



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS DE MAESTRIA

“ESTRATEGIAS DE MEJORA EN LA CALIDAD DE AGUA PARA
ABASTECIMIENTO PUBLICO EN EL MUNICIPIO DE VILLA GUERRERO,
ESTADO DE MÉXICO”

JOSÉ ANTONIO LÓPEZ MARTÍNEZ

COMITÉ DE TUTORES:

DRA. EDITH ERIELIA GUTIÉRREZ SEGURA

DR. MARCOS JOSÉ SOLACHE RÍOS

M. en C. VICTOR FRANCISCO PACHECO SALAZAR



TOLUCA, MÉXICO A 6 MAYO DE ENERO DE 2021

El presente proyecto se llevó a cabo en el Laboratorio del Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua y el Laboratorio de Ciencias Ambientales de la Facultad de Química, de la Universidad Autónoma del Estado de México y se contó con el soporte financiero del Proyecto UAEM: 4601/2018ESP Vulnerabilidad socio-ambiental de la sub-región florícola del Estado de México

El proyecto de investigación con título “Estrategias de mejora en la calidad de agua para abastecimiento público en el municipio de Villa Guerrero, Estado de México”, fue registrado ante la Dirección de Estudios Avanzados con el número MACIAS-1418

El proyecto se inscribe en la línea de investigación de Prevención, Control y Efectos de la Contaminación del Área de Calidad Ambiental del Programa de Posgrado en Ciencias Ambientales de la Universidad Autónoma del Estado de México.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	3
DEDICATORIAS	4
ÍNDICE	5
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	16
1.1 COMPOSICIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA	16
1.2 CALIDAD DEL AGUA	18
1.2.1 NORMATIVIDAD EN MÉXICO	19
1.2.2 NORMATIVIDAD APLICADA AL AGUA POTABLE	20
1.2.3 LÍMITES PERMISIBLES DE CALIDAD DE AGUA	21
1.3. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA	22
1.3.1 ÍNDICE DE CALIDAD DE BROWN.....	27
1.3.2 ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA DINIUS I.....	30
1.3.3 ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA DINIUS II	33
1.3.4 ÍNDICE DE CALIDAD DE SAID	35
1.4. DESCRIPCIÓN FISIOGRAFICA DEL MUNICIPIO DE VILLA GUERRERO	37
1.4.1. ¿QUE ES UN ACUIFERO?.....	37
1.4.2. ACUIFERO TENANCINGO.....	37
1.4.3. TIPO DE ACUIFERO.....	38
1.5. MUNICIPIO DE VILLA GUERRERO	39
1.5.1. HIDROLOGÍA.....	40

1.5.2. CLIMA	42
1.5.3. PRECIPITACIÓN.....	43
1.5.4. GEOLOGÍA	44
1.5.5. EDAFOLOGIA.....	45
1.5.6. FLORA.....	45
1.5.7. USO DE SUELO Y VEGETACIÓN.....	46
1.6. FUENTES DE ABASTECIMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE AGUA.....	48
1.6.1. FUENTES DE ABASTECIMIENTO EN EL MUNICIPIO DE VILLA GUERRERO	49
CAPÍTULO 2. HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN.....	51
2.1 HIPÓTESIS	51
2.2 OBJETIVO GENERAL.....	52
2.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	52
2.3 JUSTIFICACIÓN	53
CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	56
3.1 MATERIALES Y MÉTODOS	57
3.1.1 SELECCIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO.....	57
3.1.2 PREPARACIÓN DE RECIPIENTES.....	59
3.2 ÁNALISIS DE LABORATORIO	60
3.2.1 DETERMINACIONES ANALÍTICAS.....	62
4. RESULTADOS	73
Abstract.....	74
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	96
5.2 ESTRATEGIAS DE MEJORA	111
6 CONCLUSIONES.....	114

BIBLIOGRAFÍA	116
ANEXOS	121
RELACIÓN DE FUENTES DE ABASTECIMIENTO ADMINISTRADAS POR EL MUNICIPIO DE VILLA GUERRERO, ESTADO DE MÉXICO.....	122
CURVAS UTILIZADAS EN EL INDICE DE CALIDAD DE BROWN	126
ACERVO FOTOGRÁFICO	131
RESULTADOS GENERALES PRIMER MUESTREO	138
RESULTADOS FINALES PRIMER MUESTREO	142
RESULTADOS GENERALES SEGUNDO MUESTREO	143
RESULTADOS FINALES SEGUNDO MUESTREO.....	146
RESULTADOS FINALES.....	146

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación de propiedades físicas de algunos solventes.....	17
Tabla 2. Límites permisibles de calidad de agua en México.....	21
Tabla 3: Relación de pesos relativos (W_i) para cada parámetro.....	29
Tabla 4. Escala de clasificación del ICA-NSF	30
Tabla 5: Funciones de Subíndices correspondientes al Índice de calidad de agua Dinius I	31
Tabla 6: Pesos relativos correspondientes al Índice de calidad de agua Dinius I.....	32
Tabla 7. Escala de clasificación del Índice de Calidad Dinius I.	33
Tabla 8: Pesos unitarios y funciones de subíndices correspondientes al Índice de calidad de agua Dinius II.	34
Tabla 9. Escala de clasificación del Índice de Calidad Dinius II.....	35
Tabla 10. Escala de clasificación de Said.....	37
Figura 1. Localización del acuífero 1504. (Fuente: Elaboración propia con información de: INEGI, 2014).....	38
Figura 2. Localización del Municipio de Villa Guerrero. (Fuente: Elaboración propia con información de: INEGI, 2014).	39
Tabla 11: Corrientes superficiales en la Cabecera Municipal.	40
Figura 3: Hidrología (Fuente: Elaboración propia con información de: INEGI, 2014).....	41
Tabla 12. Rangos de temperatura	42
Figura 4: Climas (Fuente: Elaboración propia con información de: INEGI, 2014)	43
Tabla 13: Precipitación	44
Tabla 14 Caracterización del tipo de suelo de la región de estudio.	45

Tabla 15: Tipo de flora.....	46
Figura 5: Uso de suelo y vegetación (Fuente: Elaboración propia con información de: INEGI, 2014).....	47
Tabla 16: Tipo de flora.....	47
Figura 6: Diagrama de flujo del desarrollo experimental.....	56
Tabla 17: Coordenadas geográficas de los sitios de muestreo.....	57
Figura 7: Ubicación de los puntos de muestreo (Fuente: Elaboración propia con información de: INEGI, 2014).....	58
Tabla 18. Descripción de las jornadas de muestreo	59
Tabla 19: Volumen de muestra utilizado en la microescala	61
Tabla 20. Evaluación de los Índices de Calidad de Agua	107
Tabla 21: Escala de Clasificación.....	108

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del acuífero 1504. (Fuente: Elaboración propia con información de: INEGI, 2014).....	38
Figura 2. Localización del Municipio de Villa Guerrero. (Fuente: Elaboración propia con información de: INEGI, 2014).	39
Figura 3: Hidrología (Fuente: Elaboración propia con información de: INEGI, 2014).....	41
Figura 4: Climas (Fuente: Elaboración propia con información de: INEGI, 2014)	43
Figura 5: Uso de suelo y vegetación (Fuente: Elaboración propia con información de: INEGI, 2014).....	47
Figura 6: Diagrama de flujo del desarrollo experimental.....	56
Figura 7: Ubicación de los puntos de muestreo (Fuente: Elaboración propia con información de: INEGI, 2014).....	58



RESUMEN

El agua es un elemento esencial para el desarrollo de la vida humana, como componente del ambiente es uno de los más sensibles. El municipio de Villa Guerrero, Estado de México se encuentra ubicado dentro de la región hidrológica del Balsas, sus cuerpos de agua recargan una sección del acuífero Tenancingo. En este trabajo de investigación se evaluaron ocho fuentes de abastecimiento que suministran agua para consumo humano bajo el esquema de dos muestreos, el primero realizado durante los meses de octubre y noviembre de 2018, el segundo muestreo en el mes de mayo de 2019, condicionante que permitió evidenciar efectos de dilución enmarcados por la presencia de las lluvias en el primer muestreo, y el estiaje para el segundo. La calidad del agua fue monitoreada considerando 17 parámetros fisicoquímicos y microbiológicos: demanda bioquímica del agua, sólidos totales, sólidos suspendidos, pH, oxígeno disuelto, turbidez, fosfatos, nitratos, nitrógeno amoniacal, cloruros, dureza total, conductividad eléctrica, acidez total, alcalinidad total, coliformes totales, coliformes fecales y color, bajo los lineamientos establecidos por las normas oficiales mexicanas enfocadas al estudio de la calidad del agua.

A partir de los resultados obtenidos de los parámetros de calidad del agua, se determinaron cuatro Índices de Calidad del Agua (Brown, Dinius I, Dinius II, y Said), señalando que cada índice emplea diferentes parámetros de calidad y ponderaciones respectivas. En particular, la calidad del agua para consumo humano puede ser: excelente, buena, pobre, muy pobre o indeseable, por lo que el agua puede ser usada en diferentes actividades en función de su calidad; tales como, consumo humano, recreación, pesca, ganadería o agricultura, entre otras.

Los resultados obtenidos en función del índice de calidad, evidencian que existen variaciones bastante claras entre la temporada de lluvias y la de estiaje. Los valores de cada índice de calidad del agua disminuyeron durante la temporada de estiaje, lo que indica que factores externos pueden afectar su calidad, señalando la importancia de monitorear la calidad del agua en diferentes periodos del año. Finalmente, es importante destacar que estos resultados podrían ayudar a las autoridades a tomar las decisiones adecuadas para mejorar o mantener la calidad del agua en condiciones óptimas para el consumo humano.

Palabras clave: ICA, parámetros físicos, químicos, microbiológicos.



ABSTRACT

Water is an essential element for the development of human life, as a component of the environment it is one of the most sensitive. The municipality of Villa Guerrero, State of Mexico is located within the hydrological region of the Balsas, its bodies of water recharge a section of the Tenancingo aquifer. In this research, eight supply water sources for human consumption were evaluated under the scheme of two samplings, the first carried out during the months of October and November 2018, the second sampling in the month of May 2019, dilution effects were observed by the presence of rains in the first sample. Water quality was monitored considering 17 physicochemical and microbiological parameters: biochemical water demand, total solids, suspended solids, pH, dissolved oxygen, turbidity, phosphates, nitrates, ammonia nitrogen, chlorides, total hardness, specific conductivity, total acidity, total alkalinity, total coliforms, fecal coliforms and color, under the guidelines established by the official Mexican standards focused on the study of water quality.

Water Quality Indices (Brown, Dinius I, Dinius II, and Said) were determined from the water quality parameters, each index uses different quality parameters and respective weightings. In particular, the quality of water for human consumption can be: excellent, good, poor, very poor or undesirable, so the water can be used in different activities depending on its quality; such as, human consumption, recreation, fishing, livestock or agriculture, among others.

The results obtained based on the quality index show that there are quite clear variations between the rainy season and the dry season. The values of each water quality index decreased during the dry season, indicating that external factors may affect its quality, therefore it is important to monitor the water quality at different times of the year. Finally, it is important to highlight that these results could help the authorities to make the appropriate decisions to improve or maintain the quality of water in optimal conditions for human consumption.

Keywords Water Quality; Brown index; Dinius indices; Said index.



INTRODUCCIÓN

El agua por su naturaleza química es un compuesto asombroso, gracias a ella, las primeras formas de vida se desarrollaron en su interior, y solo mucho más tarde, en su evolución se aventuraron fuera de ella, pero nunca muy lejos, nuestro propio cuerpo está constituido principalmente por agua. Presenta varias propiedades importantes que son cruciales en su papel como disolvente, como medio de vida, en el comportamiento ambiental y en usos industriales, todas ellas basadas en las siguientes características: asimetría en su molécula, naturaleza polar, y la capacidad de formar enlaces o puentes de hidrógeno (Manahan, 2007).

En condiciones naturales, el ciclo del agua presenta como característica una gran capacidad de purificación; sin embargo, esta misma facilidad de regeneración y su aparente abundancia, han propiciado que los recursos hídricos sean expuestos a los impactos derivados por las actividades humanas y por efectos de algunos fenómenos naturales, los cuales; conjuntamente influyen tanto en la disponibilidad para utilizarla como en su calidad, y en este sentido, surge la necesidad de diseñar una serie de mecanismos para la gestión y la regulación que permitan una administración eficiente, dando prioridad a la protección y al uso sustentable del recurso.

El acceso al agua con garantías sanitarias es un tema crucial en salud pública. Una encuesta promovida por el British Medical Journal en 2007 reconoció el saneamiento y la desinfección del agua de consumo como el mayor hito de la historia de la medicina desde 1840 (Ferriman, 2007). La Organización Mundial de la Salud (OMS) publica periódicamente las guías de calidad del agua de consumo con valores guía para diversas sustancias con el objetivo de proteger la salud de la población. Estas guías son una orientación fundamental para el desarrollo de las normativas internas de cada país. El agua destinada al consumo se capta en los recursos existentes de agua subterránea o superficial de acuerdo con los criterios de calidad establecidos por los organismos de cuenca de acuerdo con lo establecido en la Ley de Aguas y la normativa derivada (Gómez-Gutierrez *et al.*, 2016).

Generalmente, la calidad del agua se determina comparando las características físicas, químicas y microbiológicas con unas directrices de calidad o estándares. Para ello, se mide



MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

la concentración de sus componentes y los efectos o propiedades causadas por la presencia de estas sustancias. En el caso del agua para consumo humano, estas normas se establecen para asegurar un suministro de agua limpia y saludable para el consumo humano y de este modo, proteger la salud de las personas, y se basan normalmente en unos niveles de toxicidad científicamente aceptables tanto para los humanos como para los organismos acuáticos (UNEP, 2008)

Una manera de expresar esta información, es a través del enfoque integral establecido en los modelos del Índice de Calidad de Agua (ICA). El Índice de Calidad de Agua (ICA), es un modelo que puede ser utilizado como un marco de referencia único para comunicar información acerca de la calidad de reservorios u almacenamientos expuestos al impacto derivado de actividades antropogénicas, de igual manera; permite evaluar la vulnerabilidad o susceptibilidad del agua a la contaminación. También se puede visualizar como una forma de agrupación simplificada de algunos constituyentes indicadores del deterioro en la calidad.

La aplicación de un modelo de ICA permite la evaluación de componentes que afectan la calidad del agua para sus diferentes usos, posibilitando el resumir esta información en un simple valor, para finalmente representar la calidad en los cuerpos de agua (Torres Vega, 2009).

El presente trabajo se enfoca en la determinación de un ICA aplicado hacia algunas fuentes de abastecimiento de agua potable en el Municipio de Villa Guerrero, Estado de México, teniendo como finalidad conocer si las actividades antropogénicas impactan directamente en la calidad del agua que se utiliza para consumo humano en la región.

En el capítulo 1 se presentan los antecedentes relacionados con la composición fisicoquímica del agua, la normatividad en México, límites máximos permisibles de la calidad del agua y los cuatro índices de calidad del agua, así como una descripción fisiográfica del municipio de Villa Guerrero, México.

En el capítulo 2 se presenta la hipótesis de trabajo y los objetivos general y específicos y la justificación del trabajo.



MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

En el capítulo 3 se presenta el desarrollo experimental, así como la metodología para calcular los cuatro índices de calidad del agua.

En el capítulo 4 se presentan los resultados de esta investigación a través de un artículo enviado a la revista “Environmental Monitoring and Assessment” con su respectiva carta de envío.

El capítulo 5 muestra una discusión de resultados.

El capítulo 6 corresponde a las conclusiones, sugerencias y bibliografía del presente trabajo.

Finalmente se muestran los Anexos correspondientes a la memoria de cálculo de los 4 índices de calidad del agua.



CAPÍTULO 1
ANTECEDENTES



CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1 COMPOSICIÓN FISICOQUÍMICA DEL AGUA

El agua es seguramente el compuesto químico más común para todos nosotros; forma parte de nuestra vida diaria: la bebemos, la vemos caer, nos bañamos en ella, lavamos con ella e incluso sabemos que es el componente mayoritario de nuestros cuerpos y nuestra Tierra. Sin embargo, quizás por esta misma razón, es probablemente también el compuesto menos apreciado. Las propiedades del agua son verdaderamente únicas en comparación con todas las otras sustancias químicas presentes en nuestro planeta y es necesario que la analicemos para comprender mejor a esta sustancia tan común como extraordinaria (Monte Perez, 2016).

Derivado de las características de su molécula (naturaleza polar, capacidad para formar enlaces puentes de hidrógeno, y asimetría), es conocido como el disolvente universal porque tiene la capacidad de desgastar minerales transportándolos disueltos a través de la superficie de la geósfera, transporta los nutrientes a las raíces de las plantas en el suelo, etc. Posee una tensión superficial muy alta y en forma líquida, como la de las gotas de lluvia actúa como si se encontrara cubierta por una membrana delgada, por su transparencia a la luz visible y a la fracción de la radiación ultravioleta de mayor longitud de onda, permite que ocurra la fotosíntesis en las algas suspendidas bajo la superficie del agua (Manahan, 2007)

Posiblemente la propiedad física más importante del agua es su comportamiento con respecto a la temperatura, presenta la capacidad de congelarse a 0 °C, en contraparte; su máxima densidad se presenta a los 4°C. El agua líquida cuenta con una capacidad calorífica de 4.184 Joules por gramo por °C (J/g °C), es decir; se requiere alta energía calorífica para elevar 1 °C un gramo de agua. Su calor de fusión presenta un valor de 334 Joules/gramo, el calor de vaporización se establece en 2.259 Joules para vaporizar un gramo de agua líquido, siendo este el calor más alto de vaporización de cualquier líquido común (Manahan, 2007).

Otra propiedad importante y que es necesario destacar, recae en su capacidad para auto disociarse, y no es otra cosa que el proceso en el que dos moléculas de agua no sólo interaccionan, sino que reaccionan entre ellas para formar dos iones: un ion hidronio H_3O^+ y un ion hidroxilo OH^- , dando lugar a la siguiente reacción (Monte Perez, 2016):



MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES



Estos iones a su vez son muy reactivos y pueden reaccionar entre ellos para formar de nuevo dos moléculas de agua:



Es un proceso continuo de ruptura y formación de moléculas de agua que está sucediendo constantemente en disolución entre distintas moléculas y que se puede escribir como una reacción que está procediendo hacia ambos lados:



Aun cuando el proceso de formación de iones y reformation de moléculas de agua es constante, siempre hay presentes en disolución una cierta cantidad de iones hidroxilo e hidronio pues esta reacción de auto disociación se encuentra en lo que conocemos como equilibrio químico (Monte Perez, 2016). La **Tabla 1** presenta un resumen en la comparación de propiedades físicas de algunos solventes.

Tabla 1: Comparación de propiedades físicas de algunos solventes

Sustancia	Masa molar (g/mol)	Polaridad relativa	Punto de ebullición (°C)	Punto de fusión (°C)	Capacidad calorífica (J/g*K)
Agua líquida	18.02	1	100	0	4.18
Etanol 95%	46.07	0.654	78.5	-117.3	2.44
Metanol	32.04	0.762	65.2	-93.9	2.14
Acetona	58.08	0.355	56.2	-95.4	2.18
Cloroformo	119.38	0.259	61.7	-63.5	0.96
Éter etílico	74.12	0.117	34.5	-116.2	2.33
Benceno	78.11	0.111	80.1	5.5	1.74
Ácido acético	60.02	0.648	117.9	16.6	2.06

Fuente: (Monte Perez, 2016)



El agua es el medio perfecto para que se lleven a cabo las reacciones químicas necesarias para la vida, ofrece una fase homogénea para que los reactivos se encuentren y para desechar los productos no deseados. La vida inició gracias a la formación de un caldo primitivo acuoso, así que la vida como la conocemos está enteramente relacionada con el agua como el origen de todo (Monte Perez, 2016).

1.2 CALIDAD DEL AGUA

Los recursos hídricos en general, indistintamente de su naturaleza ya sea superficial o subterránea, son recursos naturales ampliamente explotados, actualmente; son presa de escasez y graves problemas de contaminación prácticamente en todo el mundo. Por tal motivo es esencial prestar atención a la mejora y al mantenimiento de su calidad y cantidad, de ahí que surge la necesidad del desarrollo de metodologías eficaces para la evaluación de los recursos en pro de un desarrollo sostenible y la seguridad de la salud humana. Tradicionalmente, el agua superficial es la fuente más accesible y la más utilizada para una amplia gama de usos, esta característica le confiere una alta susceptibilidad a ser contaminada por una infinidad de fuentes. En este sentido; una constante explotación mal planificada plantea una grave amenaza para los ecosistemas, así; un enfoque estricto y vigilante hacia el monitoreo y la evaluación de las aguas superficiales son necesarios para garantizar la preservación de este recurso (Tripathi and Singal, 2019).

Calidad de agua se define a través del contenido de sustancias minerales, sus propiedades físicas, químicas y biológicas. El concepto como tal es relativo, ya que no es posible realizar una clasificación absoluta, esto; porque el grado de calidad ha de especificarse con respecto a los usos hacia los cuales se destinará. La calidad necesaria para cada uso asignado es variable, al igual que los criterios utilizados para evaluarla. Por ejemplo; en el agua para consumo humano se exigen altos estándares, mientras que es posible admitir una menor calidad para uso en algunos procesos industriales. En el caso del agua potable, estas normas se establecen para asegurar un suministro de agua limpia -saludable y de este modo, proteger la salud de las personas (Robles *et al.*, 2013).



1.2.1 **NORMATIVIDAD EN MÉXICO**

En general; toda actividad que involucre un proceso productivo debe contar con figuras normativas aplicables, sus lineamientos tendrán que ser diseñados a la medida con el objetivo de obtener un beneficio específico. Teóricamente, las disposiciones establecidas dentro de estos documentos tienen que ser seguidos al pie de la letra, dando cumplimiento a una serie de requisitos o parámetros que a la postre, darán la pauta para mantener en equilibrio el medio donde se desarrollan dichas actividades. Sus fundamentos encuentran origen dentro del régimen jurídico vigente, para su conformación es indispensable conocer a fondo el tipo de proceso o servicio al cual será aplicado, permitiendo una estandarización y la regulación más adecuada para cada escenario (Normalización, 2006).

Contextualizando; México cuenta con tres tipos de normativas, las cuales son administradas por la Secretaría de Economía con base en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, la descripción de cada una de ellas se presenta a continuación:

NOM (NORMAS OFICIALES MEXICANAS): De acuerdo la descripción realizada en la Ley Federal de Metrología y Normalización en su Artículo 3, Fracción XI. Se define como la regulación técnica de observancia obligatoria expedida por las dependencias competentes, de conformidad a las finalidades establecidas en el artículo 40, 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 (Normalización, 2006).

NORMAS MEXICANAS (NMX): De acuerdo la descripción realizada en la Ley Federal de Metrología y Normalización en su Artículo 3, Fracción X. Se define como la regulación técnica que elabore un organismo nacional de normalización, o la Secretaría, en los términos de esta Ley, que prevé para un uso común y repetido reglas, especificaciones, atributos, métodos de prueba, 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.



Establecen los requisitos mínimos de calidad de los productos y servicios, con el objetivo de orientar a los consumidores. Su aplicación es voluntaria, con excepción de los casos en que los particulares manifiesten que sus productos, procesos o servicios son conformes con las mismas (Normalización, 2006).

NORMAS DE REFERENCIA (NRF): Una norma técnica de referencia es un documento aprobado por un organismo reconocido que establece especificaciones técnicas basadas en los resultados de la experiencia y del desarrollo tecnológico, que hay que cumplir en determinados productos, procesos o servicios. Resultan fundamentales para programar los procesos de producción. Se crean con el consenso de todas las partes interesadas e involucradas en una actividad (fabricantes, administración, consumidores, laboratorios, centros de investigación). Deben aprobarse por un Organismo de Normalización reconocido.

En México son elaboradas por entidades de la administración pública federal (PEMEX, CFE), en aquellos casos en los que las normas mexicanas vigentes no cumplan sus requerimientos, o bien, las especificaciones que contienen sean obsoletas/ inaplicables (Normalización, 2006).

1.2.2 NORMATIVIDAD APLICADA AL AGUA POTABLE

En nuestro país contamos con una serie de normas de carácter permanente para el buen manejo de nuestros procesos de potabilización. El papel más importante es el de aplicar adecuadamente las mismas. La norma oficial más importante, y que debe ser aplicada por todos los organismos operadores de agua dentro del territorio nacional es la siguiente:

NOM-127-SSA1-1994. “Salud ambiental, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”.

Regula los límites máximos permisibles en cuanto a calidad física, organoléptica, química, y microbiológica en el agua potable. Es de vital importancia que cada uno de los parámetros se encuentren dentro de los límites establecidos en el documento, la salud pública está en juego y cumplir con la aplicación de esta norma es de carácter obligatorio. De igual manera, nos permite determinar el tipo de tratamiento que necesita el agua a partir de la calidad del agua a potabilizar.



1.2.3 LÍMITES PERMISIBLES DE CALIDAD DE AGUA

La norma establece límites para características microbiológicas, físicas, organolépticas, químicas, y radiactivas a considerar. Con base en lo anterior, la **Tabla 2** presenta la información específica para cada uno de los parámetros a considerar.

Tabla 2. Límites permisibles de calidad de agua en México.

Microbiológicas	
Característica	Límite
Organismos Coliformes Totales	Ausencia
<i>E. coli</i>	Ausencia
Físicas y Organolépticas	
Característica	Límite
Color	20 unidades de color verdadero en la escala platino- cobalto
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método
Químicas	
Característica	Límite (mg/L)
Aluminio	0.20
Arsénico	0.01
Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros como (CN ⁻)	0.07
Cloro residual libre	0.2-1.00
Cloruros (como Cl ⁻)	250.00
Cobre	2.00
Cromo Total	0.05
Dureza total (como CaCO ₃)	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Hierro	0.30
Fluoruros (como F ⁻)	1.50
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	0.05
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6-5 - 8.5
Plomo	0.01
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00



MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Sulfatos como SO ₄ ⁻	400.00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50
Trihalometanos totales	0.20
Zinc	5.00
Plaguicidas (microgramos/L)	
Compuesto	Límite
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.20
DDT (total de isómeros)	1.00
Gamma- HCH (lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	1.00
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20.00
2,4-D	30.00
Radiactivas (Bq/L)	
Compuesto	Límite
Radiactividad alfa global	0.1
Radiactividad beta global	1.00

Fuente:(Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud Ambiental, 1994).

1.3. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA

Una gran cantidad de datos sobre la calidad del agua sin una interpretación precisa no pueden auxiliar correctamente a la gestión del recurso, por lo cual; es indispensable resumir estos datos en dígitos numéricos definidos. Para resolver esta problemática se desarrolló una metodología denominada Índices de Calidad del Agua, donde a partir de la aplicación de esta técnica, es posible realizar la administración adecuada de los recursos hídricos de una región.

La creación de un índice de calidad del agua, (ICA), por sus siglas en inglés (WQI), se basa en la creación de un sencillo procedimiento matemático que integra la relación de parámetros físicos, químicos, y microbiológicos para generar una puntuación, posteriormente; una vez desarrollado y aplicado, se convierte en una herramienta conveniente para examinar tendencias, resaltando condiciones ambientales específicas, apoyando a los tomadores de decisiones y a los gobiernos en la evaluación de la eficacia de programas regulatorios (Regmi *et.al.*2017).

Los primeros índices de calidad del agua incluyeron sólo diez parámetros, fueron descritos por Horton en el año de 1965, y han sido considerados como indicadores importantes para la evaluación de la calidad del agua (Das Kangabam and Govindaraju, 2017).



Para el año de 1978 Ott realizó una encuesta sobre los tipos y la medida en que se utilizaban los índices de calidad del agua en los Estados Unidos. En 1985, Canter fue más preciso; y aclaró que la comparación realizada entre varios índices desencadenando una serie de controversias, ya que los supuestos y los objetivos enfocados a diferentes aplicaciones presentaron variaciones significativas (Asadollahfardi, 2015).

Steinhart et.al. (1982) presentaron un índice para resumir información técnica sobre el estado y las tendencias de calidad de agua en lagos. Aunque el índice se desarrolló para aguas cercanas a las orillas de los grandes lagos de América del Norte, a través de sus observaciones afirmaron que el concepto de índice era aplicable para otros lagos templados con alta calidad de agua. Intentaron minimizar la vulnerabilidad del índice mediante el empleo de las siguientes estrategias: La selección de variables relevantes para los usos del lago en estudio, construcción de curvas de clasificación basadas en criterios establecidos, centrarse en variables para las que hay datos confiables y disponibles.

Ved Prakash y colaboradores (2000) desarrollaron un índice que consta de sólo cuatro parámetros para evaluar el perfil de calidad del agua sobre la totalidad del río Ganga ubicado en la India, identificaron alcances y determinaron la brecha existente entre la calidad de agua deseada y la que existe realmente, programando medidas urgentes para el control de la contaminación. Este índice fue creado bajo los conceptos del modelo desarrollado por Brown y colaboradores en el año de 1970 (NSF-WQI), presentando ligeras modificaciones en términos de distribución de pesos, además; asigna criterios para diferentes categorías de usos establecidas por la Junta Central de Contaminación del Agua de la India (Abbasi, T., & Abbasi, 2012).

Jonnalagadda y Mhere (2001) estudiaron la calidad del agua del río Odzi, el río principal que emerge en tierras altas al este de Zimbabwe utilizando índices de calidad del agua, monitoreando los siguientes parámetros químicos: Temperatura, conductividad eléctrica, sólidos suspendidos totales, demanda biológica de oxígeno (DBO), fosfatos totales, y nitratos; por espacio de 9 meses en 6 estaciones de muestreo. Los resultados indicaron que, si bien el agua era de calidad media a buena en la corriente superior, la calidad estaba viciada río abajo, posiblemente debido a la filtración originada en los vertederos de una mina



abandonada y los escurrimientos originados en tierras agrícolas que se pudieron infiltrar en el río.

Bordalo et.al. (2001) estudiaron la calidad del agua del río Bangpakong, el más importante de la cuenca fluvial al este de Tailandia, utilizando índices de calidad del agua desarrollados en Escocia. Recolectaron muestras en junio de 1998 hasta junio de 1999 en 11 estaciones de monitoreo cubriendo un total de 227 km de camino fluvial. Los parámetros monitoreados incluidos fueron: Temperatura, OD, turbidez, sólidos en suspensión, pH, amoníaco, coliformes fecales, DBO, DQO, fosfato, conductividad y metales pesados. Se encontró que el WQI promedio era muy bajo en un escaso 41% y la calidad del agua disminuyó aún más durante la temporada de sequía.

Fernández et.al. (2004) revisaron 36 modelos de ICA y el índice de contaminación del agua (WPI); los resultados de su trabajo mostraron que existen diferencias apreciables entre diferentes WQI en la misma muestra de agua. Concluyeron que el WPI desarrollado en Colombia por Ramírez y colaboradores en 1997, además de la estrategia AMOEBA que fue desarrollada por De Zwart en 1995 en Holanda ofrecía ventajas considerables sobre formulaciones más tradicionales.

Sedeño-Díaz y López-López (2007) estudiaron la calidad del agua del Río Lerma, una de las zonas notoriamente más contaminadas de México. Utilizaron el Índice de Calidad del Agua (ICA), basándose en un modelo multiplicativo y ponderado como componente principal para su trabajo. Las puntuaciones de ICA juzgaron que el agua no era apta para beber y demostró que era de vital importancia aplicar tratamiento.

Velázquez- Machuca y Pimentel- Equihua (2012) evaluaron el grado de contaminación de las fuentes de agua potable en la Ciénaga de Chapala en el Estado de Michoacán, México. Utilizaron un análisis estadístico multivariado y el cálculo del ICA para 17 sitios (manantiales y pozos), estableciendo tres periodos de muestreo, abril- diciembre de 2008 y mayo de 2009, encontrando que B, Cd, Pb y Coliformes Fecales exceden los límites permisibles en agua para consumo humano. En relación con el cálculo del ICA, el 96 % de las fuentes mostro buena y moderada calidad, el 4% restante es agua de baja calidad.



Das Kangabam *et al.* (2017) desarrollaron un índice de calidad de agua para el lago Loktak en la India, evaluaron 20 parámetros fisicoquímicos y biológicos sobre cinco sitios de muestreo para el periodo comprendido entre julio de 2013 a mayo de 2014. Los resultados permitieron dilucidar una alta concentración de nitritos para los cinco sitios de muestreo, además los valores obtenidos para el modelo del índice de calidad se encontraron en el rango de 64 a 77 sobre su escala de clasificación, lo cual indica que el agua no es apta para el consumo humano sin un previo tratamiento.

Con base en lo anterior y valorando los pros y contras de algunos índices, para este trabajo de investigación se determinó utilizar los siguientes:

- 1) Índice de calidad de agua de Brown
- 2) Índice de calidad de agua Dinius I
- 3) Índice de calidad de agua Dinius II
- 4) Índice de calidad de agua de Said

El índice diseñado por Brown permite representar la calidad del agua de manera bastante general, no reconoce y tampoco incorpora usos específicos tales como: el suministro de agua potable, la agricultura, la industria, etc. Esta dificultad ha sido una tendencia aparente para que algunos encuestados se encontraran fuertemente influenciados y que a su juicio les permitiera encontrar la idoneidad para la inclusión de los parámetros en el ICA, para esta labor consideraron factores como la disponibilidad de datos y metodologías analíticas existentes para su cuantificación.

Durante la evaluación del Índice diseñaron una formulación con espíritu aritmético que, aunque era bastante sencillo de entender y calcular, carecía de sensibilidad en términos del efecto de un mal valor para uno o más parámetros. Esta pequeña deficiencia llevó a Brown y colaboradores en el año 1973 a proponer una variación en el modelo, el cual contempló un comportamiento multiplicativo. Bajo este esquema, las investigaciones realizadas posteriormente demostraron que el modelo multiplicativo se comportó de manera más adecuada que el modelo con características aditivas (Abbasi, T., & Abbasi, 2012).

En el año de 1972 el Índice Dinius I considerado como un precursor, permitió la apertura hacia nuevos horizontes en el sentido de que, a través de este, se intentó diseñar un



rudimentario sistema de contabilidad social; el cual mediría los costos, el impacto de la contaminación, y los esfuerzos a realizar para el control de la calidad del agua. Para este modelo seleccionaron 11 parámetros y al igual que en otros índices diseñados en la época, se estableció una escala de clasificación con orden decreciente y con valores expresados como porcentaje de calidad de agua, este modelo fue aplicado por Dinius en una base ilustrativa para los datos en varios ríos en el estado de Alabama, Estados Unidos.

Para el año de 1987, Dinius desarrolló una variación a su modelo de índice de calidad del agua, donde a partir de la metodología Delphi consideraron 12 parámetros para la conformación de su estructura (oxígeno disuelto, DBO₅, coliformes totales-fecales, pH, alcalinidad, dureza, cloruros, conductividad específica, temperatura, color, y nitratos), matemáticamente presentó un comportamiento multiplicativo, y como característica principal; a partir de este modelo es posible clasificar el agua para 4 usos distintos, tales como: Suministro de agua pública, recreación, agricultura, e industria, entre otros. (Abbasi, T., & Abbasi, 2012).

Investigaciones realizadas por Said y colaboradores (2004), llegaron a la conclusión de que ICA conformados por 8 o más parámetros, pueden no llegar a ser eficientes y representativos al momento de gestionar y administrar los recursos hídricos. De acuerdo con los autores; la mayoría de las cuencas hidrográficas no cuentan con una base de datos amplia, continua, suficiente, y a largo plazo para todas y cada una de las variables a considerar por cada uno de los ICA a evaluar.

Ante este panorama; Said y su equipo de trabajo se dieron a la tarea de formular un nuevo índice basado solo en 5 parámetros (oxígeno disuelto, fosforo total, turbidez, coliformes fecales, y conductividad específica), que como característica esencial fuera un modelo representativo y funcional. Concluyeron que el modelo bajo un esquema logarítmico en conjunto con los parámetros seleccionados permitiría esclarecer el efecto negativo de concentraciones pequeñas de contaminación (Abbasi and Abbasi, 2012)



1.3.1 ÍNDICE DE CALIDAD DE BROWN

A principios de la década de los 70's se desarrollaron un sin número de modelos ICA propuestos por diferentes científicos y organizaciones para la evaluación de la calidad de agua, uno de los más utilizados e importantes es el NSF-WQI desarrollado por Brown y colaboradores en 1970 con el apoyo de la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF), este modelo se encuentra conformado por nueve parámetros: Oxígeno disuelto (OD), coliformes fecales (FC), pH, demanda biológica de oxígeno (DBO), nitratos, fosfatos, temperatura, turbidez y sólidos totales (Bilgin, 2018).

La historia para el desarrollo y elaboración de este ICA implica la selección estrictamente rigurosa de cada uno de los parámetros a considerar, formulando una escala común y asignando los pesos a partir de la metodología Delphi. Su trabajo se puede resumir de la siguiente manera:

- 1) Brown y sus colaboradores prepararon un cuestionario (No. 1) y lo enviaron a un panel elegido cuidadosamente, cuyos miembros provenían de una variedad de actividades relacionadas con la distribución y la gestión del agua, incluyeron a personal de las oficinas de regulación, administración de servicios públicos locales, ingenieros consultores, académicos, e ingenieros sanitarios. Se les solicitó que consideraran 35 parámetros de calidad del agua para construir un índice.
- 2) También se solicitó a los miembros del panel asignar una calificación de importancia para cada parámetro en una escala de 1 a 5, donde 1 correspondía a la significación más alta mientras que 5 correspondió a la significación más baja. Al obtener una mayor convergencia de opinión sobre la importancia de cada parámetro para el índice, se elaboró un segundo cuestionario en el que cada miembro revisó la calificación original mientras consideraba modificar sus elecciones, y si lo deseaba, también la opinión de sus compañeros; sin embargo, se observaron pequeños cambios en las respuestas modificadas.
- 3) Finalmente, como los parámetros que habían surgido del segundo cuestionario fueron los más significativos, se presentaron las curvas que asignan la variación en la calidad



del agua para diferentes valores de los parámetros seleccionados, las cuales deben elaborarse para cada uno de ellos (Asadollahfardi, 2015)

Originalmente el Índice propuesto por Brown adopta la siguiente forma:

$$\sum_{i=1}^{n=9} W_i T_i(p_i) \dots \dots \dots 1$$

Considerar que:

$$q_i = p_i T_i \dots \dots \dots 1'$$

Donde:

p_i =valor medido del i -ésimo parámetro

T_i =Transformación de la calificación de calidad (curvas) del i -ésimo parámetro medido.

W_i = Peso relativo del i -ésimo parámetro; y presenta la siguiente restricción:

$$\sum_{i=1}^{n=9} W_i = 1 \dots \dots \dots 1''$$

Finalmente, la ecuación que gobierna el modelo de ICA propuesto por Brown queda definida de la siguiente manera:

$$\sum_{i=1}^{n=9} W_i q_i \dots \dots \dots 2$$

Donde:

El valor de q_i se obtiene a partir de las determinaciones analíticas, posteriormente con los valores obtenidos se realiza la consulta de las curvas de calidad desarrolladas por el autor, los valores obtenidos en dichas curvas se utilizan para realizar el cálculo Adicionalmente W_i representa un factor de ponderación que adquiere valores entre 0 y 1, es decir: $W_1+W_2+W_3+\dots+W_n = 1$. La relación de pesos relativos para cada parámetro se presenta en la **Tabla 3**:



Tabla 3: Relación de pesos relativos (W_i) para cada parámetro

Parámetros	Pesos Relativos Finales (W_i)
Oxígeno Disuelto (mg/L)	0.17
Densidad de Coliformes Fecales (NMP/100mL)	0.16
pH	0.11
DBO ₅ (mg/L)	0.11
Nitratos (mg/L)	0.10
Fosfatos (mg/L)	0.10
Temperatura (°C)	0.10
Turbidez (mg/L)	0.08
Sólidos Totales (mg/L)	0.07
$\Sigma=$	1

Fuente:(Abbasi, T., & Abbasi, 2012).

Este modelo sólo permite representar el uso general del agua, no incorpora ni reconoce funciones de usos específicos, tales como el suministro de agua potable, la agricultura, o la misma industria. Con estas condiciones, y visualizando a través de la aplicación que la formulación anterior por su naturaleza aditiva carecía de sensibilidad, Brown en 1973 se dio a la tarea de proponer una variación al modelo introduciendo la siguiente progresión geométrica:

$$WQI = \prod_{i=1}^n S_i^{w_i} \text{ --- 3}$$

Donde:

Al igual que en el modelo anterior, W_i representa un factor de ponderación adquiriendo valores entre 0 y 1, S_i representa el valor del subíndice adjunto al parámetro individual, es equivalente al factor q_i y su valor se determina a partir de los valores obtenidos en las curvas de calidad.

A pesar de que ambos modelos han sido utilizados, se puede observar que el modelo que involucra la progresión geométrica converge de mejor manera con las expectativas planteadas, puesto que al obtener una evaluación nula en alguno de los subíndices evaluados, el resultado no se invalida (Lumb *et al.*, 2011). En este trabajo de investigación se evaluaron



las dos ecuaciones (2 y 3) con la finalidad de observar las discrepancias que existen entre ellas. Finalmente, se presenta la **Tabla 4** que muestra la escala de clasificación que fue diseñada para este índice.

Tabla 4. Escala de clasificación del ICA-NSF

Valores del WQI	Descripción	Escala de color
91-100	Excelente	Azul
71-90	Buena	Verde
51-70	Media	Amarillo
26-50	Mala	Naranja
0-25	Muy Mala	Rojo

Fuente: Elaboración propia con información consultada en: (Eugenia *et.al.*,2007).

NOTA. La consulta de las curvas de calidad se puede realizar en el apartado de Anexos.

1.3.2 ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA DINIUS I

En el año de 1972 se desarrolló un nuevo modelo de ICA nombrado como Dinius I, el cual brinda una apertura en el sentido de que a través de su formulación se diseña un sistema bastante simple de contabilidad social, es decir; intenta medir el impacto de la contaminación y los costos que de la remediación se desprenden. La metodología de cálculo se encuentra basada en la suma ponderada de los subíndices, similar al utilizado en el modelo de Horton y la versión aditiva del Índice de Brown.

Para dar forma a este índice se seleccionaron once parámetros, como el índice de Horton y el NSF-WQI tenían una escala decreciente, con valores expresados como un porcentaje de calidad perfecta del agua que corresponde al 100%. Los subíndices del índice de Dinius se desarrollaron a partir de una revisión de la literatura científica publicada. El autor examinó la calidad del agua descrita por varias autoridades a diferentes niveles de variables contaminantes, y a partir de esta información generó 11 ecuaciones de subíndice. Las ecuaciones desarrolladas se pueden consultar en la **Tabla 5**:



Tabla 5: Funciones de Subíndices correspondientes al Índice de calidad de agua Dinius I

Parámetro	Subíndice
Oxígeno Disuelto (% de saturación)	$I_1 = x$
DBO 5 (mg/L)	$I_2 = 107 x^{-0.642}$
Coliformes Totales (NMP/100mL)	$I_3 = 100(x)^{-0.3}$
Coliformes Fecales (NMP/100mL)	$I_4 = 100 (5x)^{-0.3}$
Conductividad Específica ($\mu\text{mho/cm}$)	$I_5 = 535 x^{-0.3565}$
Cloruros (mg/L)	$I_6 = 125.8 x^{-0.207}$
Dureza (CaCO_3 , mg/L)	$I_7 = 10^{1.974 - 0.00132 x}$
Alcalinidad (CaCO_3 , mg/L)	$I_8 = 108 x^{-0.178}$
pH	$I_9 = 10^{0.2335 + 0.44x}$, $x < 6.7$ $I_{10} = 100$, $6.7 \leq x \leq 7.58$ $I_{11} = 10^{4.22 - 0.293x}$, $x > 7.58$
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	$I_{12} = -4(x_a - x_{\text{std}}) + 112$ $x_a = \text{temp del agua}$ $x_{\text{std}} = \text{temp estándar } (20^{\circ}\text{C})$
Color (Unidades C)	$I_{13} = 128 x^{-0.288}$

Fuente:(Abbasi, T., & Abbasi, 2012).

El índice se calculó como la suma ponderada de los subíndices. Los pesos variaron de 0,5 a 5 en una escala básica de importancia. En esta escala, 1,2,3,4 y 5 denotaron respectivamente el grado de importancia de cada uno de ellos, considerando los valores: muy poco, poco, promedio, gran, y de gran importancia. La suma de los pesos da un total de 21, siendo esto el denominador en la ecuación del índice. Se tienen registros que fue aplicado por Dinius en una base ilustrativa sobre los datos de varias corrientes en Alabama (Abbasi, T., & Abbasi, 2012). La distribución de pesos aplicados a este modelo, se presentan en la **Tabla 6**.



Tabla 6: Pesos relativos correspondientes al Índice de calidad de agua Dinius I

Parámetro	Peso Relativo Dinius (Wi)
Oxígeno Disuelto (% de saturación)	5,0
DBO ₅ (mg/L)	2,0
Coliformes Totales (NMP/100mL)	3,0
Coliformes Fecales (NMP/100mL)	4,0
Conductividad Específica (µmho/cm)	1,0
Cloruros (mg/L)	0,5
Dureza (CaCO ₃ , mg/L)	1,0
Alcalinidad (CaCO ₃ , mg/L)	0,5
pH	4,0
Temperatura (°C)	2,0
Color (Unidades C)	1,0
Σ=	21

Fuente: Elaboración propia con información consultada en: (González Meléndez, Caicedo Quintero and Aguirre Ramírez ,2013).

La ecuación 4 muestra los componentes de este índice:

$$WQI = \frac{1}{21} \sum_{i=1}^{n=11} W_i I_i \text{ ----- } 4$$

La escala de clasificación se representa en la **Tabla 7**:



Tabla 7. Escala de clasificación del Índice de Calidad Dinius I.

Valores del WQI	Descripción	Escala de color
91-100	Excelente	Azul
81-90	Buena	Verde
51-80	Regular	Amarillo
41-50	Mala	Naranja
0-40	Muy Mala	Rojo

Fuente: (González Meléndez, Caicedo Quintero y Aguirre Ramírez ,2013).

1.3.3 ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA DINIUS II

Para el año de 1987, el mismo Dinius desarrolló un modelo alternativo de Índice de Calidad de agua (Dinius II), donde la formulación de cada una de las funciones para los subíndices involucró una agregación multiplicativa, priorizando la apertura necesaria para desarrollar la metodología Delphi adecuadamente, es decir; sin ningún tipo de restricción al momento de proponer y elegir los parámetros a considerar. Como resultado, se obtuvo la inclusión de 12 parámetros que impactan directamente en la sanidad de los cuerpos de agua, este modelo propone la clasificación para seis distintos usos, entre los que destacan: el suministro de agua potable, recreación, pesca, agricultura, e industria (Abbasi, T., & Abbasi, 2012)

La ecuación 5 muestra el modelo Dinius II:

$$IWQ = \prod_{i=1}^{n=12} I_i^{W_i} \text{ ----- } 5$$

Donde:

IWQ= Índice de calidad del agua, el cual es representado por un número entre 0 y 100.

I_i= Subíndice de la variable contaminante, representado por un numero entre 0 y 100.

W_i= Peso unitario de la variable contaminante, representado por un numero en 0 y 1.

n= Número de variables contaminantes.



Tabla 8: Pesos unitarios y funciones de subíndices correspondientes al Índice de calidad de agua Dinius

II.

Parámetro	Peso Unitario de la variable contaminante (W_i)	Subíndice de la variable contaminante (I_i)
Oxígeno Disuelto (% de saturación)	0.109	$I_1 = 0.82(DO) + 10.56$
DBO ₅ (mg/L) a 20 °C	0.097	$I_2 = 108 (DBO_5)^{-0.3494}$
Coliformes Totales (NMP/100mL)	0.090	$I_3 = 136(Coli)^{-0.1311}$
Coliformes Fecales (NMP/100mL)	0.116	$I_4 = 106 (E- Coli)^{-0.1286}$
Conductividad Específica (µmho/cm)	0.079	$I_5 = 506 (CE)^{-0.3315}$
Cloruros (mg/L)	0.074	$I_6 = 391 (Cl)^{-0.3480}$
Dureza (CaCO ₃ , mg/L)	0.065	$I_7 = 552 (HA)^{-0.4488}$
Alcalinidad (CaCO ₃ , mg/L)	0.063	$I_8 = 110 (Alk)^{-0.1342}$
pH	0.077	$I_9 = 10^{0.6803+0.1856(pH)}$, $x < 6.9$ $I_{10} = 1$, $6.9 \leq x \leq 7.1$ $I_{11} = 10^{3.65-0.2216(pH)}$, $x > 7.1$
Temperatura (°C)	0.077	$I_{12} = 10^{2.004 - 0.0382 (T_a - T_{std})}$ $T_a =$ temp del agua $T_{std} =$ temp estándar (20°C)
Color (Unidades C)	0.063	$I_{13} = 127 (C)^{-0.2394}$
Nitratos (mg/L)	0.090	$I_{14} = 125(N)^{-0.2718}$

Fuente:(Abbasi, T., & Abbasi, 2012).

La **Tabla 9** presenta la escala de clasificación correspondiente a este índice:



Tabla 9. Escala de clasificación del Índice de Calidad Dinius II.

Valores del WQI	Descripción	Escala de color
91-100	Excelente	Azul
81-90	Buena	Verde
51-80	Regular	Amarillo
41-50	Mala	Naranja
0-40	Muy Mala	Rojo

Fuente: (González Meléndez, Caicedo Quintero y Aguirre Ramírez ,2013).

1.3.4 ÍNDICE DE CALIDAD DE SAID

Said y colaboradores en el año 2004 verificaron a través de sus investigaciones que la mayoría de los Índices de Calidad del Agua desarrollados en los Estados de Unidos de América y en Canadá involucraban como mínimo 8 variables de calidad. Paralelamente; también se percataron de que casi la totalidad de las cuencas hidrográficas no contaban con bases de datos amplias y continuas en donde concentrar este tipo de información, por ende; establecieron la necesidad de implementar un nuevo ICA integrado por una cantidad menor de parámetros, cuya característica fundamental se tradujera en la comparación del estado de sanidad/ afectación de diferentes sitios a evaluar.

Ante tal desafío, los autores propusieron un modelo de ICA integrado por sólo 5 parámetros con la pretensión de ser bastante representativo, donde para el desarrollo de la ecuación, se plantearon los siguientes pasos:

- A) Clasificar las variables de calidad de agua de acuerdo con su importancia, contemplando: Oxígeno disuelto, coliformes fecales, turbidez y conductividad específica.
- B) Una preselección de parámetros que presentan los impactos más pronunciados sobre la calidad del agua.

De acuerdo con las evaluaciones realizadas, otorgaron mayor peso al oxígeno disuelto, posteriormente consideraron a los coliformes fecales y el fósforo total; y finalmente con un



poco de menor importancia se encuentran la temperatura, la turbidez, y la conductividad específica. Acto seguido; con base en un formulario final, se mantiene el índice en un rango numérico razonable, siendo su comportamiento gobernado por una función logarítmica bastante simple, promoviendo la generación de números pequeños, pero a la vez significativos; que bien pueden ser interpretados por los tomadores de decisiones, y el público en general (Said, Stevens and Sehlke, 2004).

Según los autores, no es necesario estandarizar las variables para calcular su Índice. Los cálculos se simplifican aún más mediante la eliminación de subíndices que forman parte de la mayoría de los otros índices sofisticados, la ecuación 6 rige al índice correspondiente. (Abbasi & Abbasi, 2012):

$$WQI = \log \frac{DO^{1.5}}{(3.8^{TP}) (Turb)^{0.15} (15)^{\frac{FCol}{10000}} + 0.14SC^{0.5}} \quad \text{--- 6}$$

Donde: DO representa el oxígeno disuelto y tiene unidades de porcentaje (% de oxígeno de saturación), Turb representa la turbidez con unidades nefelométricas de turbidez (NTU), TP representa los fosfatos totales con unidades de (mg / L), FCol representa a las bacterias coliformes fecales (UFC/100 mL), y SC representa a la conductividad específica en ($\mu\text{S} / \text{cm}$) a 25 °C.

La escala de clasificación de este modelo se diseñó para variar de 0 a 3. El valor máximo o ideal de este índice es 3. Este comportamiento es para aguas muy buenas que tienen 100% de oxígeno disuelto, sin fosforo total, sin coliformes fecales, una turbidez menor a 1 NTU, y una conductancia específica menor a 5 $\mu\text{S} / \text{cm}$, el valor de este índice será 3. En puntajes más bajos llegando hasta valores de 2, el agua es considerada aceptable; para valores menores de 2, la calidad del agua representa un caso marginal requiriendo algún tipo de tratamiento. Sus observaciones concluyeron en que una o dos variables se han deteriorado, el valor de este índice será menor a 2. Si la mayoría de las variables se han deteriorado, el índice caerá por debajo de 1, lo que significaría mala calidad del agua (Abbasi & Abbasi, 2012).

La información anterior se resume en la **Tabla 10**:



Tabla 10. Escala de clasificación de Said.

Valores del WQI	Descripción	Observaciones
3	Excelente	Sin observaciones
2	Aceptable	Sin observaciones
1	Marginal	Requiere algún tipo de tratamiento
0	Mala calidad	Requiere algún tipo de tratamiento

Fuente: Elaboración propia con información consultada en: (Abbasi & Abbasi, 2012).

1.4. DESCRIPCIÓN FISIOGRAFICA DEL MUNICIPIO DE VILLA GUERRERO

1.4.1. ¿QUE ES UN ACUIFERO?

Es la formación geológica que almacena agua y actúa como depósito y reserva. La mayoría conforman grandes extensiones y su recarga se debe al aporte de aguas pluviales, corrientes superficiales, y lagos, que se infiltran a través del suelo hacia el subsuelo, el agua escurre por gravedad desde las zonas de recarga hacia las de descarga, las cuales pueden ser ríos, lagos y manantiales; la explotación se efectúa mediante el bombeo en pozos. El agua subterránea se consideraba frecuentemente una fuente inagotable debido a su disponibilidad y buena calidad, pero diversos estudios indican que es muy vulnerable a la contaminación (Robles *et al.*, 2013).

1.4.2. ACUIFERO TENANCINGO

Definido con la clave 1504 dentro del Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en el sur del Estado de México, en sus límites con los estados de Morelos y Guerrero, entre los paralelos 18°42' a 19°06' de latitud Norte y los meridianos 99°17' a 99°58' de longitud Oeste, cubriendo una superficie de 2,000 km² con un rango de altitud entre 1100 y 2300 msnm (Fig. 1). Geopolíticamente se extiende totalmente sobre los municipios Almoloya de Alquisiras, Coatepec Harinas, Ixtapan de la Sal, Joquicingo, Malinalco, Ocuilan, Tenancingo, Tenango del Valle, Texcaltitlán, Tonatico, *Villa Guerrero* y Zumpahuacán; y parcialmente los municipios Sultepec,



Temascaltepec, Texcalyacac, Santiago Tianguistenco, Toluca, Zacualpan y Zinacantepec
(Comisión Nacional del Agua, 2011)

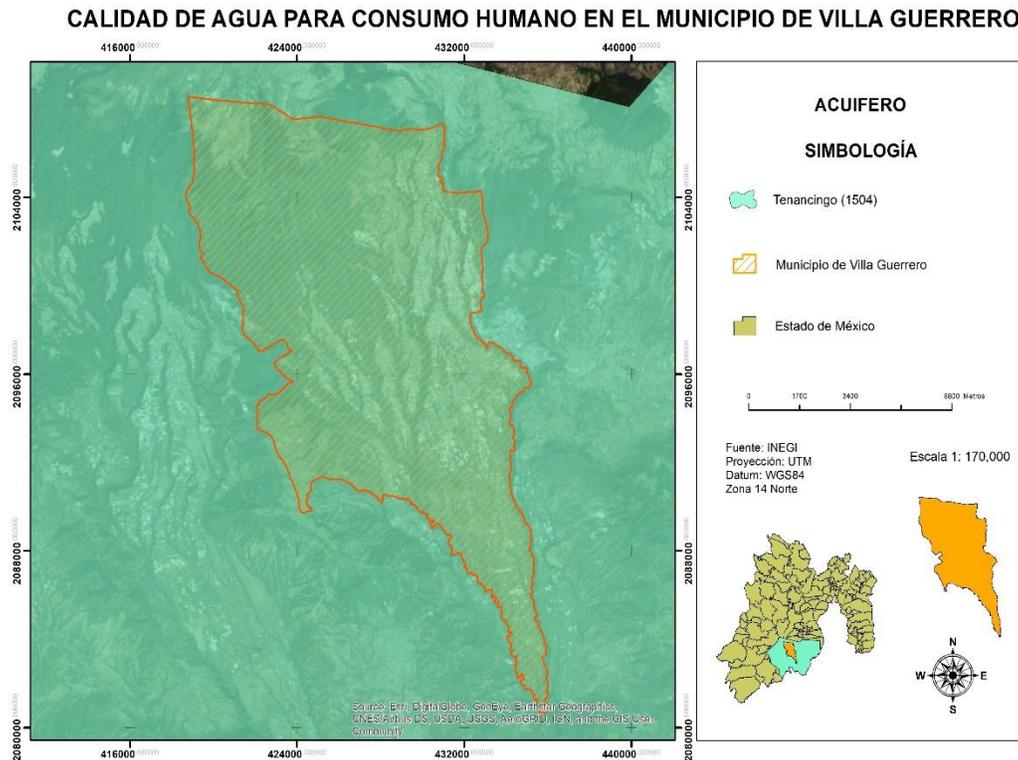


Figura 1. Localización del acuífero 1504. (Fuente: Elaboración propia con información de: INEGI, 2014)

1.4.3. TIPO DE ACUIFERO

Las características geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero tipo libre, también llamados no confinados o freáticos. Los materiales granulares no consolidados no presentan espesores importantes, pero generan horizontes saturados dando lugar a manantiales. Se ha identificado una componente de flujo subterráneo regional caracterizado por aguas termales que afloran en la zona de Ixtapan de la Sal con temperaturas del agua superiores a los 33 °C (Comisión Nacional del Agua, 2011).



1.5. MUNICIPIO DE VILLA GUERRERO

El municipio de Villa Guerrero se encuentra ubicado entre los paralelos 18° 49' y 19° 03' de latitud norte; los meridianos 99° 36' y 99° 45' de longitud oeste; con una altitud entre 1 400 y 3 800 msnm. Colinda al norte con los municipios de Toluca, Tenango del Valle y Tenancingo; al este con los municipios de Tenancingo y Zumpahuacán; al sur con el municipio de Ixtapan de la Sal, al oeste con los municipios de Coatepec Harinas y Toluca, ocupa el 0.94% de la superficie del estado (INEGI, 2009) (Fig.2). Es conocido en el Estado de México y en la nación entera como el municipio líder en producción florícola. Muchos son los elementos físicos que han permitido esa condición de privilegio: propiedades del suelo, recursos hidráulicos y clima (Municipio de Villa Guerrero, 2016).

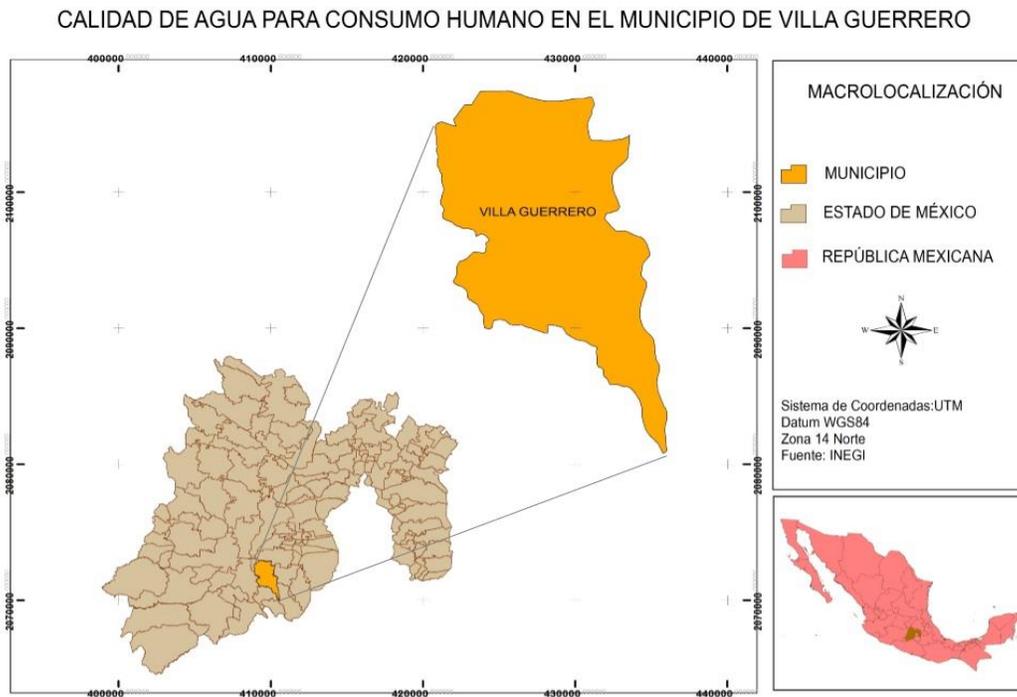


Figura 2. Localización del Municipio de Villa Guerrero. (Fuente: Elaboración propia con información de: INEGI, 2014).



1.5.1. HIDROLOGÍA

El Municipio de Villa Guerrero pertenece la Región Hidrológica del Balsas, comprende las subcuencas Región Grande Amacuzac y a la Región Alto Amacuzac, cruzan la demarcación catorce corrientes de agua de naturaleza perenne, las cuales se mencionan a continuación: Calderón, Cuajimalpa, El Salto, Grande, Los Ocotes, Los Reyes, Los Sabinos, Los Tizantes, Nenetzingo, San Gaspar, San Jerónimo, San Mateo, Tenancingo, y Tintojo. Existen registros de la existencia de corrientes de agua de naturaleza intermitente, y que son denominadas de la siguiente manera: Los Cuervos, El Cebadero, Texcalienco, Tequemilpa, y Los Tizantes (INEGI, 2009).

Información consultada en la carta topográfica publicada por INEGI con número de hoja adyacente E14A58 correspondiente al Municipio de Tenancingo de Degollado, las corrientes superficiales que es posible encontrar dentro de la cabecera municipal de Villa Guerrero se especifican en la **Tabla 11**:

Tabla 11: Corrientes superficiales en la Cabecera Municipal.

HIDROLOGÍA CABECERA MPAL. VILLA GUERRERO					
No.	CARÁCTER	NOMBRE	COORDENADAS UTM		
			SENTIDO	X	Y
1	Perenne	Arroyo El Muerto	Inicio	431458.31 m E	2094501.59 m N
			Final	430955.49 m E	2098186.10 m N
2	Intermitente	Arroyo Paso Hondo	Inicio	433080.70 m E	2094141.68 m N
			Final	431571.58 m E	2096772.13 m N
3	Perenne	Arroyo Los Sabinos	Inicio	432545.83 m E	2097446.22 m N
			Final	431419.14 m E	2098615.94 m N
4	Perenne	Río Texcalienco	Inicio	435204.61 m E	2095719.75 m N
			Final	432268.10 m E	2098770.70 m N
5	Perenne		Inicio	434768.36 m E	2097898.97 m N



MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

HIDROLOGÍA CABECERA MPAL. VILLA GUERRERO					
No.	CARÁCTER	NOMBRE	COORDENADAS UTM		
			SENTIDO	X	Y
		Río La Fábrica	Final	432938.46 m E	2098892.32 m N
6	Perenne	Río Tenancingo	Inicio	434248.82 m E	2094271.87 m N
			Final	435396.05 m E	2095589.43 m N

Fuente: (INEGI, 2014)

El mapa mostrado en la Figura 3 ilustra la hidrología correspondiente a la cabecera municipal de Villa Guerrero, Estado de México.

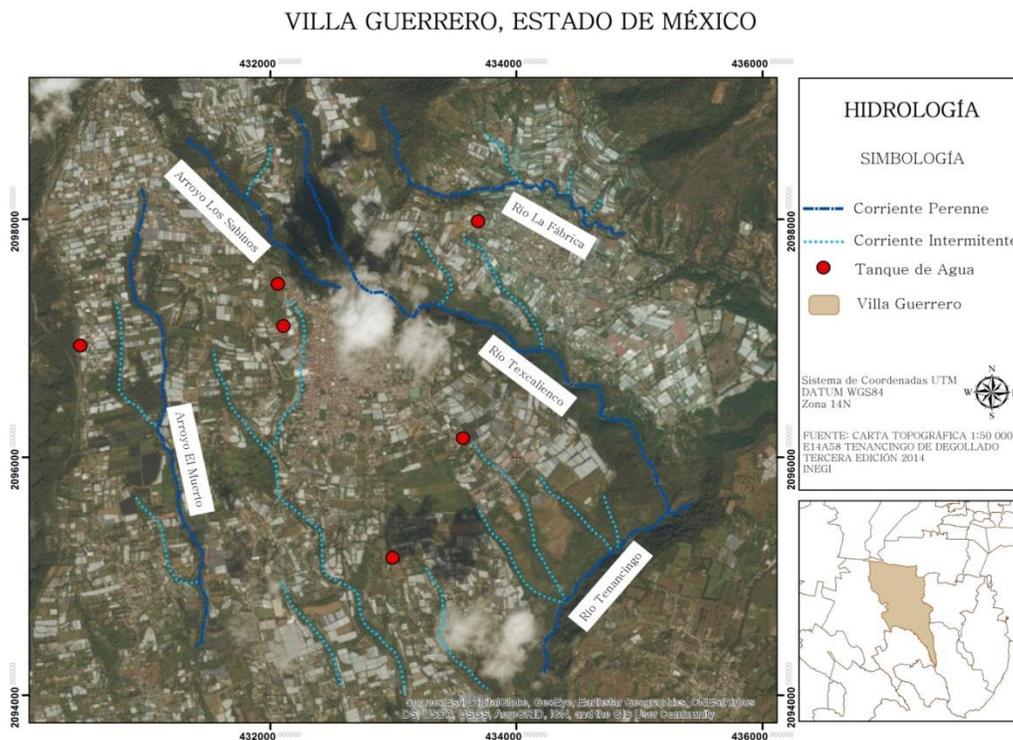


Figura 3: Hidrología (Fuente: Elaboración propia con información de: INEGI, 2014).



1.5.2. CLIMA

El clima que predomina dentro del municipio es el templado sub húmedo, de acuerdo a la clasificación de Koopen, este clima se encuentra dentro del tipo Cw. La **Tabla 12** muestra las temperaturas máximas, media y mínimas de forma anual.

Tabla 12. Rangos de temperatura

Máxima anual (°C)	Media anual (°C)	Mínima anual (°C)
39	18.6	4

Fuente: (Municipio de Villa Guerrero 2016).

En la Figura 4, se muestra que el municipio posee tres zonas perfectamente definidas en las que el clima va cambiando. La zona norte está poblada de bosque mixto mesófilo; tiene un clima templado húmedo Cf, derivado de su posición altimétrica y de su gran cercanía con el cono volcánico del Xinantécatl; en esta zona, las heladas suelen ser severas y eventualmente llega a nevar.

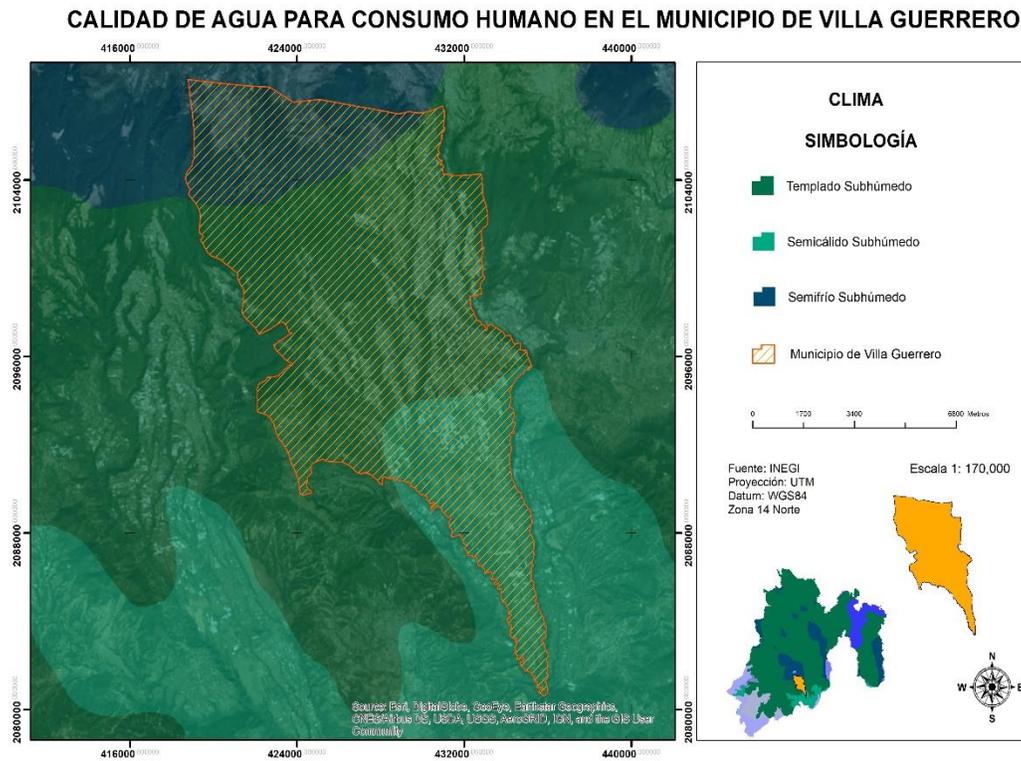


Figura 4: Climas (Fuente: Elaboración propia con información de: INEGI, 2014)

La parte media del municipio posee un agradable clima templado en el que las heladas no hacen daños mayores, sólo cuando provienen de los vientos polares que penetran por el Golfo de México, se elevan en la Sierra Madre Oriental y afectan la masa central del Anáhuac que los lugareños llaman hielo negro del Popocatepetl. A este tipo de clima se le clasifica como Cwbg.

La parte más septentrional del municipio presenta un clima templado, semicálido del tipo Aw, en donde llegan a presentarse las más elevadas temperaturas del territorio municipal y las heladas prácticamente nunca se presentan. (Municipio de Villa Guerrero, 2016).

1.5.3. PRECIPITACIÓN

En condiciones de normalidad, la temporada de lluvias inicia a finales de abril y suele interrumpirse durante mayo, continuando de manera regular y plenamente establecida durante los meses de junio y julio, para hacerse intensa en agosto y septiembre. Las lluvias comienzan a escasear en octubre y noviembre, aunque en ocasiones en diciembre y enero



suelen presentarse algunas lluvias. La precipitación media anual es de 1243 mm. Los vientos dominantes soplan de sureste a noroeste y se presentan durante febrero y marzo, y en noviembre y diciembre, estos últimos generalmente más intensos que los primeros meses del año. Sin embargo, las lluvias suelen venir del sureste ingresando al municipio a partir del sistema montañoso del Nixcongo.

La **Tabla 13** muestra un promedio anual de los días lluviosos, despejados y nublados del municipio de estudio. Este es sólo alguno de los tantos elementos físicos que hacen que Villa Guerrero tenga ventajas naturales para el desarrollo de la agricultura, especialmente la floricultura (Municipio de Villa Guerrero, 2016).

Tabla 13: Precipitación

Lluvia total en 24 horas	Número de días con lluvia	Número de días despejados	Números de días nublados
72 mm	127	168	148

Fuente: (Municipio de Villa Guerrero 2016).

1.5.4. GEOLOGÍA

Las formaciones de la superficie que abarca el municipio son fundamentalmente cerros, barrancas, pequeños valles, así como lomeríos (Municipio de Villa Guerrero, 2016). El periodo de formación de las rocas comprende la siguiente distribución: El 85.54 % en el Neógeno, el 4.86% en el Paleógeno, el 3.11% en el Cuaternario, el 2.67% no dispone de información, y el 0.01% en el Cretácico. La naturaleza de las rocas es descrita de la siguiente manera (INEGI, 2009):

- Sedimentarias: arenisca- conglomerado (39.5%), brecha sedimentaria (27.65%), y caliza (0.01%).
- Ignea extrusiva: andesita (13.09%, volcanoclástico (5.3%), toba ácida (4.86%) y basalto (0.01%).
- Metamórfica: metasedimentaria (2.67%)
- Suelo: aluvial (1.66%)



1.5.5. EDAFOLOGIA

La distribución de suelo en el municipio de Villa Guerrero, Estado de México presenta el siguiente comportamiento, dominando el suelo tipo andosol (**Tabla 14**). (INEGI, 2009):

Tabla 14 Caracterización del tipo de suelo de la región de estudio.

Suelo dominante	Porcentaje de distribución
	Andosol 37.35 %
	Vertisol 20.39 %
	Cambisol 15.44 %
	Phaeozem 7.97 %
	Regosol 6.43 %
	Luvisol 6.3 %
	Leptosol 2.31%

Fuente: (INEGI 2009).

1.5.6. FLORA

En Villa Guerrero existe una gran variedad de flora silvestre y de flora cultivada, la **Tabla 15** presenta algunos ejemplos de las flores de ornato cultivadas en esta región. (Municipio de Villa Guerrero, 2016).



Tabla 15: Tipo de flora

Tipo	Nombre
Flora	Azucenas del río
	Flor de mayo
	Vergonzosa
	Violetas
Flores de ornato	Margarita
	Vara de San José
	Lirio acuático
	Catarinas
	Rosas
	Ave del paraíso
	Clavel
	Lilies
Crisantemo	
Polar	
Gladiola	
Pompón	
Gerbera	
Margarita	

Fuente: (Municipio de Villa Guerrero, 2016).

1.5.7. USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

El uso de suelo en el municipio de Villa Guerrero está dado por la agricultura, tanto de riego como temporal, cuenta con áreas de pastizal inducido, bosques de encino, pino, oyamel y táscate, asimismo se conjuntan con zonas urbanas, que constituyen al municipio (Municipio de Villa Guerrero, 2016). La Figura 5 ilustra el uso de suelo y la vegetación que prevalece en el municipio.



CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN EL MUNICIPIO DE VILLA GUERRERO

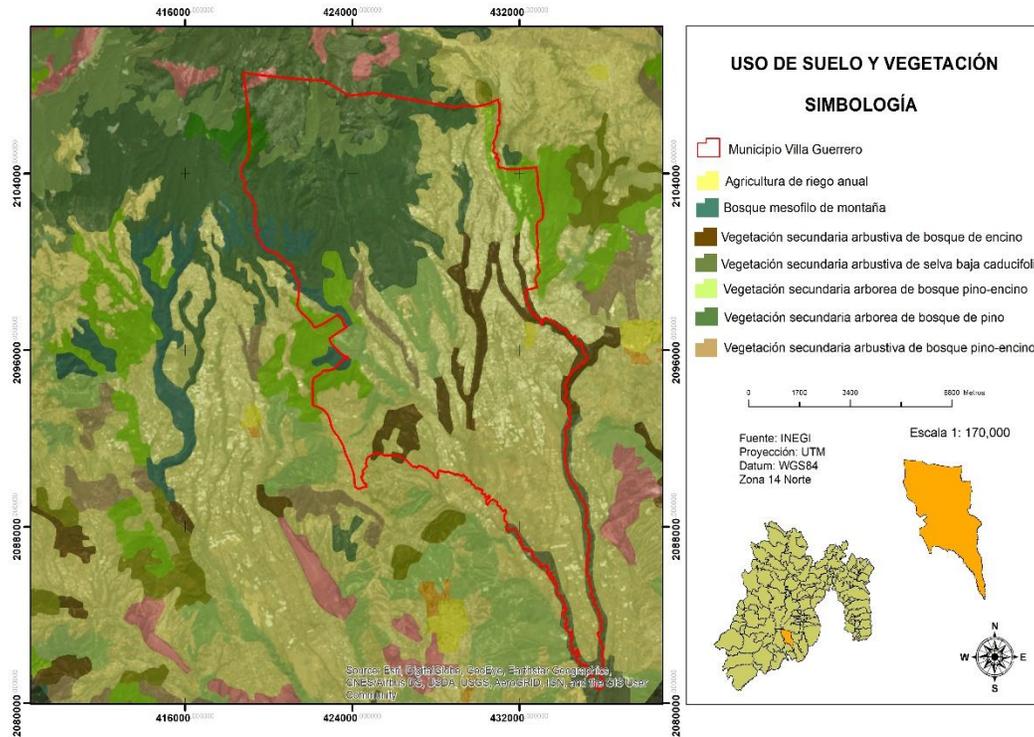


Figura 5: Uso de suelo y vegetación (Fuente: Elaboración propia con información de: INEGI, 2014)

De acuerdo con el Prontuario de Información Geográfica el porcentaje de distribución es presentado en la **Tabla 16**, siendo la actividad agrícola, la que mayormente destaca:

Tabla 16: Tipo de flora

	Porcentaje de distribución en el territorio municipal
Uso de suelo y vegetación	Agricultura 55.45 %
	Zona urbana 3.81%
	Bosque 37.25 %
	Selva 2.94 %
	Pastizal 0.55%

Fuente:(INEGI ,2009)



1.6. FUENTES DE ABASTECIMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE AGUA

Se define como fuente de abastecimiento al punto o fase del ciclo natural del agua, del cual se desvía o capta un flujo de manera temporal con la finalidad de darle un cierto uso, para posteriormente regresarlo a la naturaleza (Henry, J.G.; Heinke, 1999). Es preciso aclarar que este volumen puede o no ser descargado a su fuente original, y esto dependerá de la forma en la cual son dispuestas las aguas residuales. La calidad y cantidad del agua procedente de aguas superficiales y subterráneas, las dos fuentes principales, experimentan la influencia de la geografía, el clima, y las actividades humanas. Las aguas subterráneas generalmente se pueden aprovechar con poco o nulo tratamiento, en contraparte; el agua superficial suele necesitar tratamientos extensos, en especial si existe presencia de cualquier tipo de contaminación (Henry, J.G.; Heinke, 1999)

Las aguas subterráneas son aquellas que se almacenan o permanecen por debajo de la superficie terrestre formadas a través de un proceso de filtración. Se dice que las formaciones de suelo y roca que se han saturado de líquido son conocidos como depósitos de agua subterránea o acuíferos, de donde normalmente es extraída a través de la perforación de pozos. El tamaño de poro, la viscosidad del agua, y otros factores se amalgaman para limitar la velocidad a la cual el agua se mueve a través del suelo para rellenar el pozo. Las aguas superficiales tienen su origen en ríos y lagos, generalmente se utilizan como importantes fuentes de abastecimiento de aguas públicas en virtud de las altas tasas de extracción que soportan normalmente (Henry, J.G.; Heinke, 1999).

Las fuentes de agua superficial representan el eje dentro del desarrollo de los seres humanos, permiten el abastecimiento para las diferentes actividades socioeconómicas llevadas a cabo en los asentamientos poblacionales; y paradójicamente, muchas de estas actividades causan alteración o el deterioro de las mismas. En general, las aguas superficiales están sometidas a contaminación natural (arrastre de material particulado, disuelto, con presencia de materia orgánica natural (MON) y de origen antrópico (descargas de aguas residuales domésticas, escorrentía agrícola, efluentes de procesos industriales, entre otros) (Torres, Patricia. Cruz, Camilo. Patiño, 2009).



1.6.1. FUENTES DE ABASTECIMIENTO EN EL MUNICIPIO DE VILLA GUERRERO

De acuerdo al reporte de recarga de reactivos de gas cloro y/o hipoclorito de sodio, proceso realizado por la Comisión del Agua del Estado de México a través de la Gerencia Regional de Coatepec Harinas, en el municipio de Villa Guerrero se cuenta con un total de treinta y seis fuentes de abastecimiento para la distribución del líquido. Esta información es posible consultarla en la sección de Anexos.



CAPÍTULO 2
HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y
JUSTIFICACIÓN



CAPÍTULO 2. HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

2.1 HIPÓTESIS

El Índice de la Calidad del agua obtenido a partir de la determinación de parámetros físicos, químicos, y microbiológicos; establece si las fuentes de abastecimiento de agua destinadas hacia el consumo humano en el municipio de Villa Guerrero, han sido impactadas por las actividades antropogénicas desarrolladas en la región, propiciando una propuesta de estrategias que permitan mejorar la calidad del agua, basados en los criterios establecidos por la normatividad vigente.



2.2 OBJETIVO GENERAL

Evaluar cuatro distintos modelos de Índice de calidad de agua en ocho sitios utilizados como fuentes de abastecimiento para la extracción de agua potable en el Municipio de Villa Guerrero durante el periodo comprendido entre los meses de septiembre 2018- mayo 2019.

2.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Establecer los puntos de muestreo con base en lo estipulado en el “Reporte de recarga de reactivos de gas cloro y/o hipoclorito de sodio realizado por la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM)”, contemplando las treinta y seis fuentes de abastecimiento del municipio de Villa Guerrero.
- b. Diseñar el programa de muestreo en función de las características del sitio.
- c. Determinar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos correspondientes a los modelos de índice de calidad de agua seleccionados.
- d. A través de la metodología propuesta por cada uno de los 4 modelos, calcular el índice de la calidad del agua sobre las fuentes de abastecimiento seleccionadas.
- e. En función de los resultados obtenidos, proponer estrategias de rehabilitación para el restablecimiento de la calidad del agua, cuando el cálculo del índice refleje valores por debajo de 80 con respecto a la escala de clasificación.



2.3 JUSTIFICACIÓN

A través de la historia de la humanidad, la calidad del agua utilizada para consumo humano determina el bienestar de las poblaciones. Las enfermedades derivadas de un “agua potable” contaminada por materia fecal puede diezmar ciudades enteras, incluso actualmente; el agua insalubre que ha sido contaminada por factores naturales o actividades humanas, impactando directamente en la salud de los grupos poblacionales que se ven obligados a utilizarla, tanto para beber como para la irrigación de hortalizas. Actualmente existe evidencia de epidemias ocasionales, conocidas como enfermedades bacterianas y virales propiciadas por agentes infecciosos transportadas en el agua, tales como el cólera, o la hepatitis, etc. En los países tecnológicamente desarrollados este tipo de problemáticas se encuentran perfectamente controladas y erradicadas (UNEP, 2008).

Hoy en día, la mayor preocupación sobre la seguridad del agua recae sobre la presencia potencial de contaminantes químicos, los cuales pueden incluir la presencia de metales pesados, además de productos con naturaleza orgánica e inorgánica. El origen para este tipo de contaminación procede principalmente de las actividades humanas; la generación de aguas residuales de naturaleza industrial - municipal, y la escorrentía en terrenos agrícolas, son sólo algunas de las fuentes que impactan directamente en la calidad del agua que se recircula en un acuífero (Manahan, 2007).

Los requisitos para la calidad de agua son establecidos en función del uso al cual será destinada, generalmente es posible ajustar su calidad con base en estándares físicos, químicos y microbiológicos fijados por el mismo usuario. Específicamente para el abasto público, se presenta un especial cuidado con sabores, olores, colores, y turbidez, en parte porque dan mal sabor al agua potable; por ejemplo, sabores y olores deben su presencia a sustancias químicas volátiles y materia orgánica en descomposición, por otro lado; la coloración puede presentarse por la presencia de minerales como el hierro o manganeso. Se dice que las fuentes de abastecimiento de agua superficial varían en cuanto a turbidez desde 10 hasta 1,000 unidades nefelométricas de turbidez (UNT), los ríos bastante opacos pueden presentar valores de hasta 10,000 UNT (Henry, J.G.; Heinke, 1999).



MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Los múltiples compuestos químicos disueltos en el agua pueden ser de origen natural o antrópicos (industrial, agrícola, y domésticos), y ser benéficos o dañinos de acuerdo con su composición y concentración. Con base en lo anterior, se realizó una evaluación para determinar si las actividades antropogénicas desarrolladas en el Municipio de Villa Guerrero, Estado de México impactan de manera directa o indirecta sobre los escurrimientos y/o corrientes superficiales que suministran agua potable a la población, paralelamente; se pretende establecer un antecedente que permita clasificar la calidad del agua, sugiriendo los usos más adecuados para cada punto de muestreo, y en su caso, proponer un método de tratamiento adecuado para muestras con índice de calidad bajo.



CAPÍTULO 3
DISEÑO EXPERIMENTAL



CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Las etapas para la realización del proyecto se resumen en el siguiente diagrama:

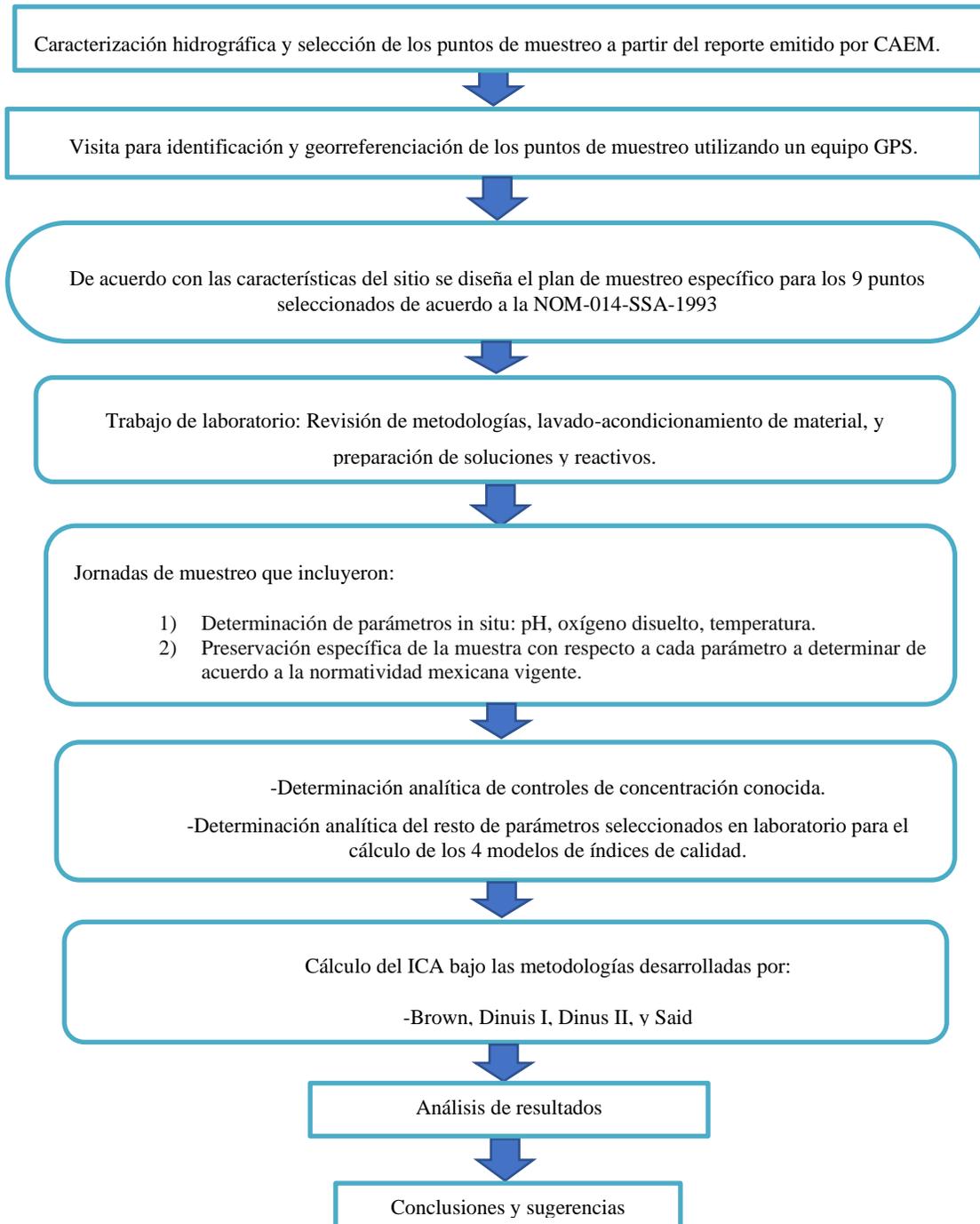


Figura 6: Diagrama de flujo del desarrollo experimental.



3.1 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.1 SELECCIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO

La caracterización de la zona de estudio fue posible a partir de la consulta del Plan Municipal de Desarrollo Urbano del Municipio de Villa Guerrero 2016, y complementariamente la revisión del Prontuario de Información Geográfica correspondiente. Adicionalmente se tomó como referencia la información proporcionada por la CAEM (**que es posible consultar en la sección de anexos de este documento**), se realizaron visitas para georeferenciar 9 tanques de regulación los cuales representan el eje temático de este proyecto de investigación. La selección de cada uno de ellos es sugerida por el Ing. Gregorio Salinas, director del Organismo de Agua Potable y Alcantarillado del municipio tomando como principal criterio que el tanque se encuentre ubicado dentro de la zona de invernaderos. La **Tabla 17** presenta la georreferenciación de las fuentes de abastecimiento seleccionadas.

Tabla 17: Coordenadas geográficas de los sitios de muestreo.

No	Nombre de la fuente	Coordenadas UTM	
1	La Estrella/ San Francisco I	14 Q 431465.00 m E	2096959.00 m N
2	Buenavista/Buenavista 2	14 Q 430509.00 m E	2096660.00 m N
3	La Estrella/ La Joya	14 Q 431088.00 m E	2098567.00 m N
4	Manantial El Coponial y Pozo Profundo	14 Q 432130.00 m E	2097450.00 m N
5	Los Fresnos/ Cabecera Municipal	14 Q 432130.00 m E	2097450.00 m N
6	El Jicote- Zacango I	14 Q 424145.00 m E	2101377.00 m N
7	El Jicote- Zacango III	14 Q 424095.00 m E	2101377.00 m N
8	San Francisco II	14 Q 431312.00 m E	2096456.00 m N
9	San Francisco III	14 Q 431686.00 m E	2095352.00 m N

Fuente: (Elaboración propia con información proporcionada por la Comisión del Agua del Estado de México, Gerencia Regional de Coatepec Harinas, 2018).

A partir de la georreferenciación de los tanques de regulación, el mapa de la Figura 7 ilustra la ubicación de cada uno de ellos dentro del territorio municipal.

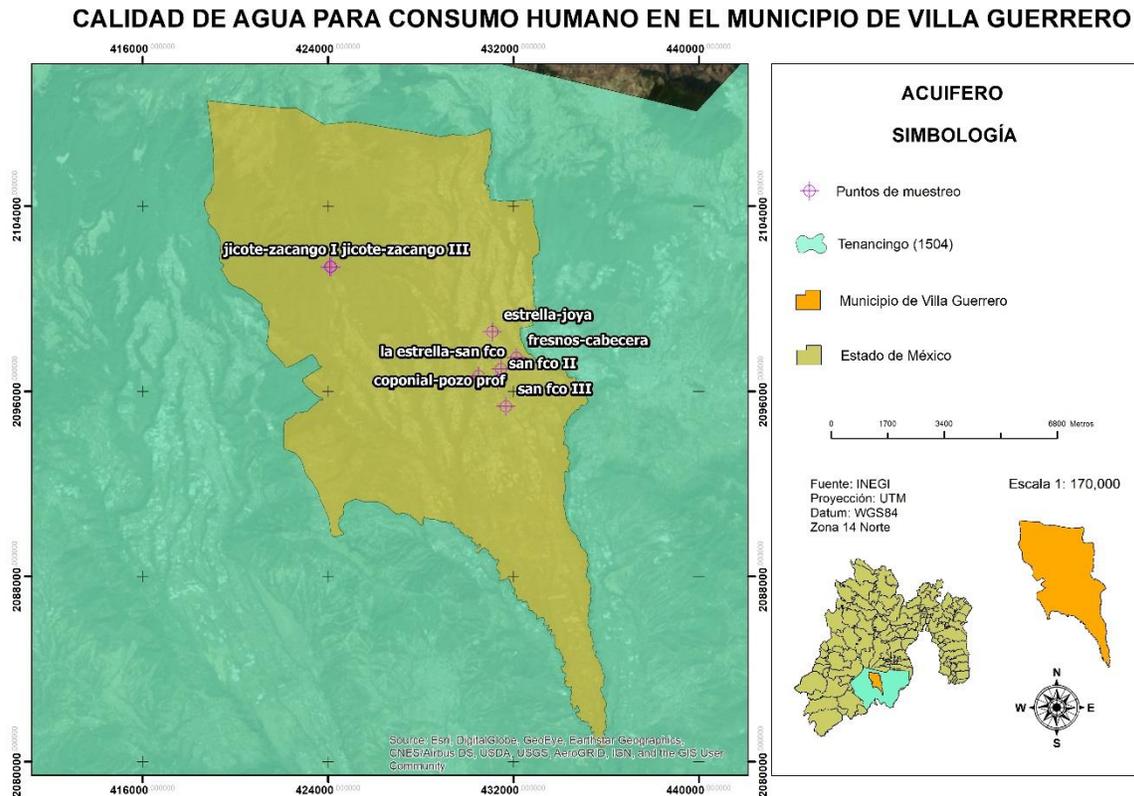


Figura 7: Ubicación de los puntos de muestreo (Fuente: Elaboración propia con información de: INEGI, 2014).

3.5. 2 MUESTREO

Los muestreos se llevaron a cabo conforme a lo establecido en la norma mexicana NOM-014-SSA-1993, en la cual se describen los lineamientos generales y recomendaciones sanitarias para efectuar las actividades de muestreo de agua para consumo humano en sistemas de abastecimiento públicos y privados, con el objetivo de medir y determinar sus características físicas, químicas y microbiológicas.

Se realizaron dos jornadas de muestreos en los sitios seleccionados, uno en temporada de lluvias y el otro en temporada de estiaje, el periodo de tiempo que se contempla comprendió



los meses de octubre del 2018 y mayo del 2019. La **Tabla 18** muestra la distribución de las jornadas de muestreo.

Tabla 18. Descripción de las jornadas de muestreo

Sitio de Muestreo	Primera jornada de muestreo	Horario	Segunda jornada de muestreo	Horario
San Francisco I	25/10/2018	9:35:00 a.m	13/05/2019	12:00:00 a.m
Buenavista	25/10/2018	10:35:00 a.m	13/05/2019	10:40:00 a.m
Estrella - La Joya	25/10/2018	11:25:00 a.m	13/05/2019	10:15:00 a.m
Coponial	25/10/2018	12:00:00 p.m	13/05/2019	13:55:00 p.m
Los Fresnos	25/10/2018	12:10:00 p.m	13/05/2019	13:46:00 p.m
El Jicote- Zacango III (La alta)	08/11/2018	10:20:00 am	13/05/2019	8:25:00 am
Los Hoyos-Zacango II(La baja)	08/11/2018	10: 35:00 a.m	13/05/2019	8: 40:00 a.m
San Francisco II	08/11/2018	13:00:00 p.m	13/05/2019	12:20:00 p.m
San Francisco III	08/11/2018	13:30:00 p.m	13/05/2019	12:45:00 p.m

Fuente: (Elaboración propia)

3.1.2 PREPARACIÓN DE RECIPIENTES

Se acondicionaron recipientes para parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, además de una probable especiación de metales de acuerdo al siguiente procedimiento:

Parámetros fisicoquímicos: Se consideraron recipientes de plástico con capacidad para 1 L y tapa de rosca hermética, los cuales fueron lavados con extrán, se enjuagaron con abundante agua y se sumergieron en una solución de ácido clorhídrico al 5%, finalmente se enjuagaron con agua desionizada y se secaron al ambiente. Para el caso particular de grasas y aceites, se utilizaron recipientes de vidrio, fueron lavados con extrán y enjuagados con hexano.

Parámetros microbiológicos: Se consideraron envases de vidrio de aproximadamente de 300 mL, con resistencia al proceso de esterilización, tapón de rosca y boca ancha para permitir el correcto llenado.

Metales: Se emplearon recipientes de plástico con capacidad de 100 mL, el procedimiento de lavado es exactamente igual al que se realizó para los fisicoquímicos, a los cuales se les agregaron unas gotas de ácido nítrico como conservador al llegar al laboratorio.



3.4.3 TOMA DE MUESTRA

Para la realización del muestreo se llevó el control de la información obtenida en una bitácora, registrando lugar, fecha, y hora de muestreo.

- a) Análisis microbiológicos: Se utilizó el flujo de agua antes de llegar al proceso de cloración. Sobre la parte externa de la tubería, se realizó limpieza a través de una torunda impregnada con alcohol, el flujo de agua fue intenso y no fue posible disminuirlo para realizar la limpieza interna. Posteriormente, con dos lámparas de alcohol sólido se flamearon ambos costados de la salida del agua, se tomó la muestra de agua en una sola exhibición, también se flameó la boquilla del recipiente y el tapón, concluyendo con el cerrado del mismo. Finalmente, el recipiente se ingresó a la hielera y se cubrió de hielo inmediatamente.
- b) Análisis fisicoquímicos: Se enjuagaron los recipientes con el agua a muestrear tres veces, y se procedió a tomar la muestra. Para grasas y aceites la toma de muestra fue directamente.
- c) Análisis de metales: La toma se realizó de igual manera que para los parámetros fisicoquímicos, se adicionó ácido nítrico al llegar al laboratorio.

3.2 ANÁLISIS DE LABORATORIO

Los análisis fisicoquímicos y microbiológicos fueron realizados bajo los procedimientos establecidos en la Normatividad Mexicana, para algunos parámetros, específicamente los volumétricos; se utilizó el esquema de microescala y paralelamente se empleó el manejo de controles con concentración conocida, los cuales fueron tratados como una muestra más al realizar los análisis con el objetivo de dar confiabilidad a los resultados. La **Tabla 19** muestra la comparación entre el volumen de muestra utilizado por las NOM y el volumen que se utilizó en el esquema de la microescala, con la finalidad de disminuir costos de reactivos y facilitar el transporte de muestras hasta el laboratorio.



Tabla 19: Volumen de muestra utilizado en la microescala

Parámetro	Volumen real requerido	Volumen requerido por la microescala	Norma
Color	100 mL	10 mL	NMX-AA-045-2001
Conductividad	500 mL	10 mL	NMX-AA-093-SCFI-2000
Turbidez	100 mL	10 mL	NMX-AA-038-SCFI-2001
Alcalinidad	50 mL	10 mL	NMX-AA-036-SCFI-2001
Temperatura	500 mL - 1 L	50 mL	NMX-AA-007-SCFI-2013
pH	500 mL	10 mL	NMX-AA-008-SCFI-2016
Dureza	100 mL	10 mL	NMX-AA-072-SCFI-2001
Sólidos	1 L	100 mL	NMX-AA-034-SCFI-2015
Cloruros	100 mL	10 mL	NMX-AA-073-SCFI-2001
Sulfatos	100 mL	10 mL	NMX-AA-074-2014
Oxígeno disuelto	300 mL	300 mL	NMX-AA-012-SCFI-2001
DBO	1 L	100 mL	NMX-AA-028-SCFI-2001
DQO	10 mL	2 mL	METODO HACH
Grasas y aceites	1 L	1 L	NMX-AA-039-SCFI-2001
Nitratos	100 mL	2 mL	MÉTODO HACH
Nitritos	100 mL		
Nitrógeno	250 mL		MÉTODO HACH
Nitrógeno-amoniaco	50 mL	2 mL	
Nitrógeno-orgánico	250 mL		
Fósforo total	100 mL		NMX-AA-029-SCFI-2001
Fósforo soluble	100 mL	50 mL	
Fósforo hidrolizable	10 mL		
Sustancias activas al azul de metileno	600 mL	50 mL	NMX-AA-005-SCFI-2013
Coliformes totales y fecales	200 mL	200 mL	NMX-AA-042-SCFI-2015

Fuente: (Elaboración propia).



3.2.1 DETERMINACIONES ANALÍTICAS

3.2.1.1 Alcalinidad

La NMX-AA-036-SCFI-2001 indica que alcalinidad se refiere a la presencia de sustancias hidrolizables en agua y que como producto de hidrólisis generan el ion hidroxilo (OH⁻), tales como las bases fuertes, y los hidróxidos de metales alcalinotérreos. Contribuyen también en forma importante a la alcalinidad, los carbonatos y fosfatos. La presencia de boratos y silicatos en concentraciones altas también contribuyen a la alcalinidad del medio.

Para la determinación de alcalinidad se colocaron 10 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer de 50 ml, se adicionaron 2 gotas de la solución indicadora de fenolftaleína, como no se presentó un cambio en la coloración de la muestra, se adicionaron dos gotas de solución indicadora de naranja de metilo, posteriormente la muestra se tituló con una solución de ácido sulfúrico de concentración 0.0196 N hasta obtener el punto de equilibrio (viraje de naranja hacia amarillo canela). Finalmente, se registró el volumen utilizado del agente titulante y se realizaron los cálculos correspondientes mediante la siguiente expresión:

$$\text{Alcalinidad total como CaCO}_3 \text{ (mg/L)} = \frac{(A*B)*50*1000}{V} \text{ --- --- --- --- --- } 7$$

Donde:

A: Volumen del H₂SO₄ utilizado

B: Normalidad de la disolución de H₂SO₄

V: Volumen de la muestra en mL

3.2.2.2 Dureza

La NMX-072-SCFI-2001 describe que el método se basa en la formación de complejos por la sal disódica del ácido etilendiaminotetraacético con los iones calcio y magnesio. El método consiste en una valoración empleando un indicador visual de punto final, el negro de eriocromo T, que es de color rojo en la presencia de calcio y magnesio y vira a azul cuando estos se encuentran acomplejados o ausentes.



Para la determinación de la dureza total en el agua se colocaron 10 ml de muestra en un matraz Erlenmeyer de 50 ml, se adicionó 1 ml de solución amortiguadora para incrementar el pH, posteriormente se adicionó 0.2 g del indicador eriocromo negro T, en este punto la muestra adquirió la coloración vino rojiza. La muestra fue titulada con una solución de EDTA con una concentración 1 M hasta alcanzar el punto de equilibrio (vire de vino rojizo hasta alcanzar el azul turquesa). Finalmente, se registró el volumen utilizado del agente titulante y se realizaron los cálculos correspondientes mediante la ecuación 8:

$$\text{Dureza total como CaCO}_3 \text{ (mg/L)} = \frac{(A * C) * 1000}{V} \text{ --- 8}$$

Donde:

A: Volumen de EDTA utilizado

C: Factor de equivalencia

V: Volumen de la muestra en mL

3.2.2.3 Cloruros

La **NMX-AA-073-2001** especifica que la determinación de cloruros por el método argentométrico se basa en una valoración con nitrato de plata utilizando como indicador cromato de potasio. La plata reacciona con los cloruros para formar un precipitado de cloruro de plata de color blanco.

Para la determinación se utilizaron 10 ml de muestra y se colocaron en matraces Erlenmeyer de 50 ml, se adicionaron 0.5 mL de solución indicadora de cromato de potasio, y se tituló con una solución de nitrato de plata de concentración 0.0114 N, hasta alcanzar el punto de equilibrio (vire de amarillo a naranja rojizo en presencia de un precipitado blanco), es importante mantener un criterio constante en este punto. Finalmente, se registró el volumen utilizado del agente titulante y se realizaron los cálculos correspondientes mediante la ecuación 9:



$$\text{Cloruros (mg/L)} = \frac{(A - B) * N * (35.45) * (1000)}{V} \text{ --- 9}$$

Donde:

A: Volumen de nitrato de plata en solución utilizado en la titulación de la muestra

B: mL de nitrato de plata en solución utilizado en la valoración del blanco

N: Normalidad del nitrato de plata

V: Volumen de la muestra en mL

Nota: No fue necesario realizar el ajuste de pH, las muestras presentaron valores por arriba de 7.

3.2.2.4 Nitratos

La determinación de este parámetro se llevó a cabo empleando el test Hach para nitratos, método de reducción del cadmio con un rango de concentración de 0 a 30.0 mg/L de $\text{NO}_3\text{-N}$ método 8039.

3.2.2.5 Nitrógeno amoniacal

La determinación de este parámetro se llevó a cabo empleando el test Hach para nitrógeno – Amonio, método del salicilato con un rango de concentración de 0.4 a 50.0 mg/L de $\text{NH}_3\text{-N}$, método 10031.

3.2.2.6 Oxígeno disuelto

La **NMX-012-SCFI-2001** lo define como, la cantidad de oxígeno que se encuentra disuelto en el agua, la concentración de oxígeno disuelto (OD) generalmente es medida en partes por millón (ppm) o en mg/L, su presencia es esencial para la conservación de reservorios saludables, generalmente; un nivel alto indica agua de mejor calidad, esta cualidad permite dar soporte a la vida animal y vegetal. Los niveles de OD en aguas naturales, residuales y residuales tratadas dependen de las actividades químicas, físicas y bioquímicas en los cuerpos de agua.



La determinación de oxígeno disuelto para las muestras se llevó a cabo a través del método electrométrico, las lecturas se llevaron a cabo con el apoyo de un oxímetro de la marca YSI modelo 5100 previamente calibrado. El procedimiento consistió en llenar con muestra un frasco winkler (300 ml), posteriormente se introduce el electrodo, se enciende el dispositivo de agitación, es en este momento donde comienza la medición, esperando la estabilización en la lectura registrando el valor final.

3.2.2.7 Análisis microbiológicos

La **NOM-112-SSA1-1994** establece un método para la determinación y enumeración en agua de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli* presuntiva mediante el cultivo en un medio líquido sobre múltiples tubos, donde el cálculo se basa en la metodología de la determinación del número más probable (NMP). Este método, permite analizar los coliformes desarrollados a partir de una fermentación al interior de los tubos.

El procedimiento a seguir se describe a continuación:

- Se determinó el número de tubos a utilizar en función del número de muestras a analizar.
- Se lavaron perfectamente tubos, campanas de Durham, y pipetas de 10,1 y 0.1 mL.
- Se preparó el caldo de cultivo, para posteriormente, llenar cada uno de los tubos con 10 mL de esta solución.
- Se esterilizaron tubos y pipetas en autoclave.
- Considerando que cinco tubos representan una serie, se procedió a la siembra de la muestra (prueba tentativa). Para cada muestra se utilizaron 3 series, la primera con 10 mL, la segunda con 1 mL, y la tercera con 0.1 mL.
- La siembra se realizó sobre una campana de flujo laminar, utilizando dos lámparas de alcohol a los costados, esto con el fin de esterilizar tanto el área de trabajo, así como el asa bacteriológica, garantizando de esta manera condiciones asépticas.
- Luego, los tubos fueron incubados a una temperatura de 35 ± 0.5 °C por un lapso de 48 horas.



- Al finalizar este periodo se extrajeron los tubos de la incubadora, verificando formación de gas al interior del mismo, su presencia nos indicó presencia de organismos coliformes, por lo cual fue necesario realizar la prueba confirmatoria resembrando en caldo de bilis verde brillante y E.Coli, y volviendo a incubar por un nuevo periodo de 48 horas.
- La ausencia de gas durante la prueba tentativa indica que nuestro ensayo es negativo.
- Cualquier presencia de gas al finalizar el periodo de incubación de la prueba confirmatoria, indica presencia de organismos coliformes, los cuales son contados como coliformes totales cultivados en el caldo verde brillante, y fecales para el caldo E. Coli.

3.2.2.8 Color

La **NMX-AA-045-2001** indica que el color en agua puede deberse a la presencia del contenido natural de metales o iones metálicos en disolución, humus o residuos orgánicos, plancton o desechos industriales. Por lo general se elimina el color para cualquier propósito de uso del agua. Es por ello, importante la determinación de color en aguas naturales.

Para la determinación del color en las muestras se utilizó el apoyo de un espectrofotómetro de la marca Hach modelo DR 5000, se eligió el programa que se encuentra bajo una longitud de onda de 455 nm, con unidades de medición Pt-Co, y se utilizó como blanco agua desionizada.

3.2.2.9 Turbidez

La **NMX AA-038-SCFI-2001** especifica que la turbidez en agua se debe a la presencia de partículas suspendidas y disueltas. Materia en suspensión como arcilla, cieno o materia orgánica e inorgánica finamente dividida, así como compuestos solubles coloridos, plancton y diversos microorganismos. La transparencia del agua es muy importante cuando está destinada al consumo del ser humano, a la elaboración de productos destinados al mismo y a otros procesos de manufactura que requieren el empleo de agua con características específicas, razón por la cual, la determinación de la turbidez es muy útil como indicador de



la calidad del agua, jugando un papel muy importante en el desempeño de las plantas de tratamiento de agua.

La determinación de este parámetro fue realizada utilizando un turbidímetro de la marca Thomas Scientific modelo 550, previamente calibrado, y utilizando como blanco agua desionizada.

3.2.2.10 Conductividad eléctrica

La **NMX-093-2000** la define como una expresión numérica que permite cuantificar la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura. La determinación de conductividad es de gran importancia pues da una idea del grado de mineralización del agua natural, potable, residual, residual tratada, de proceso o bien del agua para ser usada en el laboratorio en análisis de rutina o para trabajos de investigación.

La determinación de este parámetro fue realizada con el apoyo de un conductímetro de la marca Thermo Scientific Orion Star modelo A 212, el cual fue calibrado con soluciones patrón específicas para conductividad.

3.2.2.11 pH

Conceptualmente la **NMX-AA-008-SCFI-2000** indica que pH en fase acuosa se define como el logaritmo negativo de la actividad del ion hidronio (protón hidratado, H⁺): $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$. De esta definición no puede inferirse directamente el procedimiento de medición de esta magnitud debido a que no es posible determinar de manera experimental la actividad de iones individuales.

A una temperatura especificada, la determinación del pH proporciona un valor característico relacionado con el nivel de acidez intrínseca de la disolución examinada. Por el procedimiento de asignación del valor de pH a las disoluciones patrón, pH(P), se puede considerar que el pH de una disolución es un número representativo de la actividad del ion hidronio y en disoluciones cuyas concentraciones en electrólitos sean más pequeñas que 0,01



M, el valor del pH difiere poco del logaritmo del valor numérico de la concentración de protones hidratados, expresada en mol/L.

La medición del parámetro en campo se realizó utilizando un potenciómetro de campo (marca Hanna modelo HI98331) calibrado a tres puntos con soluciones patrón de valores 4, 7, y 10. Para tener un mayor control de esta variable, se realizó la medición en laboratorio utilizando un potenciómetro de la marca Oakton, con un electrodo Ion 700, previamente calibrado de nuevo a tres puntos, donde para la obtención del valor final se promediaron los valores obtenidos en campo y laboratorio.

3.2.2.12 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

La **NMX-AA-028-SCFI-2001** describe el método a seguir, y se basa en medir la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para efectuar la oxidación de la materia orgánica presente en aguas naturales y residuales y se determina por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto al cabo de cinco días de incubación a 20°C. Para la determinación de oxígeno disuelto (OD) se puede emplear cualquiera de los dos métodos establecidos en la norma mexicana **NMX-AA-012-SCFI**.

La metodología utilizada para la siembra de microorganismos presentes en la muestra de agua se describe a continuación:

- Agua de dilución: Para fines experimentales se prepararon 4 litros añadiendo por cada litro de agua 1 mL de cada una de las siguientes disoluciones: disolución de sulfato de magnesio, disolución de cloruro de calcio, disolución de cloruro férrico y disolución amortiguadora de fosfatos, posteriormente se saturó con oxígeno aireando con aire filtrado, garantizando nula presencia de materia orgánica durante 60 minutos.
- Disolución patrón de glucosa-ácido glutámico. El proceso consistió en introducir a la estufa 50 g de glucosa y 50 g de ácido glutámico a 103°C durante una hora, acto seguido; introducir al desecador hasta perder la totalidad de temperatura alcanzada. Posteriormente, se pesaron con precisión 0.03 g de glucosa y 0.03 g de ácido glutámico, se diluyeron en agua y aforaron a 200 mL. Esta solución se preparó



inmediatamente antes de usarla. Esta disolución es considerada un control con un valor de DBO₅ de 198 mg/L.

- Preparación del inóculo: Se pesó el contenido de una cápsula de inóculo liofilizado en un vaso de precipitados (0.1832g), el peso total de esta cápsula permite la preparación de 500 mL de inóculo. En virtud de reducir el consumo y la disminución en la generación de residuos sólo se utilizaron 100 mL de esta solución, se realizaron los cálculos para escalamiento y se pesaron 0.0366 g, el resto del inóculo se tapó con parafilm, se etiquetó peso y tipo de material, y posteriormente fue almacenado en un desecador.
- Activación del inóculo y siembra: Para activar los microorganismos provenientes del inóculo, se tuvo que airear la solución por espacio de al menos 30 minutos; posteriormente se retiró la aireación y se dejó reposar la solución, al finalizar el tiempo de reposo se decantó el sobrenadante y se le adicionaron 12 mL al agua de dilución (3ml de solución de inóculo por cada litro de agua de dilución).
- Preparación del blanco: Se colocaron 300 ml de agua de dilución en un frasco winkler, se midió la concentración de oxígeno disuelto con apoyo del oxímetro (marca YSI modelo 5100) previamente calibrado, posteriormente se taparon los frascos, se colocaron sellos hidráulicos y se incubaron a 20 °C por un periodo de 5 días.
- Preparación de las muestras controles: Se colocaron 100 ml de la solución patrón de ácido glutámico-glucosa en un frasco winkler, se aforaron a 300 mL con agua de dilución, se midió la concentración de oxígeno disuelto con apoyo del oxímetro previamente calibrado, posteriormente se taparon los frascos, colocaron sellos hidráulicos e incubaron a 20 °C por un periodo de 5 días.
- Preparación de las muestras: Se colocaron 100 mL de muestra en un frasco winkler y se aforaron a 300 mL con el agua de dilución, se midió la concentración de oxígeno disuelto con apoyo del oxímetro, posteriormente se taparon los frascos, colocaron sellos hidráulicos e incubaron a 20 °C por un periodo de 5 días.
- Finalizados los 5 días de incubación se tomó lectura de la concentración de oxígeno disuelto presente en las muestras con el oxímetro.



MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

absorbe a 690 nm. La intensidad del color azul formado depende de la concentración de fosfatos adicionados al heteropoliácido. El método es aplicable cuando el contenido de fósforo en las muestras se encuentra entre las concentraciones de 0,01 a 6,0 mg P/L.

Los fosfatos se determinaron por medio de un espectrofotómetro de UV/Vis3600 plus de la marca Shimadzu en el laboratorio.



CAPÍTULO 4
RESULTADOS



4. RESULTADOS

Derivado de los resultados obtenidos de esta investigación, se redactó el artículo titulado: “**Assessment of the quality of water for human consumption and comparison of quality indices**”, el cual ha sido enviado a la revista indexada “**Enviromental Monitoring and Assesment**” para su posible publicación. A continuación, se muestra el comprobante de envío respectivo, así como el contenido del mismo.

CARTA DE ENVÍO

De: em.emas.0.711e7d.988115b9@editorialmanager.com <em.emas.0.711e7d.988115b9@editorialmanager.com> en nombre de EMAS <em@editorialmanager.com>

Enviado: jueves, 4 de febrero de 2021 12:42 p. m.

Para: Edith Erielia Gutierrez Segura <eegutierrez@uaemex.mx>

Asunto: Environmental Monitoring and Assessment : manuscript sent back has been received - [EMID:46bd9f51acb393fc]

A Sent Back manuscript has been re-submitted to Environmental Monitoring and Assessment
The title is Assessment of the quality of water for human consumption and comparison of quality indices.

****Our flexible approach during the COVID-19 pandemic****

If you need more time at any stage of the peer-review process, please do let us know. While our systems will continue to remind you of the original timelines, we aim to be as flexible as possible during the current pandemic.

This letter contains confidential information, is for your own use, and should not be forwarded to third parties.

Recipients of this email are registered users within the Editorial Manager database for this journal. We will keep your information on file to use in the process of submitting, evaluating and publishing a manuscript. For more information on how we use your personal details please see our privacy policy at <https://www.springernature.com/production-privacy-policy>. If you no longer wish to receive messages from this journal or you have questions regarding database management, please contact the Publication Office at the link below.

In compliance with data protection regulations, you may request that we remove your personal registration details at any time. (Use the following URL: <https://www.editorialmanager.com/emas/login.asp?a=r>). Please contact the publication office if you have any questions.

Assessment of the quality of water for human consumption and comparison of quality indices.

J.A. López-Martínez¹, E. Gutiérrez-Segura¹, M. Solache-Rios², V.F. Pacheco Salazar¹, G. Fonseca-Montes de Oca³, C. Rodríguez-Soto⁴

¹ Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Paseo Colón y Tollocan s/n., Toluca, Estado de México, México. C.P. 50000

² Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Departamento de Química. Carretera México-Toluca S/N La Marquesa, Ocoyoacac, México C. P. 52750.

³ Instituto Interamericano de Tecnologías y Ciencias del Agua IITCA-UAEM, Carretera Toluca-Ixtlahuaca Km. 14.5, Unidad San Cayetano, Toluca, Estado de México. México.

⁴ Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro Coatepec s/n Ciudad Universitaria, Toluca Estado de México C.P. 50110.

Abstract

The Water Quality was determined from water quality parameters and Brown, Dinius, Dinius Second and Said indices to evaluate the drinking water from the municipality of Villa Guerrero, Mexico. Water samples were collected in both raining and dry seasons from nine sampling stations during 2019 and 18 parameters were analyzed: biological oxygen demand, total dissolved solids, the concentration of hydrogen ions, dissolved oxygen, turbidity, phosphates, nitrate nitrogen, ammoniacal nitrogen, chlorides, total hardness, specific conductivity, total acidity, total alkalinity, total coliform, fecal coliform, color, temperature and total solids. The indices indicated in general that the water of this region is suitable for human consumption, although its quality depended on the index used in the determination, because each index considers different parameters and weightages assigned to each one. The results show the importance of monitoring the water quality and the comparison of the results

obtained from different indices which indicate the effect of external factors that may alter its quality and help the authorities to take the right decisions to improve it.

Keywords Water Quality; Brown index; Dinius indices; Said index.

Introduction

The surface water quality represents an important environmental concern, its exploitation depends on the natural processes, anthropogenic activities, (Tiri et al. 2018), such as, the weathering of the rocks, precipitation, soil erosion, as well as agricultural, urban and industrial activities, together with the overexploitation of water resources, which have an impact on the economy of each region (Wu et al. 2019). In that sense, the sources of water supply for human consumption have been seriously affected by the continuous deposition of solid waste and pollutants in lakes and rivers generating a global health problem (Das Kangabam and Govindaraju 2017). Two important sources of water for human consumption are surface and underground water, the first consists of canals, streams, lakes and wetlands, while the second is in the spaces of the pores inside the rocks and the alluvium, in the cracks and in openings and aquifers.

Some features are notable from surface water for example, could be easily contaminated with organisms and chemicals that cause waterborne contamination and intestinal infections, the turbidity frequently changes with the amount of rain, consequently, an increase in turbidity increases the treatment cost and operational cost and the temperature of surface water changes with the temperature of the environments. Groundwater shows big benefits because it is not effectively contaminated or polluted as surface water, the nature of groundwater is consistently steady and groundwater sources are mostly lower in bacteria than surface water sources (Muthu 2019).

Recently, some changes have been detected in the physicochemical parameters of water in the aquifer of Toluca Valley probably due to its overexploitation coupled with the increase of urban, agricultural and industrial activities; Also a change in the chemical parameters of groundwater has been observed, an increase in the presence of certain contaminants, such as nitrates and heavy metals associated with changes in salinity and sulfate concentrations due

to the use of fertilizers in agricultural areas and/or discharge of wastewater (Esteller and Andreu 2005). A study of mathematical modeling in 18 communities of the municipality of Villa Guerrero, State of Mexico, indicated that part of the aquifer in this area is significantly exposed to pesticide contamination because these substances are applied with high frequency and quantity (Velázquez et al. 2017). One study reported that the Amacuzac River in its channel through the State of Morelos is moderately contaminated, and the main pollutants found were nitrates, Biochemical Oxygen Demand and fecal coliforms with high levels at the beginning of the rainy season (Nandini et al. 2018).

In Mexico, the quality of surface waters is monitored by The National Water Commission considering basically 4 parameters: the Five-day Biochemical Oxygen Demand (BOD₅), the Chemical Oxygen Demand (COD) Fecal coliforms (FC) and the Total Suspended Solids (SST) (Conagua 2018). Spatial and temporal variations in hydrochemistry require regular monitoring for a reliable estimate of their quality (Singh et al. 2004).

The Water Quality Index (WQI) is a simple method utilized as a part of surveying the general water quality using a group of parameters which reduce the large amounts of information to a single number, usually dimensionless. (Ewaid and Abed 2017; Said 2004).

Various water quality indices (WQI) have been developed worldwide to evaluate the water quality for direct human consumption and other uses; as well as helping to assess the environmental impact caused by pollution (Tripathi and Singal 2019), they allow the comparison of water qualities from diverse sources and suggest an appropriate use according to the type of water resource, allow authorities to make decisions on the development of more objective policies, identify any contamination conditions before implementing a new policy or regulatory law and also provide a general picture of the general water quality to non-technical personnel (Tripathi and Singal 2019, Regmi et al. 2017). A WQI is applied when it is known that there is a specific contamination problem, a specific monitoring is carried out, considering selected variables or indicators for the aquatic system under study (Strobl and Robillard 2008).

Among the most outstanding WQI's are: Brown (Bilgin 2018), Dinius, Dinius Second and Said, among others. Calculation of WQI's are based on a number of physico-chemical and microbiological parameters.

There are 4 classes of water quality within this WQI, namely class 1 for drinking water sources, class 2 for water recreation, class 3 for fisheries and animal husbandry, class 4 for agriculture. Excellent (0–25), Good (26–50), Poor (51–75), Very Poor (76–100), Unsuitable for drinking (> 100) (Ewaid and Abed 2017).

Brown's WQI (1970) represents general water quality, does not incorporate or recognize functions of specific water uses, such as use for human consumption, uses in agriculture or industry, etc. This index is calculated as the weighted arithmetic average of the individual weights assigned to each quality parameter. This WQI is made up of nine water quality parameters: Dissolved oxygen, fecal coliforms, pH, BOD, nitrates, phosphates, temperature, turbidity and total solids (Bilgin 2018; Zotou et al. 2020).

Dinius One 'WQI (1972) was developed to describe different levels of polluting parameters and through its use the planning, measurement of costs and impacts of pollution were evaluated and was a precursor in decision making. The water quality index is of mathematical character and the water is classified according to five different uses; one of them (industrial and agricultural purposes). This index is based on the analysis of 11 water quality parameters (Dissolved oxygen, 5-Day BOD, total coliforms, fecal coliforms, specific conductivity, chlorides, hardness, alkalinity, pH, temperature and color) (Abbasi and Abbasi 2012a; Aguilar et al. 2019).

Dinius' Second WQI (1987) includes the above parameters and the nitrate analysis, classifies water in six water uses as public water supply, recreation, fish, shellfish, agriculture and industry. This index is based on multiplicative aggregation, with values expressed as a percentage of good water quality corresponding to 100% (Abbasi and Abbasi 2012a).

The Said et al. WQI (2004) was based on only 5 parameters and can be used to compare the status of different sites, the variables are Dissolved oxygen, total phosphates, fecal coliform, turbidity and specific conductivity. The index has been designed to range from 0 to 3 (Abbasi and Abbasi 2012b; Said et al. 2004).

The purpose of this work is to assess whether the physicochemical and microbiological quality of surface water is suitable for human consumption or general purposes by means of

long-term Brown, Dinius, Dinius Second and Said water quality indices (dry and rainy season) and to compare the data obtained by using each index.

Materials and Methods

Sampling area: Villa Guerrero township lies at 18° 57'N; 99° 38' W; 1 420 - 3 900 m.a.s.l. (Figure 1), located in the central region of Mexico, occupies 0.94% of the surface of the state and has 67,929 inhabitants (INEGI 2016). In the municipality of Villa Guerrero, State of Mexico, the floricultural activity is characterized by an abundant use of water and pesticides, both in open and closed environments (greenhouses); In addition, the geographical disposition of the town, surrounded by a mountainous system, (Cabra et al. 2000) generates geographical conditions that contribute substantially to the permanence of these pesticides in the area.

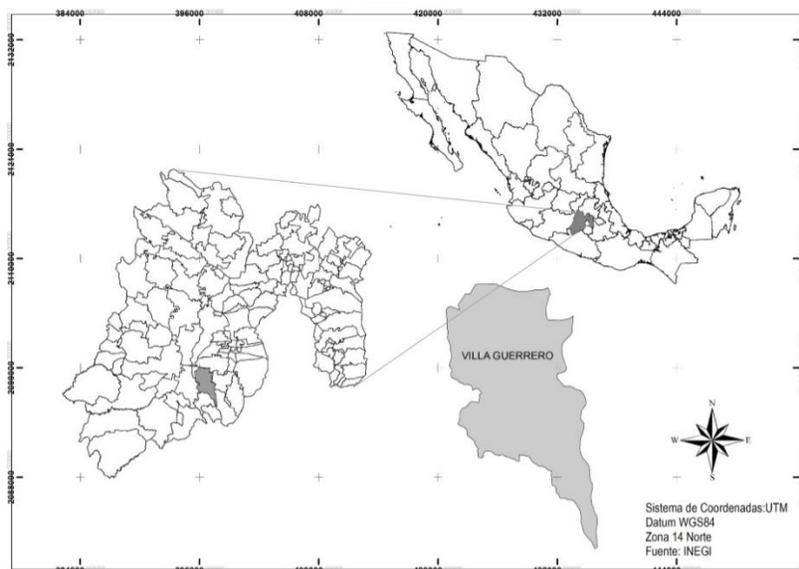


Fig. 1 Map of Villa Guerrero, México.

Water samples: 9 monitoring stations were selected from the 36 drinking water supply tanks of the municipality of Villa Guerrero Mexico (Fig. 1), covering urban areas and areas of floricultural crops in greenhouses. Site 1 (Buenavista), site 2 (La Joya), site 3 (Coponial), site 4 (Los Fresnos), site 5 (San Francisco I), site 6 (San Francisco II), site 7 (San Francisco III),

site 8 (Zacango I) and site 9 (Zacango II). The geographical coordinates of the sampling sites are shown in [Table 1](#).

Table 1 Geographic coordinates of the sampling sites.

	Sampling sites	Coordinates UTM	
1	Buenavista	14 Q 430509.00 m E	2096660.00 m N
2	Coponial	14 Q 432130.00 m E	2097450.00 m N
3	Estrella - La Joya	14 Q 431088.00 m E	2098567.00 m N
4	Los Fresnos/ Cabecera Municipal	14 Q 432130.00 m E	2097450.00 m N
5	San Francisco I	14 Q 431465.00 m E	2096959.00 m N
6	San Francisco II	14 Q 431312.00 m E	2096456.00 m N
7	San Francisco III	14 Q 431686.00 m E	2095352.00 m N
8	Zacango I	14 Q 424095.00 m E	2101377.00 m N
9	Zacango II	14 Q 424145.00 m E	2101377.00 m N

Sampling was carried out in accordance with the Mexican Standard NOM-014-SSA-1993. Samples were taken before the disinfection process in duplicate and the analysis of each sample was done twice. These datasets were collected during Oct 2018 (wet season) and May 2019 (dry season).

Water samples were collected for the physicochemical analyzes in polyethylene bottles of 1L with hermetic screw caps, pre-washed with a 1% solution of non-ionic detergent (Extran) and abundant water, treated with a 5% HCl solution and then rinsed with deionized water, while water samples for microbiological analysis were taken in glass bottles of 300 mL previously sterilized.

The samples were stored on ice and transported to the laboratory where the physicochemical and microbiological analyzes were processed, all chemical reagents used in the analysis were analytical grade.

The parameters (pH, EC, DO) were analyzed at the sampling site. pH, EC, DO were determined by using the instrument model edge, Hanna instruments.

Water quality indices

The WQI were determined from the average values of the 17 parameters of the water quality. The equations of the models used are the following:

Brown' WQI (Tian et al. 2019).

$$WQI = \frac{\sum_{i=1}^n C_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad \text{Eq. 1}$$

Dinius' One WQI (T. Abbasi and Abbasi 2012).

$$WQI = \frac{1}{21} \sum_{i=1}^{n=11} W_i I_i \quad \text{Eq. 2}$$

Dinius' Second Index WQI (Zotou et al. 2020)

$$WQI = \prod_{i=1}^n I_i^{W_i} \quad \text{Eq. 3}$$

Said' WQI (Said et al. 2004)

$$WQI = \log \left[\frac{(DO)^{1.5}}{3.8^{TP} Tur^{0.15} (15)^{\frac{F-Coil}{10000}} + 0.14(SC)^{0.5}} \right] \quad \text{Eq. 4}$$

Where n is the total number of the parameters included in the study, Ci is the normalized value of parameter i, and Pi is the weight of parameter i used in Brown index.

I_i is the sub-index function of the pollutant parameter, W_i is the unit weight of the pollutant parameter whose value ranges from, 0–1 in Dinius’ One index (Sarkar and Abbasi 2006).

Weightages assigned to the quality parameters utilized in Dinius’ Second Index methodology were: 0.241, 0.169, 0.174, 0.215, 0.200 for DO, pH, SC, BOD₅ and NO₃-N respectively (Zotou et al. 2020).

Results and Discussion

Parameter selection

The parameters of drinking water should be selected considering the substances that are known to be of importance to health and are present in significant concentrations in the water source (WHO 2017). Establishing National drinking water standards. Guidelines for drinking-water quality training pack.

In this research 18 parameters and four indices were selected to determine the quality of water (Table 2). The parameters that characterize water quality are classified in different ways, one of them is considering its physical, chemical, and microbiological properties. The importance of each parameter is critical. (Strobl and Robillard 2008).

Table 2 The water quality parameters, abbreviations and analytical method used.

Parameter	Abbreviation	Unit	Analytical Method
Temperature	T	°C	NMX-AA-007-SCFI-2000
Hydrogen ion concentration	pH		NMX-AA-008-SCFI-2016
Total hardness	TH	mg/L	NMX-AA-072-SCFI-2001
Specific conductivity	SC	μS/cm	NMX-AA-093-SCFI-2000
Turbidity	Turb	NTU	NMX-AA-038-SCFI-2001
Total acidity as CaCO ₃	Acid	mg/L	NMX-AA-036-SCFI-2001
Total alkalinity as CaCO ₃	Alkal	mg/L	NMX-AA-036-SCFI-2001

Parameter	Abbreviation	Unit	Analytical Method
Chlorides	Cl ⁻	mg/L	NMX-AA-073-SCFI-2001
Dissolved oxygen	DO	mg/L	NMX-AA-012-SCFI-2001
5-days Biological oxygen demand	BOD ₅	mg/L	NMX-AA-028-SCFI-2001
Total coliform	T-Coli	(counts/100 mL)	NMX-AA-042-SCFI-2015
Fecal coliforms	F-Coli	(counts/100 mL)	NMX-AA-042-SCFI-2015
Color	Color	TCU	NMX-AA-045-2001
Ammoniacal nitrogen	NH ₃ -N	mg/L	NMX-AA-079-SCFI-2001
Nitrate nitrogen	NO ₃ -N	mg/L	NMX-AA-079-SCFI-2001
Total phosphates	(PO ₃) ⁻⁴	mg/L	NMX-AA-029-SCFI-2001
Total suspended solids	TSS	mg/L	NMX-AA-034-SCFI-2015
Total dissolved solids	TDS	mg/L	NMX-AA-034-SCFI-2015

Table 3 shows the average of each parameter in both dry and raining seasons, as it can be observed most parameters are below the maximum values recommended by WHO. Shah and Joshi have reported the importance of each parameter in the water quality, therefore only a brief description of them is given (Shah and Joshi 2017).

pH. The pH has an important effect on all body chemistry, health and disease because human body has from 50 to 60 % water. The pH level of our body fluid should be in the range 7–7.2. If pH is less than 5.3, assimilation of vitamins or minerals is not possible. If pH is greater than 8.5, causes the water taste bitter or soda-like taste. The pH in the samples was sometimes up to 8.4 and the recommended value by WHO is between 7.0 and 8.0.

Dissolved oxygen (DO). The concentration of DO in waters depends on water temperature, turbulence, salinity, and altitude. This parameter determines whether biological changes are brought by aerobic or anaerobic organisms. Low concentrations of DO indicates a high organic pollution in the river. The optimum value for good water quality is 4 to 6 mg/l. The values found in the water samples were from 6.7 to 8.0 mg/l in the dry season and from 3.8 to 6.2 mg/l in the raining season, this values may indicate some organic pollution in the water.

Biological oxygen demand (BOD₅). This parameter determines the oxygen required to stabilize domestic and industrial wastes. Minimum 2–7 mg/l of DO is required for the degradation of oxidizable organic matter. The values found in the samples were higher in the dry season than raining season, in the first one some values were near 20 mg/l which indicate water pollution.

Specific conductivity/Total dissolved solids (TDS). This is the amount of dissolved solids in the water. The specific conductivity depends on the total dissolved solids. The content of dissolved solids is important because it affects the quality of the water used for drinking and irrigation. Dissolved ions affect the pH of water, which is important to the health of aquatic species. The conductivity values obtained were similar in both seasons and these values corresponded to those of freshwater streams which have a conductivity between 150 to 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ to support diverse aquatic life.

Nitrate nitrogen. This parameter is responsible of eutrophication of waters due to growth of aquatic plants and algae. Excess of nitrate nitrogen in water can cause serious health hazards. Bacteria in the digestive system transform nitrate to nitrite, then the nitrite reacts with iron in the hemoglobin of red blood cells to form methemoglobin, which lacks the oxygen carrying ability of hemoglobin. A nitrate level of up to 3 ppm in well water is safe for drinking. The U.S. Environmental Protection Agency ([USEPA 2009](#)) has set the primary drinking water standard (from public water supplies) for nitrate at 10 mg/L. The values determined in the samples were 0.4 to 5.8 mg/L.

Total and fecal coliform. Coliforms should be absent according to WHO. In this study coliforms were present in the samples taken in the dry season and were absent in the raining season. This behavior could be due to the fact that water samples were taken before the chlorination process in some sites and in other sites the chlorination system was out of order.

Turbidity. This is a measure of the ability of light to pass through water, turbidity may depend on the type of the soil that make up the base of the wells. High turbidity values indicated a possible presence of microorganisms and other suspended solids that may affect the quality of the water. Consumption of high turbid water can consequently cause serious health risks. Points with high turbidity values above the recommended limits should be disinfected before use. The turbidities in the water samples were similar and low in both dry and raining seasons.

Chloride. This chemical species enters in to ground system from various sources such as rainwater, agricultural activities and leaching from waste disposal. The concentration found in the samples was much lower than the permissible limit of WHO ([WHO 2017](#)).

Color. Color in water is the result of soluble chemical substances that may come from different sources like metal ions, humic and fulvic acids, lignin, tannin, algae, peaty matters, etc. The color of samples was lower than the permissible limit of WHO.

Phosphorus defines the type of plants that will prevail, as well as the eutrophication of aquatic ecosystems because it is usually the limiting nutrient. The natural levels of phosphate usually range from 0.005 to 0.05 mg/L, the concentration of phosphate in the water samples was higher than this range.

Water Quality Indices.

Data of [Table 3](#) were treated with Brown's (1970), Dinius (1972), Dinius' Second (1987) and Said (2004) ([Abbasi and Abbasi 2012a,b](#)). Each index considers different parameters as describe above. The parameters have different importance and a value is assigned to each one according to its relative effect on the water quality and these values depend on the permissible limit regulations for drinking water set by national and international agencies.

Table 3 Descriptive statistics from Villa Guerrero monitored parameters

Parameter	Dry season			Raining season			WHO standard
	Max.	Min.	Mean-SD	Max.	Min	Mean-SD	
T	13.5	8	11.3±1.8	26	9	18.5±6.5	-
pH	8.1	7.4	7.7 ±0.4	8.4	7.3	7.8 ±0.8	7.0-8.0
TH	186.1	37.2	111.6±105.2	100.0	20.0	60.0±56.6	500 mg/L
SC	166.3	75.9	121.1±63.9	160.3	72.8	116.5±61.8	-
Turb.	1.55	0.08	0.8±1.0	0.2	0.02	0.09±0.1	1 NTU
Acid	59.8	16.1	37.9±30.9	22.1	3.5	12.8±13.1	-
Alkal	70.7	30.0	50.4±28.7	73.5	39.2	56.3±24.2	-
Cl ⁻	27.4	13.0	20.2 ±10.1	20.2	5.0	12.6±10.7	250 mg/L
DO	8.0	6.7	7.39±0.96	6.2	3.8	4.9±1.7	-
BOD ₅	19.4	1.5	10.4 ±12.7	2.9	0.6	1.8±1.7	-
T-Coli	920	2	461±649.1	0	0	0	-
F-Coli	49	1	25±33.9	0	0	0	Not detectable
Color	6	1	3.5±3.5	4	1	2.5±2.1	15 TCU
NH ₃ -N	3.92	1.5	2.7±1.7	0.5	0.03	0.3±0.3	50 mg/L
NO ₃ -N	5.8	0.6	3.2±3.6	4	0.4	2.4±2.8	-
(PO ₃) ⁻⁴	2.0	0.001	1.0±0.4	2.2	0.6	1.4±1.1	-
TSS	64	8	36±10.6	72	16	44±39.6	-
TDS	212	100	156±79.1	156	18	87±97.5	1000 mg/L

Table 4 shows the Water Quality Indices determined from the analysis of the parameters and the models and Table 5 shows the classification of water according to the Water Quality Indices.

Table 4 The Water Quality Indices of all sampling sites.

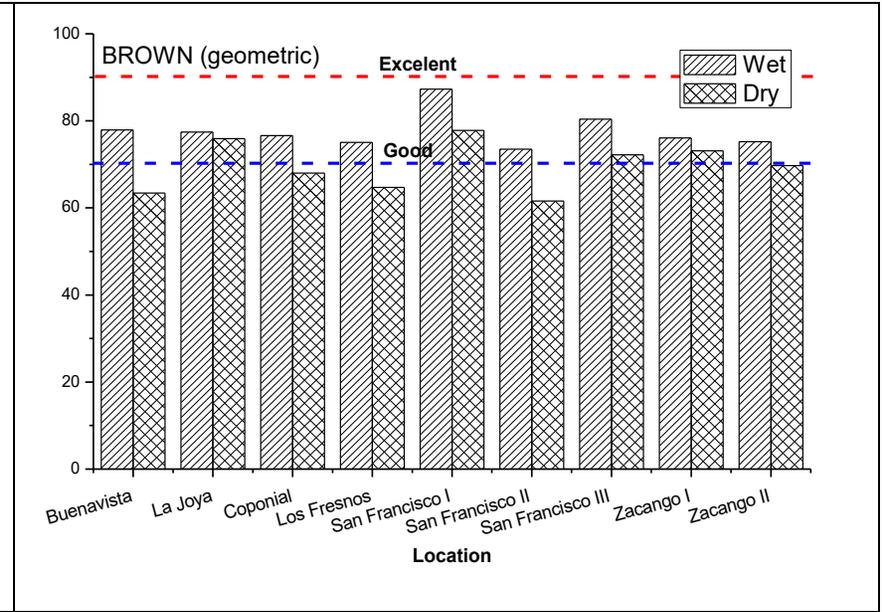
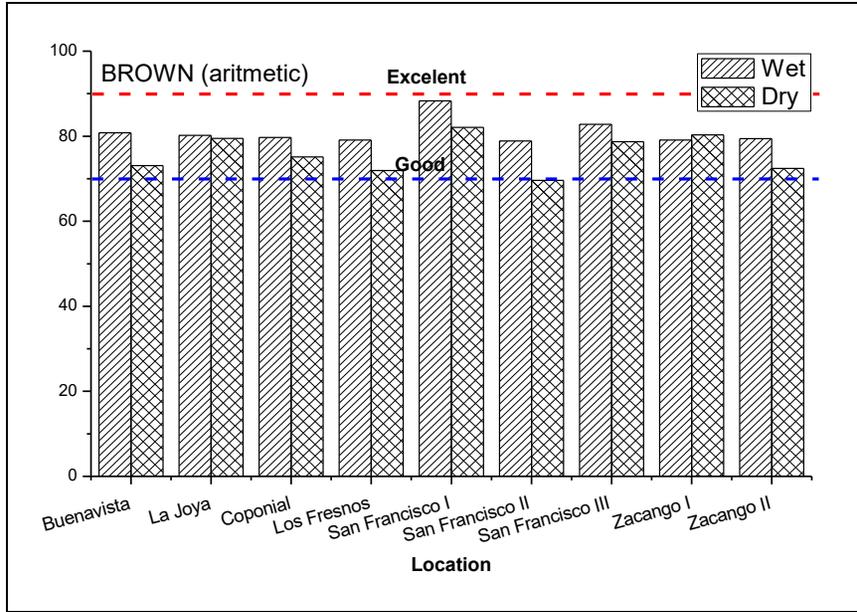
WQI	Brown Progression Arithmetic		Brown Progression Geometric		Dinius One		Dinius Second		Said	
	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry
Buenvista	80.8	73.0	77.9	63.4	80.6	51.2	100.4	72.1	2.1	2.5
La Joya	80.2	79.5	77.4	75.9	78.3	69.4	93.8	84.9	2.3	2.4
Coponial	79.7	75.1	76.6	68.0	77.5	62.8	88.0	74.0	2.3	2.4
Los Fresnos	79.1	71.9	75.03	64.7	79.6	58.4	88.3	71.5	2.0	1.8
San Francisco I	88.3	82.0	87.3	77.8	85.5	65.7	98.3	83.9	2.3	2.3
San Francisco II	78.9	69.6	73.5	61.6	82.5	56.0	94.8	73.4	1.7	1.6
San Francisco III	82.8	78.7	80.4	72.2	84.2	63.4	92.1	76.4	2.2	2.4
Zacango I	79.1	80.3	76.1	73.1	79.9	72.5	95.3	85.1	2.2	2.5
Zacango II	79.4	72.4	75.2	69.7	85.7	54.7	101.7	77.9	2.0	2.4

Table 5 Classification of water according to the Water Quality Indices.

Brown		Dinius		Said	
Excellent	100-90	Excellent	100-91	Very good	3.0
Good	90-70	Good	90-81	Acceptable	3.0-2.0
Medium	70-50	Regular	80-51	Marginal	2.0
Bad	50-25	Bad	50-41	Poor	1.0-0
Very bad	25-0	Very bad	40-0		

Fig. 2 shows the quality of water from each sampling place. The results show that the quality of water depends on the index used to treat the data, since each index considers different water parameters. Although most parameters are lower than the maximum limits settled by the regulations, in some cases the water quality is marginal. The results from the Brown and Dinius indices show that the quality of water is better in the raining season than in the dry seasons, this is reasonable because the pollutants are diluted although the Said WQI shows the opposite, these results indicate that the parameters considered in each index are very important to determine its quality. The quality of water from the Brown (arithmetic) index shows that water in all cases is good and for the Brown (geometric) index in some cases is not good in the dry season. The index that considers most parameters is the Dinius one, in most cases the results show regular quality mainly in the dry season, similar behavior was observed for Dinius Second index although the water quality improved, in most cases, the water quality was excellent in the raining season. The Said index considers less parameters than the other and showed the lowest water quality, in most cases was regular and marginal. These results show that it is important to consider the value of each parameter to select the index, for example in this study, the specific conductivity seems to play an important role on the Said index and therefore the results show that the water quality is lower than using the other indices. [Ewaid et al. 2017](#) found that poor quality of water was mainly due to the turbidity, SC, and TDS in the water and the decisive factors responsible for water quality are only five: Turbidity, SC, Chemical oxygen demand, TH, and pH. (Predicting the Tigris River water quality within Baghdad, Iraq by using water quality index and regression analysis ([Ewaid et al. 2018](#))) The water quality parameters determined in this study showed acceptable values of water for human consumption. In general, the water quality indices calculated show that the water of this region is adequate for human consumption (municipality of Villa Guerrero), its origins come from the slopes of the Nevado de Toluca volcano ([Ba et al. 2000](#)); however, there are anthropological factors, such as agricultural activities that generate uncontrolled consumption of pesticides and fertilizers in the region that may affect its quality, which have not yet been studied in detail and it is recommended to analyze their impact in future work. It is advisable to establish sanitation practices for water intakes for human consumption in some places (Buenavista, Coponial, Los Fresnos, San Francisco II and San Francisco III) because the Water Quality Index of Dinius II showed regular water quality,

which It is based on the largest number of water quality parameters. It is also recommended to determine the QWI in the following years to ensure that water quality is maintained.



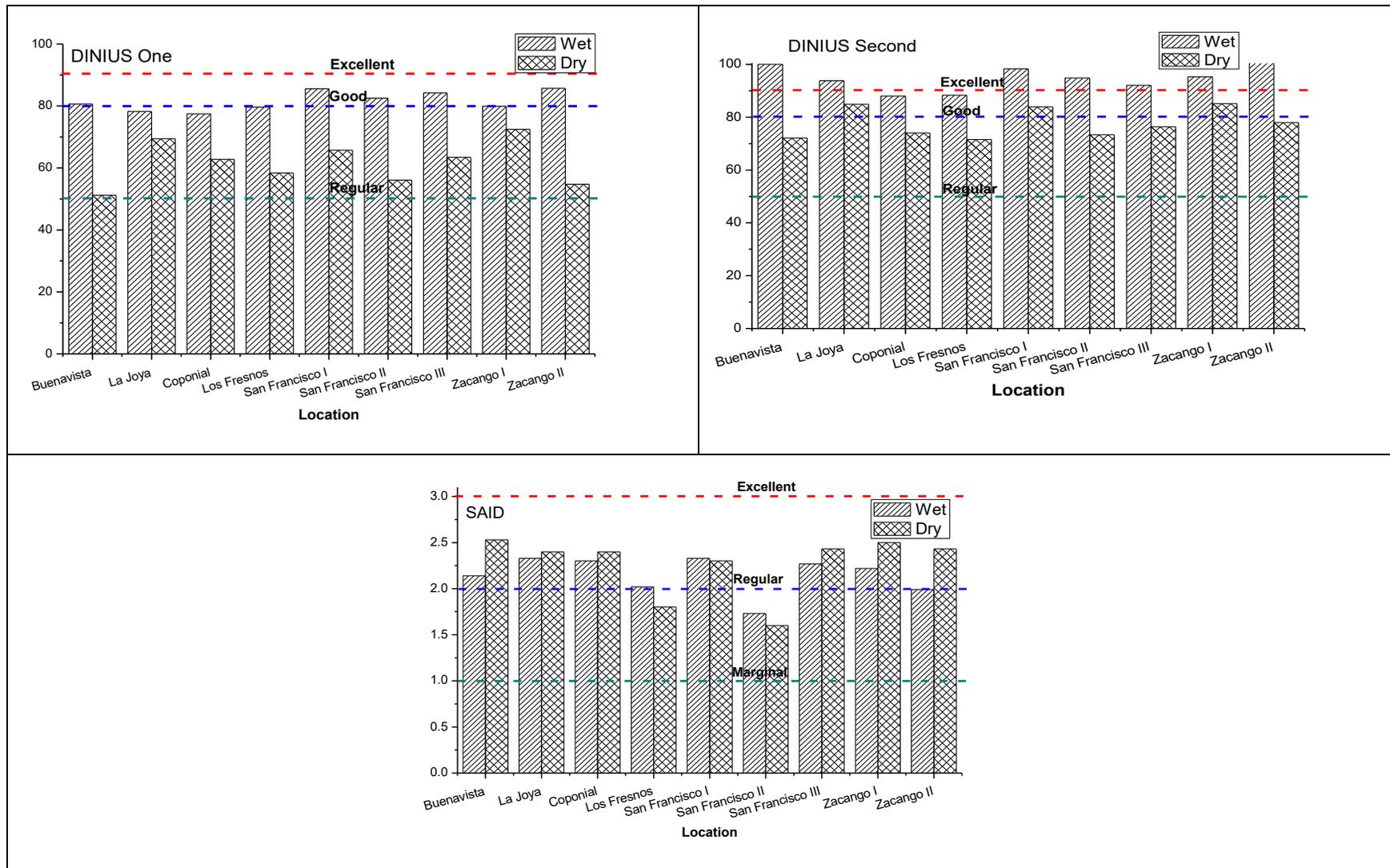


Fig. 2 Brown, Dinius One, Dinius Second and Said WQI's in different sampling sites and dry and wet season.

Conclusions

Biological oxygen demand, total dissolved solids, the concentration of hydrogen ions, dissolved oxygen, turbidity, phosphates, nitrate nitrogen, ammoniacal nitrogen, chlorides, total hardness, specific conductivity, total acidity, total alkalinity, total coliform, fecal coliform, color, temperature and total solids were determined in drinking water of nine wells from the municipality of Villa Guerrero, Mexico. The quality water indices were determined by using these water quality parameters and Brown, Dinius, Dinius Second and Said indices, in general the results indicate that water is adequate for human consumption. The results showed as well that the indices obtained depends on the parameters used in each calculation.

Acknowledgements

The authors are grateful to UAEMex for the financial support of this research, project 4601/2018ESP and **scholarship grant ###, for J.A. López-Martínez.**

Conflict of interest

The authors certify that they have NO affiliations with or involvement in any organization or entity with any financial interest (such as honoraria; educational grants; participation in speakers' bureaus; membership, employment, consultancies, stock ownership, or other equity interest; and expert testimony or patent-licensing arrangements), or non-financial interest (such as personal or professional relationships, affiliations, knowledge or beliefs).

References

Abbasi, T., & Abbasi, S.A. (2012). *Water Quality Indices*. ISBN:978-0-444-54304-2. doi: 10.1016/B978-0-444-54304-2.00003-8.

Aguilar J. A. P., Campo J., Meneu S. N., Gimeno-García E., & Andreu V. (2019). Analysis of existing water information for the applicability of water quality indices in the fluvial-littoral area of turia and Jucar Rivers, Valencia, Spain. *Applied Geography*, *111*, 102062. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.102062>.

Ba K. M., Díaz Delgado C., & Rodríguez Osorio V. (2001). Simulación de caudales de los ríos Amacuzac y San Jerónimo en el Estado de Mexico, México. *Ingeniería Hidráulica en México*, *XVI*(4), 117-126.

Bilgin, A. (2018). Evaluation of surface water quality by using Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) method and discriminant analysis method: a case study Coruh River Basin. *Environmental Monitoring and Assessment.*, *190*(9), <https://doi: 10.1007/s10661-018-6927-5>.

Capra L., & Macías J.L. (2000). Pleistocene cohesive debris flows at Nevado de Toluca Volcano, central Mexico. *Journal Volcanology and Geothermal Research*, *102*, 149-168. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00186-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00186-4).

Conagua (2018). Estadísticas del Agua en Mexico. ww.gob.mx/conagua. (Accessed January 2021).

Das Kangabam R, & Govindaraju M. (2017). Anthropogenic activity-induced water quality degradation in the Loktak lake, a Ramsar site in the Indo-Burma biodiversity hotspot. *Environmental Technology* *40*(17) 2232-2241. <https://doi: 10.1080/09593330.2017.1378267>.

Esteller M. V. & Andreu J. M. (2005). Anthropic effects on hydrochemical characteristics of the Valle de Toluca aquifer (central Mexico). *Hydrogeology Journal*, *13*, 378–390. <https://doi: 10.1007/s10040-004-0395-4>.

Ewaid S. H., & Abed S. A. (2017). Water quality index for Al-Gharraf River, southern Iraq. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, *43*(2), 117–122. <https://doi:>

10.1016/j.ejar.2017.03.001.

Ewaid S.H., Abed S.A., & Kadhum S.A. (2018). Predicting the Tigris River water quality within Baghdad, Iraq by using water quality index and regression analysis. *Environmental Technology & Innovation*, 11, 390–398. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.06.013>

INEGI 2016. Panorama sociodemográfico de Estado de México 2015. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

Muthu, S. S. (2019). Water in textiles and fashion: consumption, footprint, and life cycle assessment (First edition.). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03774-6>.

Nandini S., Ramírez-García P., Sarma S. S. S., Gutierrez-Ochoa R.A. (2019). Planktonic indicators of water quality: A case study in the Amacuzac River Basin (State of Morelos, Mexico). *River Res Applic.* 2019, 1–12. <https://doi: 10.1002/rra.3401>

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, (2000). "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano—límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización".

Regmi R.K., Mishra B.K., Masago Y., Luo P., Toyozumi-Kojima A., & Jalilov S.M. (2017). Applying a water quality index model to assess the water quality of the major rivers in the Kathmandu Valley, Nepal. *Environ Monit Assess.*, 189(8), 1-16. <https://doi: 10.1007/s10661-017-6090-4>.

Said, A., Stevens, D. K. & Sehlke, G. (2004). An innovative index for evaluating water quality in streams. *Environmental Management*, 34(3), 406–414. <https://doi: 10.1007/s00267-004-0210-y>.

Sarkar C., & Abbasi S.A. (2006). Qualidex--a new software for generating water quality indices. *Environ Monit Assess.*, 119(1-3), 201-31. <https://doi: 10.1007/s10661-005-9023-6>.

Shah, K.A., & Joshi, G.S. (2017). Evaluation of water quality index for River Sabarmati, Gujarat, India. *Appl Water Sci* 7, 1349–1358. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0318-7>.

Singh K.P., Malik A., Mohan D., & Sinha S. (2004). Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India)—a case study. *Water Research*, 38, 3980–3992. <https://doi: 10.1016/j.watres.2004.06.011>.

Strobl, R.O. & Robillard, P.D. (2008) Network design for water quality monitoring of surface freshwaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 87(4), 639–648. <https://doi:10.1016/j.jenvman.2007.03.001>.

Tiri, A., Belkhiri, L. & Mouni, L. (2018). Evaluation of surface water quality for drinking purposes using fuzzy inference system. *Groundwater for Sustainable Development*, 6, 235–244. <https://doi:10.1016/j.gsd.2018.01.006>.

Tripathi, M. & Singal, S.K. (2019). Use of Principal Component Analysis for parameter selection for development of a novel Water Quality Index: A case study of river Ganga India. *Ecological Indicators*, 96, 430–436. <https://doi:10.1016/j.ecolind.2018.09.025>.

USEPA-2009. EPA's Safe Drinking Water. <http://www.epa.gov/safewater/>

Velázquez, A., Sánchez, J.C., Adame, S., Paredes J., & Mancino M. (2017). Determinación de vulnerabilidad de acuíferos usando método SINTACS por aplicación de plaguicidas en suelos agrícolas en Villa Guerrero, Estado de México. *Revista Universitaria de Geografía*, 26(2), 111-129. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=383254667005>.

WHO, 2017. Guidelines for drinking-water quality. World Health Organization, 4th Edition. ISBN 978-92-4-154995-0

Wu Z., Wang X., Chen Y., Cai Y., & Deng J. (2018). Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China. *Science of the Total Environment* 612, 914–922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.293>

Zotou I., Tsihrintzis V. A., & Gikas G. D. (2020): Water quality evaluation of a lacustrine water body in the Mediterranean based on different water quality index (WQI) methodologies *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng.* 9, 1-12. <https://doi:10.1080/10934529.2019.1710956>.



CAPÍTULO 5
DISCUSIÓN DE RESULTADOS



5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presenta la discusión de resultados obtenidos para este trabajo de investigación. De manera muy general; los análisis realizados sobre las fuentes de abastecimiento de agua seleccionadas para este estudio, dilucidaron que tanto propiedades físicas y químicas se mantienen dentro de los rangos permisibles estipulados en la Normatividad Mexicana (NOM 127-SSA1-1994-SALUD). Por otro lado; el análisis microbiológico permitió identificar la presencia de organismos coliformes en las muestras, puntualmente en aquellas que se tomaron durante la época de lluvias.

A) Comportamiento del pH

El término pH se utiliza universalmente para determinar si una solución es ácida o básica y es uno de los parámetros operativos principales para el control de la calidad del agua. El pH óptimo de las aguas debe estar entre 6.5 y 8.5, es decir, entre neutra y ligeramente alcalina. Las aguas de pH menor de 6.5 son corrosivas debido al anhídrido carbónico, ácidos o sales ácidas que tienen en disolución (Organización Mundial de La Salud, 2011). Comparando el rango de pH óptimo reportado por la bibliografía con los resultados obtenidos en campo, el máximo experimental se estaciona en 8.4 para temporada de secas y de 8.1 para la temporada de lluvias, observando que el parámetro se encuentra dentro de la normalidad y además la temporada de lluvias puede generar un efecto de dilución en las muestras.

B) Comportamiento de la Dureza Total

La dureza del agua se debe al contenido de calcio y, en menor medida, de magnesio disueltos. Suele expresarse como cantidad equivalente de carbonato cálcico. En función del pH y de la alcalinidad, una dureza del agua por encima de 200 mg/L aproximadamente puede provocar la formación de incrustaciones, sobre todo en las calefacciones. Las aguas blandas con una dureza menor que 100 mg/L aproximadamente tienen una capacidad de amortiguación baja y pueden ser más corrosivas para las tuberías. No se propone ningún valor de referencia



basado en efectos sobre la salud para la dureza. No obstante, el grado de dureza del agua puede afectar a su aceptabilidad por parte del consumidor en lo que se refiere al sabor y a la formación de incrustaciones (Organización Mundial de La Salud, 2011).

Si bien, este parámetro no tiene un valor límite establecido por la OMS, la NOM 127-SSA1-1994-SALUD, establece el valor límite de 500mg/L como CaCO_3 . En los sitios de muestreo se presentan valores por debajo del límite, inclusive el valor máximo que se obtuvo 186.1 mg/L como CaCO_3 para la temporada de lluvias y de 100 mg/L como CaCO_3 para temporada de estiaje, que de acuerdo a la escala de clasificación el agua que se distribuye en el Municipio Villa Guerrero es considerada como moderadamente dura (Julián-Soto, 2010). El incremento de la concentración en la temporada de lluvias podría deberse a la incorporación de CO_2 por el efecto de percolación al agua subterránea, lo que genera una mayor disolución de carbonatos (Neira, 2006).

C) Comportamiento de la conductividad específica

La conductividad es una expresión numérica que representa la capacidad de una solución para transportar corriente eléctrica. Depende de la presencia de iones y de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura de medición. Cuanto mayor sea la concentración de iones mayor será la conductividad. En aguas naturales la medida de la conductividad tiene varias aplicaciones, entre las más importantes esta la evaluación de las variaciones de la concentración de minerales disueltos en aguas naturales y residuales. Normativamente en México no se reporta un valor límite máximo permisible para este parámetro, para los Estados Unidos de América el rango de valores para agua de consumo humano se encuentra entre los 30 y los 1500 mhos/cm, tomando como referencia este rango y realizando la comparación correspondiente con los resultados obtenidos en cada uno de los sitios de muestreo, se concluye que el valor máximo experimental obtenido para este parámetro es de 0.000166 mho/cm para la temporada de lluvias y de 0.000160 mho/cm para temporada de secas, valores cercanos entre si y muy por debajo del rango reportado en la literatura (Organización Mundial de La Salud, 2011).



D) Comportamiento de la turbidez

La turbidez en el agua de consumo está causada por la presencia de partículas de materia, que pueden proceder del agua de origen, como consecuencia de un filtrado inadecuado, o debido a la re-suspensión de sedimentos en el sistema de distribución. También puede deberse a la presencia de partículas de materia inorgánica en algunas aguas subterráneas o al desprendimiento de biopelículas en el sistema de distribución. El aspecto del agua con una turbidez menor que 5 UNT suele ser aceptable para los consumidores, aunque esto puede variar en función de las circunstancias locales (Organización Mundial de La Salud, 2011).

Normativamente en México, el valor máximo permisible para este parámetro es de 5 UNT, el máximo valor obtenido experimentalmente sobre los sitios de muestreos se estaciona en 1.5 UNT para la temporada de lluvias y 0.2 UNT para la temporada de secas, estos valores se encuentran por debajo de los máximos permisibles, y es evidente que la escorrentía propiciada por las precipitaciones pluviales incorpora materia orgánica e inorgánica, incrementando la turbiedad del agua.

E) Comportamiento de la alcalinidad

Este parámetro expresa la capacidad que tiene el agua de mantener su pH a pesar de recibir una solución ácida o alcalina. Corresponde principalmente a los hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y NH_4^+ ; los más comunes son los de calcio y magnesio. Trabajos de investigación han demostrado que una alcalinidad mínima de 20 mg de CaCO_3/L es necesaria para mantener la vida acuática. Cuando las aguas tienen alcalinidades inferiores se vuelven muy sensibles a la contaminación, ya que no tienen capacidad para oponerse a las modificaciones que generen disminuciones del pH (acidificación). La alcalinidad del agua que circula a través del sistema de distribución con tubos de hierro debe estar dentro del rango de 30 hasta 100 mg/L como CaCO_3 , para prevenir corrosiones; teniendo una tolerancia de hasta 500 mg/L puede ser aceptable (Barreto, 2009).



Con referencia a los resultados experimentales obtenidos para este parámetro, se observó que la concentración máxima para el muestreo efectuado en temporada de secas fue de 73.5 mg/L de CaCO_3 y para la temporada de lluvias es de 70.7 mg/L de CaCO_3 para la temporada de lluvias, evidenciando que la alcalinidad se encuentra dentro de condiciones normales, y que probablemente el efecto de las lluvias favorece el proceso de disolución, y por lo tanto el incremento en la concentración de bicarbonatos.

F) Comportamiento de los cloruros

En la naturaleza las sales de cloruro de sodio, cloruro de potasio, y cloruro de calcio están ampliamente distribuidas, su solubilidad en agua fría es: 357, 344, 745 g/L, respectivamente. El cloruro, en forma de ion Cl^- , es uno de los aniones inorgánicos principales en el agua, su contenido procede de fuentes naturales, aguas residuales y vertidos industriales. El efecto antropogénico está mayormente asociado con el ion sodio. Los niveles de concentración de cloruros en agua no contaminada se encuentran a valores menores de 10 mg/L y en agua que se ha sometido a procesos de cloración ha reportado resultados de 40 a 63 mg/L (García Vargas *et al.*, 2009).

Con referencia a los resultados experimentales obtenidos para este parámetro, se puede observar que la concentración máxima para el muestreo efectuado en temporada de secas fue de 20.2 mg/L y para la temporada de lluvias fue de 27.4 mg/L, en este sentido es importante mencionar que los muestreos se realizaron antes de efectuar el proceso de cloración, por tanto; las concentraciones se deben a los procesos naturales de captación. Normativamente el máximo permisible para cloruros se fijó en 250 mg/L, por otro lado; al realizar la respectiva comparación, se observó que las concentraciones experimentales quedaron por debajo de los valores estipulados por la norma, concluyendo que el parámetro se encuentra en condiciones normales.



G) Comportamiento del oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto es uno de los indicadores más importantes de la calidad del agua. Los valores normales varían entre los 7.0 y 8.0 mg/L. La fuente principal del oxígeno es el aire, el cual se difunde rápidamente en el agua por la turbulencia en los ríos y por el viento en los lagos. El oxígeno constituye uno de los elementos de mayor importancia en los ecosistemas acuáticos, ya que su presencia y concentración definen el tipo de especies que ocurren de acuerdo con sus tolerancias y rangos de adaptación, y por ende establecen toda la estructura y funcionamiento biótico de estos sistemas. El oxígeno se considera un compuesto ligeramente soluble en el agua y su presencia en solución está determinada por la solubilidad del gas, la presión, la temperatura y la pureza del agua (Roldán, 2007).

Con referencia a los resultados experimentales obtenidos para este parámetro, se observa que la concentración máxima para el muestreo efectuado en temporada de secas fue de 6.2 mg/L y para la temporada de lluvias fue de 8.0 mg/L, los valores de oxígeno disuelto presentaron variaciones debido a efectos ambientales y posiblemente a factores antrópicos, permaneciendo dentro de los valores normales.

H) Comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno

De acuerdo con la CONAGUA, la DBO₅ es un indicador de la cantidad de materia orgánica presente en el agua. Su incremento provoca la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua, creando condiciones de “anoxia” que dañan a las comunidades biológicas de los ecosistemas acuáticos. La escala de clasificación para este parámetro indica que se tiene un agua de excelente calidad cuando experimentalmente se presentan valores de DBO₅ menores o iguales a 3 mg/L, se tiene un agua de buena calidad para valores de DBO₅ de 3.1 a 6 mg/L, se tiene una calidad de agua aceptable para valores de DBO₅ de 6.1 a 30 mg/L, y para valores mayores a este rango se clasifican como aguas contaminadas (Comisión Nacional del agua, 2018).



Con referencia a los resultados experimentales obtenidos para este parámetro, se observa que la concentración máxima para el muestreo efectuado en temporada de secas es de 2.9 mg/L y para la temporada de lluvias es de 19.4 mg/L, que de acuerdo con la escala de clasificación emitida por la CONAGUA se tienen algunas fuentes de abastecimiento dentro del rango de aceptable calidad, las cuales presentan indicios de contaminación, pero con capacidad de autodepuración.

Es en este punto donde cobra relevancia el realizar un análisis en cuanto a las actividades humanas desarrolladas justo antes de la canalización del flujo, donde; considerando los resultados obtenidos en el análisis del grupo coliforme, podemos decir que existe una leve contaminación de naturaleza fecal que impacta de manera directa en la calidad del agua distribuida en el Municipio, y que probablemente a partir de los escurrimientos y el efecto de arrastre producidos por las precipitaciones pluviales fue posible detectar.

I) Comportamiento del grupo coliforme (totales y fecales)

Los microorganismos indicadores de la calidad de agua, se encuentran en las bacterias del grupo coliformes, que son patógenos de transmisión fecal-oral perteneciendo a este grupo especies como *Escherichia coli*, entre otras. Estos organismos generalmente se pueden encontrar en la capa superficial del agua o en los sedimentos del fondo. Los coliformes fecales también denominados termo tolerantes, llamados así porque soportan temperaturas de hasta 45°C, comprenden un grupo reducido de microorganismos indicadores de calidad, ya que son de origen fecal. Este tipo de microorganismos pertenece al grupo de los coliformes totales, pero se diferencian de los demás en que son indol positivo, su presencia indica contaminación fecal de origen humano o animal, ya que las heces contienen dichos microorganismos, presentes en la microbiota intestinal y de ellos entre 90 y 100 % son *E. coli*. Por otro lado, las heces de animales y humanos pueden contaminar el suelo con microorganismos potencialmente patógenos y existe la posibilidad de que sean suspendidos posteriormente en la atmósfera (Bautista Olivas *et al.*, 2013).



Normativamente en México, el límite máximo permisible para estos dos indicadores es de 0 NMP/100 mL, los valores experimentales obtenidos durante el muestreo realizado en temporada de secas fueron de 0 NMP/100 mL para ambos. Por otro lado, el muestreo realizado durante la temporada de lluvias reflejó presencia de ambos, para coliformes totales obtuvimos 920 NMP/100 ml, y para los coliformes fecales se obtuvieron 49 NMP/100 mL como valores máximos, este hecho representa un sinónimo inequívoco de contaminación microbiológica.

Los resultados obtenidos permiten visualizar que probablemente existan aportaciones derivadas del arrastre generado por la temporada de lluvias. Es importante considerar que los muestreos fueron realizados justo antes del proceso de cloración, que la disposición de los residuos líquidos generados en la mayor parte del Municipio es realizada a través de fosas sépticas, que siete de los nueve tanques de almacenamiento sometidos a estudio se encuentran ubicados dentro de la mancha urbana, que al momento de realizar esta investigación y por cuestiones de tiempo, no se consideró analizar las actividades humanas realizadas justo antes de la canalización (toma hacia tubo) de la fuente de abastecimiento, y finalmente; recalcar que el ultimo filtro, la cloración, no funcionaba adecuadamente en cinco de los nueve tanques sometidos a estudio.

J) Comportamiento del color

Idóneamente, el agua de consumo no debe tener ningún color apreciable. Generalmente, el color en el agua de consumo se debe a la presencia de materia orgánica coloreada (principalmente ácidos húmicos y fúlvicos) asociada al humus del suelo. Asimismo, la presencia de hierro y otros metales, bien como impurezas naturales o como resultado de la corrosión, también tiene una gran influencia en el color del agua. Si el agua de un sistema de abastecimiento tiene color, se debe investigar su origen, sobre todo si se ha producido un cambio sustancial. La mayoría de las personas puede percibir niveles de color mayores que 15 unidades de color verdadero (UCV) en un vaso de agua. Un nivel de color alto también puede indicar una gran propensión a la generación de subproductos en los procesos de desinfección, de igual forma, no se propone ningún valor de referencia basado en efectos



sobre la salud para el color en el agua de consumo (Organización Mundial de La Salud, 2011).

Normativamente en México el valor máximo permisible es de 20 UCV Pt-Co en la escala platino-cobalto, al comparar este valor con las concentraciones máximas experimentales obtenidas para la temporada de estiaje es de 4 UCV Pt-Co; en tanto para la temporada de lluvias se obtuvo un valor de 6 UCV Pt-Co, y al igual que en la turbiedad se observa el efecto de arrastre o escorrentía típico de la temporada de lluvias.

K) Comportamiento del nitrógeno amoniacal

El nitrógeno amoniacal proviene de los procesos metabólicos, agrícolas e industriales, su presencia indica posible contaminación con aguas residuales. Las descargas de aguas residuales y domésticas incrementan las concentraciones de nitrógeno amoniacal en las aguas superficiales y subterráneas, afectando la calidad de las mismas. En condiciones normales la fuente de nitrógeno amoniacal en aguas superficiales proviene de la degradación del nitrógeno orgánico y por acción bacteriana, se va oxidando gradualmente a nitritos y finalmente a nitratos. De acuerdo con la OMS el amoniaco presente en agua potable no tiene una importancia inmediata para la salud, por lo que no se propone un valor guía basado en criterios sanitarios. Sin embargo, por los problemas de olor sugiere un umbral de 1.5 mg/L, para el sabor un umbral del 35 mg/L. En México, la norma estipula un valor máximo de 0.5 mg/L para consumo y 0.06 mg/L para agua dulce en protección a la vida acuática (Angelino Perez, 2019).

De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos, el muestreo realizado durante la temporada de estiaje presentó una concentración de 0.5 mg/L, por el contrario; el muestreo que se realizó durante la temporada de lluvias proporcionó una concentración máxima de 3.92 mg/L. La comparativa con los límites establecidos por la normatividad mexicana indican contaminación en las fuentes de abastecimiento durante la temporada de lluvias, y aquí nos podemos remitir a los factores que se han descrito en el análisis del grupo coliforme, donde



consideramos la percolación y/o filtración de la materia orgánica contenida en las fosas sépticas de la región hacia el interior de los tanques de almacenamiento; posibilidad remota pero existente considerando que siete de los nueve tanques se ubican dentro de la mancha urbana y con un nivel inferior a casas habitación. Otra posibilidad a considerar, recae en la revisión de las actividades antropogénicas desarrolladas en las inmediaciones del origen o nacimiento de las fuentes de abastecimiento, puesto que las escorrentías típicas de las precipitaciones pluviales pueden impactar en la calidad del agua suministrada al Municipio.

L) Comportamiento del nitrógeno de nitratos

Los nitratos y nitritos son iones de origen natural o antropogénico que forman parte del ciclo del nitrógeno. El nitrato se utiliza principalmente en fertilizantes inorgánicos, y el nitrito sódico como conservante alimentario, especialmente para las carnes curadas. La concentración de nitrato en aguas subterráneas y superficiales suele ser baja, pero puede llegar a ser alta por filtración o escorrentía de tierras agrícolas o debido a la contaminación por residuos humanos o animales como consecuencia de la oxidación del amoníaco y fuentes similares.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda un valor de referencia para la concentración de NO_3^- en agua para consumo humano con exposición a corto plazo de 50 mg/L (11.29 N- NO_3^- /L) y para el ión nitrito (NO_2^-) de 3 mg/L (0.91 N- NO_2^- /L), teniendo este último el valor de 0.2 mg/L (0.06 N- NO_2^- /L si la exposición al ión es prolongada. En México la Norma-127-SSA1, 1994 establece un límite expresado en nitrógeno de 10 mg N- NO_3^- /L, equivalente a 44.3 mg NO_3^- /L. Cabe destacar que la norma mexicana está basada en la guía para la calidad del agua potable de la OMS de 1985, ligeramente más restrictiva (Brenes et al., 2011).

Al comparar estos valores con los valores obtenidos experimentalmente, se observa que la concentración máxima obtenida para el muestreo realizado durante la temporada de estiaje fue de 4 mg/L, paralelamente en el muestreo realizado durante la temporada de lluvias se obtuvo una concentración máxima de 5.8 mg/L, evidenciando que la presencia de nitratos en



las fuentes de abastecimiento aun no alcanza los límites máximos permisibles establecidos por la normatividad, será de vital importancia conocer el origen de la contaminación para erradicarla por completo.

M) Comportamiento del ion fosfato

El ion fosfato (PO_4^{3-}) se forma a partir del fósforo inorgánico que existe como mineral y contribuye directamente en el ciclo de este elemento en el ambiente. También puede existir en solución como partículas, como fragmentos sueltos o en los cuerpos de organismos acuáticos. El agua de lluvia puede contener distintas cantidades de fosfatos que se filtran de los suelos agrícolas a los cursos de agua próximos. El ion fosfato suele operar como un nutriente del crecimiento de algas, esto quiere decir que al existir mayor concentración de fosfatos (PO_4^{3-}), crecen las algas de manera desmedida, lo que a su vez afecta la cantidad de oxígeno presente en el agua y, por ende, el crecimiento descontrolado de materia orgánica viva, situación que conlleva una mayor tasa de descomposición, que finalmente conduce a un proceso franco de eutrofización.

Bajo los términos de la Directiva 75/440 establecida por la Comunidad Europea (CE), el valor máximo permisible para el ion fosfato es de 0.7 mg/L en aguas destinadas al consumo humano (Ambiente, 2000). Paralelamente; en Costa Rica consideran que la contaminación de lechos acuáticos con fosfatos, no implica una afectación para con la salud humana, sino en el equilibrio ambiental que genera el lixiviado del ion en altas concentraciones. (Bolaños-Alfaro et al., 2017).

Normativamente en México no se cuenta con un valor de referencia o limitante para este parámetro, experimentalmente se obtuvo una concentración máxima de 2.2 mg/L para el muestreo realizado en temporada de estiaje, de igual forma; para el muestreo realizado durante la temporada de lluvias se obtuvo una concentración máxima de 1.9 mg/L, concentraciones bajas, pero que de acuerdo con la información anterior se encuentran por encima de lo reportado por la comunidad europea. En este sentido; es importante mencionar



que la presencia de este ion pudiera deberse a una infiltración de los productos agroquímicos utilizados en la zona, ya que como se mencionó anteriormente los tanques de almacenamiento no se encuentran sellados herméticamente, es decir; se encontró al interior residuos de hojarasca proveniente del arbolado, de igual forma no podemos descartar la posibilidad de infiltración de alguna descarga de aguas residuales al interior de los tanques por fisuras en la estructura de los mismos.

N) Comportamiento de los sólidos disueltos totales (TDS)

Los sólidos disueltos totales representan una medida de la materia en una muestra de agua, de dimensiones más pequeñas de 2 micrones (2 millionésimas de un metro) y no pueden ser removidas por un filtro tradicional. Los TDS son básicamente la suma de todos los minerales, metales, y sales disueltas en el agua siendo un buen indicador de la calidad. Se clasifica como un contaminante secundario por la Agencia de Protección Ambiental de los EU (USEPA) y se sugiere un máximo de 500 mg/L en agua potable. Personas no acostumbradas al agua con alto contenido de TDS pueden experimentar irritación gastrointestinal al beber ésta, también pueden interferir con equipos de tratamiento y es importante considerarlo al instalar un sistema de tratamiento de agua (EPA, 2009).

Por otro lado; en la primera edición de las Guías para la calidad del agua potable, publicada en 1984, se estableció un valor de referencia de 1000 mg/L para los SDT, basado en consideraciones gustativas. En las Guías de 1993 no se propuso ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud para los SDT, ya que no se disponía de datos fiables sobre posibles efectos sobre la salud asociados a la ingestión de SDT en el agua de consumo. No obstante, la presencia de concentraciones altas de SDT en el agua de consumo (superiores a 1200 mg/l) puede resultar desagradable para los consumidores (Organización Mundial de La Salud, 2011).

Con la información anterior como antecedente y comparándola con los valores experimentales obtenidos, observamos que el parámetro se encuentra dentro de los



requerimientos establecidos para aguas destinadas al consumo humano. En el muestreo realizado durante la temporada de estiaje se obtuvo una concentración máxima de 156 mg/L, y para el muestreo realizado en la temporada de lluvias se obtuvo una concentración máxima de 212 mg/L, evidenciando que la escorrentía típica de las lluvias pudo haber impactado en el incremento de la concentración para el parámetro.

O) Modelos de Índice de Calidad.

En la **Tabla 20** se presentan los resultados obtenidos a partir de la evaluación de los 4 modelos de Índice de calidad (Brown, Dinius I, Dinius II, y Said):

Tabla 20. Evaluación de los Índices de Calidad de Agua

Sitio de Muestreo	WQI Brown Progresión Aritmética	WQI Brown Progresión Geométrica	WQI Dinius I	WQI Dinius II	WQI Said
San Francisco I	88.33	87.32	85.54	98.26	77.65
Buenavista	80.84	77.93	80.61	100.37	71.47
Estrella - La Joya	80.23	77.44	78.26	93.82	77.68
Coponial	79.68	76.67	77.48	88.01	75.84
Los Fresnos	79.12	75.04	79.58	88.28	67.40
El Jicote- Zacango III (La alta)	79.13	76.14	79.68	95.28	74.16
Los Hoyos- Zacango II (La baja)	79.44	75.27	85.68	101.67	66.64
San Francisco II	78.88	73.56	82.54	94.85	57.79
San Francisco III	82.85	80.41	84.23	92.12	75.75

Fuente: (Elaboración propia)



Tabla 21: Escala de Clasificación.

Valores del WQI	Descripción WQI Brown	Valores del WQI	Descripción WQI Dinius I – Dinius II	Valores del WQI	Descripción WQI Said
91-100	Excelente	91-100	Excelente	3 ≈ 100	Excelente
71-90	Buena	81-90	Buena	2 ≈ 66.66	Aceptable
51-70	Media	51-80	Regular	1 ≈ 33.33	Marginal
26-50	Mala	41-50	Mala	0	Mala Calidad
0-25	Muy Mala	0-40	Muy mala	-	-

Fuente: Elaboración propia con información consultada en: (Eugenia *et al.*, 2007; González Meléndez, Caicedo Quintero and Aguirre Ramírez, 2013)

Considerando los resultados obtenidos en la evaluación de los cuatro modelos de índice de calidad (WQI), observamos que las fuentes de abastecimiento San Francisco I, Buenavista, Estrella- Coponial, y San Francisco III presentaron una calidad de agua cercano a lo buena-aceptable. En contraparte, las cinco fuentes restantes: Coponial, Fresnos, Zacango el alta, Zacango la baja, y San Francisco II presentaron una calidad regular -media.

En cuanto al comportamiento de cada uno de los modelos de índice de calidad, se observó la funcionalidad de cada uno de ellos. Particularmente para este proyecto, consideramos que los modelos elaborados por Brown en su modalidad de regresión geométrica, Dinius I, y Said representan las mejores opciones para el monitoreo de las fuentes de abastecimiento, en este arreglo; el modelo desarrollado por Said pudiera funcionar como un indicador, es decir; a partir de los resultados arrojados en su evaluación comenzar a tomar decisiones u acciones para la mejora de la calidad en la fuente evaluada.

Finalmente, podemos decir que los modelos de Índice de Calidad del Agua (WQI), son herramientas que pudieran ser utilizadas como un medio predictivo o preventivo una vez que la fuente de abastecimiento ha sido caracterizada en su totalidad, es decir; a través de estas herramientas las fuentes de almacenamiento pudieran estar monitoreadas permanentemente con la finalidad de mantener y mejorar la calidad del agua a suministrar hacia la población.



Paralelamente, tomando como referencia los valores máximos permisibles establecidos por la NOM- 127- SSA1- 1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, y haciendo la comparativa con los resultados obtenidos en las determinaciones analíticas, se observó que las fuentes de abastecimiento utilizadas para el suministro de agua potable en el Municipio de Villa Guerrero se encontraron impactadas por contaminación microbiológica, específicamente por coliformes totales y fecales, este comportamiento se evidenció únicamente durante la jornada de muestreo realizada durante la temporada de lluvias.

Para comprender mejor la problemática del agua en el municipio de Villa Guerrero, fue necesario realizar una reseña de las condiciones en las cuales se encuentran las instalaciones de los tanques de almacenamiento:

- 1) De los 9 tanques de almacenamiento seleccionados, sólo 3 de ellos (Estrella, San Francisco I y San Francisco II) cuentan con el proceso de desinfección a través de la dosificación de una solución de hipoclorito de sodio, el sistema utilizado para este fin se basa en el goteo, la solución de hipoclorito de sodio se almacena en tinacos de 200 L; donde a partir de una manguera y una válvula controlan la dosificación de la solución al interior de los tanques.
- 2) Los tanques que suministran a la Cabecera Municipal (Fresnos y Coponial) cuentan con el sistema de dosificación con base en el suministro de gas cloro; este sistema se encuentra totalmente automatizado y operando adecuadamente.
- 3) Los restantes 4 tanques contaban con la infraestructura para la dosificación de la solución de hipoclorito de sodio, pero por distintas situaciones ajenas al personal administrativo, la desinfección para estos tanques no podía llevarse a cabo en ese momento.
- 4) Para el caso particular de los tanques Zacango I, II y Estrella se encontró que los tanques no estaban perfectamente sellados, es decir; era posible encontrar hojarasca y residuos de corteza vegetal al interior de los mismos.
- 5) Como detalle a considerar, Villa Guerrero no cuenta con una red de drenaje-alcantarillado que permita una mejor disposición de los residuos líquidos generados



MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

al interior del municipio, la forma en la cual disponen de este tipo de residuos es a través de fosas sépticas.

- 6) La estructura de los tanques de almacenamiento se conforma a partir de paredes y losa-tapa de concreto, parte de ellos se encuentran enterrados unos cuantos metros bajo tierra, y como posibilidad podrían presentar filtraciones del medio hacia el interior, mencionar que no se encuentran sellados herméticamente puesto que es posible encontrar residuos de corteza vegetal al interior de los mismos.
- 7) De acuerdo con los administradores, la limpieza de los tanques se realiza cada 6 meses.



5.2 ESTRATEGIAS DE MEJORA

Las Guías para la Calidad del Agua de Consumo Humano publicadas por la OMS(Organización Mundial de La Salud, 2011) establecen lo siguiente para aspectos microbiológicos:

“La garantía de la inocuidad microbiana del abastecimiento de agua de consumo se basa en la aplicación, desde la cuenca de captación al consumidor, de barreras múltiples para evitar la contaminación del agua de consumo o para reducirla a niveles que no sean perjudiciales para la salud. La estrategia preferida es un sistema de gestión que hace hincapié en la prevención o reducción de la entrada de patógenos a los recursos hídricos y que reduce la dependencia en las operaciones de tratamiento para la eliminación de patógenos. En términos generales, los mayores riesgos microbiológicos se asocian a la ingestión de agua contaminada con heces fecales de origen humano o animal (incluidas las de las aves). Las heces fecales pueden ser fuente de agentes patógenos, como bacterias, virus, protozoos y helmintos”.

Con base en la información anterior, y considerando la infraestructura de los tanques de almacenamiento sometidos a estudio, se proponen las siguientes estrategias para mejorar la calidad de agua suministrada hacia el abastecimiento público en el Municipio.

- 1) Realizar un estudio de permeabilidad en suelo por los alrededores de cada uno de los tanques de almacenamiento, la finalidad es determinar la dirección del flujo generado por los escurrimientos en temporada de lluvias. Con esta acción podemos descartar o confirmar posibles escurrimientos provenientes de las fosas sépticas, es importante realizar ensayos para determinar presencia de coliformes.
- 2) Generar un mapa de vulnerabilidad hídrica basado en un reconocimiento físico del origen o nacimiento de los veneros utilizados como fuentes de abastecimiento. Sera importante identificar las actividades humanas o factores naturales que pudieran estar impactando en la calidad del agua a lo largo de su trayectoria, justo antes de llegar al punto donde se entuba el flujo.



- 3) Implementar un programa trimestral de limpieza al interior de los tanques, al suministrar agua para consumo humano las condiciones de limpieza tienen que ser constante.

En cuanto a la desinfección, la guía indica lo siguiente:

“La desinfección tiene una importancia incuestionable en la seguridad del abastecimiento de agua de consumo humano. La eliminación de microorganismos patógenos es una operación fundamental que muy frecuentemente se realiza con productos químicos reactivos como el cloro. La desinfección constituye una barrera eficaz contra numerosos agentes patógenos (especialmente las bacterias) durante el tratamiento del agua de consumo humano y debe utilizarse tanto para las aguas superficiales como para las aguas subterráneas expuestas a la contaminación fecal. La turbiedad elevada puede proteger a los microorganismos de los efectos de la desinfección, estimular la proliferación de bacterias y generar una demanda significativa de cloro. Resulta esencial que se implemente una estrategia general de gestión eficaz con múltiples barreras conjuntamente con la desinfección a fin de evitar o eliminar la contaminación microbiana, proteger el agua de la fuente y permitir procesos de tratamiento adecuados, así como la protección del agua durante su almacenamiento y distribución”.

En la sección de anexos es posible consultar la relación de tanques de almacenamiento donde se realiza desinfección, de igual forma; la CAEM reporta aquellas fuentes que por razones de mantenimiento o falta de infraestructura no realiza el proceso de desinfección, por consiguiente:

- 4) Implementar en la medida de lo posible la automatización y el funcionamiento al 100 % del proceso de cloración en los puntos donde no se está realizando, realizando un monitoreo constante para evaluar la eficiencia del proceso.



CAPÍTULO 6
CONCLUSIONES



6 CONCLUSIONES

- ❖ Las determinaciones analíticas nos permitieron caracterizar de manera general las propiedades químicas, físicas, y organolépticas correspondientes al agua suministrada para el consumo humano en el municipio de Villa Guerrero, Estado de México.
- ❖ Fue posible establecer que la calidad del agua oscila entre buena y regular calidad, en función de los Índices de Calidad utilizados.
- ❖ En cuanto a la calidad microbiológica se detectó presencia de contaminación, condición observada solo para el muestreo correspondiente a la temporada de lluvias.
- ❖ La presencia de nitrógeno amoniacal en las muestras, es indicio de una posible contaminación con aguas residuales domésticas derivada de una posible infiltración al interior de los tanques.
- ❖ La presencia de nitratos puede estar relacionada con la aplicación de fertilizantes, derivado de la principal actividad económica desarrollada en el municipio: La producción de flor.
- ❖ Cabe la posibilidad de que la presencia de nitratos también pueda provenir a la oxidación del amonio (NH_4^+) y de otras fuentes presentes en los residuos orgánicos, y con fuentes de contaminación no puntuales como los campos de cultivo, fuentes puntuales como una descarga de aguas residuales domésticas, o la presencia de tiraderos de basura a cielo abierto.
- ❖ La presencia de la concentración de fosfatos puede estar relacionada con el caso de los nitratos: La aplicación de fertilizantes y la infiltración de aguas residuales al interior de los tanques de almacenamiento; pudieran ser los factores que inciden.
- ❖ La evaluación de los cuatro diferentes modelos de Índice de Calidad nos permitió cuantificar y cualificar el grado de sanidad de las fuentes de abastecimiento utilizadas en el municipio de Villa Guerrero en el Estado de México, con valores de alrededor 80 y con una clasificación de buena para: San Francisco I, Buenavista, Estrella-Joya, y San Francisco III. Para las restantes 5 fuentes: Coponial, San Francisco II, Zacango el Alta, Zacango la Baja, y San Francisco III se obtuvieron valores que oscilan entre los 75 y 79, con escala de clasificación regular. Las variabilidades en los resultados son comprensibles derivado del impacto propiciado por el grupo Coliforme.
- ❖ El modelo desarrollado por Brown no presentó diferencias significativas al momento de evaluar la progresión geométrica respecto a la progresión aritmética.



- ❖ Se verificó que existen marcadas diferencias entre el modelo Dinius I y Dinius II al momento de realizar su evaluación. El modelo Dinius II incremento demasiado los valores, este comportamiento genero un incremento en la calidad del agua durante ambos muestreos realizados. La formulación de cada uno de los modelos probablemente represente un factor de incidencia. La formulación de Dinius I se desarrolla bajo los conceptos de un promedio aritmético ponderado, y por otro lado; Dinius II se evalúa bajo un índice multiplicativo además de la incorporación de un parámetro adicional, nitratos.
- ❖ El modelo de Índice de calidad Dinius I presento una escala de clasificación que oscila entre la media y la buena calidad para ambos muestreos. El modelo de Índice de calidad Dinius II presento una escala de clasificación que oscila entre la buena y la excelente calidad para ambos muestreos.
- ❖ Comparando los resultados obtenidos entre los modelos Dinius I y Dinius II, se establece que el modelo Dinius I es más conservador, ofreciendo un comportamiento bastante similar al modelo de Brown.
- ❖ El modelo de Índice desarrollado por Said presento una escala de clasificación que oscila entre lo marginal y lo aceptable, para el caso marginal se sugiere realizar un tratamiento de acuerdo a las necesidades.
- ❖ Los modelos de Índice de calidad propuestos se comportaron de manera similar, demostrando que aún en la actualidad son elementos que se pueden explotar en pro de una adecuada planeación en la gestión del recurso.



BIBLIOGRAFÍA

Abbasi, T., & Abbasi, S. . . (2012) ““ Conventional ” Indices for Determining Fitness of Waters for Different Uses. Water Quality Indices’, in *Water Quality Indices*. 1 ra, pp. 25–62. doi: 10.1016/B978-0-444-54304-2.00003-8.

Abbasi, T. & and Abbasi, S. A. (2012) ‘Water-Quality Indices of USA and Canada’, *Water Quality Indices*, pp. 175–186. doi: 10.1016/b978-0-444-54304-2.00010-5.

Agua, C. N. del (2018) *Estadísticas del agua en México*. México.

Ambiente, M. de M. (2000) *Libro Blanco del Agua de España*. 1ra Edició. Edited by C. de P. S. G. T. M. de M. Ambiente.

Angelino Perez, L. (2019) *Diagnóstico de la presencia de nitrógeno superficial del agua de la media luna a través de un análisis geoespacial tesis*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Asadollahfardi, G. (2015) *Water Quality Management Assessment and Interpretation*. Edited by S. B. I. W. S. A. TECHNOLOGY. Tehran, Iran.

Barreto, C. (2009) *Análisis Químico I - Un Enfoque Ambiental*. Callao, Perú.

Bautista Olivas, A. L. *et al.* (2013) ‘Calidad microbiológica del agua obtenida por condensación de la atmósfera en Tlaxcala, Hidalgo y Ciudad de México’, *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 29(2), pp. 167–175.

Bilgin, A. (2018) ‘Evaluation of surface water quality by using Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) method and discriminant analysis method: a case study Coruh River Basin’, *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(9). doi: 10.1007/s10661-018-6927-5.

Bolaños-Alfaro, J. D., Cordero-Castro, G. and Segura-Araya, G. (2017) ‘Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica)’, *Revista Tecnología en Marcha*, 30(4), p. 15. doi: 10.18845/tm.v30i4.3408.



Bordalo, A. A., Nilsumranchit, W. and Chalermwat, K. (2001) 'Water Quality and uses of the Bangpakong River (Eastern Thailand)', *Wat. Res*, 35(15), pp. 3635–3642. Available at: https://ac.els-cdn.com/S0043135401000793/1-s2.0-S0043135401000793-main.pdf?_tid=3627eb9f-bb32-46f2-b96b-4d432f02c6a2&acdnat=1524805823_d4ed71aafd5c1f1326b064531d6921b0.

Brenes, R., Cadena, A. and Ruiz-Guerrero, R. (2011) 'Monitoreo de la concentración de nitrato en el acuífero del Valle de Puebla', *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(4), pp. 313–321.

Comisión Nacional del Agua (2011) 'Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Tenancingo (1504), Estado de México', *Conagua*, 2011, p. 23. Available at: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103135/DR_1504.pdf.

EPA (2009) *National Secondary Drinking Water Regulations (NSDWRs)*. Available at: <https://www.epa.gov/sdwa/drinking-water-regulations-and-contaminants>.

Eugenia, N. *et al.* (2007) 'Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua A review of physical-chemical parameters as water quality and contamination indicators', 27(3), pp. 172–181.

Fernández, Nelson; Ramirez, Alberto; Solano, F. (2004) 'Physico-chemical water quality indices - a comparative review -', *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 2(1), pp. 19–30. doi: 10.24054/01204211.v1.n1.2004.9.

Ferriman, A. (2007) 'Lack of hospital beds causes emergency departments to miss targets.', *BMJ (Clinical research ed.)*, 334(7585), p. 111. doi: 10.1136/bmj.39098.461968.DB.

García Vargas, A. *et al.* (2009) 'Cloruros totales en el agua de abastecimiento', *Centro interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional.*, p. 3. Available at: <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/8825/1/clorurosnov12.pdf>.

Gómez-Gutierrez, A. *et al.* (2016) 'La calidad sanitaria del agua de consumo', *Gaceta Sanitaria*, 30, pp. 63–68. doi: 10.1016/j.gaceta.2016.04.012.



González Meléndez, V., Caicedo Quintero, O. and Aguirre Ramírez, N. (2013) ‘Application of water quality indices NSF , DINIUS and BMWP’, *Gestión y Ambiente*, (1), pp. 97–108.

Henry, J.G.; Heinke, G. W. (1999) ‘Ingenieria-Ambiental_Glynn.Pdf’, in. Toronto, Ontario. Canada., pp. 388–399.

INEGI (2009) *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Villa Guerrero , México Clave geoestadística 15113*.

INEGI (2014) *Carta Topográfica E14-A58. Tenancingo de Degollado 35*.

Jonnalagadda, S. B. and Mhere, G. (2001) ‘Water quality of the odzi river in the Eastern Highlands of Zimbabwe’, *Water Research*, 35(10), pp. 2371–2376. doi: 10.1016/S0043-1354(00)00533-9.

Julián-Soto, F. (2010) ‘La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias’, *Ingeniería, investigación y tecnología*, 11(2), pp. 167–177. doi: 10.22201/fi.25940732e.2010.11n2.014.

Das Kangabam, R. *et al.* (2017) ‘Development of a water quality index (WQI) for the Loktak Lake in India’, *Applied Water Science*, 7(6), pp. 2907–2918. doi: 10.1007/s13201-017-0579-4.

Das Kangabam, R. and Govindaraju, M. (2017) ‘Anthropogenic activity-induced water quality degradation in the Loktak lake, a Ramsar site in the Indo-Burma biodiversity hotspot’, *Environmental Technology (United Kingdom)*, 0(0), pp. 1–10. doi: 10.1080/09593330.2017.1378267.

Lumb, A. *et al.* (2011) ‘A Comparative Study of USA and Canadian Water Quality Index Models’, *Water Quality, Exposure and Health*, 3(3–4), pp. 203–216. doi: 10.1007/s12403-011-0056-5.

Manahan, S. E. (2007) ‘Introducción a la Química Ambiental’, in UNAM (ed.). México: Editorial Reverte S.A. DE C.V., pp. 31–35.

Monte Perez, I. (2016) *Agua , pH y equilibrio químico : Entendiendo el efecto del dióxido de*



carbono en la acidificación de los océanos. México, D.F. Available at: <http://www.sems.gob.mx/work/models/sems/Resource/12235/5/images/agua-ph-ciencias.pdf>.

Municipio de Villa Guerrero, E. de M. (2016) *Plan Municipal de Desarrollo Urbano*.

Neira, M. A. (2006) *Dureza En Aguas De Consumo Humano Y Uso Industrial , Impactos Y Medidas De Mitigación . Estudio De Caso : Chile*. Santiago de Chile.

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud Ambiental, A. para uso y consumo humano-L. permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización". (1994) 'Normalización, Metrología. Secretaría de Economía.', 127, pp. 1–7.

Normalización, M. S. de E. (2006) 'Ley Federal Sobre Metrología Y Normalización * Disposiciones Generales', pp. 1–48.

Organización Mundial de La Salud (2011) 'Guías para la calidad del agua de consumo humano.', *Organización Mundial de la Salud*, 4, p. 608. Available at: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Regmi, R. K. *et al.* (2017) 'Applying a water quality index model to assess the water quality of the major rivers in the Kathmandu Valley, Nepal', *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(8). doi: 10.1007/s10661-017-6090-4.

Robles, E. *et al.* (2013) 'Calidad Bacteriológica y físicoquímica del agua del acuífero Tepalcingo-Axochiapan, Morelos, México', *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(1), pp. 19–28.

Roldán, G. (2007) 'El Uso De Macroinvertebrados Como Bioindicadores De La Calidad Del Agua', *Revista Biocenosis*, pp. 95–104.

Said, A., Stevens, D. K. and Sehlke, G. (2004) 'An innovative index for evaluating water quality in streams', *Environmental Management*, 34(3), pp. 406–414. doi: 10.1007/s00267-004-0210-y.



Sedeño-Díaz, J. E. and López-López, E. (2007) 'Water quality in the Río Lerma, Mexico: An overview of the last quarter of the twentieth century', *Water Resources Management*, 21(10), pp. 1797–1812. doi: 10.1007/s11269-006-9128-x.

Steinhart, C., Schierow, L.-J. and Sonzogni, W. C. (1982) 'An Environmental Quality Index for the Great Lakes', *Water Resources Bulletin*, 18(6), pp. 1025–1031.

Torres, Patricia. Cruz, Camilo. Patiño, P. (2009) 'Índices calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica.', *Revista Ingenierías. Universidad de Medellín, Colombia.*, 8(15), pp. 79–94.

Torres Vega, F. (2009) *Desarrollo y Aplicación de un Índice de Calidad de Agua para ríos en Puerto Rico*. Universidad de Puerto Rico. Recinto Universitario de Mayagüez.

Tripathi, M. and Singal, S. K. (2019) 'Use of Principal Component Analysis for parameter selection for development of a novel Water Quality Index: A case study of river Ganga India', *Ecological Indicators*, 96(May 2018), pp. 430–436. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.09.025.

UNEP (2008) 'Water Quality for Ecosystem and Human Health', *WATER PROGRAM*, pp. 2–5, 130. Available at: http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/12217/water_quality_human_health.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Velázquez- Machuca, M. A. and Pimentel- Equihua, J. L. (2012) 'Calidad del agua potable en la Ciénaga de Chapala , Michoacán , México', *Tecnología y Ciencias del Agua*, III, pp. 111–125.



ANEXOS



**RELACIÓN DE FUENTES DE ABASTECIMIENTO ADMINISTRADAS POR EL
MUNICIPIO DE VILLA GUERRERO, ESTADO DE MÉXICO**



MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES



Gobierno del Estado de México
Secretaría de Obra Pública
Comisión del Agua del Estado de México



VOLUMEN ESTIMADO DEL SUMINISTRO Y RECARGA DE REACTIVOS DE GAS CLORO Y/O
HIPOCLORITO DE SODIO Y MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS DE CLORACION GENERADO EN
EL MES DE MAYO DE 2018

MUNICIPIO DE VILLA GUERRERO

PERIODO : Del 22/04/2018 al 21/05/2018

GERENCIA REGIONAL DE COATEPEC HARINAS

CAUDAL MUNICIPAL

No.	NOMBRE DE LA FUENTE	CAUDAL (L.P.S.)	VOLUMEN DIARIO (M ³)	DIAS CLORADOS	VOLUMEN MENSUAL (M ³)
1	BUENAVISTA/BUENAVISTA 2	1.20	103.68	30.00	3,110.40
2	EL BORBOLLON/ EJIDO COAPEXCO	0.30	25.92	30.00	777.60
3	MANANT. EL COPONIAL Y POZO PROFUNDO.	13.60	1,175.04	29.00	34,076.16
4	EL COPONIAL / SANTA MARIA ARANZAZU	5.60	483.84	0.00	0.00
5	EL JICOTE/ SAN GASPAS	1.00	86.40	30.00	2,592.00
6	EL JICOTE/ ZACANGO 1	4.50	388.80	30.00	11,664.00
7	EL JICOTE/ ZACANGO 3	0.50	43.20	30.00	1,296.00
8	AGUA TAPADA/ SANTIAGO OXTOTITLAN	5.80	501.12	30.00	15,033.60
9	EL TEJOCOTE/ CRUZ VIDRIADA	0.30	25.92	0.00	0.00
10	EL ZARZAL/ SAN MATEO COAPEXCO	3.40	293.76	30.00	8,812.80
11	LA ESTRELLA/ BUENAVISTA 1	1.20	103.68	30.00	3,110.40
12	LA ESTRELLA/ EL ISLOTE	1.70	146.88	30.00	4,406.40
13	LA ESTRELLA/ LA JOYA	0.90	77.76	30.00	2,332.80
14	LA ESTRELLA/ SAN FRANCISCO 1	1.40	120.96	0.00	0.00
15	LA ESTRELLA/ SAN MIGUEL	3.36	336.96	30.00	10,108.80



MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES



Gobierno del Estado de México
Secretaría de Obra Pública
Comisión del Agua del Estado de México



VOLUMEN ESTIMADO DEL SUMINISTRO Y RECARGA DE REACTIVOS DE GAS CLORO Y/O IPOCLORITO DE SODIO Y MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS DE CLORACION GENERADO EN EL MES DE MAYO DE 2018

MUNICIPIO DE VILLA GUERRERO

PERIODO : Del 22/04/2018 al 21/05/2018

GERENCIA REGIONAL DE COATEPEC HARINAS

CAUDAL MUNICIPAL

No.	NOMBRE DE LA FUENTE	CAUDAL (L.P.S.)	VOLUMEN DIARIO (M³)	DIAS CLORADOS	VOLUMEN MENSUAL (M³)
16	LA ESTRELLA / SAN LUCAS	2.20	190.08	30.00	5,702.40
17	LA JOYA DE LEOPOLDO/ PORFIRIO DIAZ	1.00	86.40	30.00	2,592.00
18	LAS CANDELITAS/ SAN FELIPE	1.00	86.40	30.00	2,592.00
19	LOS AILES/ TOTOLMAJAC	3.60	311.04	0.00	0.00
20	LOS CHICAMOLES 1/ JESUS CARRANZA	4.50	388.80	30.00	11,664.00
21	LOS FRESNOS/CABECERA MUNICIPAL	5.60	483.84	29.00	14,031.36
22	LOS HOYOS/ ZACANGO 2	2.90	250.56	30.00	7,516.80
23	LOS TEPETATES/ LOMA DEL CAPULIN	2.50	216.00	0.00	0.00
24	PASO DEL MACHO/ SAN BARTOLO	3.60	311.04	30.00	9,331.20
25	SIN NOMBRE/ LOMA DE LA CONCEPCION	2.00	172.80	30.00	5,184.00
26	SIN NOMBRE/ SAN FRANCISCO 2	0.60	51.84	30.00	1,555.20
27	POZO BUENAVISTA / POZO BUENAVISTA	2.10	181.44	30.00	5,443.20
28	EL DURAZNO/ SAN MIGUEL 2	1.00	86.40	30.00	2,592.00
29	LOS CHICAMOLES LA FINCA		172.80	30.00	5,184.00

SECRETARÍA DE OBRA PÚBLICA
MAY 2018
H. AYUNTAMIENTO DE VILLA GUERRERO, MEX.
ING. ENRIQUE BERNAL PERDOMO.
SECRETARIO MUNICIPAL

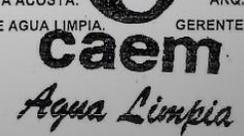
PRIMERA REGIDURIA
MAY 2018
H. AYUNTAMIENTO DE VILLA GUERRERO, MEX.
C. ASTURCIVER RODRIGUEZ TRUJILLO.
PRIMER REGIDOR LOCAL AYUNTAMIENTO.
MANTENIMIENTO CONSTITUCIONAL PARA LA CAEM

RECURSOS HIDRAULICOS
MAY 2018
H. AYUNTAMIENTO DE VILLA GUERRERO, MEX.
ING. EZEQUIEL SALINAS ACOSTA.
DIRECTOR DE AGUA POTABLE Y SANAMIENTO.

ING. LUIS A. GORDILLO GAMACHO
JEFE DEL AREA DE AGUA LIMPIA

DR. RAUL SALVADOR NAVA ACOSTA.
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE AGUA LIMPIA

ARQ. MAURILIO ESQUIVEL HIGUERA
GERENTE REGIONAL DE COATEPEC HARINAS





MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES



Gobierno del Estado de México
Secretaría de Obra Pública
Comisión del Agua del Estado de México



VOLUMEN ESTIMADO DEL SUMINISTRO Y RECARGA DE REACTIVOS DE GAS CLORO Y/O IPOCCLORITO DE SODIO Y MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS DE CLORACION GENERADO EN EL MES DE MAYO DE 2018

MUNICIPIO DE VILLA GUERRERO

PERIODO : Del 22/04/2018 al 21/05/2018

GERENCIA REGIONAL DE COATEPEC HARINAS

CAUDAL MUNICIPAL

No.	NOMBRE DE LA FUENTE	CAUDAL (L.P.S.)	VOLUMEN DIARIO (M³)	DIAS CLORADOS	VOLUMEN MENSUAL (M³)
30	QUEQUIXTLA JESUS CARRANZA 2	1.20	103.68	25.00	2,592.00
31	LOS CHICAMOLES EJIDO LA FINCA	1.50	129.60	30.00	3,888.00
32	LOS CHICAMOLES POTRERO NUEVO	1.20	103.68	30.00	3,110.40
33	LA ESTRELLA SAN DIEGO	3.40	293.76	30.00	8,812.80
34	QUEQUIXTLA COXCACUACO.	1.30	112.32	25.00	2,808.00
35	LOS CHICAMOLES PROGRESO HIDALGO.	1.75	151.20	30.00	4,536.00
36	LOS MIMBRES /COXCACUACO / 2	0.50	43.20	30.00	1,296.00
SUMA		90.75	7,840.80		197,752.32

Observaciones:

MANANT. EL COPONIAL Y POZO PROFUNDO. - POR FALTA DE ENERGIA ELECTRICA.
 EL COPONIAL / SANTA MARIA ARANZAZU - POR FALTA DE ENERGIA ELECTRICA.
 EL TEJOCOTE/ CRUZ VIDRIADA - ESTE EQUIPO FUE SUSTRADO DEL TANQUE DE REG.
 LOS AILES/ TOTOLMAJAC - POR TRABAJOS DE CONSTRUCCION DE CASETA PARA PROTECCION DEL EQUIPO.
 LOS FRESNOS/CABECERA MUNICIPAL - POR FALTA DE ENERGIA ELECTRICA.
 LOS TEPETATES/ LOMA DEL CAPULIN - ESTE EQUIPO FUE SUSTRADO DEL TANQUE DE REG.
 QUEQUIXTLA JESUS CARRANZA 2 - ESTE EQUIPO TRABAJA INTERMITENTE.
 QUEQUIXTLA COXCACUACO. - ESTE EQUIPO TRABAJA INTERMITENTE.

GRAN TOTAL 197,752.32



LIC. ENRIQUE BERNAL PERDOMO.
SECRETARIO MUNICIPAL

ING. LUIS A. GORDILLO CAMACHO
JEFE DEL AREA DE AGUA LIMPIA



DR. RAUL SALVADOR NAVA ACOSTA
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE AGUA LIMPIA.



ARQ. MAURILIO ESQUIVEL HIGUERA
GERENTE REGIONAL DE COATEPEC HARINAS





CURVAS UTILIZADAS EN EL INDICE DE CALIDAD DE BROWN

Fuente: Eugenia *et.al.*(2007).

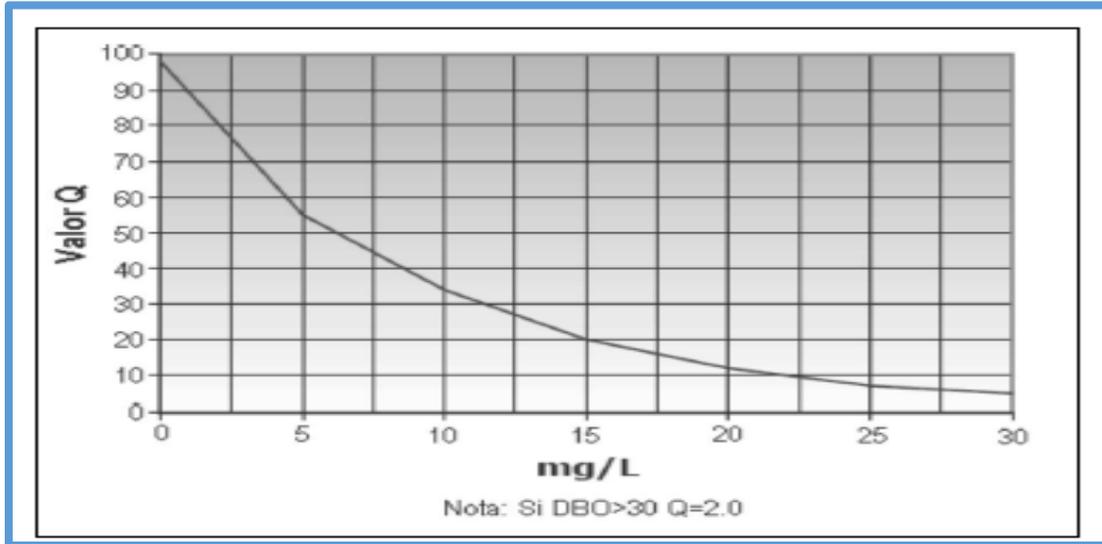


Grafico 1. Curva de calidad DBO.

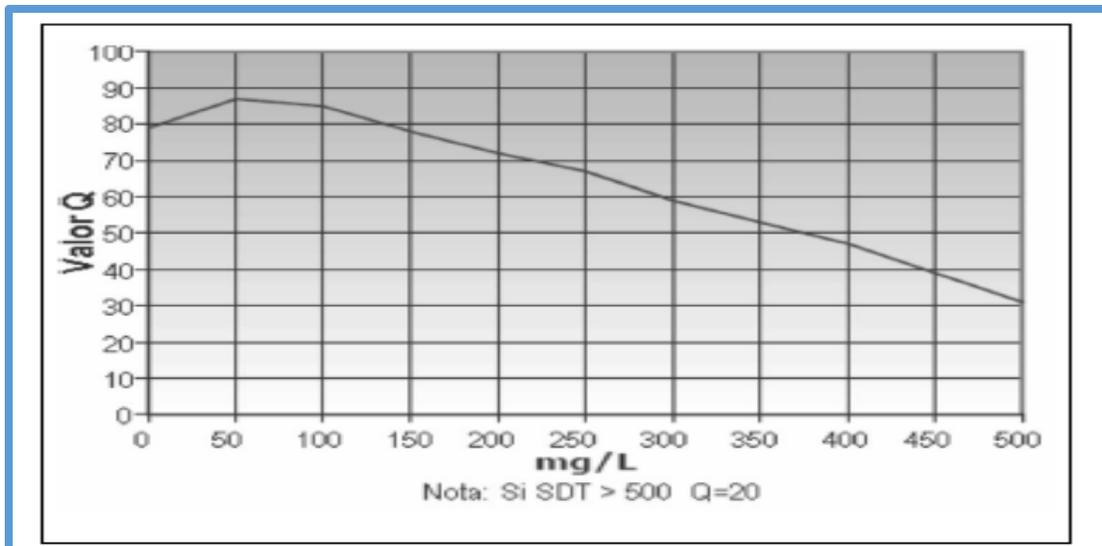


Grafico 2: Curva de Calidad de SDT

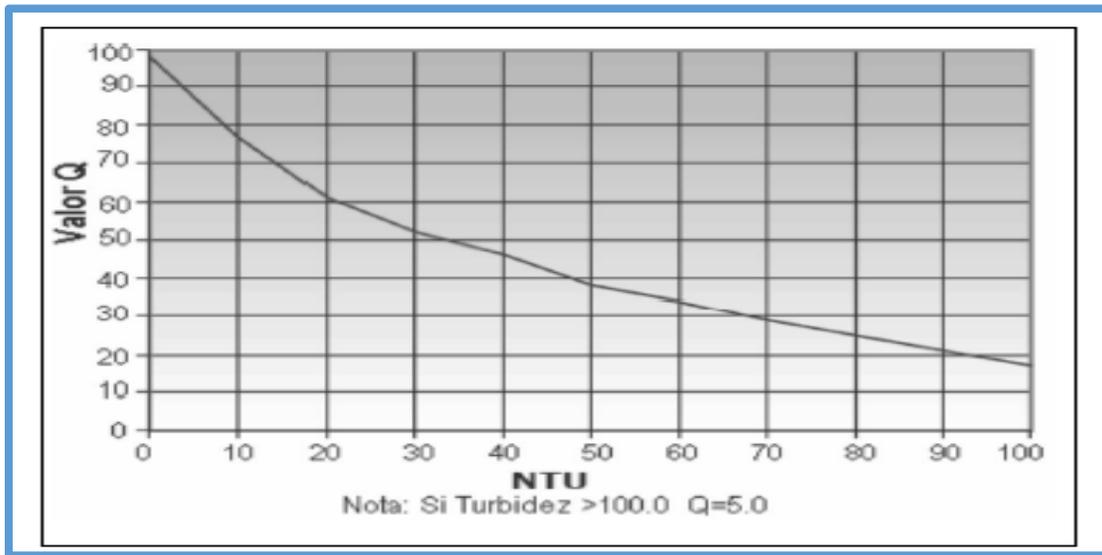


Gráfico 3. Curva de calidad de turbidez.

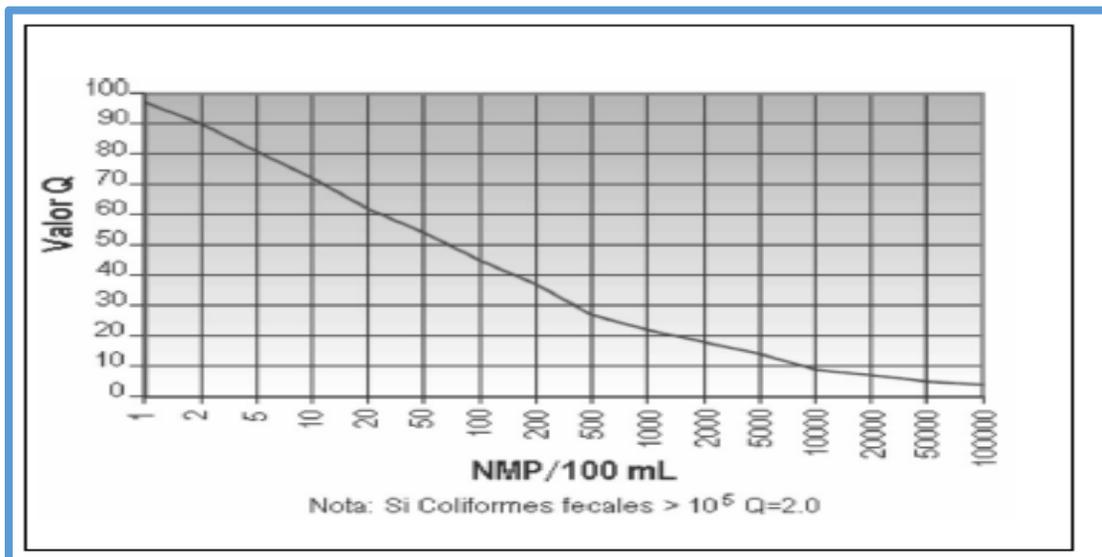


Gráfico 4. Curva de calidad de Coliformes Fecales.

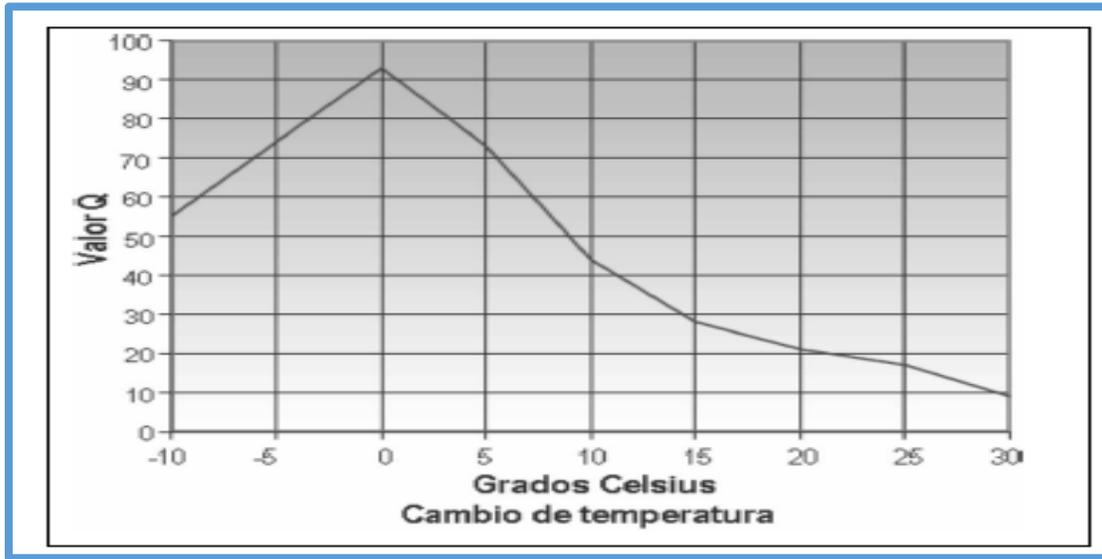


Grafico 5. Curva de calidad de temperatura.

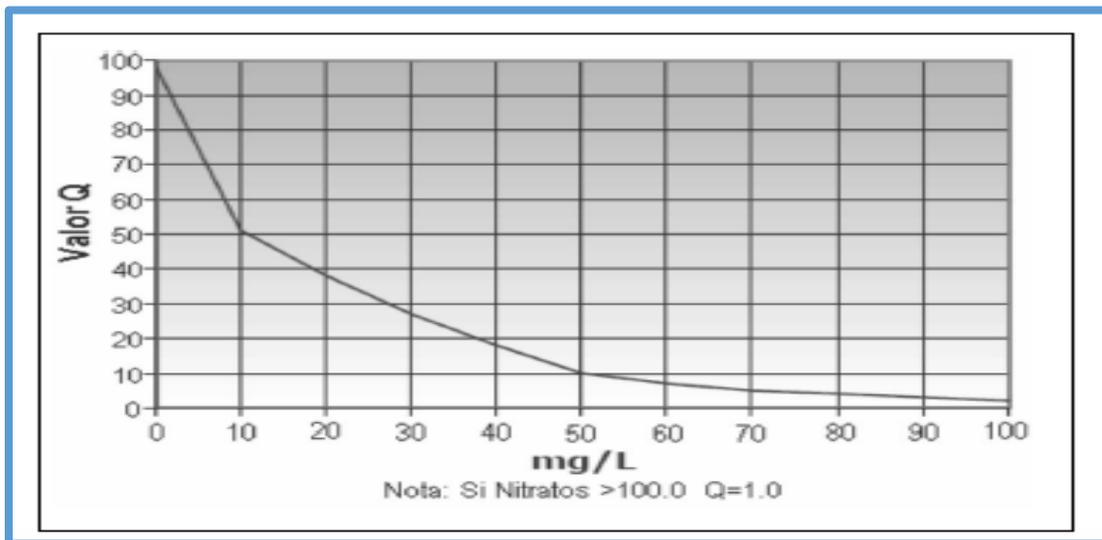


Grafico 6. Curva de calidad de nitratos.

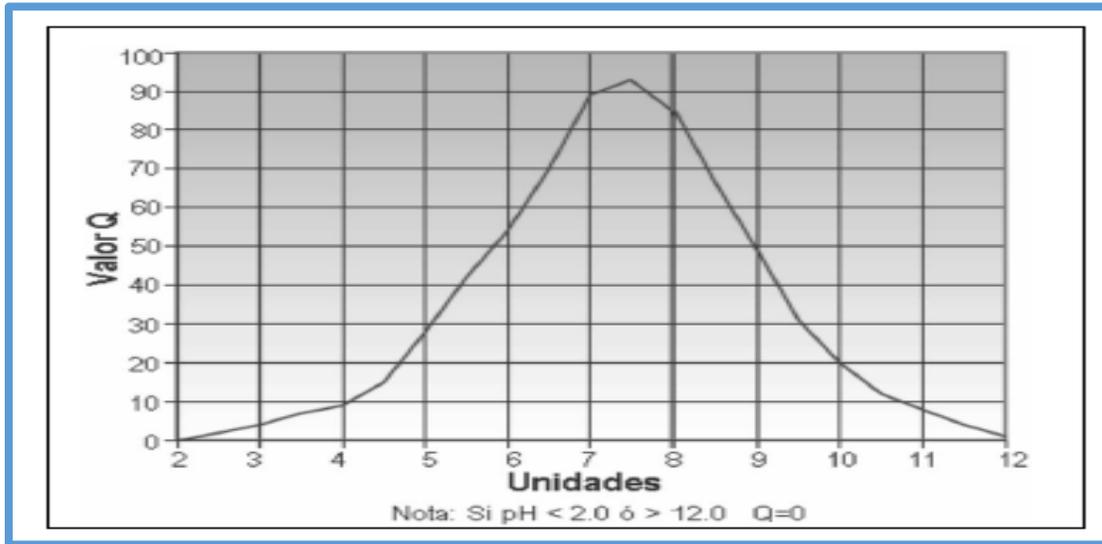


Grafico 7. Curva de calidad de pH.

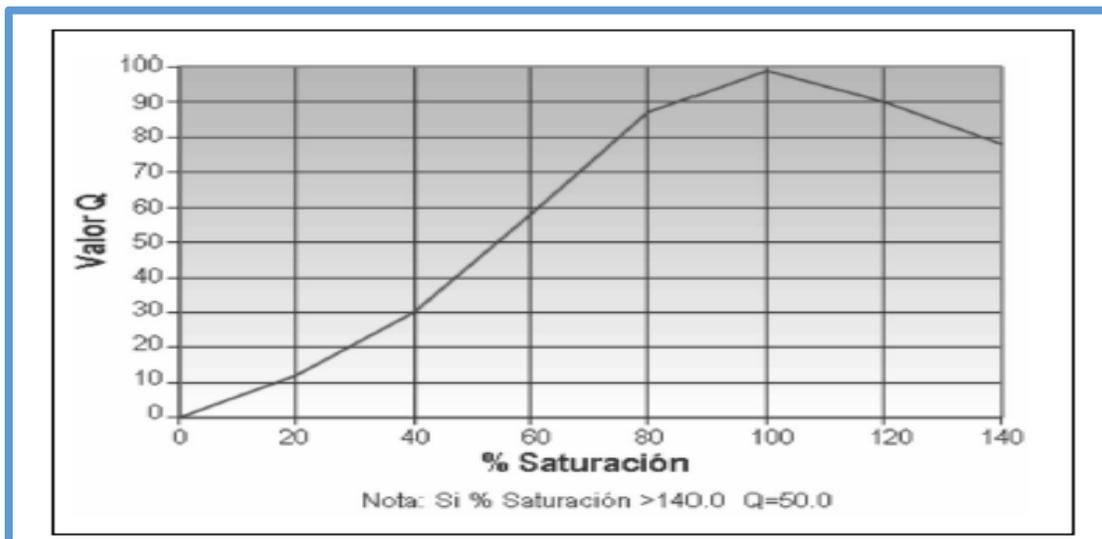


Grafico 8. Curva de calidad de % OD

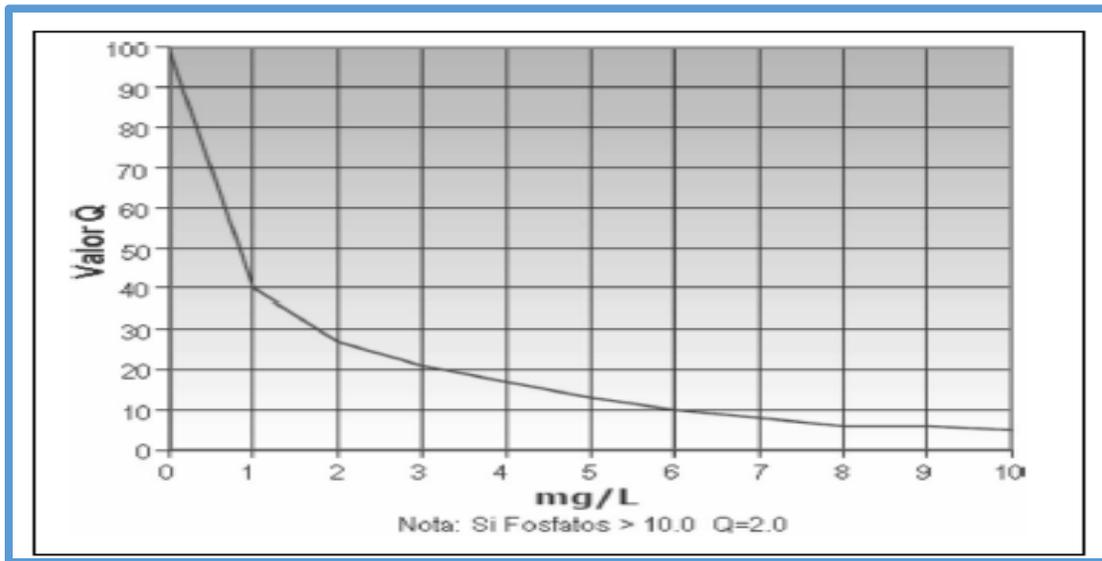


Gráfico 9. Curva de calidad de fosfatos



ACERVO FOTOGRÁFICO



Imagen 1: Tanque de almacenamiento San Francisco I.

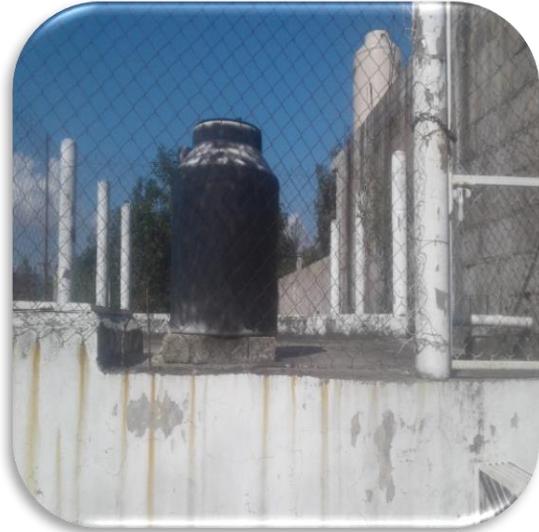


Imagen 2: Tanque de almacenamiento la Estrella.



Imagen 3: Tanque de almacenamiento los Fresnos



Imagen 4: Tanque de almacenamiento San Francisco II



Imagen 5: Muestreo en tanque de almacenamiento San Francisco I.



Imagen 6: Muestreo en tanque de almacenamiento la Estrella.



Imagen 7: Muestreo en tanque de almacenamiento San Francisco II



Imagen 8: Muestreo en tanque de almacenamiento Zacango I.



Imagen 9: Preparando muestreo para el grupo Coliforme.



Imagen 10: Conservación de la muestra durante las jornadas de muestreo.



Imagen 11: Medición de oxígeno disuelto en laboratorio.



Imagen 12: Comenzando con trabajo en laboratorio.



Imagen 13: Limpieza del material a utilizar para determinar el gpo Coliforme.



Imagen 14: Preparación del material y reactivos a esterilizar.

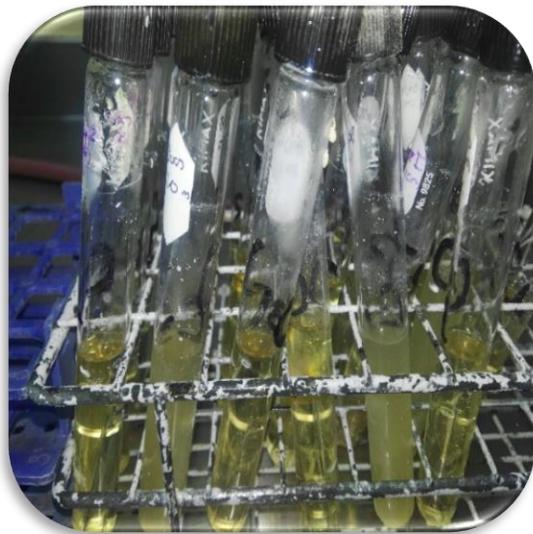


Imagen 15: Identificación de gas y turbidez en tubos.



Imagen 16: Resiembra de tubos para prueba confirmatoria del Gpo Coliforme.



Imagen 17: Determinación de parámetros mediante volumetría.



Imagen 18: Determinación de acidez.



Imagen 19: Determinación de alcalinidad.



Imagen 20: Determinación de dureza.



Imagen 21: Determinación de acidez cloruros.



Imagen 22: Medición de oxígeno disuelto inicial para DBO_5 mediante el método electroquímico..



Imagen 23: Preparación de frascos winkler para DBO_5 .



Imagen 24: Frascos winkler para DBO_5 puestos a incubar.



RESULTADOS GENERALES



RESULTADOS GENERALES PRIMER MUESTREO

Sitio de Muestreo	pH	Conductividad eléctrica (µs/cm)	Turbidez (NTU)	Acidez total como CaCO ₃ (mg/L)	Alcalinidad total como CaCO ₃ mg/L	Dureza (mg/L)	Cloruros Cl ⁻ (mg/L)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	DBO 5 (mg/L)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Fecales (NMP)	Color Pt-Co	Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	Nitrógeno como Nitratos (mg/L)	Fosfatos totales (mg/L)	Sólidos Totales (mg/L)	Sólidos Suspendidos (mg/L)	Sólidos Disueltos (mg/L)	Temperatura del agua (°C)
San Francisco I	7.47	91.775	0.1	8.85	63.7	50.015	18.18585	5.89	0.885	0	0	0	0.51	1.4	0.6933	66	48	18	8
Buenavista	7.52	76.13	0.11	11.505	39.2	20.006	12.1239	6.2	2.64	0	0	0	0.29	0.6	1.205	112	68	44	9
Estrella - La Joya	7.76	78.88	0.04	3.9825	39.2	60.018	16.1652	5.14	2.97	0	0	0	0.03	0.6	0.8389	94	36	58	11
Coponial	7.44	110.65	0.02	13.275	49	80.024	20.2065	4.42	2.475	0	0	0	0.21	3.2	0.9856	114	30	84	13.5
Los Fresnos	7.28	160.3	0.2	8.85	58.8	100.03	18.18585	5.34	1.26	0	0	1	0.21	4.4	1.3207	154	30	124	14
El Jicote-Zacango III (La alta)	8.44	72.83	0.17	17.7	58.8	60.018	5.859885	4.3	0.905	0	0	4	0	0.4	0.8895	132	16	116	12
Los Hoyos-Zacango II (La baja)	8	73.31	0.11	17.7	44.1	45.0135	5.051625	4.29	0.665	0	0	1	0	0.5	1.461	94	32	62	11
San Francisco II	8.3	100.7	0.02	22.125	73.5	85.0255	8.688795	3.68	0.86	0	0	0	0	0.7	2.2369	182	26	156	11
San Francisco III	7.97	119	0.46	17.7	68.6	70.021	7.27434	4.54	0.575	0	0	3	0	2.7	0.6421	156	72	84	13



RESULTADOS POR INDICE DE CALIDAD DEL AGUA (WQI) EVALUADO

Sitio de Muestreo	pH Promedio	Valor Q	Promedio DBO 5 (mg/L)	Valor Q	% Sat OD ideal	Valor Q	Coliformes Fecales (NMP)	Valor Q	Promedio Nitrógeno como Nitratos (mg/L)	Valor Q	Temperatura (°C)	Valor Q	Promedio Sólidos Disueltos (mg/L)	Valor Q	Promedio Fosfatos totales (mg/L)	Valor Q	Promedio Turbidez (NTU)	Valor Q	WQI Brown Progresión Aritmética	WQI Brown Progresión Geométrica
San Francisco I	7.47	91	0.885	90	76.42	80	0	98	1.4	97	8	58	18	82	0.69	99	0.1	100	88.33	87.32
Buenavista	7.52	91.5	2.64	74	76.57	80	0	98	0.6	99	9	57	44	85	1.20	38	0.11	100	80.835	77.93
Estrella - La Joya	7.76	90	2.97	69	76.63	80	0	98	0.6	99	11	42	58	88	0.84	52	0.04	100	80.23	77.44
Coponial	7.44	92	2.475	76	76.42	80	0	98	3.2	90	13.5	38	84	86	0.99	51	0.02	100	79.68	76.67
Los Fresnos	7.28	90	1.26	90	76.42	80	0	98	4.4	88	14	38	124	82	1.32	37	0.2	100	79.12	75.04
El Jicote-Zacango III (La alta)	8.44	70	0.905	97	72.88	72	0	98	0.6	99	12	42	116	82	0.89	50	0.17	100	79.13	76.14
Los Hoyos-Zacango II (La baja)	8	82	0.665	98	72.99	72	0	98	0.4	99	11	43	62	86	1.46	35	0.11	100	79.44	75.27
San Francisco II	8.3	80	0.86	98	76.79	79	0	98	0.7	99	11	42	156	77	2.24	27	0.02	100	78.88	73.56
San Francisco III	7.975	83	0.575	99	77.23	79	0	98	2.7	88	13	39	84	86	0.64	70	0.46	100	82.85	80.41

Sitio de Muestreo	pH	I pH	I C.E	I Alcalinidad	I Dureza	I cloruros	I Oxígeno Disuelto	I DBO 5	I Color	I temperatura	I.C.F	I C.T	WQI DINIUS I
San Francisco I	7.47	100	106.8175311	51.55691665	80.90590124	69.01059708	76.41578947	115.7300652	128	80	61.70338627	100	85.54094343
Buenavista	7.52	100	114.1771317	56.21067954	88.63231238	75.05276137	76.56578947	57.37385832	128	76	61.70338627	100	80.61101779
Estrella - La Joya	7.76	88.37308175	112.7418304	56.21067954	78.48311647	70.71382951	76.63157895	53.19540714	128	68	61.70338627	100	78.25821606
Coponial	7.44	100	99.9275182	54.02177543	73.85303034	67.52179583	76.42368421	59.801007	128	58	61.70338627	100	77.48030068
Los Fresnos	7.28	100	87.55782832	52.29673689	69.49609465	69.01059708	76.42368421	92.24564836	128	56	61.70338627	100	79.57765966
El Jicote- Zacango III (La alta)	8.44	55.85730782	115.995237	52.29673689	78.48311647	87.2423989	72.88157895	114.0815439	85.86510239	64	61.70338627	100	79.68356472
Los Hoyos-Zacango II (La baja)	8	75.1622894	115.7239088	55.044469	82.14519786	89.96434091	72.98684211	139.037606	128	68	61.70338627	100	85.68375089
San Francisco II	8.3	61.39033454	103.3412656	50.26024591	72.73883483	80.41110202	76.79210526	117.8788179	128	68	61.70338627	100	82.539896
San Francisco III	7.97	76.69905269	97.36913016	50.88128407	76.13288371	83.42368444	77.22763158	152.6430451	93.28225761	60	61.70338627	100	84.23207627



Sitio de Muestreo	I OD	I DBO 5	I COLI	I FECAL	I Alk	I Dureza	I Cloruros	I Cond Elect	I p H	I NO3	I Temp	I Color	WQI DINIUS II
San Francisco I	73.220947	112.7098253	136	106	62.99080715	95.3636522	142.4916656	113.1116612	91.5756479	114.0755084	49.93441887	127	98.26122875
Buenavista	73.343947	76.93347393	136	106	67.23163841	143.8726858	164.0851284	120.3413168	89.22365296	143.6178772	45.7298735	127	100.3728511
Estrella - La Joya	73.397895	73.83166324	136	106	67.23163841	87.87115439	148.4535341	118.93399	78.74808475	143.6178772	38.35305825	127	93.82499271
Coponial	73.227421	78.68801312	136	106	65.24817535	77.22782911	137.361763	106.311592	93.01650129	91.1192736	30.78222441	127	88.00642458
Los Fresnos	73.227421	99.62177765	136	106	63.67108462	69.86837026	142.4916656	94.01887585	101.0927475	83.56406833	29.45777902	127	88.27709494
El Jicote- Zacango III (La alta)	70.322895	111.8331974	136	106	63.67108462	87.87115439	211.3252313	122.1222083	55.27897734	160.3504221	35.12367905	91.132	95.28056289
Los Hoyos-Zacango II (La baja)	70.409211	124.5460254	136	106	66.1772973	99.98131325	222.5270104	121.8565588	69.50243176	150.9141513	38.35305825	127	101.6698781
San Francisco II	73.529526	113.8439607	136	106	61.79266476	75.15491695	184.2548099	109.6847494	59.45659033	137.7248683	38.35305825	127	94.85406256
San Francisco III	73.886658	131.0375639	136	106	62.36745019	81.99750023	196.0074533	103.7783351	70.59598465	95.42569725	32.16621793	97.629	92.11585828

Sitio de Muestreo	I OD	I BOD	I Ph	I Col Fecales	WQI Prakash
San Francisco I	72.16851	90.475	93.9805	97.2	87.4541976
Buenavista	72.31242	78.19	92.488	97.2	84.8363097
Estrella - La Joya	72.37554	75.88	85.324	97.2	82.8408964
Coponial	72.17608	79.345	94.876	97.2	85.5388556
Los Fresnos	72.17608	87.85	101.21	97.2	88.5482856
El Jicote- Zacango III (La alta)	68.77779	90.335	65.026	97.2	80.0064839
Los Hoyos-Zacango II (La baja)	68.87878	92.015	78.16	97.2	83.2464707
San Francisco II	72.52955	90.65	69.205	97.2	82.1487592
San Francisco III	72.94739	92.645	79.0555	97.2	84.8244508

Sitio de Muestreo	OD (% sat)	Fosfatos totales (mg/L)	Turbidez (NTU)	Coliformes Fecales (NMP)	Conductividad eléctrica (µs/cm)	WQI (Said)	% WQI (Said)
San Francisco I	76.41578947	0.6933	0.1	0	91.775	2.32957329	77.65
Buenavista	76.56578947	1.205	0.11	0	76.13	2.14395225	71.47
Estrella - La Joya	76.63157895	0.8389	0.04	0	78.88	2.33045824	77.68
Coponial	76.42368421	0.9856	0.02	0	110.65	2.27515025	75.84
Los Fresnos	76.42368421	1.3207	0.2	0	160.3	2.02188825	67.40
El Jicote- Zacango III (La alta)	72.88157895	0.8895	0.17	0	72.83	2.22475163	74.16
Los Hoyos-Zacango II (La baja)	72.98684211	1.461	0.11	0	73.31	1.99909242	66.64
San Francisco II	76.79210526	2.2369	0.02	0	100.7	1.73377908	57.79
San Francisco III	77.22763158	0.6421	0.46	0	119	2.27239	75.75



NOTAS A CONSIDERAR:

- 1) El porcentaje de saturación del oxígeno disuelto en agua se calculó realizando las correcciones correspondientes por temperatura y gravedad, medida aplicable para la presión atmosférica correspondiente a cada uno de los sitios de muestreo.
- 2) Se tomó como base el valor de la solubilidad del oxígeno en el agua a 760 mm de Hg y 15 °C, la base del cálculo se fundamenta bajo los principios de la regresión lineal.
- 3) El cálculo del porcentaje promedio correspondiente al Índice desarrollado por Said, se realizó tomando como base el valor máximo reportado en la escala de clasificación.

CÁLCULO DEL % DE SATURACIÓN DE OXIGENO DISUELTO PARA CADA UNO DE LOS SITIOS DE MUESTREO

PROPIEDADES DE LA ATMOSFERA A GRAN ALTITUD.

Altitud (m.s.n.m)	Presión (kPa)	Presión (Pa)	Presión (Torr)	Presión (Atm)
0	101.325	101325	760.127532	1.000167805
1000	89.88	89880	674.268567	0.887195483
2000	79.5	79500	596.3991	0.784735658
5000	54.05	54050	405.476369	0.533521538

Fuente: Cengel, Y., Boles, M. (2004). *Termodinámica (4ta Ed). México, D.F. Pp 764.*

Sitio de Muestreo	Presión Corregida por longitud (mm de Hg)	Solubilidad del Oxígeno (mg/L)	% de Sat de Oxígeno Disuelto
San Francisco I	580.76	7.45818105	76.4157895
Buenavista	581.9	7.47282105	76.5657895
Estrella - La Joya	582.4	7.47924211	76.6315789
Coponial	580.82	7.45895158	76.4236842
Los Fresnos	580.82	7.45895158	76.4236842
El Jicote- Zacango III (La alta)	553.9	7.11324211	72.8815789
Los Hoyos-Zacango II (La baja)	554.7	7.12351579	72.9868421
San Francisco II	583.62	7.49490947	76.7921053
San Francisco III	586.93	7.53741684	77.2276316
Solubilidad del oxígeno en el agua a 760 mm de Hg y 15 °C (mg/L)		9.76	



RESULTADOS FINALES PRIMER MUESTREO

INDICE DE CALIDAD PROMEDIOS (WQI)

Sitio de Muestreo	WQI Brown Progresión Aritmética	WQI Brown Progresión Geométrica	WQI Dinius I	WQI Dinius II	WQI Said	WQI PROMEDIOS
San Francisco I	88.33	87.32	85.54	98.26	77.65	87.42
Buenavista	80.84	77.93	80.61	100.37	71.47	82.24
Estrella - La Joya	80.23	77.44	78.26	93.82	77.68	81.49
Coponial	79.68	76.67	77.48	88.01	75.84	79.53
Los Fresnos	79.12	75.04	79.58	88.28	67.40	77.88
El Jicote-Zacango III (La alta)	79.13	76.14	79.68	95.28	74.16	80.88
Los Hoyos-Zacango II (La baja)	79.44	75.27	85.68	101.67	66.64	81.74
San Francisco II	78.88	73.56	82.54	94.85	57.79	77.53
San Francisco III	82.85	80.41	84.23	92.12	75.75	83.07



RESULTADOS GENERALES SEGUNDO MUESTREO

Sitio de Muestreo	Ph	Conductividad eléctrica (µs/cm)	Turbidez (NTU)	Acidez total como CaCO ₃ (mg/L)	Alcalinidad total como CaCO ₃ mg/L	Dureza (mg/L)	Cloruros Cl ⁻ (mg/L)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Fecales (NMP)	Color Pt-Co	Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	Nitrógeno como Nitratos (mg/L)	Fosfatos totales (mg/L)	Sólidos Totales (mg/L)	Sólidos Suspendidos (mg/L)	Sólidos Disueltos (mg/L)	Temperatura del agua (°C)
San Francisco I	7.8	80.05	0.22	18.4	38.25	93.05	16.87	7.46	4.57	33	1	1	2.1	1.3	0.8	66	22	122	15
Buenavista	7.48	86.42	0.7	18.4	43.9875	37.22	25.31	8.18	19.465	920	20	6	4	0.7	0.001	112	36	100	21
Estrella - La Joya	7.75	93.06	0.08	23	34.425	111.66	23.20	8.24	6.585	5	1	5	1.5	1.1	0.8	94	8	148	11
Coponial	7.9	119.4	0.8	16.1	51.6375	148.88	14.76	7.93	7.23	8	1	1	3.1	4.4	0.4	114	16	186	26
Los Fresnos	7.81	166.5	0.5	25.3	70.7625	186.1	16.87	6.47	1.465	350	1	1	1.6	6	1.5	154	22	202	26
El Jicote-Zacango III (La alta)	7.66	85.41	1.5	18.4	42.075	111.66	27.42	7.94	14.44	2	1	1	2.1	0.9	0.001	132	20	170	12
Los Hoyos-Zacango II (La baja)	8.1	75.93	0.5	9.2	30.6	83.745	27.42	6.83	6.52	27	49	6	3.2	1	0.001	94	64	102	9
San Francisco II	7.86	105.8	1.5	59.8	49.725	158.185	16.87	6.73	5.5	240	1	1	3.1	1.3	1.9	182	22	212	25
San Francisco III	7.77	119.6	0.7	55.2	45.9	130.27	27.42	7.5	5.32	8	1	1	1.3	2.1	0.001	156	24	176	24



RESULTADOS POR INDICE DE CALIDAD EVALUADO

Sitio de Muestreo	pH Promedio	Valor Q	Promedio DBO 5 (mg/L)	Valor Q	% Sat OD real	Valor Q	Coliformes Fecales (NMP)	Valor Q	Promedio Nitrógeno como Nitratos (mg/L)	Valor Q	Temperatura del agua (°C)	Valor Q	Promedio Sólidos Disueltos (mg/L)	Valor Q	Promedio Fosfatos totales (mg/L)	Valor Q	Promedio Turbidez (NTU)	Valor Q	WQI Brown Progresión Aritmética	WQI Brown Progresión Geométrica
San Francisco I	7.8	90	4.57	60	76.43	80	1	98	1.285	99	15	29	122	80	0.95	99	0.22	100	82.08	77.85
Buenavista	7.485	92	19.47	21	83.81	90	20	60	0.625	99	21	20	100	85	0.001	99	0.5	100	73.08	63.46
Estrella - La Joya	7.75	90	6.59	51	84.43	91	1	98	1.21	99	11	42	148	79	0.814	52	0.4	100	79.49	75.99
Coponial	7.9	92	7.23	48	81.25	89	1	98	4.62	90	26	18	186	72	0.52	51	0.085	100	75.15	68.02
Los Fresnos	7.815	91	1.47	90	66.29	65	1	98	5.8	70	26	18	202	71	1.405	35	0.5	100	71.91	64.76
El Jicote-Zacango III (La alta)	7.66	93	14.44	22	81.35	89	1	98	0.8	99	12	40	170	75	0.001	99	1.55	98	80.35	73.13
Los Hoyos-Zacango II (La baja)	8.1	82	6.52	50	69.98	67	49	52	1.13	95	9	50	102	82	0.001	99	0.55	100	72.37	69.76
San Francisco II	7.86	90	5.50	52	68.95	66	1	98	1.415	97	25	18	212	71	2.052	28	1.55	98	69.63	61.58
San Francisco III	7.775	91	5.32	53	76.84	80	1	98	2.22	87	24	19	176	72	0.001	99	0.705	100	78.66	72.23

Sitio de Muestreo	pH	I pH	I C.E	I Alcalinidad	I Dureza	I cloruros	I Oxígeno Disuelto	I DBO 5	I Color	I temperatura	I.C.F	I C.T	WQI DINIUS I
San Francisco I	7.8	86.02011127	112.1515979	56.4566831	70.98621171	70.08828613	76.43442623	40.33829867	128	52	61.70338627	35.03	65.67543113
Buenavista	7.48	100	109.1316691	55.06950131	84.11425447	64.44578969	83.81147541	15.91044944	76.40159224	28	25.11886432	12.908	51.2134911
Estrella - La Joya	7.75	88.97131305	106.289351	57.52547224	67.08243214	65.61706212	84.42622951	31.90589763	80.52052695	68	61.70338627	61.703	69.44293034
Coponial	7.9	80.40813701	97.25271616	53.51998074	59.90711426	72.05261933	81.25	30.04809826	128	8	61.70338627	53.589	62.77523945
Los Fresnos	7.81	85.44172346	86.38127425	50.60096411	53.49928773	70.08828613	66.29098361	83.73673489	128	8	61.70338627	17.25	58.43608143
El Jicote- Zacango III (La alta)	7.66	94.54095827	109.5899989	55.50696239	67.08243214	63.38679506	81.35245902	19.2726591	128	64	61.70338627	81.225	72.4979593
Los Hoyos-Zacango II (La baja)	8.1	70.25868224	114.2842559	58.74424704	73.02248363	63.38679506	69.9795082	32.10974238	76.40159224	76	19.19774305	37.204	54.74061193
San Francisco II	7.86	82.60759909	101.5370734	53.88072646	58.23657159	70.08828613	68.95491803	35.81549279	128	12	61.70338627	19.317	56.07311733
San Francisco III	7.77	87.77887288	97.19470735	54.6538924	63.39333503	63.38679506	76.8442623	36.58882894	128	16	61.70338627	53.589	63.44599013



MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Sitio de Muestreo	I OD	I DBO 5	I COLI	I FECAL	I Alk	I Dureza	I Cloruros	I Cond Elect	I p H	I NO3	I Temp	I Color	WQI DINIUS II
San Francisco I	73.23623	63.51101233	85.99272885	106	67.45335352	72.17373281	146.2524286	118.3548976	83.46799858	116.3965773	26.97739432	127	83.90889995
Buenavista	79.28541	38.27879565	55.58867523	72.10965335	66.19998573	108.8866517	127.0057339	115.388596	98.272499	137.7248683	15.91475657	82.702	72.13011018
Estrella - La Joya	79.789508	55.90110159	110.1295693	106	68.4138768	66.50321242	130.9102787	112.59149	85.62488476	121.8034196	38.35305825	86.391	84.88136132
Coponial	77.185	54.10542769	103.5484998	106	64.79071226	58.4480625	153.2090022	103.6629545	79.31585315	83.56406833	10.25179705	127	74.0761238
Los Fresnos	64.918607	94.51050623	63.09741798	106	62.10822248	52.87822951	146.2524286	92.84354125	83.04318547	76.80836193	10.25179705	127	71.54876567
El Jicote- Zacango III (La alta)	77.269016	42.48845881	124.1863538	106	66.59607713	66.50321242	123.5168238	115.8391536	89.64870078	128.6313711	35.12367905	127	85.12738386
Los Hoyos-Zacango II (La baja)	67.943197	56.09519286	88.28504016	64.26087716	69.50385124	75.66850076	123.5168238	120.4463032	71.62093725	125	45.7298735	82.702	77.93752195
San Francisco II	67.103033	59.53070582	66.29689894	106	65.11969355	56.87922779	146.2524286	107.9029996	80.95133215	116.3965773	11.19437883	127	73.36320391
San Francisco III	73.572295	60.22686137	103.5484998	106	65.8229622	62.05787569	123.5168238	103.605457	84.75552142	102.1717445	12.22362449	127	76.39504921

Sitio de Muestreo	I OD	I BOD	I pH	I Col Fecales	WQI Prakash
San Francisco I	75.928279	64.68	84.13	97.2	81.55156639
Buenavista	84.559426	19.435	93.682	62.59260212	68.04204072
Estrella - La Joya	85.278689	50.575	85.6225	97.2	82.09859344
Coponial	81.5625	46.06	81.145	97.2	79.103675
Los Fresnos	64.060451	86.415	83.8315	97.2	81.93651975
El Jicote- Zacango III (La alta)	81.682377	24.46	88.309	97.2	76.61291689
Los Hoyos-Zacango II (La baja)	68.376025	51.03	75.175	52.24078427	62.05818722
San Francisco II	67.177254	58.17	82.339	97.2	77.20782877
San Francisco III	76.407787	59.43	85.0255	97.2	80.89972393

Sitio de Muestreo	Fosfatos totales (mg/L)	Turbidez (NTU)	Coliformes Fecales (NMP)	Conductividad eléctrica (µs/cm)	WQI (Said)
San Francisco I	0.8	0.22	1	80.05	2.27206736
Buenavista	0.001	0.7	20	86.42	2.53165486
Estrella - La Joya	0.8	0.08	1	93.06	2.36556791
Coponial	0.4	0.8	1	119.4	2.36233189
Los Fresnos	1.5	0.5	1	166.5	1.80356226
El Jicote- Zacango III (La alta)	0.001	1.5	1	85.41	2.49296422
Los Hoyos-Zacango II (La baja)	0.001	0.5	49	75.93	2.43817262
San Francisco II	1.9	1.5	1	105.8	1.58549624
San Francisco III	0.001	0.7	1	119.6	2.43387914



RESULTADOS FINALES SEGUNDO MUESTREO

Sitio de Muestreo	WQI Brown Progresión aritmética	WQI Brown Progresión geométrica	WQI Dinius I	WQI DINIUS II	% WQI Said	WQI Promedios
San Francisco I	82.08	77.85	65.68	83.91	75.74	77.05
Buenavista	73.08	63.46	51.21	72.13	84.39	68.85
Estrella - La Joya	79.49	75.99	69.44	84.88	78.85	77.73
Coponial	75.15	68.02	62.78	74.08	78.74	71.75
Los Fresnos	71.91	64.76	58.44	71.55	60.12	65.35
El Jicote-Zacango III (La alta)	80.35	73.13	72.50	85.13	83.10	78.84
Los Hoyos-Zacango II (La baja)	72.37	69.76	54.74	77.94	81.27	71.22
San Francisco II	69.63	61.58	56.07	73.36	52.85	62.70
San Francisco III	78.66	72.23	63.45	76.40	81.13	74.37

RESULTADOS FINALES

Sitio de Muestreo	Muestreo 1 (Secas)	Muestreo 2 (Lluvias)	WQI Final
San Francisco I	87.42	77.05	82.24
Buenavista	82.24	68.85	75.55
Estrella - La Joya	81.49	77.73	79.61
Coponial	79.53	71.75	75.64
Los Fresnos	77.88	65.35	71.62
El Jicote- Zacango III (La alta)	80.88	78.84	79.86
Los Hoyos-Zacango II (La baja)	81.74	71.22	76.48
San Francisco II	77.53	62.70	70.11
San Francisco III	83.07	74.37	78.72