice AMOEBA (OPT) de acuerdo con los datos los del río Sabinal.

	Poniente	Centro		Oriente	
	Lluvia	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
	AMOEBA	19.025	0.65	0.05	1.25
	Mala	Muy Mala	Muy Mala	Muy Mala	Muy Mala

En su mayoría de puntos de muestreo y en épocas del año, la calidad del río Sabinal se encuentra en una muy mala calidad, exceptuando el lado poniente en época de lluvias que se encuentra en clasificación mala.

ICATEST

A continuación, se presentan las gráficas realizadas en el ICATEST V 1.0, correspondientes al índice AMOEBA (OPI) aplicado a aguas del río Sabinal:

Figura 10. Gráfica de AMOEBA (OPI) en el punto de muestreo Poniente en época de Lluvias.

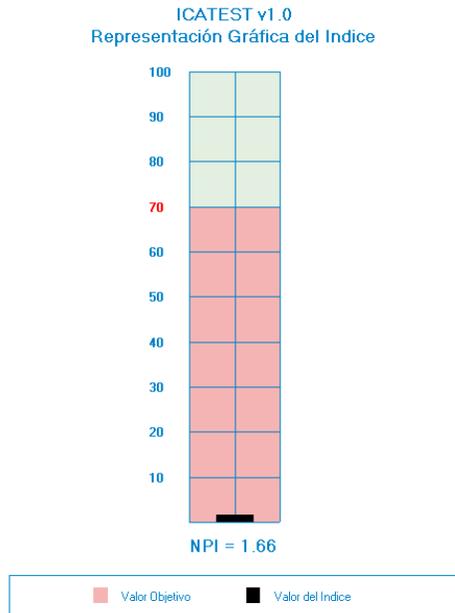


Figura 11. Gráfica de AMOEBA (OPI) en el punto de muestreo Centro en época de Lluvias.

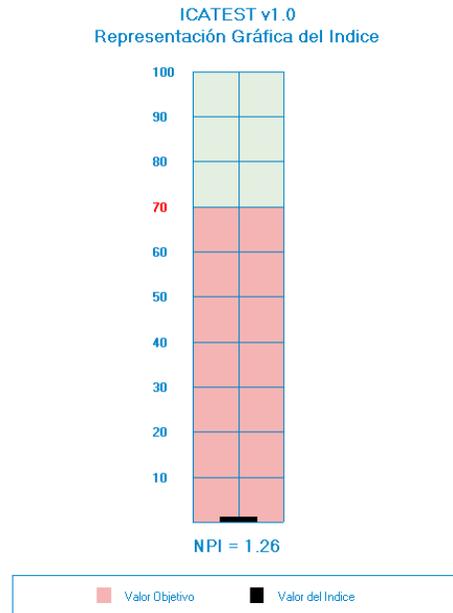


Figura 12. Gráfica de AMOEBA (OPI) en el punto de muestreo Centro en época de Estiaje.

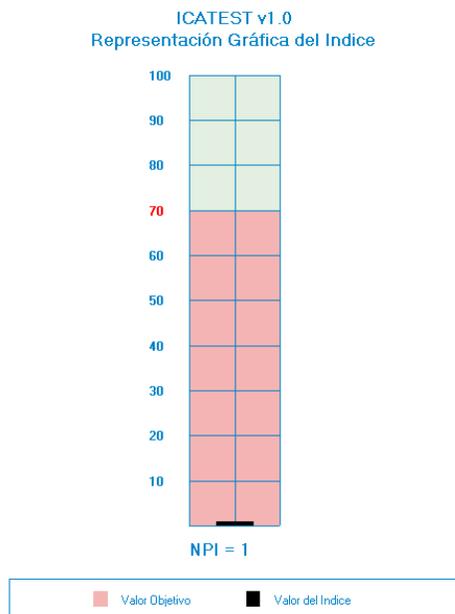


Figura 13. Gráfica de AMOEBA (OPI) en el punto de muestreo Oriente en época de Lluvias.

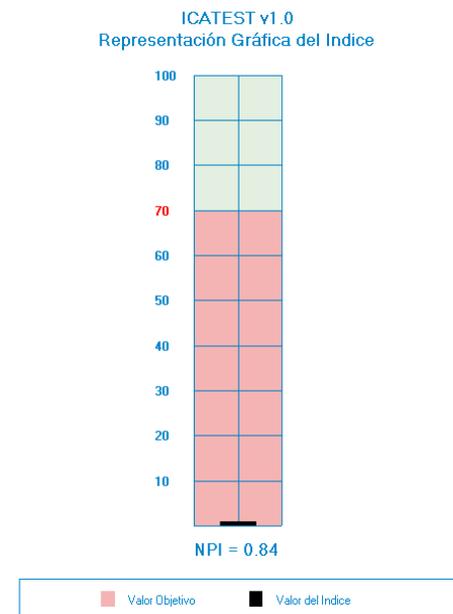
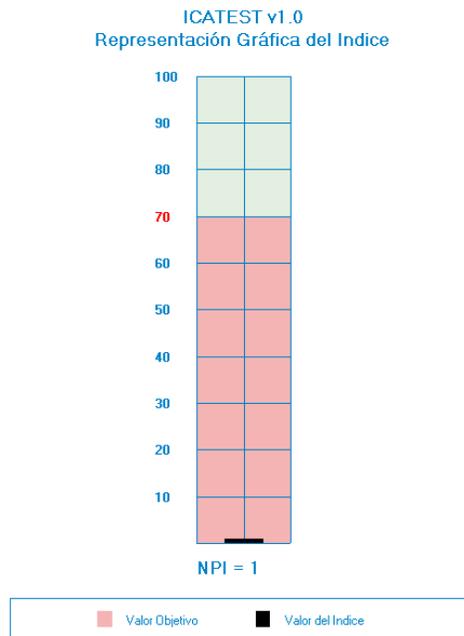


Figura 14. Gráfica de AMOEBA (OPI) en el punto de muestreo Oriente en época de Estiaje.



APLICACIÓN DE ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN

ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR pH

Se presentan los valores del ICOpH para los tres puntos de muestreo:

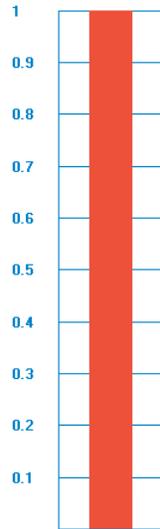
Tabla 40. Resultados de los puntos de muestreo en las dos épocas del año del índice ICOpH.

	Poniente	Centro		Oriente	
	Lluvia	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
pH	7.2	7.5	7.1	7.4	7.2
ICOpH	1.06	1.08	1.06	1.07	1.06
Grado de Contaminación	Muy Alto				

A continuación, se presentan las gráficas realizadas en el ICATEST V 1.0, correspondientes al índice ICOpH aplicado a aguas del río Sabinal:

Figura 15. Gráfica de ICOpH en el punto de muestreo Poniente en época de Lluvias.

ICATEST v1.0
Representación Gráfica de la Calidad del Agua

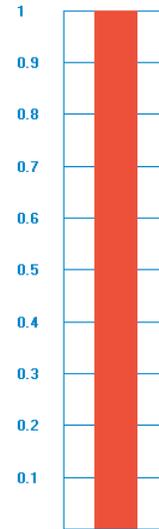


Indice = 1



Figura 16. Gráfica de ICOpH en el punto de muestreo Centro en época de Lluvias.

ICATEST v1.0
Representación Gráfica de la Calidad del Agua

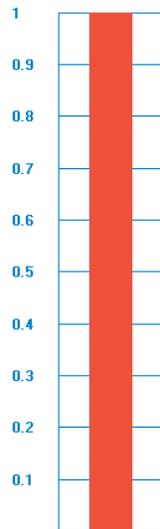


Indice = 1



Figura 17. Gráfica de ICOpH en el punto de muestreo Centro en época de Estiaje.

ICATEST v1.0
Representación Gráfica de la Calidad del Agua

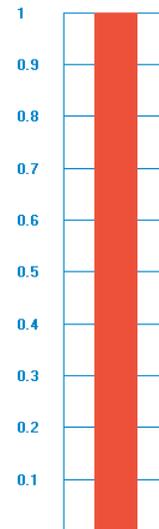


Indice = 1



Figura 18. Gráfica de ICOpH en el punto de muestreo Oriente en época de Lluvias.

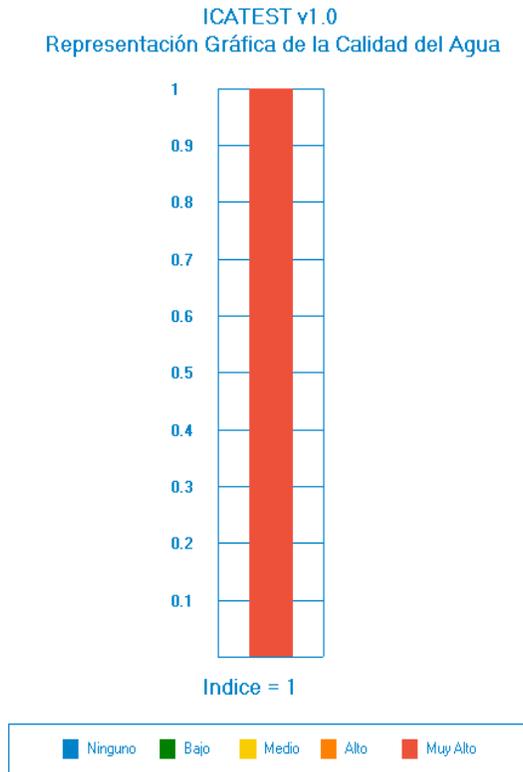
ICATEST v1.0
Representación Gráfica de la Calidad del Agua



Indice = 1



Figura 19. Gráfica de ICOPH en el punto de muestreo Oriente en época de Estiaje.



ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR MINERALIZACIÓN

Tabla 41. Resultados de los puntos de muestreo en las dos épocas del año del índice ICOMI.

	Poniente	Centro		Oriente	
	Lluvia	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
Conductividad Eléctrica	716	1008	1199	1016	1130
Alcalinidad	304.6	336	376	386.6	463.0
ICOMI	1.64	1.72	1.82	1.84	2.03
Grado de Contaminación	Muy Alto				

A continuación, se presentan las gráficas realizadas en el ICATEST V 1.0, correspondientes al índice ICOMI aplicado a aguas del río Sabinal:

Figura 20. Gráfica de ICOMI en el punto de muestreo Poniente en época de Lluvias.

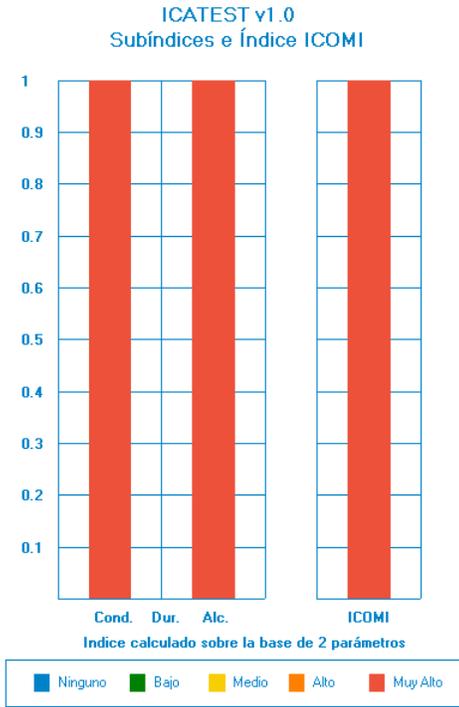


Figura 21. Gráfica de ICOMI en el punto de muestreo Centro en época de Lluvias.

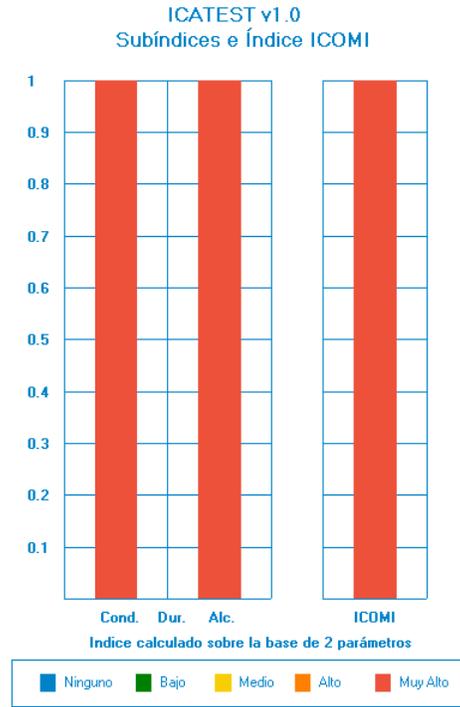


Figura 22. Gráfica de ICOMI en el punto de muestreo Centro en época de Estiaje.

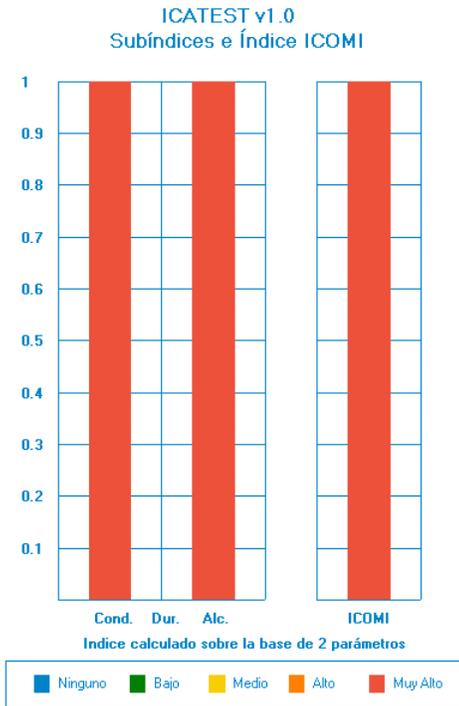


Figura 23. Gráfica de ICOMI en el punto de muestreo Oriente en época de Lluvias.

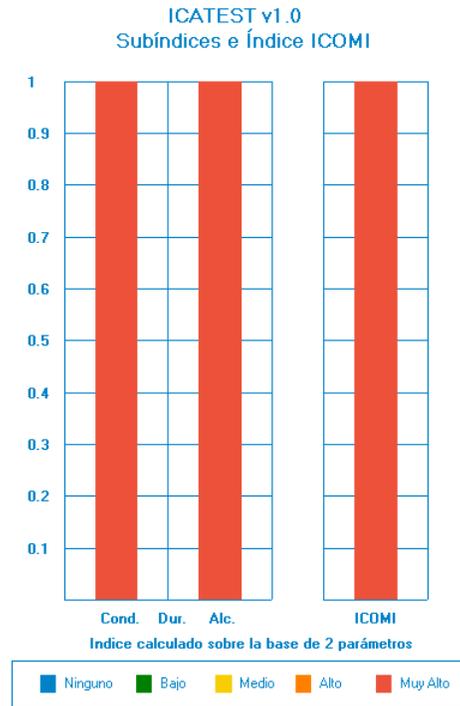
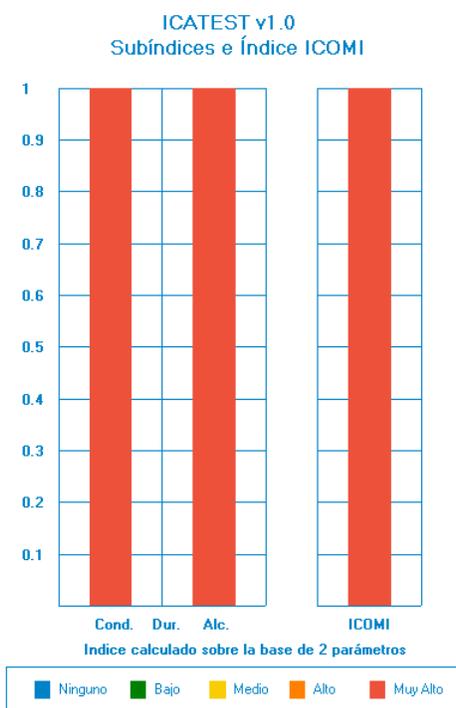


Figura 24. Gráfica de ICOMI en el punto de muestreo Oriente en época de Estiaje.



ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR MATERIA ORGÁNICA

Tabla 42. Resultados de los puntos de muestreo en las dos épocas del año del índice ICOMO.

	Poniente	Centro		Oriente	
	Lluvia	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
DBO	15.4	35.8	-	57.5	-
Oxígeno	7.6	2.5	-	0.5	-
ICOMO	0.89	1.39	-	1.62	-
Grado de Contaminación	Muy Alto	Muy Alto	-	Muy Alto	-

**Espacios sin valores (-), son datos que no pudieron ser obtenidos en el momento del muestreo por indisponibilidad de los equipos.*

A continuación, se presentan las gráficas realizadas en el ICATEST V 1.0, correspondientes al índice ICOMO aplicado a aguas del río Sabinal:

Figura 25. Gráfica de ICOMO en el punto de muestreo Poniente en época de Lluvias.

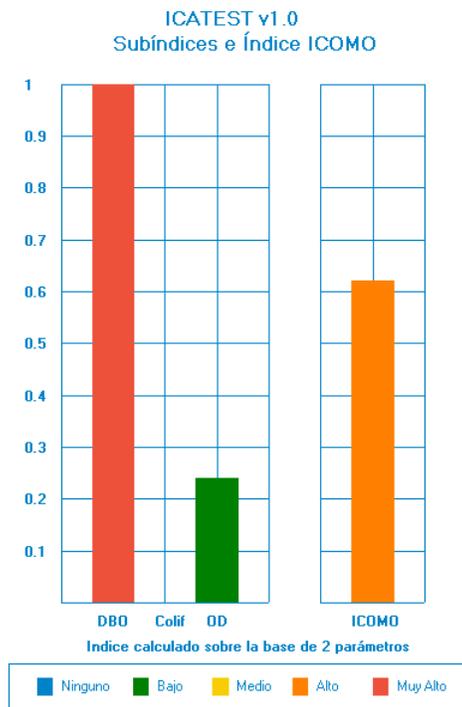


Figura 26. Gráfica de ICOMO en el punto de muestreo Centro en época de Lluvias.

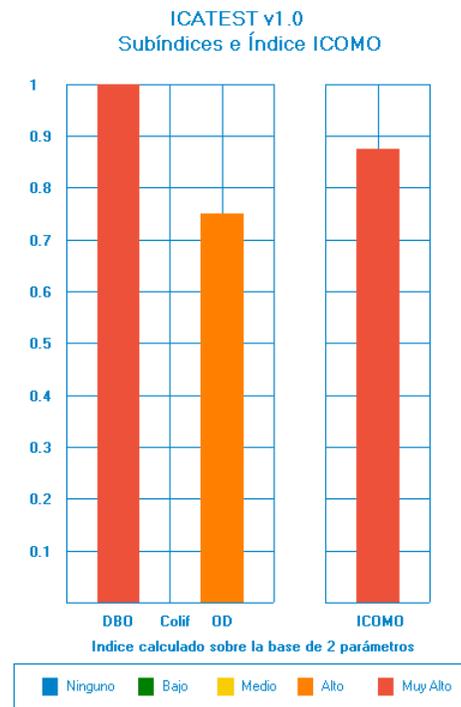
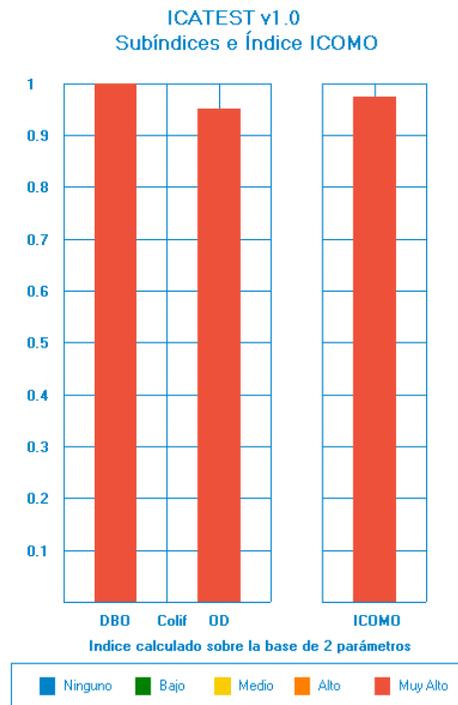


Figura 27. Gráfica de ICOMO en el punto de muestreo Oriente en época de Lluvias



ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR SÓLIDOS SUSPENDIDOS

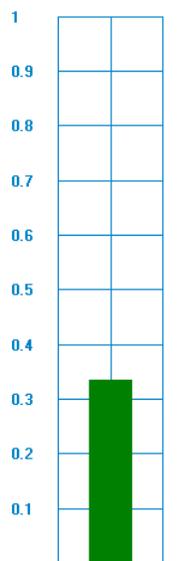
Tabla 43. Resultados de los puntos de muestreo en las dos épocas del año del índice ICOSUS.

	Poniente	Centro		Oriente	
	Lluvia	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
Sólidos Suspendidos Totales	118	124	385.5	121	406.9
ICOSUS	0.33	0.35	1.00	0.34	1.00
Grado de Contaminación	Bajo	Bajo	Muy Alto	Bajo	Muy Alto

A continuación, se presentan las gráficas realizadas en el ICATEST V 1.0, correspondientes al índice ICOSUS aplicado a aguas del río Sabinal:

Figura 28. Gráfica de ICOSUS en el punto de muestreo Poniente en época de Lluvias.

ICATEST v1.0
Representación Gráfica de la Calidad del Agua

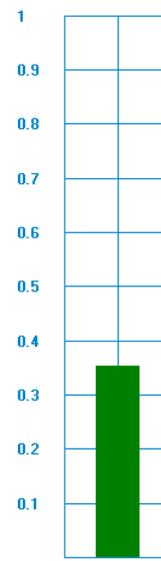


Índice = 0.334



Figura 29. Gráfica de ICOSUS en el punto de muestreo Centro en época de Lluvias.

ICATEST v1.0
Representación Gráfica de la Calidad del Agua



Índice = 0.352



Figura 30. Gráfica de ICOSUS en el punto de muestreo Centro en época de Estiaje.

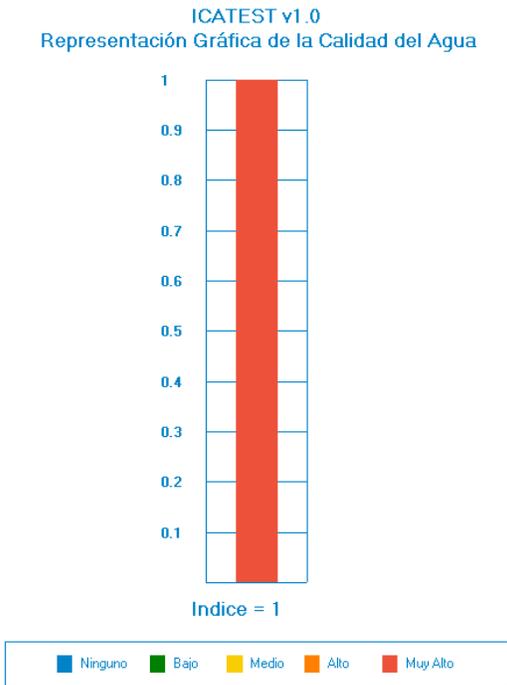


Figura 31. Gráfica de ICOSUS en el punto de muestreo Oriente en época de Lluvias.

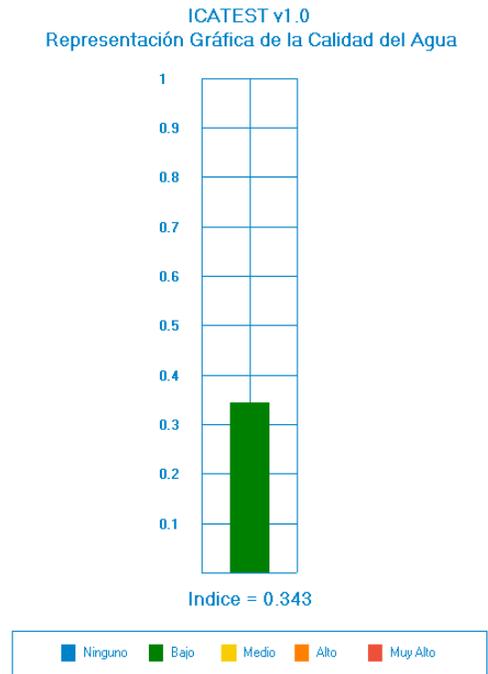
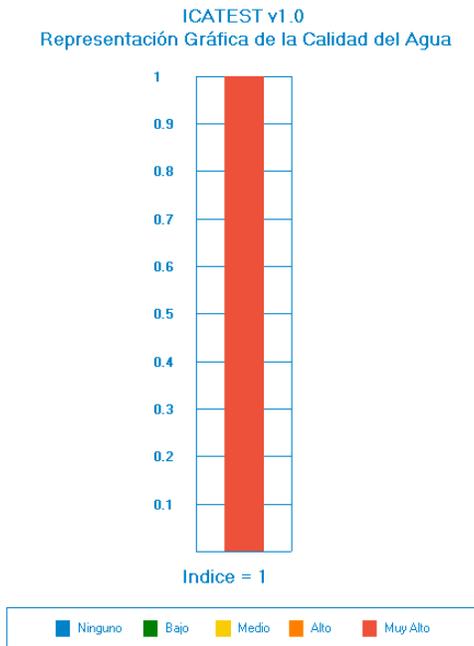


Figura 32. Gráfica de ICOSUS en el punto de muestreo Oriente en época de Estiaje.



DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Analizando los datos con los LMP dictados por las Normas Oficiales Mexicanas, son los Sólidos Suspendidos y Sedimentables los que muestran valores fuera de los límites establecidos.

Para con la NOM-001, los S_{sed} quedan bajo el límite en todos los puntos a excepción del Punto Oriente en temporada de estiaje, y los SST en los puntos Centro y Oriente en temporada de estiaje. Los demás parámetros se encuentran bajo los LMP.

En cuanto a la NOM-002, únicamente los Puntos Centro y Oriente en temporada de estiaje sobrepasan los LMP en el parámetro de SST.

Por su lado, el parámetro de SST sobrepasa los límites establecidos para dicha variable en la NOM-003, en todos los puntos en ambas temporadas de estudio. La DBO_5 sobrepasa el LMP en los Puntos Centro y Oriente en temporada de lluvia. Solamente el parámetro de Huevos de Helminto se encuentra bajo los LMP, sin embargo, existe presencia de estos parásitos en el río Sabinal, lo que representa un potencial de infecciones para aquellos que puedan entrar en contacto constante con las aguas de mencionada corriente superficial.

Es importante aclarar que, a pesar de que las normas mencionadas están dirigidas para descargas de aguas residuales, se tomaron los LMP a manera de evaluar la situación del río Sabinal dada la falta de indicadores de calidad del agua para todos los parámetros analizados.

Ahora bien, se determinó la Calidad de Aguas del río Sabinal de acuerdo con los 7 índices de calidad del agua nacional e internacional, así como con Índices de Contaminación, para establecer no solo el estado del río, sino para realizar la comparación con los estándares de calidad de agua alrededor del mundo.

El índice de Calidad del Agua de la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF WQI), desarrollado por Brown, *et al.* (1970) es uno de los principales índices de calidad que ha servido como base para el desarrollo de diversas metodologías para el análisis de cuerpos y corrientes de aguas superficiales. Al aplicarlo en el río Sabinal, el NSF WQI indica una *Calidad Buena* en el Punto Poniente durante la temporada de lluvias, disminuyendo la calidad a Media y Mala al avanzar hacia los puntos Centro y Oriente en ambas temporadas, concordando con los resultados netos de la caracterización del río, los cuales evidencian que el estado del río se ve afectado conforme recorre la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

Por su parte, el Índice de Calidad elaborado por Dinius (1987), considera no solo la calidad de los cuerpos del agua, sino el posible uso de las aguas estudiadas, ya que ciertos usos son menos estrictos en las características del agua que puede emplearse.

Dicho lo anterior, de considerarse el agua del río Sabinal para el suministro de agua a comunidades, estas requerirían de un tratamiento que permita llevar el agua a valores más amigables, de acuerdo con el ICA de Dinius. En comparación, si la misma agua fuera destinada para uso en el sector agrícola, no se requeriría de un tratamiento.

Es en cuanto a los usos de Recreación y para la vida marina, en donde se observa mayor variedad en la clasificación de la calidad de las aguas del Sabinal, encontrando el agua del Punto Poniente en temporada de lluvias aceptable para los tres tipos de usos, sin embargo, en los Puntos Centro y Oriente, se determinan indicios de contaminación, afectando potencialmente a la vida acuática y las actividades que puedan realizarse dentro del cauce del río.

Al igual que el NSF WQI, se puede notar el deterioro de la calidad del río Sabinal al avanzar por el tramo que atraviesa Tuxtla Gutiérrez, lo cual puede deberse a las descargas de aguas provenientes de Plantas de Tratamiento, que puedan no cumplir con los límites permisibles establecidos por la Normatividad Mexicana, así como descargas clandestinas y el desecho de residuos domésticos en el cauce del Río, ya que los asentamientos humanos incrementan junto con la actividad antropogénica cuanto más se alejan las aguas del punto poniente.

Con relación al índice de calidad diseñado por León (1992), se consideró un número más grande de parámetros que se ajustaran a las aguas del territorio mexicano, ajustando los valores de ponderación de Dinius, pero haciendo uso de sus fórmulas para la determinación de los valores de los subíndices. Al aplicarlo al río Sabinal, se encontró que la calidad del agua en el río está en un rango entre Fuertemente contaminada y Aceptable, dependiendo del uso que se le dé.

De usarse el agua del río Sabinal como suministro de agua potable, esta se considera como agua contaminada y fuertemente contaminada. Aun para el uso menos riguroso, en este caso el uso Recreativo, únicamente el agua del Punto Poniente en temporada de lluvias se considera Aceptable, con el resto de los puntos y temporadas clasificados como Levemente Contaminada.

Para la aplicación del índice de Calidad del IDEAM, se cuentan con datos para todos los parámetros necesarios para su cálculo, no obstante, de incluirse los valores de la Conductividad Eléctrica en su conjetura, la clasificación de las aguas analizadas alcanza

niveles críticos, que podría deberse a que el índice fue elaborado teniendo en cuenta su uso para todo tipo de aguas superficiales, disminuyendo el rango para dicha variable.

Los valores encontrados para la conductividad eléctrica en el río Sabinal entran en el rango usual para corrientes superficiales (Ramos, *et al.*, 2006), puesto que la movilidad de agua causa el arrastre de sedimentos, y dependiendo de los tipos de suelo del cauce de cada río, serán los tipos de sales o minerales que puedan encontrarse en las aguas, que influyen en los valores de conductividad.

Por lo tanto, se decidió no incluir la Conductividad Eléctrica en la determinación de este índice de calidad y, por consiguiente, se realizó la modificación de la ponderación de las variables, dividiendo de manera equitativa el peso correspondiente a la conductividad.

Es así como se obtuvo que de acuerdo con el ICA IDEAM, la Calidad del río Sabinal en el Punto Poniente y Centro en temporada de lluvias es Regular, y en los Puntos Oriente en temporada de lluvias y Centro y Oriente en temporada de estiaje son clasificados en Calidad Mala.

De acuerdo el índice de calidad ISQA, se puede observar que la mayoría de los puntos de muestreo, presentaron una muy mala calidad del agua debido a presencia de aguas negras, según el ISQA, ha sobrepasado la capacidad de autodepuración del agua, he incluso es inaceptable para consumo y riego. Sin embargo, el punto de muestreo del lado poniente en época de lluvias, se encuentra en un estado de mala calidad, y se le considera un agua contaminada, dudosa para tratamiento con fines de consumo y sólo para cultivos muy resistentes.

En cuanto al índice AMOEBA, se pueden observar similitudes al índice anterior como que la mayoría de los puntos de muestreos se encuentra en una condición de muy mala calidad, exceptuando igualmente, al lado poniente que presenta una calidad mala. Es importante mencionar que únicamente se analizó el Índice de Contaminación Orgánica, ya que se cubría con los parámetros requeridos para su cálculo.

En cuanto a los indicadores de CONAGUA, en las dos diferentes épocas del año, se observa que, en cuanto a SST en poniente, centro y oriente en época de lluvia, se tiene un valor de clasificación aceptable. Se sabe que dicha clasificación es para aguas superficiales con indicio de contaminación, con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente. Sin embargo, en época de estiaje, en los puntos centro y oriente, encontramos una clasificación de contaminada y fuertemente contaminada, respectivamente. Dicho estado se puede deber a factores como la temperatura ambiente y el poco movimiento del cauce del río.

El parámetro de DQO, en época de lluvias muestra una clasificación de contaminada para el punto poniente, en cuanto a centro y oriente, se tuvo una clasificación de fuertemente contaminada, lo que nos dice, que dicha agua podría estar potentemente impactada por descargas de aguas residuales, no obstante, en época de estiaje, se muestran en ambos resultados, una clasificación de fuertemente contaminada igualmente podría deberse a las descargas de aguas residuales, mencionadas anteriormente. Para los resultados de DBO se mostró una clasificación de aceptable para época de lluvias en el punto de muestreo poniente, como se menciona anteriormente, dicha clasificación incurre a un indicio de contaminación. En lo que concierne, a los otros puntos en la misma época del año, se tuvo una clasificación de fuertemente contaminada e igualmente podría deberse a las razones anteriormente mencionadas.

En cuanto al %OD se mostró una clasificación excelente para época de lluvias en el punto de muestreo poniente, mientras que para el punto centro de la misma época se clasificó como aceptable y en el punto oriente como fuertemente contaminada, comportamiento similar a la clasificación dada por los indicadores anteriores.

Asimismo, a fin de conocer la calidad del río Sabinal en diferentes años, se consultaron trabajos aplicados sobre el mismo cuerpo de agua para luego compararlos con los indicadores de calidad del agua establecidos por CONAGUA. En la Tabla 44, se muestran los rangos de las determinaciones de cada estudio:

Tabla 44. Valores de los parámetros analizados.

Parámetros	Castañón y Abraján (2009)		SEMAHN (2020)		Tesis río Sabinal (2016 y 2017)	
	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
OD (%Sat)	17.4 - 90.5	0.9 - 101.9	34.2 - 94.2	31.1 - 170.2	6.3 - 94.1	-
DBO₅ (mg/L)	4.0 - 10.6	1.17 - 140.6	0.91 - 76.5	1.06 - 39.6	15.4 - 57.5	-
DQO (mg/L)	5.4 - 225	<13.25 - 291	19.8 - 181.8	19.8 - 73.3	91 - 330	391.5 - 792.5
SST (mg/L)	26.66 - 370.6	<0.01 - 1.7	15.5 - 169.0	6.0 - 41.0	118 - 124	385.5 - 406.9

Fuente: Abraján y Castrejón (2009) y SEMAHN (2020)

OD (%Sat) = Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto; DBO₅ (mg/L) = Demanda Bioquímica de Oxígeno en mg/L; DQO (mg/L) = Demanda Química de Oxígeno en mg/L; SST (mg/L) = Sólidos Suspendidos Totales en mg/L. Se marcan los parámetros no determinados con un guion (-).

Como se observa en la Tabla 44, los valores de OD indican una calidad de agua desde excelente ($70 < OD \leq 110$ %Sat), usualmente en la zona poniente, hasta fuertemente contaminada ($OD \leq 10$; $OD \geq 150$ %Sat) en sitios ubicados cerca de la salida de la ciudad. También, se puede apreciar un aumento en los niveles de OD con el paso de los años.

En cuanto al parámetro de DBO_5 , para 2009, el río Sabinal presentó valores que clasificaron al Sabinal desde un río con aguas de excelente calidad (≤ 3 mg/L) hasta uno fuertemente contaminado (> 120 mg/L). Por otro lado, el presente trabajo determinó que las aguas del río Sabinal muestran valores de DBO_5 clasificados entre aceptables ($6 < DBO_5 \leq 30$ mg/L) y contaminado ($30 < DBO_5 \leq 120$ mg/L). Los valores obtenidos por la SEMAHN (2020), muestran que la mayoría de los puntos en ambos estudios clasificaron como excelente a contaminado en ambas épocas, lo cual significa que hay cierto indicio de contaminación pero que aún cuentan con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente.

El parámetro de DQO indica que el agua del río Sabinal de acuerdo con estudio de Castañón y Abraján (2009), obtuvo valores que se clasifican como fuertemente contaminado ($DQO > 200$ mg/L) en ambas épocas del año.

En cuanto a la SEMAHN (2020), el valor más bajo que reportó (19.8 mg/L) fue igual en ambas épocas del año, clasificando al agua como Aceptable ($20 < DQO \leq 40$ mg/L); sin embargo, también reportaron valores propios de aguas fuertemente contaminadas (> 200 mg/L).

De manera similar, para este estudio se reportan valores que clasifican el agua como contaminada ($40 < DQO \leq 200$ mg/L) y fuertemente contaminada.

Finalmente, para el parámetro de SST, los estudios de 2009 y 2020 reportan en época de estiaje los valores más bajos, clasificando el agua como excelente (≤ 25 mg/L), mientras que, para la época de lluvias, muestran valores clasificados en el rango de contaminado ($150 < SST \leq 400$ mg/L). Los valores obtenidos en este estudio reflejan una calidad de aceptable ($75 < SST \leq 150$ mg/L) a contaminada para la época de lluvias, y de contaminada a fuertemente contaminada ($SST > 400$ mg/L) para la época de estiaje.

Además, al comparar los valores de los parámetros determinados en este estudio con aquellos típicos de aguas residuales domésticas (Metcalf & Eddy, 1998), la caracterización de los puntos centro y oriente en época de lluvias muestran valores de ARD débiles. Por otro lado, también hay presencia de valores típicos medios (ST en el punto centro, y DQO en Oriente, ambos en época de estiaje), así como valores típicos de ARD fuertes para el parámetro de alcalinidad, en los puntos centro y oriente tanto en época de lluvias como en estiaje.

Lo expuesto con anterioridad implica que la contaminación del río Sabinal ha existido por años, y que ha prevalecido hasta la fecha, lo que indica la falta de medidas correctivas y preventivas para su cuidado.

Por su parte, respecto a los ICO, el ICOpH señala que todos los puntos de muestreo en las dos épocas diferentes del año muestran un grado de contaminación muy alto, a pesar de que el valor del pH se considera como neutro, esto puede deberse que dicha clasificación del ICO sea muy estricta en cuanto a las limitantes de este parámetro.

En cuanto al índice ICOMI, se compone de los parámetros de conductividad eléctrica, alcalinidad y dureza e igualmente que el ICO anterior, los puntos de muestreo, en las dos épocas diferentes del año, mostraron un grado de contaminación alto, se considera que el grado de contaminación fue alto debido a que existe arrastre de minerales en el cauce del río, el nivel de alcalinidad nos muestra la presencia de sales en el cauce, sin embargo, no se observó algún comportamiento anormal, es importante aclarar que no se contaba con los datos de dureza, por lo tanto, el cálculo se modificó únicamente para los dos parámetros con los que se contaba.

El índice ICOMO se conforma de DBO, Coliformes y Oxígeno, se aclara, que se realizaron los cálculos correspondientes previamente para obtener el oxígeno en porcentaje e igualmente, como el caso anterior, por falta de datos se consideraron en la fórmula únicamente los parámetros con los que se contaban. El índice arrojó para los tres puntos de muestreo en época de lluvias, un grado muy alto de contaminación, en cuanto a la época de estiaje, no se contaban con los datos para realizar el cálculo. Y finalmente, el ICOSUS, mostró resultados más favorables para el río en época de lluvias con un grado de contaminación bajo, pero para época de estiaje, mostró un grado de contaminación muy alto.

La importancia de los índices radica en facilitar la toma de decisiones para los diferentes sectores de la sociedad debido a que reducen una gran cantidad de parámetros a un valor único que expresa la calidad del recurso hídrico de manera sencilla y concreta dando paso al ordenamiento de usos de suelo y la planeación de medidas de recuperación de los recursos hídricos.

CONCLUSIONES

Derivado de los muestreos realizados en tres puntos del río Sabinal, en épocas de lluvia y estiaje por un periodo de dos años y comparando los valores de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos con los que debe observar un cuerpo de agua superficial no impactado o de baja perturbación de acuerdo con la CONAGUA, nos permite determinar que el río presenta altos índices de contaminación en los puntos Centro y Oriente.

A pesar de que los muestreos fueron realizados en el mismo cuerpo de agua, la diferencia entre los valores de cada uno es evidente en todos los parámetros, observando cambios drásticos a lo largo de su cauce. Los valores más altos fueron encontrados en los puntos centro y oriente, que a comparación del punto poniente (que se considera de calidad aceptable) muestran un estado de contaminación avanzada, lo cual demuestra que entre los puntos poniente y centro deben existir factores que provoquen un cambio radical en la calidad del agua, por lo que considerando las actividades propias de los alrededores, deben existir diversos puntos de descarga de aguas residuales domésticas a lo largo de los puntos monitoreados.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se deduce que las aguas del río Sabinal, se ven afectadas por descargas de aguas residuales, con base en el comportamiento de los parámetros analizados y lo reportado por diversos autores (Castañón y Abraján, 2009; SEMAH, 2020), contribuyendo al deteriorado estado del cuerpo de agua.

Lo anterior, se refuerza con la aplicación de los índices de calidad del agua (ICA) internacionales y nacionales, que no sólo ayudan a determinar la calidad de cuerpos de agua superficiales, si no también, los estándares establecidos por otros países en relación con lo que define un agua de buena calidad. De manera general, los ICA sitúan a las aguas del río Sabinal en las categorías de Medianamente Contaminado a Muy Contaminado, clasificación que puede variar de acuerdo con el uso que se le dé a mencionado recurso.

Los índices de calidad poseen un valor histórico importante, ya que al paso de los años han sido modificados de acuerdo con las necesidades de cada estudio, además de ser una herramienta que disminuye la dificultad en el manejo de datos, ofreciendo un producto de fácil aplicación y comprensión para diferentes sectores (científico, social y político).

De igual manera, se realizó la aplicación de índices de contaminación (ICO) que, en concordancia con los índices de calidad, determinan que el río Sabinal cuenta con valores muy altos de contaminación en los ICO aplicables. A pesar del número limitado de datos y de estaciones en este estudio. El comportamiento de los valores es similar a los

presentados en otros estudios realizados en el río Sabinal como Castañón y Abraján (2009) y SEMAHN (2020). Además, coincide con dos estaciones (Centro y Oriente) con los trabajos anteriormente mencionados.

Finalmente, tomando en cuenta los resultados de los parámetros analizados durante los años 2016 y 2017 en ambas épocas del año (estiaje y lluvias), así como los índices de calidad de agua y de contaminación, se concluye que la calidad del agua del río disminuye por su paso a través de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, mostrando un gran contraste entre su inicio y su final, con una calidad generalmente clasificada como aceptable en el lado poniente y fuertemente contaminada en el lado centro y oriente; por lo que puede establecerse que este cuerpo de agua se encuentra impactado de manera negativa a consecuencias de las actividades antropogénicas de la capital del estado de Chiapas.

De esta manera, este trabajo actúa como un intermediario entre los estudios de caracterización y determinación de la calidad del agua del río Sabinal, aportando información que pueda servir como antecedente a futuras investigaciones o como estudio de apoyo para los tomadores de decisiones.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda analizar los efluentes de las plantas de tratamiento existentes que descargan sus aguas en el río Sabinal, a fin de corroborar que se encuentren dentro de los LMP.
- Buscar la mejoría de la infraestructura hidrosanitaria para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez y mejores sistemas de tratamiento que resulten en efluentes que no afecten la calidad del río Sabinal.
- Llevar a cabo monitoreos constantes del estado de la calidad del agua.
- Considerar más puntos de muestreo con el objetivo de cubrir mayor parte del cauce del río, además ampliar, el listado de parámetros a determinar, incluyendo variables microbiológicas, como coliformes, así como, nutrientes y metales pesados.
- Es recomendable definir un ICA adecuado a los cuerpos o corrientes de agua a analizar, así como la población que afecta, previamente a la ejecución de muestreos, para establecer los parámetros a analizar. Por su flexibilidad y por considerar parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de fácil determinación, se recomienda el NSF WQI y los ICOs.
- De contar con los recursos para ello, la creación de un índice de calidad diseñado específicamente para el río Sabinal sería idóneo.
- Se debe considerar que, a mayor cantidad de datos, mayor confiabilidad en los resultados, por lo que, de contar con las posibilidades, realizar un mayor número de muestreos por parámetro.
- Instar a las autoridades competentes a identificar las descargas clandestinas o no reguladas a lo largo del cauce del río Sabinal.
- Se sugiere incorporar el uso de tecnologías computacionales como softwares para agilizar el análisis de datos para el cálculo de índices de calidad, que cuenten con aprobación de expertos de en la materia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abraján, P. y Castañón, J. H. (2009). Análisis de la calidad del agua superficial del Río Sabinal, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. *Lacandonia*, Revista de Ciencias UNICACH. 67-77 pp. En línea en: cuid.unicach.mx/revistas/index.php/lacandonia/article/view/173/174

Advanced Purification Engineering Corp (APEC). (2013). *The Water Cycle: A Guide for Students*. Obtenido el día 06 de mayo de 2017 desde <http://www.freedrinkingwater.com/resource-water-cycle-student-guide.htm>

Alonso G., Cruz R., Santos F., Ramírez M., Ruíz M., e Iglesias J. (1995). *Zonificación Sísmica de la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez*. Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). México, 33 pp.

Amado A. J., Rubiños J. E., Gavi F., Alarcón J. J., Hernández E., Ramírez C., Mejía E., Pedrero F., Nicolás E., y Salazar E. (2006). Índice de Calidad del Agua en la Cuenca del Río Amajac, Hidalgo, México: Diagnóstico y Predicción. *PHYTON*, Vol. 55, Núm. 75, pp. 71-83.

American Public Health Association (APHA). (1992). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22^a Edición, APHA-AWWA-WEF. Washington, 1946 pp.

Arellano, J. (2002). *Introducción a la Ingeniería Ambiental*. Alfaomega. México, 246 pp.

Behar S., Dates G., y Byrne J. (1996). *Testing the Waters: Chemical and Physical Vital Signs of a River*. River Watch Network. Estados Unidos, 211 pp.

Bier A. W. (2009). Introduction to Oxidation-Reduction Potential Measurement. HACH Company. Estados Unidos de América, 5 pp.

Brown, R. M.; McClelland, N. I.; Deininger, R. A.; y Tozer, R. G. (1970). A water quality index. Do we dare? *Water Sewage Works* 11, pp. 339-342. Estados Unidos.

Calvo G. y Mora J. (2007). Evaluación y Clasificación Preliminar de la Calidad del Agua de la Cuenca del Río Tárcoles y el Reventazón. *Tecnología en Marcha*, Vol. 20, Núm. 2, pp. 3-9.

Castañón J. H. y Abraján P. (2009). Análisis de la Calidad del Agua Superficial del Río Sabinal, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. *Lacandonia*, Vol. 3, Núm. 2, pp. 67-77.

Colín A., Díez A. y Bernal L. A. (2014). Parámetros Físicoquímicos y Biológicos de la Calidad del Agua. En: *Aplicaciones Electroquímicas al Tratamiento de Aguas Residuales*, Barrera C. E. (Editor). Reverté Ediciones S.A. de C.V., México, 348 pp.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2010). El agua en México: Cauces y Encauces. México, 702 pp. Recuperado el día 22 de agosto de 2020 desde <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/elaguaenmexico-caucesyencauces.pdf>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2010). Plan de Emergencia de Inundación de Corrientes Problemáticas: Río Sabinal. Gerencia de Protección a la Infraestructura y Atención de Emergencias (GPIAE). Chiapas, 68 pp. En línea en: <http://proteccioncivil.chiapas.gob.mx/documentos/DOC02131109.pdf>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016). Monitoreo de Calidad del Agua. Subdirección General Técnica. Gerencia de Calidad del Agua. México, 9 pp. En línea en: http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/145524/Monitoreo_de_calidad_del_agua_en_M_xico_2012-2015.pdf

Comisión Nacional del Agua. (2018). Descarga de aguas residuales municipales (2018). Servicio. *Sistema Nacional de Información del Agua*. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México. En línea en: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=descargasResiduales&n=nacional>.

Comisión Nacional del Agua., CONAGUA. (2005). Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua. México. En línea en: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AGUA05_03&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce

Comunidad Andina (CAN). (2008). Manual de Estadísticas Ambientales Andinas. Secretaría General de la Comunidad Andina. Lima, Perú. 95 pp. En línea en: http://www.cepal.org/deype/noticias/noticias/7/44607/Indicadores_CAN_completo.pdf

Das J. y Achayra B. C. (2003). Hydrology and Assesment of Lotic Water Quality in Cuttack City, India. *Water, Air and Soil Pollution*. Vol. 150, Núm. 1, pp. 163-175.

Dinius, S. H. (1987). Design of an index of water quality. *Journal of the American Water Resources Association*, 23(5), 833-843.

Domènech X. y Peral J. (2006). *Química Ambiental de Sistemas Terrestres*. Editorial Reverté S.A. España, 247 pp.

Egger E. A. (2003). El Ciclo Hidrológico: El Viaje del Agua a través del Tiempo. *Visionlearning*. Vol. EAS-2, Núm. 2. Tomado el 03 de mayo de 2017 desde: <http://www.eee.visionlearning.com/es/library/Ciescias-de-la-Tierra/6/El-Ciclo-Hidrol%C3 %B3gico/99/reading>

Environmental Protection Agency (EPA). (2011). Acid Rain: The pH Scale. Tomado el 28 de mayo de 2017 desde https://www3.epa.gov/acidrain/education/site_students_spanish/phscale.html

Escobar-Megchún S. I., Nájera-Aguilar H. A., González-Hilerio M., Gutiérrez-Jiménez J., Gutiérrez-Hernández R. F., y Rojas-Valencia M. N. (2014). Application of the Fenton Process in the Elimination of Helminth Eggs. *Journal of Water and Health*, Vol. 12, Núm. 4, pp. 722-726.

Fernández y Solano (2005). Índices de Calidad y de Contaminación del Agua. Ed. Universidad Pamplona. En línea en: http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portaIG/home_10/recursos/general/pagco_nenido/libros/05082010/libros.jsp

Fernández, N., Ramírez, A., Solano, F. 2004. Physicochemical water quality Indices - A comparative review. *Revista Bistua*. Vol. 1 No. 1 2004. pp 19-30.

Forero, G. (2015). Caracterización físico-química y microbiológica del agua del río Soacha, Cundimarca, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. Vol. 6. Número 2. 119-143 pp. En línea en: <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1410>

Forero-Céspedes A. M., Reinoso-Flórez G., Gutiérrez C. (2013). Evaluación de la Calidad del Agua del Río Opia (Tolima-Colombia) mediante Macro Invertebrados Acuáticos y Parámetros Físicoquímicos. *Caldasia*, Vol. 35, Núm. 2, pp. 371-387.

Foster S., Hirata R., Gomes D., D'Elia M., Paris M. (2003). *Protección de la Calidad del Agua Subterránea*. Ediciones Mundi-Prensa Libros. Madrid, 128 pp.

García E. (2004). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México, 98 pp.

Gerencia de Calidad del Agua. (2019). Indicadores de calidad del agua. En línea en: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AGUA05_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce

Gil J. A. (2014). Determinación de la Calidad del Agua mediante Variables Físicoquímicas y Comunidades de Macro Invertebrados. Tesis de Maestría. Universidad de Manizales, Colombia, 84 pp.

Global Water Partnership. (2014). Ecosystem Services and Water Security. Global Water Partnership Briefing Notes. Recuperado el día 22 de agosto de 2020 desde:

https://www.gwp.org/globalassets/global/about-gwp/publications/briefing-notes/p816_gwp_ecosystems_briefing-note_web.pdf

Global Water Partnership. (2017). Linking Ecosystem Services and Water Security. Global Water Partnership Perspectives Papers. Recuperado el día 22 de agosto de 2020 de https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/perspective-papers/gwp_pp_ecosystemservices.pdf

Goyenola, G. (2007). Oxígeno disuelto. Cartillas de la Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos. Uruguay. En línea en: http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/cartillas_redMAPSA.htm.

Guevara A. (1996). Control de Calidad del Agua: Métodos de Análisis para la Evaluación de la Calidad del Agua. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, 50 pp.

Hem J. D. (1985). Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 2254. 3ª Edición. En línea en: <https://pubs.usgs.gov/wsp/wsp2254/pdf/wsp2254a.pdf>

Hernández, M. L. (2013). Educación Ambiental para la Cuenca del Río Sabinal. Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural. Recuperado el día 12 de marzo de 2017, desde www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/educacion_ambiental/rio_sabinal

Hombre, Naturaleza, A.C. (2014). Programa de manejo integrado de la subcuenca del río Sabinal, Chiapas. 176 pp. Recuperado el día 22 de agosto de 2020 desde hombrenaturaleza.org.mx/publicaciones/.

Horton, R. K. (1965). An index number system for rating water quality. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 37(3), 300-306.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2013). Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1.00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia – Indicadores de Calidad del agua superficial, Recuperado desde www.ideam.gov.co/documents/11769/646961/3.02+HM+Indice+calidad+agua.pdf/c5a50442-79de-4cab-881a-824fe057fbc1

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2013). Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del agua superficial. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM 12 p.

Instituto Estatal del Agua (INESA). (2013). Plan de Gestión del Comité de Cuenca del Río Sabinal. Instituto Estatal del Agua, Gobierno del Estado de Chiapas, 120 pp. En línea en: https://issuu.com/inesachiapas/docs/plan_de_gestion_del_comite_de_cuenc

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2018). Desarrollo de rutas de instrumentación de las contribuciones nacionalmente determinadas en materia de mitigación de gases y compuestos de efecto invernadero (GyCEI) del sector Aguas Residuales de México. México. En línea en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/461753/Aguas_residuales.pdf.

Jiménez C. B. (2007). Información y Calidad del Agua en México. Trayectorias, Vol. 9, Núm. 24, pp. 45-56.

Jiménez L. A., Reynoso R., y Velásquez E. (2004). Evaluación de la Integridad Biótica del Río Sabinal basado en el Análisis de la Comunidad de Peces. Agricultura Sostenible, Vol. 6, Núm. 1, 9 pp.

Jiménez M., y Vélez M. (2006). Análisis Comparativo de Indicadores de la Calidad de Agua Superficial. Avances en Recursos Hidráulicos, Vol. 1, Núm. 14, pp. 53-69.

León, L.F.V. (1992). Índices de calidad del agua (ICA), forma de estimarlos y aplicación en la Cuenca Lerma-Chapala. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. VIII Congreso Nacional. México.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA). (2017). En línea en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_240117.pdf

Lozada, P. T.; Vélez, C. H. C.; & Patiño, P. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. Revista de Ingenierías: Universidad de Medellín, 8(15), 3.

Manahan S. E. (2007). Introducción a la Química Ambiental. Reverté Ediciones S.A. de C.V., Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). España, 709 pp.

Marín R. (2003). Físicoquímica y Microbiología de los Medios Acuáticos: Tratamiento y Control de Calidad de Aguas. Ediciones Díaz de Santos. España, 319 pp.

Martínez J. (1995). Estudio de la Calidad de las Aguas Superficiales del Río San Pedro. Investigación y Ciencia, Vol. 25, Núm. 17, pp. 27-39.

Martínez M. R. (1994). Historia Natural de los Cuerpos Acuáticos. Tercera Edición. Letras, S. A. España, 270 pp.

Medina-Tafur, C., Hora, M., Pereda, W., Gabriel, R. y Asencio, I. (2008). Revista Sciendo. Vol 15. Número 2. 1-12 pp. En línea en: revistas.unitru.edu.pe/index.php/SCIENDO/article/view/493

Metcalf y Eddy, Inc. (1998). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización*. Tercera Edición, Volumen 1. McGraw-Hill. México, 436 pp.

Ministerio de Salud de Perú (MINSA). (2011). *Reglamento de la Calidad del Agua para el Consumo Humano*. Dirección General de Salud Ambiental. Primera Edición, J.B. GRAPHIC. Lima, 46 pp.

Molina A. M. y Tigreros J. L. (2005). *Evaluación Preliminar de la Remoción de Sólidos Suspendidos en el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Arauca*. Tesis Profesional. Universidad Nacional de Colombia Sede Arauca. Colombia, 112 pp.

Naciones Unidas (UN). (2005). *Manual de Estadísticas Ambientales: Glosario de Términos Ambientales*. Santa Cruz de la Sierra, p. 31-45.

Navarro R., Espinosa M., Suárez M., Rodríguez X., Álvarez Y., y Pedro S. (2005). Material de Referencia para la Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en Aguas y Aguas Residuales. CENIC Ciencias Químicas. Vol. 36, Núm. Especial, 8 pp.

New South Wales Environment Protection Authority (NSW EPA). (2015). *Water Pollution: Sources*. Recuperado el 26 de mayo de 2017 desde http://www.epa.nsw.gov.au/Water_pollution/about.htm

Norma Mexicana, NMX-AA-004-SCFI-2013. Análisis de Agua - Medición de Sólidos Sedimentables en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas - Método de Prueba.

Norma Mexicana, NMX-AA-030/1-SCFI-2012. Análisis de Agua - Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas - Método de Prueba.

Norma Mexicana, NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de Agua - Medición de Sólidos y Sales Disueltas en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas - Método de Prueba.

Norma Mexicana, NMX-AA-036-SCFI-2001. Análisis de Agua - Determinación de Acidez y Alcalinidad en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas - Método de Prueba.

Norma Mexicana, NMX-AA-038-SCFI-2001. Análisis de Agua - Determinación de Turbiedad en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas - Método de Prueba.

Norma Mexicana, NMX-AA-045-SCFI-2001. Análisis de Agua - Determinación de Color Platino Cobalto en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas - Método de Prueba.

Norma Mexicana, NMX-AA-113-SCFI-2012. *Análisis de Agua - Medición del Número de Huevos de Helmintho en Aguas Residuales y Residuales Tratadas por Observación Microscópica - Método de Prueba.*

Norma Oficial Mexicana, NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas de Aguas Residuales en Aguas y Bienes Nacionales.

Norma Oficial Mexicana, NOM-002-SEMARNAT-1996. Que establece los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas de Aguas Residuales a los Sistemas de Alcantarillado Urbano o Municipal.

Norma Oficial Mexicana, NOM-003-SEMARNAT-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) (2009). Tercer Informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. Recuperado el día 05 de marzo de 2017 desde: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/>.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). Guías para la Calidad del Agua Potable: Primer Apéndice a la Tercera Edición. *World Health Organization*, Vol. 1, Núm. 3, pp. 11-12. Consultado el día 15 de marzo de 2017. En línea en: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf

Organización Mundial de la Salud. (2017). Guías para la calidad del agua potable. 4ª Edición que incorpora la primera adenda [Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating first addendum]. Ginebra (Suiza). En línea en: https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/drinking-water-quality-guidelines-4-including-1st-addendum/es/

Orozco C., Pérez A., González M. N., Rodríguez F., y Alfayate J. (2005). Contaminación Ambiental: Una Visión desde la Química. 3ª Edición. Paraninfo, S. A. España, 688 pp.

Ott, W. R. (1978). Environmental indices: Theory and Practice. Ann Arbor: Ann Arbor Science. Estados Unidos; p.p. 357.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (2008). Water Quality for Ecosystems and Human Health. 2ª Edición. United Nations Environment Programme Global Environment Monitoring System/Water Programme. Canadá, 130 pp. En línea: http://www.unwater.org/wwd10/downloads/water_quality_human_health.pdf

Programa de Ordenamiento Ecológico y Territorial de la Subcuenca del Río Sabinal (POETSAB). (2011). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). En línea en: http://www.bitacora.semarnat.gob.mx/Doc/OET_Sabinal/Decreto.zip

Proyecto de Norma Mexicana, PROY-NMX-AA-121/1-SCFI-2008. Análisis de Agua - Aguas Naturales Epicontinentales, Costeras y Marinas-Muestreo - Guía para el Muestreo de Ríos y Corrientes.

Ramírez A., Restrepo R., y Viña G. (1997). Cuatro Índices de Contaminación para Caracterización de Aguas Continentales – Fórmulas y Aplicación. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, Vol. 1, Núm. 3, pp. 135-153. En línea en: www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53831997000100009

Ramírez, A., Restrepo, R., y Viña, G. (1999). Índices de Contaminación para caracterización de aguas Continentales y Vertimientos. Formulación. *Ciencia, Tecnología y Futuro*. Vol. 1 Núm. 5. pp. 135 – 153. En línea en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53831997000100009

Ramos, A. M., Fornells, N. P., y Solà, C. (2006). Estado ecológico de los ríos en Cataluña: Diagnóstico del riesgo de incumplimiento de los objetivos de la Directiva Marco del Agua. *Tecnología del agua*, 26(273), 30-46.

Raschid-Sally L. y Jayakody P. (2008). Drivers and Characteristics of Wastewater Agriculture in Developing Countries: Results from a Global Assessment, Research Report 127. International Water Management Institute (IWMI). Colombo, Sri Lanka. En línea en: <http://www.unwater.org/downloads/RR127.pdf>

Reguant-Álvarez, M. y Torrado-Fonseca, M. (2016). El método Delphi. *REIRE, Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 9 (1), 87-102. DOI: 10.1344/reire2016.9.1916

Romero J. A. (1999). *La Calidad del Agua*. 2ª Edición. AlfaOmega. México, 278 pp.

Romero J. A. (2009). *La Calidad del Agua*. 3ª Edición. Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia, 484 pp.

Rubio-Arias H., Contreras-Caraveo M., Saucedo Terán R., Pinales-Munguía A., y Quintana R. (2012). An Overall Water Quality Index (WQI) for a Man-Made Aquatic Reservoir in Mexico. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 9, Núm. 5, pp. 1687-1698.

Rubio-Arias H., Ortiz R. C., Quintana R. M., Saucedo R. A., Ochoa J. M., y Rey N. I. (2014). Índice de Calidad de Agua (ICA) en la Presa La Boquilla en Chihuahua, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, Vol. 1, Núm. 2, pp. 139-150.

Sawyer C., McCarty P., y Parkin G. (2001). Química para Ingeniería Ambiental. Editorial McGraw Hill. Bogotá, pp. 713.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). Introducción a los servicios ambientales. México, 68 pp. Recuperado el día 22 de agosto de 2020 desde https://www.researchgate.net/publication/304629727_Introduccion_a_los_servicios_ambientales.

Secretaría de Medio Ambiente y Vivienda (SEMAVI). (2009). Memoria Técnica del Programa de Ordenamiento Ecológico y Territorial de la Subcuenca del Río Sabinal. Chiapas, 411 pp. Recuperado el 01 de mayo de 2017. En línea en: http://www.bitacora.semahn.chiapas.gob.mx/Doc/OET_Sabinal/MemoriaTecnica.zip

Secretaría del Medio Ambiente e Historia Natural. (2020). Evaluación de la calidad del agua en el río Sabinal. *Laboratorio de Monitoreo Ambiental*. Chiapas, México.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). (2007). Monitoreo de la Calidad del Agua de los Ríos en el Perú. Recuperado desde: www.senamhi.gob.pe/main_down.php?ub=est&id=hidro_monCalAgua_peru08 el 23 de febrero de 2017.

Sutadian, A. D.; Muttill, N.; Yilmaz, A. G., & Perera, B. J. C. (2016). Development of river water quality indices—a review. *Environmental monitoring and assessment*, 188(1), 58.

Tamani Y. H. (2014). Evaluación de la Calidad del Agua del Río Negro en la Provincia de Padre Abad, Aguaytía. Práctica Profesional. Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS). Facultad de Recursos Naturales Renovables. Perú, 120 pp.

Terán, L. P., (2019). Determinación del índice simplificado de calidad del agua (ISQA) de la zona urbana de la parroquia de Pacto Provincia Pichincha. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Ambiental y manejo de riesgo naturales. Universidad UTE. Quito, Ecuador.

Torres M. G., Gutiérrez J., y Penagos F. E. (2010). Protozoarios y Rotíferos de Vida Libre en Agua Residual del Río Sabinal. *Lacandonia*, Vol. 4, Núm. 1, pp. 23-28.

Torres, C. A., (2018). Planteamiento de una metodología para el cálculo de un índice de calidad del agua para el Río Machangara, cuenca Alta del río Guayllabamba. Tesis de Máster en Gestión de Recursos Hídricos. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Torres, P., Cruz, C.H y Patiño, J.H. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. Vol. 8. No. 15. pp. 79-94. En línea en: <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/59>

United States Geological Survey (USGS). (2016). El Ciclo del Agua: The Water Cycle. Recuperado el día 08 de mayo de 2017 desde: water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html

Universidad de Pamplona. (2006). Indicadores de la Calidad del Agua: Generalidades. Recuperado el 04 de mayo de 2017 desde www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portaIG/home_10/recursos/general/pag_contenido/libros/06082010/icatest_capitulo2.pdf

Uribarren B. T. (2016). Recursos en Parasitología. Departamento de Microbiología y Parasitología. Universidad Autónoma de México (UNAM). En línea en: <http://www.facmed.unam.mx/deptos/microbiologia/parasitologia/> Recuperado el día 23 de abril de 2017.

Valencia J, L. (2007). Estudio Estadístico de la Calidad de las Aguas en la Cuenca Hidrográfica del Río Ebro. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, España. 338 pp.

Wefering, F. M., Danielson, L. E., y White N. M. (2000). Using the AMOEBA approach to measure progress towards ecosystem sustainability within a shellfish restoration. Project in North Carolina. En línea: www.researchgate.net/publication/223443116_Using_the_AMOEBA_approach_to_measure_progress_toward_ecosystem_sustainability_within_a_shellfish_restoration_project_in_North_Carolina/references

World Health Organization (WHO). (1971). *International Standards for Drinking-Water*. Tercera Edición. World Health Organization Publications. Suiza, 70 pp. En línea en: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/39989/1/9241540249_eng.pdf

World Health Organization (WHO). (2003). *Total Dissolved Solids in Drinking-Water*. World Health Organization Publications. Recuperado el día 07 de mayo de 2017 desde http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/tds.pdf

World Health Organization (WHO). (2011). *Guidelines for Drinking-Water Quality*. 4ª Edición. World Health Organization Publications. Suiza, 564 pp. En línea en: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151_eng.pdf

Zhen B. Y. (2009). *Calidad Fisicoquímica y Bacteriológica del Agua para Consumo Humano de la Microcuenca de la Quebrada Victoria, Curubandé, Guanacaste, Costa Rica, Año Hidrológico 2007-2008*. Tesis de Maestría. Universidad Estatal a Distancia (UNED). Escuela de Ciencias Exactas y Naturales. San José, Costa Rica. 204 pp.

ANEXOS

TABLAS

Tabla 1. Composición típica del agua residual doméstica bruta.

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		DÉBIL	MEDIA	FUERTE
Sólidos Totales (ST)	mg/l	350	720	1200
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/l	250	500	850
Fijos	mg/l	145	300	525
Volátiles	mg/l	105	200	325
Sólidos en Suspensión (SS)	mg/l	100	220	350
Fijos	mg/l	20	55	75
Volátiles	mg/l	80	165	275
Sólidos Sedimentables	ml/l	5	10	20
Demanda Bioquímica de Oxígeno, mg/l: 5 días, 20°C (DBO ₅ , 20°C)	mg/l	110	220	400
Carbono Orgánico Total (COT)	mg/l	80	160	290
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	250	500	1000
Nitrógeno (Total en la Forma N)	mg/l	20	40	85
Orgánico	mg/l	8	15	35
Amoníaco Libre	mg/l	12	25	50
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo (Total en la Forma P)	mg/l	4	8	15
Orgánico	mg/l	1	3	5
Inorgánico	mg/l	3	5	10
Cloruros	mg/l	30	50	100
Sulfato	mg/l	20	30	50
Alcalinidad (como CaCO ₃)	mg/l	50	100	200
Grasa	mg/l	50	100	150
Coliformes Totales	no./100 ml	10 ⁶ - 10 ⁷	10 ⁷ - 10 ⁸	10 ⁷ - 10 ⁹
Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs)	µg/l	< 100	100 - 400	> 400

Fuente: Metcalf y Eddy, 1998.

Tabla 2. Agentes infecciosos potencialmente presentes en el agua residual doméstica bruta.

Organismo	Enfermedad	Comentario	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis	Infestación de Gusanos. Dolor abdominal, diarrea, abdomen prominente en niños	
<i>Enterobius vermicularis</i>	Enterobiasis	Gusanos. Prurito perianal.	
<i>Fasciola hepatica</i>	Fascioliasis	Gusanos. Infección al ingerir plantas acuáticas (berro, lechuga, alfalfa) contaminadas con metacercarias.	
<i>Hymenolepis nana</i>	Hymenlepiasis	Taenia Enana. Su ciclo biológico no requiere de huéspedes intermediarios.	
<i>Taenia saginata</i>	Teniasis	Taenia (Buey)	La ingesta de carne cruda o mal cocida con cisticercos es el mecanismo de infección.
<i>Taenia solium</i>		Taenia (Cerdo)	
<i>Trichuris trichiura</i>	Trichuriasis	Gusanos. Es una de las infecciones por Helmintos más frecuentes en México.	

Fuente: Metcalf y Eddy, 1998. Modificación Propia con Información de Uribarren, 2016.

Tabla 3. Escala general de clasificación para la calidad del agua.

Nivel de contaminación	Uso del agua					
	Suministro de agua	Recreación	Peces	Mariscos	Agricultura	Industria
100	No es necesaria la purificación	Aceptable para todos los deportes acuáticos	Aceptable para todos los peces	Aceptable para todos los mariscos	No es necesaria la purificación	No es necesaria la purificación
90	Requiere mínima purificación				Requiere mínima purificación para cultivos que requieren agua de gran calidad	Requiere mínima purificación para industrias que requieren agua de gran calidad
80	Necesidad de tratamiento se vuelve más extensiva	En proceso de contaminación Conteo de bacterias aceptable	Marginal Para peces sensibles	Marginal Para mariscos sensibles	No se necesita tratamiento para la mayoría de los cultivos	No se necesita tratamiento para industrias estándar
70			Dudosa Para peces sensibles	Dudosa Para mariscos sensibles		
60	Dudosa	Solo paseos en bote, sin contacto con agua	Solo para peces resistentes	Solo para mariscos resistentes	Tratamiento extensivo para la mayoría de los cultivos	Tratamiento extensivo para la mayoría de las industrias
50			Solo para peces de gran resistencia	Solo para mariscos de gran resistencia		
40	No aceptable	Contaminación evidente comienza a aparecer	No aceptable	No aceptable	Únicamente para cultivos resistentes	Únicamente para industrias pesadas
30						

Nivel de contaminación	Uso del agua					
	Suministro de agua	Recreación	Peces	Mariscos	Agricultura	Industria
20		Contaminación evidente No aceptable			No aceptable	No aceptable
10						
0						

Fuente: Dinius, 1987.

Tabla 4. Pesos específicos de los parámetros.

Parámetro	Unidades	Pesos finales (Wi)
Oxígeno disuelto	% Saturación de oxígeno	0.103
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	0.096
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	0.053
Grado acidez/alcalinidad	Unidades de pH	0.063
Sólidos Suspendidos	mg/L	0.033
Coliformes totales	No. de organismos/100 ml	0.083
Coliformes fecales	No. de organismos/100 ml	0.143
Nitratos	mg/L	0.053
Amonios	mg/L	0.043
Fosfatos	mg/L	0.073
Fenoles	µg/L	0.033
Diferencia de temperatura	°C	0.043
Alcalinidad	mg/L de CaCO ₃	0.055
Dureza	mg/L de CaCO ₃	0.058
Cloruros	mg/L	0.068
Total		1.00

Fuente: León, 1992.

Tabla 5. Escala de clasificación de calidad del agua superficial con base en la DBO₅.

Criterio (mg/L)	Clasificación	Leyenda
DBO ₅ ≤ 3	Excelente No contaminada.	
3 < DBO ₅ ≤ 6	Buena calidad Aguas Superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable.	
6 < DBO ₅ ≤ 30	Aceptable Aguas Superficiales con indicio de contaminación. Con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente.	
30 < DBO ₅ ≤ 120	Contaminada Aguas Superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.	

Criterio (mg/L)	Clasificación	Leyenda
DBO ₅ > 120	Fuertemente contaminada Aguas Superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales.	

Fuente: CONAGUA, 2016.

Tabla 6. Escala de clasificación de calidad del agua superficial con base en la DQO.

Criterio (mg/L)	Clasificación	Leyenda
DQO ≤ 10	Excelente No contaminada.	
10 < DQO ≤ 20	Buena calidad Aguas Superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable.	
20 < DQO ≤ 40	Aceptable Aguas Superficiales con indicio de contaminación, con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente.	
40 < DQO ≤ 200	Contaminada Aguas Superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.	
DQO > 200	Fuertemente contaminada Aguas Superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales.	

Fuente: CONAGUA, 2016.

Tabla 7. Escala de clasificación de calidad del agua superficial con base en los SST.

Criterio (mg/L)	Clasificación	Leyenda
SST ≤ 25	Excelente Clase de excepción, muy buena calidad.	
25 < SST ≤ 75	Buena calidad Favorece la conservación de comunidades acuáticas y el riego agrícola irrestricto.	
75 < SST ≤ 150	Aceptable Aguas Superficiales con indicio de contaminación, con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente. Condición regular para peces. Riego agrícola restringido.	
150 < SST ≤ 400	Contaminada Aguas Superficiales de mala calidad con descargas de aguas residuales crudas.	
SST > 400	Fuertemente contaminada Aguas Superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales con alta carga contaminante. Mala condición para peces.	

Fuente: CONAGUA, 2016.

Tabla 8. Escala de clasificación de calidad del agua superficial con base en los SST.

Criterio (mg/L)	Clasificación	Leyenda
$SST \leq 25$	Excelente Clase de excepción, muy buena calidad.	
$25 < SST \leq 75$	Buena calidad Favorece la conservación de comunidades acuáticas y el riego agrícola irrestricto.	
$75 < SST \leq 150$	Aceptable Aguas Superficiales con indicio de contaminación, con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente. Condición regular para peces. Riego agrícola restringido.	
$150 < SST \leq 400$	Contaminada Aguas Superficiales de mala calidad con descargas de aguas residuales crudas.	
$SST > 400$	Fuertemente contaminada Aguas Superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales con alta carga contaminante. Mala condición para peces.	

Fuente: CONAGUA, 2016.

Tabla 9. Escala de clasificación de calidad del agua superficial con base el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto.

Criterio (%Sat)	Clasificación	Leyenda
$70 < OD \leq 110$	Excelente	
$50 < OD \leq 70$ $110 < OD \leq 120$	Buena calidad	
$30 < OD \leq 50$ $120 < OD \leq 130$	Aceptable	
$10 < OD \leq 30$ $130 < OD \leq 150$	Contaminada	
$OD \leq 10$ $OD \geq 150$	Fuertemente contaminada	

Fuente: CONAGUA, 2016.

Tabla 10. Valores de los subíndices.

Variable	Método de cálculo de subíndices
Oxígeno disuelto, OD	$I_{OD} = 1 - (1 - 0,01 * PS_{OD})$ $\%Sat \ OD > 100\% = I_{OD} = 1 - (0.01 * PS_{OD} - 1)$
Sólidos suspendidos totales, SST	$I_{SST} = 1 - (-0.02 + 0.003 * SST)$ Si $SST \leq 4.5$, entonces $I_{SST} = 1$ Si $SST \geq 320$, entonces $I_{SST} = 0$

Variable	Método de cálculo de subíndices
Demanda química de oxígeno, DQO	Si $DQO \leq 20$, entonces $I_{DQO} = 0.91$ Si $20 < DQO \leq 25$, entonces $I_{DQO} = 0.71$ Si $25 < DQO \leq 40$, entonces $I_{DQO} = 0.51$ Si $40 < DQO \leq 80$, entonces $I_{DQO} = 0.26$ Si $DQO > 80$, entonces $I_{DQO} = 0.125$
Conductividad eléctrica, C.E	$I_{C.E.} = 1 - 10^{(-3.26 + 1.34 \text{Log}10C.E.)}$ Cuando $I_{C.E.} < 0$, entonces $I_{C.E.} = 0$
pH	Si $pH < 4$, entonces $I_{pH} = 0,1$ Si $4 \leq pH \leq 7$, entonces $I_{pH} = 0.02628419 * e^{(pH * 0.520025)}$ Si $7 < pH \leq 8$, entonces $I_{pH} = 1$ Si $8 < pH \leq 11$, entonces $I_{pH} = 1.0 * e^{[(pH - 8) - 0.5187742]}$ Si $pH > 11$, entonces $I_{pH} = 0.1$

Fuente: IDEAM, 2013.

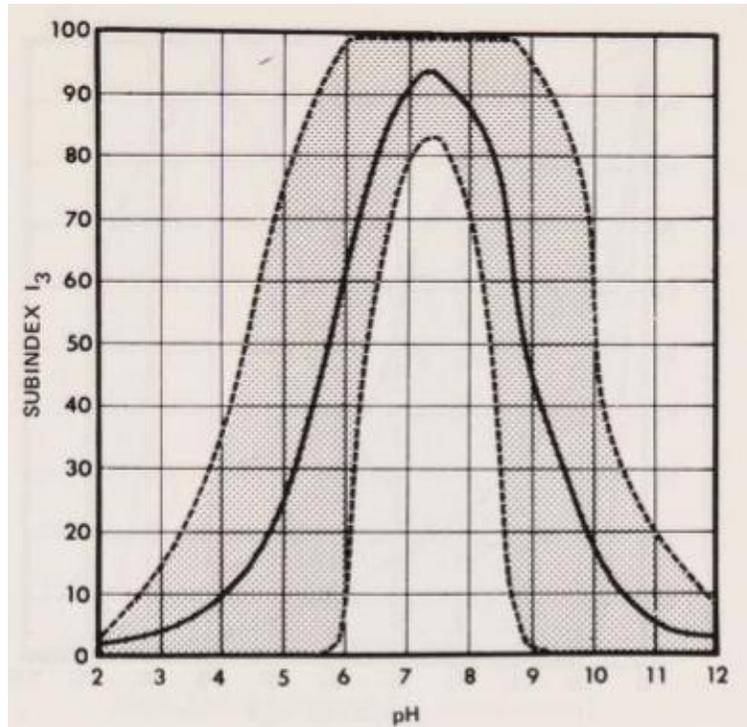
Tabla 11. Tipos de contaminación, índices y variables de la estrategia AMOEBA

Contaminación doméstica			Contaminación industrial y agrícola		Efectos biológicos		
OPI	NPI	BPI	PPI	IPI	BSI	BDI	PRI
Promedio de temperatura en 24 h	Amonio	Bacterias Termo- Tolerantes	Pesticidas Órgano - Clorados	Metales Pesados	Escala Saprofita de Macrofauna Bentónica (BMWP)	Diversidad de Macrofauna Bentónica (SCI)	Relación P/R en 24 h
DBO	Nitrógeno Total, Kjeldahl		Pesticidas Órgano - Fosforados	Aceite			
DQO	Nitritos + Nitratos		etc.	PAH			
Saturación mínima de OD en 24 h	P Total			Fenol			
				Cianidas			
				PCB			
			etc.				
Amonio	Orto P		etc.	etc.			
	PH						
	Clorofila						
	Conductividad						
	Saturación de OD máxima en 24 h						
	Turbidez						

Fuente: (Fernández y Solano, 2005)

ANEXOS

CURVAS DE FUNCIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA DE LA FUNDACIÓN NACIONAL DE SANIDAD (NSF WQI)



Gráfica 1. Función del subíndice para pH.

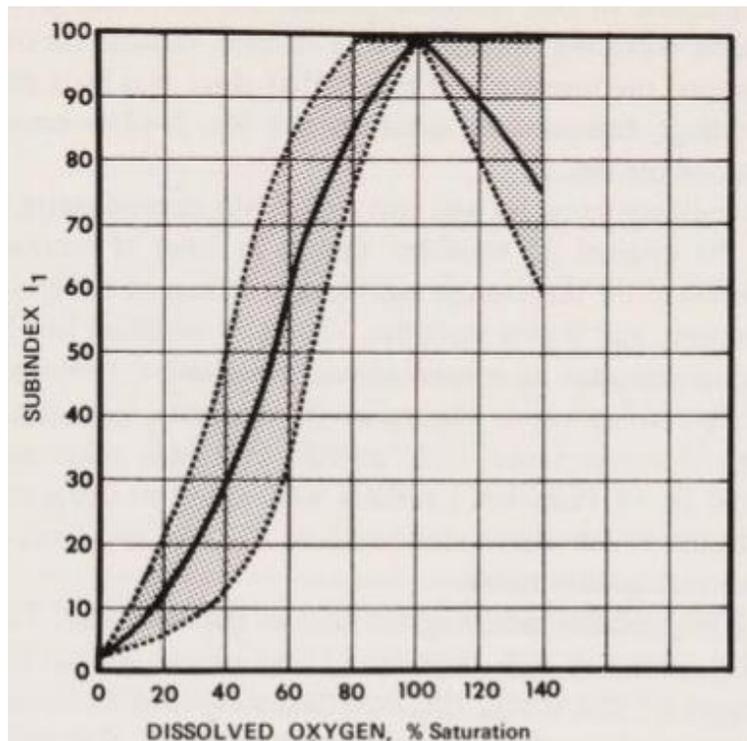


Gráfico 2. Función del subíndice para oxígeno disuelto.

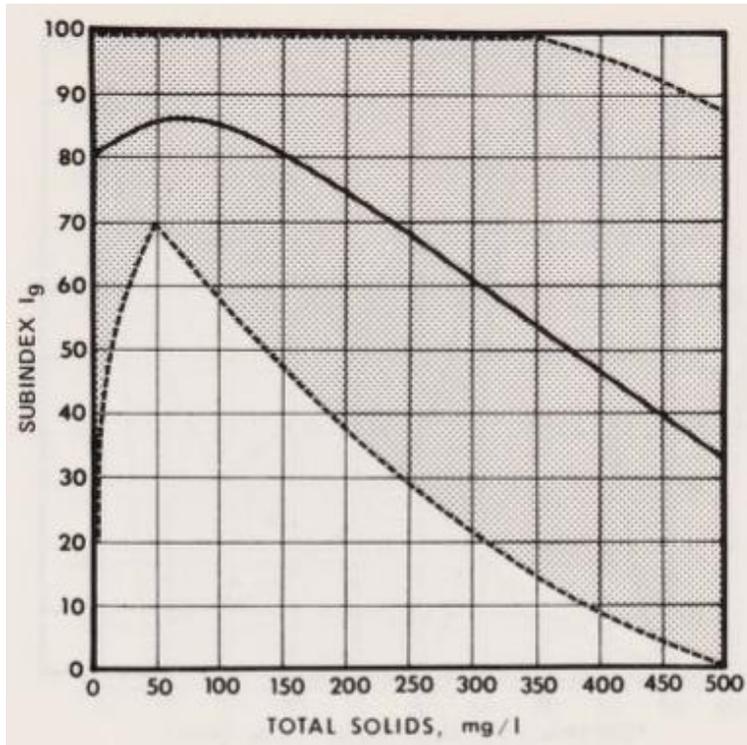


Gráfico 3. Función del subíndice para sólidos totales.

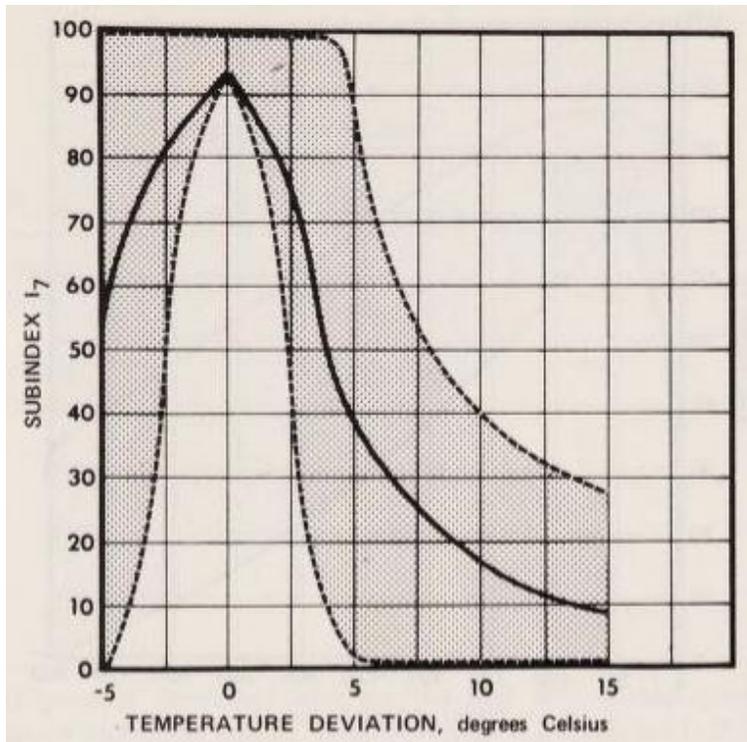


Gráfico 4. Función del subíndice para temperatura.

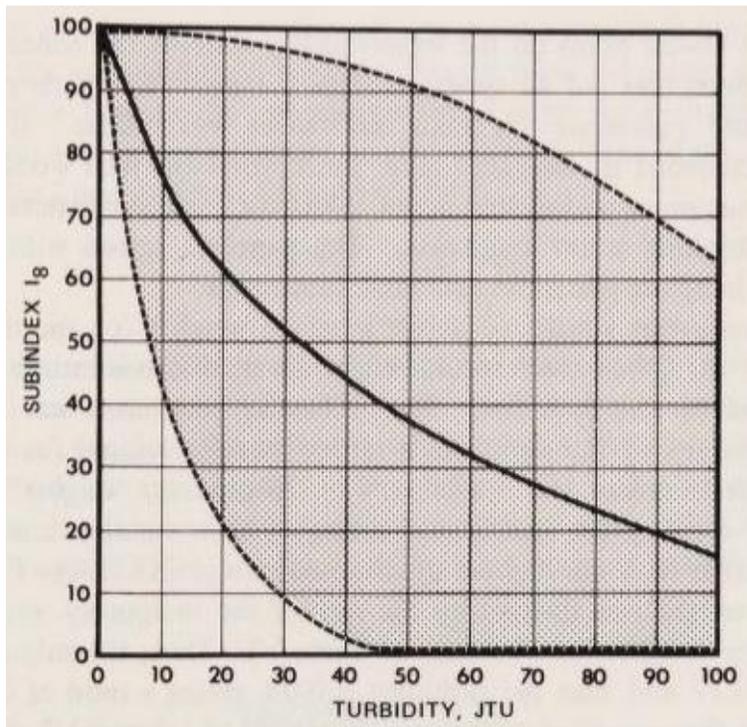


Gráfico 5. Función del subíndice para turbiedad.

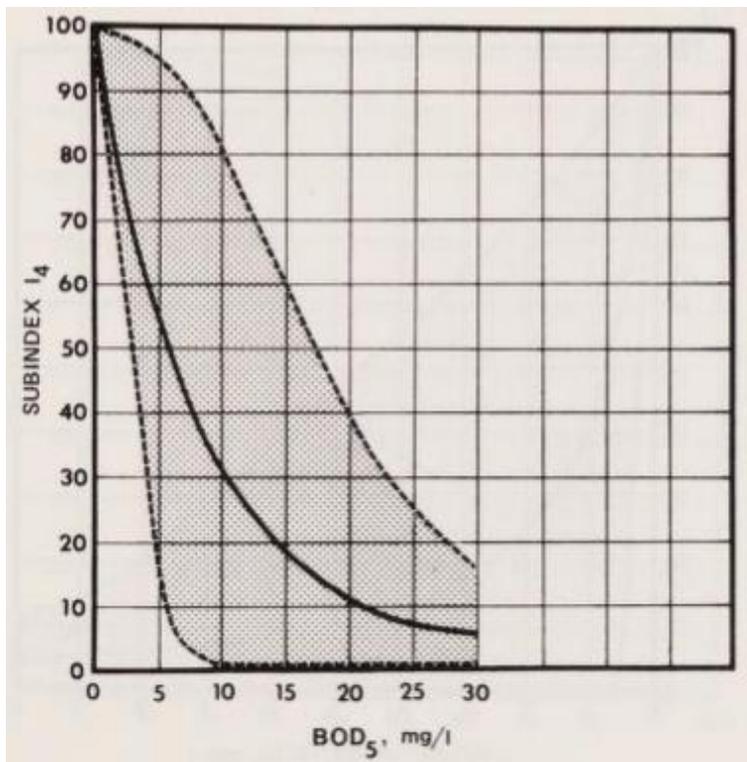


Gráfico 6. Función del subíndice para DBO_5 .