



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
IZTACALA**



**ESTUDIO FÍSICOQUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO DEL AGUA
SUBTERRÁNEA EN LA ZONA SUR DEL VALLE DE
CUERNAVACA, MORELOS, MÉXICO**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G O
P R E S E N T A:

MONROY PULIDO DIANA

DIRECTOR DE TESIS:
QFB. ESPERANZA DEL SOCORRO ROBLES VALDERRAMA

TLALNEPANTLA, ESTADO DE MÉXICO. 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatoria

Dedicada con mucho cariño y amor a una gran mujer y un gran hombre mis padres Ma. Cristina Pulido Salazar y Cornelio Monroy Patricio, por sus sabios consejos y continuas oraciones. Gracias por darme la oportunidad y el apoyo necesario para alcanzar un logro tan importante en mi vida profesional.

Que Dios los bendiga.

A todos mis hermanos por su comprensión y apoyo brindado, especialmente a mi hermana Rosa Isela por su valiosa ayuda.

Agradecimientos

Doy gracias a Dios por permitirme concluir satisfactoriamente mis estudios, a ti Dios a quien doy gracias por la luz de esperanza, fortaleza y amor que me has brindado en los momentos más difíciles de mi existencia.

Gracias a la QFB Esperanza del Socorro Robles Valderrama Directora de esta tesis por su confianza, dirección y conocimientos brindados para la realización y conclusión de la misma.

Mi agradecimiento por su valiosa colaboración y conocimientos brindados para la realización de este proyecto de tesis a los sinodales:

Dr. Víctor Manuel Rivera Aguilar

Dra. Patricia Bonilla Lemus

M en C. Elizabeth Ramírez Flores

Biol. Maria Guadalupe Sainz Morales

A mis amigos y compañeros, gracias por haberme regalado parte de su tiempo y por ofrecerme su invaluable amistad y apoyo en todo este tiempo.

Agradecimientos

Por todas las facilidades brindadas para la realización de este trabajo y su participación en los muestreos les doy mi agradecimiento a:

Subgerencia de Explotación y Monitoreo Geohidrológico

Gerencia de Aguas Subterráneas

Comisión Nacional del Agua (CNA) y

Subdirección de Aguas Subterráneas

Dirección Técnica

Dirección General del Organismo de la Cuenca del Río Balsas

CNA Cuernavaca

Un especial agradecimiento a:

Ing. Fernando Lara Guerrero

Ing. Pedro Solo Navarro

Ing. Vicente Parra

Ing. Alfonso García Sesento

Ing. Felipe Nieto López

Ing. Ramiro Pelayo Barajas

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN -----	9
1. INTRODUCCIÓN -----	10
2. MARCO TEORICO -----	12
2.1 Antecedentes en México -----	12
2.2 Antecedentes en otros países -----	16
2.3 Agua subterránea -----	17
2.3.1 Contaminación del agua subterránea -----	19
2.4 Determinaciones fisicoquímicas -----	21
2.5 Determinaciones bacteriológicas -----	25
2.6 Norma oficial mexicana -----	26
2.7 Índice de Calidad del Agua -----	26
3. JUSTIFICACIÓN -----	28
4. OBJETIVOS -----	29
5. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO -----	30
6. MATERIALES Y METODOS -----	33
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN -----	38
7.1 Primera parte: Resultados y evaluación de cada pozo y el manantial -----	38
7.1.1 Manantial: Las Fuentes -----	38
7.1.2 Pozo: Ojo de Agua -----	49
7.1.3 Pozo: Tezoyuca -----	56
7.1.4: Pozo: Zapata -----	65
7.2 Segunda parte: Comparación de resultados entre los tres pozos y el manantial -----	73
7.2.1 Concentración de sales disueltas -----	73
7.2.2 Contaminación bacteriana entre los pozos y el manantial -----	75
7.2.3 Índice de Calidad del Agua (ICA) -----	77
7.2.4 Comparación con la NOM-127-SSA1-1994 -----	78
8. CONCLUSIONES -----	79
9. BIBLIOGRAFÍA -----	81

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Técnica analítica para cada parámetro -----	34
Tabla 2. Índice individual para cada parámetro -----	35
Tabla 3. Importancia relativa de los parámetros para definir el índice de calidad del agua -----	36
Tabla 4. Usos del agua según el Índice de Calidad del Agua (ICA) -----	37

Manantial Las Fuentes

Tabla 5. Media, desviación estándar, valor mínimo y máximo de los parámetros físicoquímicos -----	39
Tabla 6. Clasificación del agua de acuerdo a la dureza total -----	42
Tabla 7. Resultados bacteriológicos -----	45
Tabla 8. Comparación de las medias, valor mínimo y máximo de los parámetros con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental, Agua para uso y consumo humano del Manantial Las Fuentes -----	47
Tabla 9. Resultados de los índices de calidad del agua por cada muestreo -----	48

Pozo Ojo de Agua

Tabla 10. Media, desviación estándar, valor mínimo y máximo de los parámetros físicoquímicos -----	49
Tabla 11. Resultados bacteriológicos -----	53
Tabla 12. Comparación de las medias, valor mínimo y máximo de los parámetros con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental, Agua para uso y consumo humano -----	54
Tabla 13. Resultados de los índices de calidad del agua por cada muestreo -----	56

Pozo Tezoyuca

Tabla 14. Media, desviación estándar, valor mínimo y máximo de los parámetros físicoquímicos -----	57
Tabla 15. Resultados bacteriológicos -----	61
Tabla 16. Comparación de las medias, valor mínimo y máximo de los parámetros con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental, Agua para uso y consumo humano -----	63
Tabla 17. Resultados de los índices de calidad del agua por cada muestreo -----	65

Pozo Zapata

Tabla 18. Media, desviación estándar, valor mínimo y máximo de los parámetros físicoquímicos -----	66
Tabla 19. Resultados bacteriológicos -----	69
Tabla 20. Comparación de las medias, valor mínimo y máximo de los parámetros con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental, Agua para uso y consumo humano -----	71
Tabla 21. Resultados de los índices de calidad del agua por cada muestreo -----	72
Tabla 22. Tipo de agua de acuerdo a la dureza total -----	75
Tabla 23. Coeficiente de correlación -----	75
Tabla 24. Frecuencia de bacterias coliformes totales entre los diferentes pozos y el manantial -----	76
Tabla 25. Frecuencia de bacterias coliformes fecales entre los diferentes pozos y el manantial -----	76
Tabla 26. Parámetros fuera de la NOM-127-SSA1-1994 -----	78

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ciclo del agua -----	18
Figura 2. Localización del acuífero de Cuernavaca, Morelos -----	30
Figura 3. Manantial Fuentes -----	33
Figura 4. Pozo Ojo de Agua -----	33
Figura 5. Pozo Tezoyuca -----	33
Figura 6. Pozo Zapata -----	33
Manantial Las Fuentes	
Figura 7. Concentración de oxígeno disuelto -----	40
Figura 8. Concentración de alcalinidad total y dureza total -----	41
Figura 9. Concentración de cloruros y sulfatos -----	44
Figura 10. Concentración de bacterias coliformes totales -----	45
Figura 11. Concentración de bacterias coliformes fecales -----	46
Pozo Ojo de Agua	
Figura 12. Concentración de oxígeno disuelto -----	50
Figura 13. Concentración de alcalinidad total y dureza total -----	51
Figura 14. Concentración de cloruros y sulfatos -----	52
Figura 15. Concentración de bacterias coliformes totales -----	53
Figura 16. Concentración de bacterias coliformes fecales -----	54
Pozo Tezoyuca	
Figura 17. Concentración de oxígeno disuelto -----	58
Figura 18. Concentración de alcalinidad total y dureza total -----	59
Figura 19. Concentración de cloruros y sulfatos -----	60
Figura 20. Concentración de bacterias coliformes totales -----	62
Figura 21. Concentración de bacterias coliformes fecales -----	62
Pozo Zapata	
Figura 22. Concentración de oxígeno disuelto -----	67
Figura 23. Concentración de alcalinidad total y dureza total -----	68
Figura 24. Concentración de cloruros y sulfatos -----	69
Figura 25. Concentración de bacterias coliformes totales -----	70
Figura 26. Concentración de bacterias coliformes fecales -----	70
Figura 27. Comportamiento espacial de los sólidos disueltos en los tres pozos y el manantial -----	74
Figura 28. Índice de Calidad del Agua (ICA) entre los pozos y el manantial -----	77

RESUMEN

Las necesidades de agua en la especie humana, han sido y son cada vez mayores, a medida en que se ha incrementado el desarrollo poblacional (Seoanez, 1999) y por consiguiente el uso del agua subterráneas también ha aumentado en los últimos años. En estas condiciones, los acuíferos en diferentes áreas del continente están sujetos a impactos por la exagerada explotación de los pozos y la ocupación no planificada del suelo. Todo ello pone en riesgo la excepcional calidad de las aguas subterráneas como es el caso del acuífero de Cuernavaca en donde muchas veces la presencia de contaminantes principalmente de origen municipal y agrícola se descarga sin tratamiento en barrancas, arroyos y ríos, provocando que las aguas residuales se infiltren y alteren la calidad del agua subterránea. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue determinar la calidad bacteriológica y fisicoquímica de tres pozos de agua y un manantial ubicados en la zona sur del Acuífero del Valle de Cuernavaca. Para poder evaluar la contaminación bacteriana del acuífero se tomaron muestras mensuales durante un año. Dichas muestras se tomaron antes de que pasaran por el dosificador de cloro. In situ se determinó el OD, pH, y temperatura. En el laboratorio se realizaron dos determinaciones bacteriológicas y 20 fisicoquímicas usando las técnicas analíticas establecidas en las normas mexicanas. Con los resultados obtenidos se calculó la media de cada parámetro y con esta el índice de calidad del agua (ICA), los índices más bajos se observaron en el manantial Las Fuentes con 72.6 %, seguido de Ojo de Agua con 83.2 %, Tezoyuca con 93.9 % y Zapata con 95 %. Comparando las medias de los parámetros con la NOM-127, se tiene que los 3 pozos y el manantial no sobrepasan los límites máximos permisibles, para los parámetros fisicoquímicos salvo en algunos muestreos que presentaron el pH ligeramente por debajo de la norma o la turbiedad que salió del límite en una sola ocasión, sin embargo la presencia de bacterias Coliformes tanto fecales como totales rebasan los límites permisibles principalmente en el Manantial Las Fuentes ya que presentó contaminación bacteriana en todos los muestreos. Podemos decir que en general el agua subterránea de la zona sur del Valle de Cuernavaca muestra algunas áreas de buena calidad como por ejemplo donde se encuentran los pozos Tezoyuca y Zapata y otras de menor calidad como donde están Ojo de Agua y Manantial Las Fuentes, por lo tanto estos resultados nos indican que en estas zonas las descargas de aguas residual a los suelos, están provocando que se degrade la calidad de los mantos acuíferos, lo que implica una disminución en la calidad del agua.

1. INTRODUCCIÓN

Las necesidades de agua en la especie humana, han sido y son cada vez mayores, a medida que se ha desarrollado la civilización y aumentado la población (Seoanez, 1999). El problema de la contaminación del agua empieza con los grandes conglomerados humanos y el advenimiento de la industrialización, debido a que la cantidad de desechos aumenta considerablemente por estos conceptos (Caballero, 2006). Por lo tanto las demandas en recursos de agua hacen necesario el uso profesional del conocimiento fundamental sobre el ciclo del agua para asegurar el control de la cantidad y calidad (Tebbutt, 1999).

Al final del siglo XIX, se empezó a utilizar el agua del subsuelo cuando las poblaciones se hicieron numerosas y se llegó al punto en que las aguas superficiales de una región se agotaron o se contaminaron por los desperdicios humanos y animales e industriales (Castro, 2000). Por lo tanto, el agua subterránea es uno de los recursos más importantes, ya que constituye a nivel mundial una gran proporción del agua utilizada y representa aproximadamente el 20% en México, el 50% en Estados Unidos, cerca del 30% en Canadá y el 70% en Europa (Escolero, 1993, citado en Mazari, 2002). En el pasado, se le considero como un recurso protegido naturalmente, sin embargo, en años recientes se han reportado problemas de contaminación en acuíferos de diversos países (Soto, 1999).

Las fuentes de contaminación que pueden afectar los sistemas de agua subterránea pueden ser puntuales y no puntuales. Se consideran fuentes puntuales a las fábricas, refinerías, tintorerías, gasolineras, aeropuertos, tiraderos de basura, tanques enterrados, así como derrames que suceden al transportar compuestos químicos. Como fuentes no puntuales se consideran la aplicación de plaguicidas en zonas agrícolas, los canales de drenaje, los sistemas de tuberías para el transporte de hidrocarburos, entre otros. En general se estima que la mayoría de los contaminantes se encuentran en forma líquida y que migran en fase acuosa interactuando a su paso con las partículas del suelo (Mazari, 2002).

Hoy en día muchas comunidades no reconocen cabalmente que el agua puede ser portadora de diversas enfermedades como es el caso de la tifoidea y el cólera que son ocasionadas por bacterias transmitidas por medio del agua. También pueden transmitirse ciertos virus como la hepatitis y protozoarios que producen giardiasis. Un buen indicador de la contaminación de las aguas son las bacterias coliformes cuya presencia indica un riesgo de contraer severas enfermedades causado por bacterias patógenas (Batllori y Febles, 2002).

Por lo tanto, cuando más disminuye la calidad del agua mas indispensable es la necesidad de proceder a frecuentes y extensos controles (Rodier, 1990). Una forma de cuantificar el grado de afectación del recurso hídrico, es por medio de índices de calidad y contaminación. Estos índices están en función de parámetros fisicoquímicos que son obtenidos de los resultados analíticos de las muestras recolectadas en campo (Barrón, 2004).

Actualmente los depósitos de aguas subterráneas han adquirido importancia relevante debido a la necesidad de abastecer el líquido a los núcleos urbanos para diversos usos, por lo que son indispensables los estudios sobre su composición, extracción, mecanismos de contaminación, establecimiento de normas de calidad que permitan su utilización sin el peligro para la salud (Castro, 2000).

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua hasta ahora se han identificado en el país 459 acuíferos con más del 20 % en sobreexplotación, la extracción promedio anual de éstos se calcula en 24 km³ a través de 140 mil aprovechamientos subterráneos. El mayor número se encuentra en el noroeste del país, sin embargo los que reciben una recarga significativa se localizan en el sureste, de hecho a excepción de esta zona, en México existen problemas de disponibilidad debido a que las recargas son menores a las extracciones (Campoy, 2001).

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES EN MÉXICO

Suárez (1988), analizó la calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua subterránea del Valle de Cuernavaca, concluyendo que los parámetros fisicoquímicos son normales y que el agua es de buena calidad, correspondiente al tipo Bicarbonatada-Cálcica-Magnésica; en cuanto al análisis biológico consideró anomalías en la calidad del agua, debido a la presencia de bacterias Coliformes en la mayoría de las muestras colectadas, cuyas fuentes son generalmente para uso potable, también indica que existe contaminación por metales en los acuíferos, ya que se detectaron valores de Pb, Ni, As, Al, Cr, y Cd que en algunos casos rebasaron las normas establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) .

González (1992), realizó un estudio hidrogeofísico de la subcuenca de Chalco, para evaluar el impacto ambiental del basurero de Sta. Catarina, en la cuenca de México. Concluye que hay contaminación por microorganismos patógenos en el agua subterránea, provenientes muy probables del basurero de Santa Catarina. Este basurero es uno de los más grandes de la cuenca, esta en un aparato volcánico (medio de alta permeabilidad), otro origen pueden ser las infiltraciones del río de lo Remedios, que conduce aguas negras, además se detectaron Coliformes fecales y mesófilos aerobios.

Isaac- Márquez *et al.* (1994), realizaron un estudio para conocer la calidad sanitaria de los suministros (pozos) de agua que abastecen a la población de la ciudad de Campeche, el cual consistió en la detección de bacterias mesofílicas aerobias, organismos Coliformes totales y fecales, así como el la inspección del entorno inmediato. El 80 y 60 % de los suministros que examinaron presentaron niveles inaceptables de bacterias mesofílicas aerobias y de organismos Coliformes, respectivamente, evidenciándose la existencia de factores potenciales de contaminación en su entorno inmediato. Proponen la necesidad de instrumentar un programa permanente de monitoreo de la calidad sanitaria del agua para consumo humano en la ciudad de Campeche.

Flores *et al.* (1995), determinaron la calidad bacteriológica del agua potable de la ciudad de Mérida, Yucatán, México, analizaron 383 pares de muestras domiciliarias; 364 (95%) llaves exteriores y 283 (73.89%) de las interiores cumplieron las normas microbiológicas. Concluyen que la calidad del agua distribuida es aceptable, excepto en la zona de influencia de la planta de aguas residual Mérida III, observaron contaminación con mesofílicos aerobios en 21.7% de las muestras.

Alcocer *et al.* (1999), describen cuales son los problemas de contaminación detectados en el agua subterránea de la Península de Yucatán, como es la contaminación por sólidos disueltos, por patógenos, nitratos, entre otros. En este caso la calidad del agua se ve disminuida por la presencia de una salinidad elevada de 200 hasta 400 mg/L reportando que las concentraciones más altas, se presentan en áreas donde hay una sobre explotación de los pozos o pozos cercanos a las costas, donde la intrusión salina es importante por sólidos disueltos en el agua subterránea (100-170 mg/L). En cuanto a las principales fuentes de contaminación por patógenos se deben a los desechos sólidos y líquidos que provienen de animales domésticos, así como el fecalismo al aire libre, esto dado por las características de la región yucateca, que permite la infiltración del agua y de desechos hasta alcanzar los mantos de agua subterránea, la ausencia de suelos y el desarrollo de diversos microorganismos patógenos, siendo común encontrar cuencas de coliformes fecales de varios miles por 100mL. También se han observado niveles de nitratos que han sobrepasado el límite permisible para las normas (24 a 162 mg/L) y en más de un 95% a las internacionales.

Gallegos *et al.* (1999), analizaron la localidad de León y el Valle del Mezquital para evaluar los efectos de los desechos de agua de irrigación sobre la calidad del agua subterránea; en el que se encontró que los coliformes totales y fecales en ambos sitios son elevadas y son transportadas a través del subsuelo principalmente en la época de lluvias, y en relación a los parámetros físico-químicos en el Mezquital la concentración de nitratos es elevado en el agua subterránea, concluyendo que el agua de desecho de la irrigación ha tenido un impacto negativo en la calidad de las aguas subterráneas de las zonas de estudio.

Granel y Gález (2002), reportan el deterioro de la calidad de agua subterránea en Cancún, Q. R. Para conocer la calidad del agua se realizó un monitoreo del agua en 16 aprovechamientos (cenotes, norias y pozos), así como a 11 descargas de agua subterránea en forma de manantiales en el Sistema Lagunar. Encontrando que la parte superior del acuífero presenta contaminación de 25 mg/L de nitrógeno en forma de nitratos. En conclusión, afirman que el desarrollo poblacional que ha tenido Cancún en los últimos años ha impactado en la calidad del agua subterránea, debido al aumento de habitantes que cada vez generan más desechos líquidos y sólidos, que de una manera u otra se ve reflejada en la calidad del agua.

Pacheco *et al.* (2002), evaluaron en el estado de Yucatán el efecto de la aplicación agrícola de la excreta porcina en la calidad del agua subterránea en 12 pozos de la región. Se determinaron la concentración iónica, la densidad de Coliformes y la presencia de Enterobacterias. Los resultados mostraron incrementos en el contenido de nitratos, en la densidad de coliformes y en la riqueza específica de Enterobacterias.

En el 2002 la Comisión Nacional del Agua, presenta un informe sobre la determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero Cuernavaca, Morelos. En este informe se presentan los resultados del muestreo de 1995, en el cual se colectaron 31 muestras entre pozos profundos y manantiales, y en algunos casos se complementan con los resultados del muestreo del año 1998. Dichas muestras se colectaron antes de los sistemas de cloración instalados en los pozos profundos con el objetivo de definir las condiciones naturales en que se encuentra el acuífero. En general se observan concentraciones que rebasan los límites de la NOM-127-SSA-1-1994 en cuanto a nitratos, se presentan concentraciones entre 10 a 44.6 mg/L de nitratos. Por lo tanto representa un problema grave debido al gran número de fuentes de abastecimiento de agua potable que se derivan de él. También se observa en los resultados de laboratorio un gran número de bacterias patógenas que se distribuyen de forma semejante al contenido de nitratos. Sin embargo, estos agentes patógenos son controlados a través de la correcta y sistemática aplicación de cloro en cada una de las fuentes de abastecimiento.

En términos generales la distribución de los elementos contenidos en el agua se caracterizan por tener menores concentraciones en la porción norte del valle y progresivamente se incrementan con dirección Sur, al circular el agua por el subsuelo.

Ávila (2003), realizó un ensayo donde presenta un análisis de la problemática ambiental relacionada con la contaminación del agua subterránea. De los casos presentados destacan algunos como es la presencia de arsénico en las aguas subterráneas de Zimapán principalmente de origen natural, la presencia de azufre en el acuífero de Puebla, el agua sale amarilla y con olor a huevo podrido debido a la presencia de ácido sulfhídrico, su origen puede deberse a la circulación de flujos regionales de agua a través de rocas evaporíticas o de estratos de yeso, otra es la descomposición de materia orgánica en los sedimentos. Sugiere la solución a los problemas de contaminación acuífera es eliminar de la fuente lo cual implica contar con un programa de manejo integral de residuos sólidos y líquidos. La descontaminación del sistema de acuíferos o remediación, es posible técnicamente, pero imposible financieramente, esto no es sólo en nuestro país sino incluso en los países desarrollados La adopción generalizada de tratar las aguas domiciliarias e industriales. En este nuevo milenio, la calidad del agua debe constituirse en un compromiso de vida. Es necesario incidir en el terreno técnico, académico, educativo y político.

Barrón (2004), en su tesis de licenciatura, realizó una evaluación del deterioro de la calidad del agua subterránea del Valle de Penjamo-Abasolo, basándose en índices de contaminación y calidad del agua. Se detectaron anomalías hidrogeoquímicas las cuales tienen un origen natural y antropogénico; las de origen natural se relacionan con flujos ascendentes de aguas termales a

través de fallas y fracturas, y las de origen antropogénico se asocian a la infiltración de retorno de riego y aguas superficiales de mala calidad de los ríos Turbo, Guanajuato y Lerma. Como resultado de los análisis químicos se detectó la presencia de arsénico en algunos pozos en cantidades superiores a las concentraciones máximas permitidas en la modificación a la NOM-127-SSA1-1994 del agua para consumo humano (0.045 mg/L).

Pacheco *et al.* (2004), realizó un diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán. Para ello, se evaluó la calidad química y bacteriológica del agua subterránea. Se colectaron muestras de agua potable de las 106 cabeceras municipales del estado. Los resultados mostraron que el agua subterránea presenta una calidad bacteriológica peligrosa y muy contaminada en la parte oriental del estado. De manera general, la calidad química del agua del agua subterránea con fines de abastecimiento en los sistemas municipales es aceptable para la mayoría de los 106 sistemas estudiados, ya que de los 22 parámetros químicos estudiados, solo 5 excedieron los límites máximos permisibles por la norma; sin embargo, la calidad bacteriológica no es aceptable.

Cortes (2004), realizó una evaluación de la calidad del agua de la presa Valle de Bravo usando el Índice de Calidad del Agua (ICA). Se tomaron muestras mensuales de 5 estaciones durante 8 meses. La estación 5 tuvo el menor porcentaje de ICA 78.45%, la estación 1, 2 y 4 los valores obtenidos fueron de 87.8, 84.5, y 82.88 % respectivamente lo cual indica que requieren una ligera purificación para ser usadas como abastecimiento público. Mientras que la estación 3 obtuvo el mayor porcentaje con 96.8% indicando con ello que esta estación presentó la mejor calidad para consumo humano.

Caballero (2006), analizó la calidad del agua subterránea en la subcuenca del río Guanajuato. Las muestras comprendieron pozos, norias, manantiales y aguas superficiales. Como resultados se tiene que los nitratos sobrepasan el límite permisible en 45 de los 80 pozos analizados del área de estudio, también se registraron altos valores de varios metales pesados (As, B, Hg, Cr, Se, U) en algunos pozos, se tiene que el contenido en Cr sobrepasó la NOM-127. Los valores de arsénico sobrepasan NOM-SSA 127, en total se presentaron altos valores de As arriba del límite permisible que es 0.025 mg/L en 10 de los 78 pozos. Por lo tanto el autor recomienda realizar estudios periódicos en la zona, como monitoreos de los puntos en donde se observan los parámetros más altos así como campañas intensas y motivadoras que ayuden a comprender a la población la importancia que tiene el agua.

Leal y Gelover (2006), realizaron una evaluación de los acuíferos de Coahuila, Zacatecas y San Luis Potosí. Se seleccionaron 90 pozos, a los cuales se realizaron análisis de sulfatos, dureza, cloruros, fosfatos, SDT, arsénico, temperatura, pH y conductividad, entre otros. Los resultados muestran que la mejor calidad de agua la presentaron los pozos de Torreón, puesto que uno de los 8 pozos analizados rebasó la norma en dureza, así como 17% de ellos el límite permisible para arsénico. En Zacatecas algunos pozos presentaron sulfatos y dureza, 40% rebasaron el límite permisible de fluoruros y 53% de arsénico. En San Luis Potosí 25% de los pozos rebasaron el límite permisible de fluoruros, 50% el de sulfato y SDT, 53% de dureza y 22% de arsénico. En su conjunto se concluye que es mayor el problema de salud pública en Zacatecas que en San Luis Potosí y la Comarca Lagunera, debido a al caudal y a la concentración de arsénico detectada en esta zona. Estos resultados son parciales ya que no se analizaron todos los pozos de cada acuífero.

2.2 ANTECEDENTES EN OTROS PAÍSES

Perdomo *et al.* (2001), evaluaron la contaminación de aguas subterráneas y aguas superficiales por nitratos y coliformes y su posible fuente de contaminación en zonas agrícolas del sudoeste del Uruguay. Los muestreos se realizaron en los años de 1996 a 1999 y se encontró que las aguas superficiales presentaron niveles inferiores de 10 mg N-NO₃/L, considerándolas aptas para consumo humano. Sin embargo, las aguas subterráneas tuvieron concentraciones de nitratos entre 1 y 93 con un promedio de 9 mg N-NO₃/L, apenas por debajo del nivel máximo permisible para el consumo humano. Los resultados de este estudio muestran que los pozos tienen mayor probabilidad de estar contaminados tanto de NO₃ como de coliformes, aunque en los pozos la relación entre coliformes y nitratos es inversa y concluyeron que las fuentes de contaminación parecen originarse de fuentes localizadas y no de fuentes agrícolas.

Sharffter y Parriaux (2002), analizaron la presencia de patógenos en aguas subterráneas y superficiales de la región montañosa de Suiza a partir de indicadores bacteriológicos. Los patógenos encontrados fueron *Campylobacter* y *Listeria*. La presencia de estos patógenos estaban generalmente relacionados con la presencia de indicadores biológicos de la contaminación del agua tales como *Escherichia coli*, *Enterococos* y otras bacterias aerobias y concluyen que los indicadores clásicos se pueden considerar como detectores eficientes de patógenos en la mayoría de los casos.

Atherholt *et al.* (2003), evaluaron indicadores de contaminación fecal en aguas subterráneas. La Agencia de Protección del Medio Ambiente Agua y Suelo especifica el uso de *E. coli* o colifagos para la determinación de contaminación. Con este estudio es fácil detectar la contaminación fecal en aguas subterráneas. Pero en relación al uso y vulnerabilidad del agua subterránea se requiere

evaluar las fuentes sanitarias. Por lo tanto la determinación de contaminación fecal en un pozo es detectado usando pruebas de indicadores bacteriológicos como Coliformes totales y Coliformes fecales.

Ottoson *et al.* (2003), evaluaron la contaminación fecal de aguas negras en sistemas de tratamiento en Vibyaasen al norte de Stockholm, Suiza usando bacterias indicadoras y biomarcadores químicos. Basándose en la medida de niveles de coprostanol (biomarcador químico). La prevalencia de carga fecal determino un nivel riesgoso con la presencia de rotavirus, *Salmonella typhimurium*, *Campylobacter jejuni*, *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum*. El reuso de esa agua para contacto directo como riego de campos deportivos y recarga de agua subterránea es inaceptable ya que representa un alto riesgo por la presencia de rotavirus a pesar de la baja carga fecal. Por lo tanto sugieren un tratamiento adicional a las aguas residuales.

Potgieter *et al.* (2006), reportaron la calidad microbiológica del agua a partir de 194 perforaciones (97 pozos privados y 97 comunales) en el área rural de Thitale-Hlanganani de la provincia de Limpopo, Sur de África fue realizado entre agosto de 2002 y agosto de 2003. En este estudio, se determinaron los niveles de coliformes totales, de coliformes fecales, bacterias termotolerantes, de enterococos fecales, del *Clostridium perfringens* (las células y las esporas vegetativas) y de colifagos somáticos. En promedio se excedieron los coliformes totales, coliformes fecales, enterococos fecales y el *Clostridium perfringes*. Los resultados indicaron la necesidad de estudiar el impacto de los asentamientos y monitorear la calidad microbiológica de aguas subterráneas y manantiales en comunidades rurales.

2.3 AGUA SUBTERRÁNEA

Las aguas subterráneas son parte del ciclo hidrológico que comprende el movimiento continuo de agua entre la tierra y la atmósfera por medio de la evaporación y la precipitación. Parte del agua que cae por la precipitación de lluvia y nieve se incorpora a lagos, ríos, arroyos y océanos (Andy and Standey, 2004). Otra parte es absorbida por la vegetación, la cual transpira el agua de nuevo hacia la atmósfera (Figura 1). El agua que no se evapora directamente de los lagos y ríos o es transpirada por las plantas, se filtra a través del subsuelo y pasa a formar los acuíferos subterráneos (Martínez y Ruano, 1998).

Actualmente en una gran parte de los países, tanto de países desarrollados como los denominados del tercer mundo, predomina el uso del agua subterránea para abastecimiento. Ya que, en general, la explotación de los almacenamientos subterráneos ofrece mayor facilidad de regulación en comparación con aguas superficiales, siendo menos sensibles a los cambios estacionales,

situaciones meteorológicas anómalas (sequías, inundaciones), etc. Por lo tanto las aguas subterráneas tienen mejor calidad como agua de consumo que las superficiales. Esto es debido a que, en principio, los acuíferos están menos afectados por las cargas contaminantes ligadas a los núcleos urbanos-industriales, debido a que los materiales geológicos naturales filtran el agua del subsuelo, haciéndola más clara y menos turbia que la superficial., esto a menos que se impongan mayores restricciones a fuentes contaminantes del tipo de las instalaciones de desechos riesgosos, por lo que las fuentes de agua subterránea estarán sometidas a una contaminación similar a la que afecta a las fuentes de agua superficial. Por lo que la importancia de las aguas subterráneas para abastecimiento urbano en países desarrollados queda de manifiesto en la abundante normatividad existente en materia de protección de su calidad y planificación de su explotación (Martínez y Ruano, 1998; Legarreta, 1994).

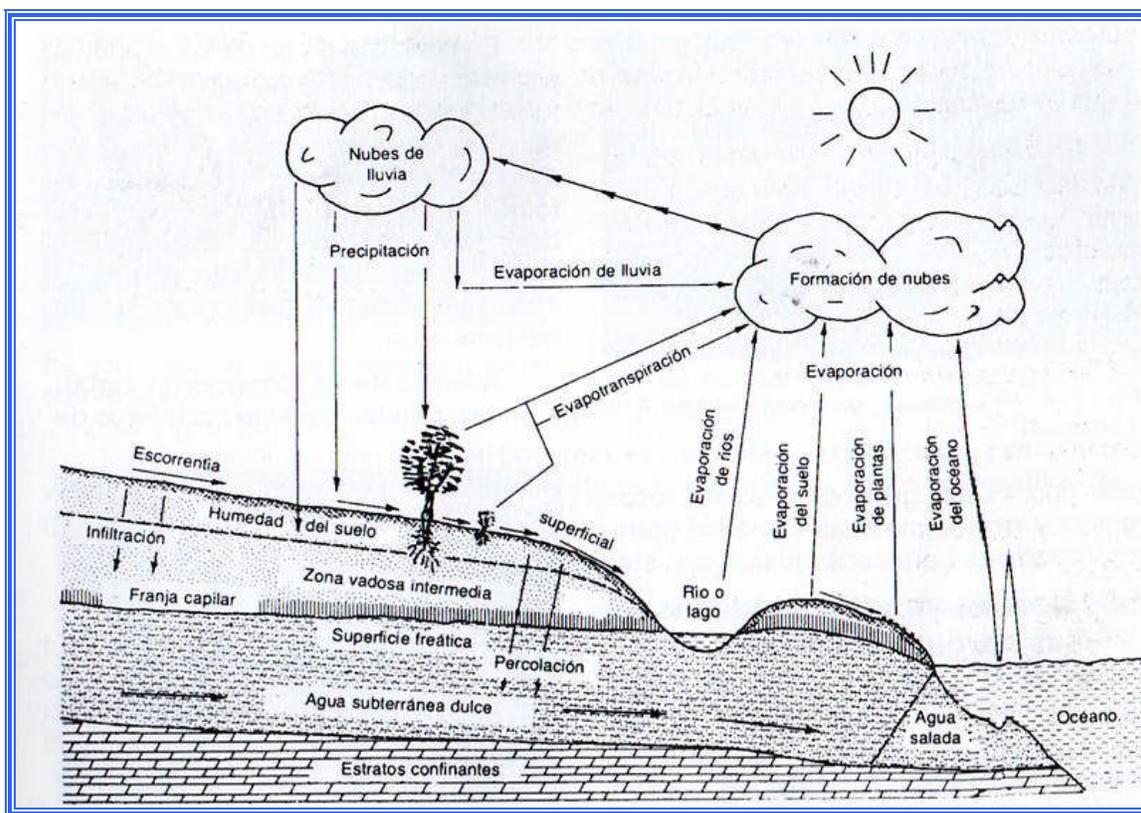


Figura 1. Ciclo hidrológico (Martínez y Ruano, 1998).

2.3.1 Contaminación del agua subterránea

La contaminación de las aguas subterráneas es un grave problema ambiental que difícilmente es remediable. Su ubicación en el subsuelo las mantiene protegidas de la contaminación inmediata, sin embargo una vez que esta ha ocurrido es muy costoso y laborioso lograr su limpieza debido a la inaccesibilidad de muchos de los acuíferos. Una gran variedad de contaminantes han sido introducidos al ambiente subterráneo alterando su calidad. Esto incluye, sustancias químicas orgánicas e inorgánicas, metales pesados y microorganismos producidos por la actividad humana y cambios en los esquemas normales de circulación, ya sea por la sobreexplotación o bien por las características hidrogeológicas propias del acuífero. Algunos de estos materiales se disuelven gradualmente en el agua, los cuales también pueden migrar por todo el suelo (Appelo, 1994; Alcocer *et al.*, 1995).

Dentro de las principales fuentes de contaminación del agua subterránea se encuentran las siguientes:

a) Contaminación por actividades agrícolas

La agricultura es una de las actividades que mayor influencia ejerce sobre el agua subterránea ya que el efecto de fertilizantes y pesticidas, así como las prácticas de abono y riego con aguas tratadas resulta en la degradación de la calidad de los acuíferos subterráneos. Gran parte de los fertilizantes son elaborados químicamente, aunque en ciudades pequeñas menos industrializadas se continúa con la práctica de abonos orgánicos, los cuales se componen principalmente de las heces fecales de animales o de desperdicios de materia orgánica.

Los principales constituyentes de los fertilizantes conocidos, como elementos mayores, son el nitrógeno, fósforo y potasio, por ser los más requeridos para el desarrollo de los cultivos. Debido a las constantes aplicaciones de estos año tras año en una misma extensión, algo de N, P y K, son arrastrados por infiltración hasta el nivel freático del suelo, de donde podría emigrar hasta el flujo de agua subterránea. Sin embargo tanto el fósforo disuelto como el potasio tienen muy poca movilidad en la mayoría de los materiales geológicos, razón por la cual no afectan la calidad del agua subterránea. No sucede así con el N, ya que este se presenta en la forma de NO_3 que hace prohibido el uso del agua para beber.

Los experimentos en laboratorio demuestran que aquellos pesticidas y herbicidas que resulten solubles en el agua se mueven rápidamente en materiales geológicos como arena y grava. Las altas concentraciones de estos compuestos saturan rápidamente los sitios de intercambio o excederán la

capacidad de biodegradación. Es así que en el caso de la fertilización química podemos hablar de contaminación a mediano plazo, ya que una gran extensión del acuífero se degrada de manera lenta y progresiva en la que las sales irán aumentando poco a poco hasta superar los límites permisibles para el abastecimiento humano (Philip *et al.*, 1999).

b) Contaminación por residuos sólidos (basureros)

Todos los residuos sólidos que genera la población son depositados en el suelo o en excavaciones en este, llamadas rellenos sanitarios, en estos depósitos los residuos sólidos se reducen por compactación y después son cubiertos por tierra. Idealmente la compactación y cubrir con tierra debería ser diario, sin embargo en la práctica, las aplicaciones para recubrir son poco frecuentes (Caballero, 2006; Mata, 2004).

En nuestro país, como en muchos otros, la mayoría de los rellenos sanitarios o basureros son abiertos, ya que es la manera más barata de operarlos. El efecto que esto produce en el agua subterránea es el siguiente: cuando llueve sobre estos depósitos, el agua se infiltra hacia el suelo un gran número de contaminantes. El líquido que se deriva de este proceso es conocido como lixiviado. En este se han determinado gran cantidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos en los que los sólidos totales disueltos pueden ser muy altos (Castro, 2000).

En algunos lugares en donde los rellenos sanitarios se localizan sobre materiales relativamente permeables, como arena, grava o roca fracturada el movimiento del lixiviado puede contaminar áreas mucho mayores que las que ocupa el depósito. La solución inmediata a este problema, sería establecer los basureros en terrenos estudiados hidrogeológicamente, sin embargo en muchas regiones no es posible hacerlo, debido a las distancias, a los asentamientos humanos y a la falta de terrenos que cubran todos los requisitos (Price, 2003).

c) Contaminación por hidrocarburos

Otra fuente potencial de contaminación es la que aportan las fugas de los tanques de almacenamiento subterráneo que son usados principalmente por gasolineras. Sin embargo, como son menos densos que el agua y no se mezclan tan fácilmente con ésta, se mantendrán flotando sobre el nivel freático del agua (Grathwoht, 1998).

d) *Lluvia ácida*

La lluvia ácida es otro de los factores que afecta la calidad del agua subterránea. Las investigaciones demuestran que la lluvia ácida incrementa la movilidad y lixiviado de metales pesados en el suelo. La mayoría de los contaminantes atmosféricos (gases y partículas) son solubles en la precipitación y son acarreados al suelo. Esto da lugar a un incremento de las reacciones químicas en el suelo y en las rocas, que afecta la calidad del agua subterránea debido a una creciente mineralización de esta. Así mismo, la alcalinidad del acuífero disminuirá con el tiempo y habrá un incremento de ácido carbónico. De la misma manera, existe un fenómeno que acompaña al agua subterránea ácida, que es el incremento en la cantidad de compuestos inorgánicos solubles y los que lo hacen de una manera más notable son los sulfatos (Philip *et al.*, 1999).

e) *Descargas domésticas directas al suelo.*

Esto es muy común en aquellos lugares donde se carece de drenaje y las personas tienen que arrojar sus desechos domésticos directamente al suelo. En estos casos la contaminación más fuerte es debida a materia orgánica y microorganismos entre otros. Además las aguas residuales que no reciben tratamiento se deben encausar hacia corrientes superficiales que las transporten hacia lugares distantes donde no causen problemas, o la única forma eficaz de controlar este tipo de contaminación es mediante tratamiento del agua residual (Castro, 2000; Mata, 2004).

2.4 DETERMINACIONES FISICOQUÍMICAS

A fin de conocer el estado que guarda el agua respecto a su calidad, se hace uso de ciertos parámetros que pueden ser los siguientes:

Alcalinidad Total

En los recursos acuíferos la alcalinidad es causada principalmente por las sales disueltas de bicarbonato (HCO_3^-). En altas concentraciones produce alcalosis metabólica en animales y seres humanos; provoca formación de espuma, acarreo de sólidos en el vapor, formación de CO_2 en el vapor de calderas, impartiendo a este, carácter corrosivo. Convierte quebradizo el acero de las calderas utilizadas en la industria y los baños. Las aguas muy alcalinas o muy ácidas afectan la ecología del cuerpo receptor (Robles *et al.*, 2004).

Cloruros

En las montañas y tierras elevadas, los abastecimientos de agua son bajos en cloruros; las aguas de los ríos y los mantos acuíferos tienen, por lo general una concentración mayor. Algunas aguas que contienen 250 mg/L de cloruros pueden presentar el sabor salado si el catión presente en el agua es el Na, sin embargo, el sabor salino típico puede estar ausente en aguas concentraciones de 1000 mg/L de cloruros cuando los cationes predominantes son el calcio y el magnesio (APHA-AWWA-WEF, 1998; Robles *et al.*, 2004). La presencia de cloruros en el agua puede deberse al lixiviado de depósitos sedimentarios marinos o por contaminación del agua de mar, salmuera, o residuos industriales o domésticos (Mata, 2004; Tebutt, 1999).

Conductividad

La conductividad del agua es una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica. La conductividad del agua depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la determinación (Romero, 1999).

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La demanda bioquímica de oxígeno es una medida de la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para degradar la materia orgánica en el agua en 5 días a 20 °C. La DBO no mide un compuesto en especial, sino todos los biodegradables, por vía aerobia (Jiménez, 2001).

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La determinación de DQO es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por la porción tanto de materia orgánica como inorgánica existente en la muestra y oxidable por un agente químico oxidante fuerte (Jiménez, 2001).

Detergentes

Los detergentes son sustancias que tienen la propiedad de reducir la tensión superficial del líquido en el cual se encuentran disueltos, de modo que éste adquiera mayor poder de penetración a través de los poros de ciertas materias y pueda extenderse más fácilmente en la superficie de los cuerpos en donde se aplica. Estos productos domésticos si se ingieren por vía oral, pueden causar vómito. Al utilizar aguas que contengan detergentes para irrigación se pueden contaminar los suelos y por consiguiente los cultivos.

Los detergentes presentan un alto contenido de fosfatos (nutrientes), los cuales provocan una sobrepoblación de la flora acuática, la cual al morir sufre una acción degradativa microbiana, ocasionando una mayor demanda de oxígeno que perjudica a la fauna y al cuerpo de agua (eutroficación) (SARH, 1978).

Dureza

Representa la concentración de cationes metálicos multivalentes presentes en el agua. La dureza más común es de calcio y magnesio. Cuando se encuentran en cantidades importantes se dice que el agua es dura y significa que contiene sales incrustantes, dificulta la cocción de legumbres e impide la formación de espuma del jabón (Romero, 1999).

Nitratos

Los nitratos se encuentran en cantidades muy pequeñas (trazas) en aguas superficiales, pero pueden alcanzar niveles altos en algunas aguas subterráneas (superiores a 20mg/L o más). En cantidades excesivas provoca metahemoglobinemia infantil (mal azul), efecto en el cual la hemoglobina se oxida a metahemoglobina produciendo asfixia (Jiménez, 2001). También pueden causar hipertensión, cáncer gástrico y malformaciones fetales. Altas concentraciones de nitratos junto con trazas de pesticidas en el agua potable pueden formar nitrosaminas, las cuales son carcinogénicas y mutagénicas (SARH, 1978; Ryding, 1994 y EPA, 2000).

Nitritos

El ión nitrito como tal es muy reactivo y se caracteriza por ser tan oxidante como reductor, además, es menos estable que el ión nitrato. Cuando el agua usada para preparar alimentos contiene nitritos se corre el riesgo de que se puedan formar sustancias carcinogénicas llamadas nitrosaminas, por combinación con los compuestos de nitrógeno orgánico, que forman a su vez por la descomposición de la proteína presente en los alimentos (Winkler, 1996). Los nitritos interfieren en la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre de niños ocasionando serias enfermedades, cuyos síntomas se desarrollan rápidamente; sin embargo, en la mayor parte de los casos la salud se deteriora en un periodo de días, los síntomas incluyen dificultad para respirar y coloración en la piel (EPA, 2000).

Nitrógeno amoniacal

El nitrógeno amoniacal esta presente en forma natural en aguas superficiales, profundas y desecho. Se produce por la desaminación de compuestos que contienen nitrógeno orgánico y por la hidrólisis de la urea. También pueden producirse por la reducción de los nitratos en condiciones anaerobias, por bacterias autótrofas nitrificantes del grupo de las nitrosamonas (APHA-AWWA-WEF, 1998).

Oxígeno Disuelto

La concentración de oxígeno disuelto es un parámetro importante para evaluar la calidad del agua. En aguas superficiales varía entre 3 y 12 mg/L; en casi todas las aguas subterráneas hay muy poco o nada. Las aguas superficiales contaminadas pueden contener menos de 3 mg/L, llegando incluso a 0 en casos extremos. La baja solubilidad del oxígeno en el agua es el factor principal que limita la

capacidad de autopurificación de aguas naturales, de ahí la necesidad de tratar los desechos líquidos, tanto domésticos como industriales (Romero, 1999; Robles *et al.*, 2004)

El oxígeno disuelto depende de muchos factores como la temperatura, altitud, movimientos del cuerpo receptor, actividad biológica, actividad química, etc. El oxígeno disuelto disminuye al aumentar la salinidad, la temperatura (50% entre 0° y 35°C) y a la altitud con respecto al nivel del mar (7% cada 60m). En la ciudad de México (2230 msnm) se tiene como concentración de saturación 7.2 mg/L a 20°C, a nivel del mar es de 9 mg/L (Jiménez, 2001; Seoanez, 1999, Cortes, 2004).

Sólidos Disueltos

Los sólidos disueltos están relacionados con el contenido de sales disueltas. Concentraciones muy elevadas afectarían el sabor del agua para consumo humano. Los sólidos disueltos, aun en caso de que carezcan completamente de propiedades nutrientes o tóxicas reducirán la solubilidad del oxígeno y contribuirán a la contaminación (Winkler, 1996).

Sólidos suspendidos

Se encuentran en las emisiones de las industrias de metales no ferrosos. Así como en los sectores de construcción, minería, textil y piel, pasta y papel. Grandes cantidades aumentan la viscosidad efectiva del agua y perjudica el flujo de la corriente, reduciendo así la transferencia del agua. (Ryding, 1994).

Sulfatos

Los sulfatos están ampliamente distribuidos en la naturaleza y su presencia en el agua varía de algunos a varios miles de miligramos por litro. Pueden derivarse de la lixiviación de los depósitos de yeso, anhidrita y esquisto, o de la oxidación de los sulfuros que se encuentran ampliamente distribuidos en rocas ígneas y sedimentarias, también procede del lavado de terrenos formados en ambientes marinos, de la descomposición de sustancias orgánicas, etc. Las aguas de las regiones áridas o semiáridas pueden contener cantidades relativamente grandes de sulfatos. En concentraciones altas actúan como laxantes y su combinación con otros iones imparte al agua sabor desagradable. En ausencia de oxígeno disuelto y nitratos los sulfatos sirven como fuente de oxígeno para las oxidaciones bioquímicas ocasionadas por bacterias anaeróbicas (Jiménez 2001; Castro, 2000).

Temperatura

El valor de la temperatura se requiere para la determinación de un gran número de parámetros o propiedades del agua, tales como alcalinidad, índice de saturación, conductividad, etc. La

temperatura en el cuerpo de agua influye también en los procesos de evaporación, transpiración y condensación, que forma parte del ciclo hidrológico. Parámetros tales como densidad y conductividad se ven afectados por variaciones de temperatura. Al aumentar la temperatura aumenta la conductividad, sin embargo al aumentar la temperatura la solubilidad del oxígeno disuelto disminuye y la actividad metabólica de los microorganismos aumenta (Tebutt, 1999).

Turbiedad

Proporciona al agua un aspecto desagradable; altas turbiedades pueden producir azolves, taponamiento, sobrecalentamiento y espumación. La turbiedad excesiva reduce la luz en los cuerpos de agua reduciendo la fotosíntesis en organismos fitoplanctónicos y en vegetales que se encuentran sumergidos, evitando así la producción de oxígeno

pH

Es un término que se usa universalmente para definir las condiciones de acidez o alcalinidad que se encuentra en una solución acuosa. El pH de casi todas las aguas superficiales varía de 6 y 8, algunas aguas subterráneas poseen valores de pH superiores a 8 y algunas inferiores a 5. Se considera que los valores extremos de pH son inhibitorios para los organismos vivos. Valores de pH mayores o menores de los establecidos por la norma ocasiona afectación del epitelio bucal.

Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)

Los principales problemas que presentan estos compuestos, en concentraciones muy bajas, son la producción de espuma y la impartición de sabor. Por ello el estándar de 0.8 mg/L representa un factor de seguridad de 15.000 veces en relación con su toxicidad.

2.5 DETERMINACIONES BACTERIOLÓGICAS

El análisis bacteriológico del agua es vital en la prevención de epidemias como resultado de la contaminación del agua. Dicho análisis para fines rutinarios de calidad, no implica la búsqueda directa de todos los gérmenes patógenos debido a su dificultad analítica y tiempo de análisis. Por consiguiente, el control sanitario del agua se hace a través de la identificación de grupos de organismos indicadores de contaminación como es el grupo Coliformes. Este grupo de organismos Coliformes habitan el tracto intestinal de humanos y otros mamíferos. Así, la presencia de Coliformes es una indicación de contaminación fecal del agua (Brock, 2004; Mata, 2004; Torres, 1999).

Este grupo es el principal indicador de la adecuación del agua para usos domésticos, industriales o de otro tipo. De este modo el grupo Coliforme se divide en dos, los Coliformes totales y los Coliformes fecales que se definen como sigue:

Coliformes Totales: bacilos cortos, Gram negativos, no esporulados, fermentan la lactosa con producción de acidez y gas, en 24-48 h, a 35 °C (*Escherichia*, *Klebsiella* y *Enterobacter*).

Coliformes Fecales: bacilos cortos, no esporulados que fermentan la lactosa con producción de acidez y gas, en 24-48 h, a 35 °C y a 44.5 ° C (*Escherichia* y algunas especies de *Klebsiella*).

2.6 NORMA OFICIAL MEXICANA

Las Normas Oficiales Mexicanas son un conjunto de reglas científicas o tecnológicas emitidas por la federación que establece los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, parámetros y límites permisibles que deberán observarse en el desarrollo de actividades o uso y destino de bienes, su aplicación y vigilancia corresponde a las autoridades federales, estatales o municipales, en el ámbito de sus respectivas jurisdicciones territoriales, así como en los términos que establezcan en su propia legislación (Mata, 2004).

La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, establece los límites permisibles de calidad del agua que sea destinada para uso y consumo humano. Esta norma Oficial Mexicana es aplicable a todos los sistemas oficiales de abastecimiento públicos y privados y a cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional. La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, en su capítulo cuatro establece los límites permisibles de calidad.

2.7 ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA

A fin de conocer el estado que guarda el agua respecto a su calidad, se hace uso de ciertos parámetros característicos que rigurosamente pueden llegar al orden de cientos; sin embargo no todos son necesarios para la mayoría de las investigaciones, pudiéndose disminuir a solo decenas. Entre estos se hallan las determinaciones de oxígeno disuelto, DBO, DQO, pH, temperatura, turbiedad, conductividad eléctrica, NMP Coliforme, etc.

El Índice de Calidad del Agua (ICA), proporciona un método que permite relacionar los parámetros reportados, con el fin de determinar el grado de contaminación que presenta el agua. Mediante el ICA se logra un patrón de comparación entre distintos cuerpos de agua y así el comportamiento de

los indicadores de contaminación del agua subterránea es un reflejo de las condiciones en las que se encuentra el acuífero al momento del muestreo, lo que permite elaborar un diagnóstico de las zonas potencialmente contaminadas y dar recomendaciones sobre las zonas en las que se deben llevar a cabo estudios más específicos, debido a que se considera un buen diagnóstico del estado del recurso (Caballero 2006).

El grado de contaminación queda representado por el índice de calidad del agua, el cual está expresado como un porcentaje del agua pura, así, el agua altamente contaminada tendrá un ICA global cercano o igual 0%, en cambio el agua en excelente condición tendrá un valor cercano a 100%.

Con ayuda del ICA se pueden determinar los usos a los que se puede destinar el agua según el grado de contaminación, dichos usos quedan establecidos en la escala de clasificación general de la calidad del agua (Tabla 4).

3. JUSTIFICACIÓN

Ya que los acuíferos constituyen una fuente de agua para consumo humano muy importante y debido a las descargas de agua residual que se tiran directamente al suelo y al uso de las aguas residuales, ya sean tratadas o sin tratar, en el riego de hortalizas es importante evaluar el impacto que tienen estas descargas en el suelo y su infiltración en los mantos acuíferos, llevando con ello toda la carga de contaminantes tanto biológicos como fisicoquímicos a los acuíferos contaminándolos y poniendo en riesgo la salud de los usuarios.

4. OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar la calidad bacteriológica y fisicoquímica de tres pozos de agua y un manantial, ubicados en la zona sur del acuífero del Valle de Cuernavaca Morelos.

Objetivos particulares

1. Determinar los parámetros bacteriológicos: Coliformes totales y Coliformes fecales
2. Determinar los parámetros fisicoquímicos: alcalinidad total y a la fenolftaleína, dureza total, de calcio y de magnesio, sulfatos, cloruros, turbiedad, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, nitratos, nitritos y nitrógeno amoniacal, demanda bioquímica de oxígeno, detergentes, pH, temperatura y oxígeno disuelto.
3. Calcular el índice de calidad del agua (ICA).
4. Comparar los resultados con la Modificación a la Norma Oficial Mexicana 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.
5. Conocer si hay diferencias significativas de la calidad del agua entre los pozos estudiados.

5. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El acuífero de Cuernavaca ha mostrado un acelerado desarrollo urbano, industrial y actividades que han generado importantes demandas de agua. Actualmente la continua degradación en la calidad del agua del acuífero es debida principalmente a las descargas de aguas residuales domésticas y municipales sin tratamiento a las barrancas, arroyos y ríos que han alterado la calidad del agua subterránea (CNA, 2002).

El acuífero Cuernavaca se localiza entre las coordenadas geográficas de 18° 47' y 19° 07' de latitud Norte y los 99° 07' y 99° 25' de longitud Oeste del meridiano de Greenwich, colinda en la porción Norte con las Cuencas Hidrológicas del Valle de México y del río Lerma. Al Este y Sur colinda con los acuíferos de Cuautla-Yautepec y Zacatepec, respectivamente, ambos en el estado de Morelos. Al poniente colinda con la subcuenca del río Chalma del estado de México (Figura 2).

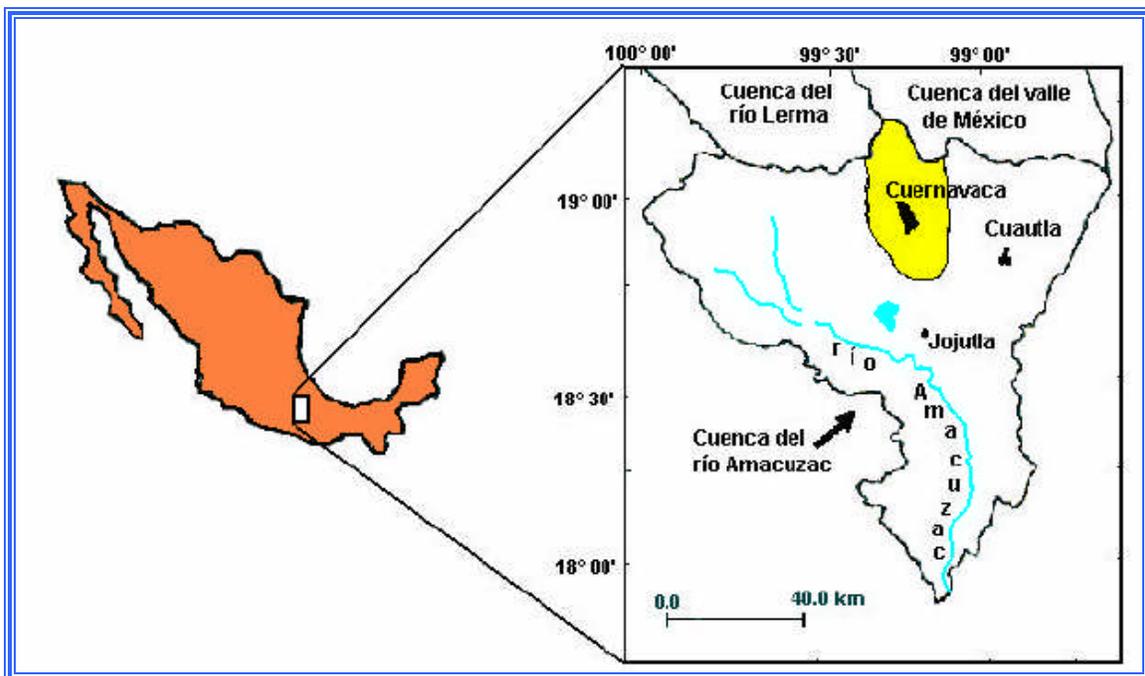


Figura 2. Localización del acuífero de Cuernavaca. Morelos, México (CNA, 2002).

5.1 Clima

El clima se define por una gran variedad de factores, sin embargo, el principal factor que influye en los climas del estado de Morelos y del acuífero de Cuernavaca se debe a la geografía, destacando la altitud del Eje Neovolcánico (ENV) y la influencia de la Sierra Madre del Sur (SMS). El clima cálido

presenta una temperatura mayor de los 22°C, predomina a altitudes menores de 1.400 msnm, en la porción sur del acuífero.

5.2 Temperatura media anual

Los tipos de climas que se definen en la zona geográfica donde se encuentra el acuífero de Cuernavaca forman cinturones climáticos con orientación de Este a Oeste, los cuales son poco oscilantes a lo largo del año. De acuerdo con las temperaturas medias anuales se tiene que en esta zona acuífera se definen cinturones con climas: semifrío, templado, semicálido y cálido. Los climas semifrío y templado se localizan en la porción Norte del acuífero y el clima semicálido y cálido al centro y Sur del acuífero, respectivamente.

5.3 Fisiografía

El valle de Cuernavaca se localiza entre las provincias fisiográficas del Eje Neovolcánico (ENV) y de la Sierra Madre del Sur (SMS).

A través del tiempo geológico el estado de Morelos ha sido afectado por períodos orogénicos y tectónicos, actividades que han dado lugar a la presencia de una gran variedad de geoformas.

Los límites geomorfológicos de la zona acuífera del valle de Cuernavaca son: al Norte con las sierras de Zempoala, Ajusco y Chichinautzin, al Sur con la Sierra de Xochicalco, al poniente con la prolongación de la Sierra de Zempoala y al oriente con la sierra de Tepoztlán-Tlaltizapan o anticlinal de Tucumán.

Las sierras del Ajusco (3,750 msnm), Zempoala (3,650 msnm) y Chichinautzin (3,690 msnm) son las mayores altitudes y una de las principales zonas de recarga del acuífero Cuernavaca. La Sierra del Chichinautzin, se constituye de coladas de lava de naturaleza basáltica; este material tiene un alto grado de permeabilidad secundaria producto del alto grado de fracturamiento, lo que permite que infiltren las aguas generadas por lluvia. La Sierra de Zempoala se constituye de volcanes y coladas de lava de naturaleza andesítica, se ubica en los alrededores de las lagunas de Zempoala. El desnivel de las sierras y el valle es de 2,490 m en una distancia aproximada de 30 Km, lo que da lugar a una expresión geomorfológica de gran contraste.

5.4 Hidrogeología

En función de aspectos geomorfológicos y geohidrológicos se define que la extensión territorial de la zona hidrogeológica del acuífero Cuernavaca tiene 996 km², de los cuales, 595.7 Km² se catalogan exclusivamente como zona de recarga y 400.3 Km² como zona acuífera.

Este acuífero se encuentra alojado en dos diferentes unidades de roca: la primera unidad consiste de rocas ígneas basálticas fracturadas de la Formación Chichinautzin que presentan una alta permeabilidad y distribución irregular; la segunda unidad la constituyen rocas de la formación Cuernavaca que presenta una permeabilidad media y una distribución irregular.

5.5 Geología

La columna estratigráfica en el acuífero Cuernavaca se representa por 13 tipos de unidades de roca, las cuales abarcan del período Cretácico Inferior (110 millones de años) al Reciente; en la columna se observan rocas ígneas intrusivas y extrusivas y grandes afloramientos de rocas sedimentarias marinas y continentales.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomaron muestras mensuales en tres pozos y un manantial del acuífero del Valle de Cuernavaca, durante un año.

Los pozos analizados en el Valle de Cuernavaca zona sur son: El manantial Las Fuentes perteneciente al municipio de Jiutepec, Ojo de Agua al municipio de Temixco, Zapata y Tezoyuca al municipio de Emiliano Zapata (figuras 3 a 6).



Figura 3. Manantial Las Fuentes



Figura 4. Pozo Ojo de Agua



Figura 5. Pozo Tezoyuca



Figura 6. Pozo Zapata

In situ se determinó en cada pozo el OD, pH y temperatura y se tomaron muestras, una en bolsa estéril para las determinaciones bacteriológicas y dos muestras en garrafones de un litro, de los cuales uno se acidificó y se mantuvo en hielo y el otro solo se mantuvo en hielo para los análisis fisicoquímicos. Todas las muestras se trasladaron en hielo al laboratorio en donde se determinaron los parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos de acuerdo a las técnicas indicadas en la tabla 1 (APHA-AWWA-WEF, 1998).

Tabla 1. Técnica analítica para cada parámetro

PARÁMETRO	TÉCNICA*
pH	Potenciométrica
Temperatura	Instrumento
Oxígeno disuelto	Winkler modificado
Conductividad	Conductímetro
Sólidos disueltos	Gravimétrico
Sólidos suspendidos	Gravimétrico
Alcalinidad total	Titulación con indicador
Nitrógeno amoniacal	Nesslerización
Nitratos	Brucina
Nitritos	Diazotización
Cloruros	Argentométrico
Sulfatos	Turbidimétrico
Dureza total	Titulación con EDTA
Dureza de calcio	Titulación con EDTA
Turbiedad	Turbidímetro
DBO ₅	Dilución
Detergentes	Azul de metileno
Coliformes totales	Filtro de membrana
Coliformes fecales	Filtro de membrana

* Las técnicas son de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas y al APHA-AWWA-WEF, 1998.

El Índice de calidad del agua (ICA) se obtuvo con la siguiente ecuación (Cortés, 2004):

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n (I_i \times W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Donde:

$I = 1$

I = Índice de calidad general

I_i = Índice de calidad del parámetro considerado (ver tabla 2)

W_i = Valor de la importancia relativa del parámetro considerado (ver tabla 3)

El índice individual para cada parámetro se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Índice individual (I_i) para cada parámetro

Parámetro	Índice de calidad individual para cada parámetro	Unidades	Observaciones
pH	$I_{pH} = 10^{4.22 - 0.923pH}$		Si pH mayor que 7.3
Sólidos suspendidos	$I_{ss} = 266.5 (ss)^{-0.37}$	mg/L	
Sólidos disueltos	$I_{sd} = 109.1 - 0.0175(sd)$	mg/L	
Conductividad eléctrica	$I_{CE} = 540(CE)^{-0.379}$	ms	
Alcalinidad	$I_a = 105(a)^{-0.186}$	mg/L como $CaCO_3$	
Dureza total	$I_D = 10^{1.974 - 0.00174(D)}$	mg/L como $CaCO_3$	
N de nitratos	$I_{NO_3} = 162.2(NO_3)^{-0.343}$	mg/L	
N amoniacal	$I_{NH_3} = 45.8(NH_3)^{-0.343}$	mg/L	
Fosfatos totales	$I_{PO_4} = 34.215(PO_4)^{-0.46}$	mg/L	
Cloruros	$I_{Cl} = 121(Cl)^{-0.223}$	mg/L	
Oxígeno disuelto	$I_{OD} = \frac{(OD)}{OD_{sat}} 100$	OD mg/L a T° de campo OD sat mg/L de saturación a misma T° de campo	La concentración de saturación del oxígeno disuelto se obtiene con la siguiente fórmula: $C_s = 14.6 - 0.3943T + 0.007714T^2 - 0.0000646T^3$ donde C_s = concentración de saturación de OD (mg/L) T = Temperatura puntual en $^\circ C$
Detergentes	$I_{SAAM} = 100 - 16.670(SAAM) + 0.1587(SAAM)^2$	SAAM en mg/L	
Demanda bioquímica de oxígeno	$I_{DBO} = 120(DBO)^{-0.673}$	DBO en mg/L	
Coliformes totales	$I_{CT} = 97.5(CT)^{-0.27}$	CT = NMP coli/ml	
Coliformes fecales	$I_{EC} = 97.5(5 < EC >)^{-0.27}$	EC = <i>Escherichia coli</i> /ml	

Fuente: SARH, 1979

La importancia relativa de cada uno de los parámetros medidos se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Importancia relativa de los parámetros para definir el índice de calidad del agua

Parámetro	Importancia relativa	Parámetro	Importancia relativa
pH	1.0	N de nitratos	2.0
Dureza total	1.0	N amoniacal	2.0
Detergentes (SAAM)	3.0	Fosfatos totales	2.0
Sólidos suspendidos	1.0	Cloruros	0.5
Sólidos disueltos	0.5	Oxígeno disuelto	5.0
		DBO	5.0
Conductividad eléctrica	2.0	Coliformes totales	3.0
Alcalinidad	1.0	Coliformes fecales	4.0

Fuente: SARH, 1979

Con el ICA calculado se ve en la tabla 4 el uso mas adecuado al que corresponde de acuerdo al valor obtenido.

Tabla 4. Usos del agua según el Índice de Calidad (ICA)

ICA	USO PÚBLICO	RECREO	PESCA Y VIDA ACUÁTICA	INDUSTRIA AGRÍCOLA	NAVEGACIÓN	TRANSPORTE DESECHOS TRATADOS.
100	Aceptable No requiere purificación	Aceptable	Aceptable	Aceptable No requiere purificación		
90	Requiere una ligera purificación	Para todo tipo de deporte acuático	para todo tipo de organismo.	Requiere una ligera purificación		
80	Mayor					
70	Necesidad de tratamiento	Aceptable pero no	Excepto especies muy sensibles	Sin tratamiento para la	Aceptable para todo tipo de navegación.	Aceptable
60		Recomendable	Dudoso para especies sensibles	Industria normal		Para todo tipo de transporte de desechos
50	Dudoso	Dudoso para contacto directo	Solo para organismos	Con tratamiento para la		tratados
40	Inaceptable	Sin contacto con el agua	Muy resistentes	Mayor parte de la industria		
30		Muestras obvias de contaminación	Inaceptable	Uso muy restringido	Contaminado	
20		Inaceptable		Inaceptable	Inaceptable	
10						Inaceptable
0						

Fuente: SARH, 1979, y, Govantes, 2007.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 PRIMERA PARTE: RESULTADOS Y EVALUACIÓN DE CADA POZO Y DEL MANANTIAL

Con los valores de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos de cada pozo estudiado, se calcularon las medias, desviación estándar y valores mínimo y máximo para cada parámetro analizado y por cada pozo. También se comparan las medias con los límites máximos permisibles de la norma mexicana para agua potable y se calcula el índice de calidad del agua (ICA). Posteriormente se hace la comparación entre pozos.

Es importante recordar que como el objetivo del estudio fue evaluar la calidad del agua subterránea, las muestras fueron tomadas antes de la desinfección (cloración).

7.1.1 MANANTIAL: LAS FUENTES

a) Variación temporal de los parámetros fisicoquímicos.

Los valores mínimos y máximos, las medias y desviaciones estándar calculadas por cada parámetro se presentan en la tabla 5. En general las medias, valores mínimos y máximos para DBO_5 , detergentes y nitrógeno amoniacal, se encontraron en el límite y por abajo del límite de detección del método, los cuales son (2, 0.001, 0.01) todos expresados en mg/L respectivamente.

Los valores por abajo del límite de detección de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), nos indican que no hubo contaminación por materia orgánica biodegradable. En este manantial los parámetros fisicoquímicos realizados que se pueden relacionar con la materia orgánica fueron la DQO y el nitrógeno amoniacal.

La demanda química de oxígeno DQO, presentó un promedio de 5.3 mg/L con valor máximo de 6.6 mg/L y mínimo de 3.5 mg/L y con una desviación estándar de 1.01. Los valores bajos de DQO son debidos básicamente a la oxidación de las sales minerales. El contenido de sales representadas por la alcalinidad, durezas, sulfatos y cloruros en general se pueden considerar bajas obteniéndose un valor mínimo de sólidos disueltos de 96 y un máximo de 118 mg/L (Tabla 5).

El nitrógeno amoniacal cuyos valores encontrados por debajo de la sensibilidad del método (0.01 mg/L), nos confirman la ausencia de materia orgánica.

Los sólidos suspendidos también presentaron en diversas ocasiones valores por arriba del límite de sensibilidad del método (0.0001 mg/L) y en otras los valores en general fueron muy bajos.

El pH presentó un promedio de 6.79, turbiedad con 0.47 UTM, sólidos disueltos 107.91, alcalinidad total con 86.55, dureza total 47.38, cloruros con 2.74, sulfatos 7.95 y nitratos 0.81, todos expresados en mg/L, estos resultados no coinciden con lo reportado por Suárez quien trabajó en esta misma zona (Fuentes) en el año de 1988, y obtuvo los siguientes resultados: pH 8.5, turbiedad con 25 UTM, sólidos disueltos con 236 mg/L, alcalinidad total con 48 mg/L, dureza total 116 mg/L, sulfatos 70 mg/L, nitratos 0 mg/L. En este trabajo no se estudiaron los otros parámetros que aquí se tomaron en cuenta. Por lo tanto se observa que el pH a tenido una disminución que va de 8.5 a 6.79 en la actualidad esto nos indica que el agua de esta zona se ha acidificado de manera considerable esto puede ser ocasionado por ácidos minerales libres que provienen de los drenajes (Robles *et al.*, 2004).

En el estudio realizado por la CNA reportaron un pH de 7 y una conductividad de 138 $\mu\text{s}/\text{cm}$, la cual es similar con la analizada en este estudio que fue de 129.97 $\mu\text{s}/\text{cm}$. La conductividad nos da en forma indirecta, la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua. Por lo tanto cualquier cambio en la cantidad de sustancias disueltas, implica un cambio en la conductividad (Romero, 1999).

Tabla 5. Media, desviación estándar, valor mínimo y máximo de los parámetros fisicoquímicos del Manantial: Las Fuentes

	DBO	DQO	OD	pH	Temp	Cond	S. Tot.	S. Susp.	S. Dis.	NO ₃	NO ₂
Media	2	5.3	5.0	6.79	17	129.9	108.6	0.75	107.9	0.815	0.002
D. Std	0.30	1.01	1.26	0.41	0.9	5.06	6.78	1.42	7.06	0.28	0.004
V. mín.	2	3.5	2.5	6.01	17	120	96	0	96	0.45	0
V. máx.	3.05	6.6	6.3	7.3	18	137	118	4	118	1.34	0.016

Tabla 5. Continuación. Media, desviación estándar, valor mínimo y máximo de los parámetros fisicoquímicos del Manantial: Las Fuentes

	Alcalin. Total	Dureza T	Dureza de Ca	Dureza de Mg	Cl ⁻	SO ₄	SAAM	Turbiedad	NH ₃
Media	86.55	47.38	26.31	21.07	2.74	7.95	0	0.475	0
D. Std.	12.53	8.936	5.62	8.34	2.63	2.50	0	0.115	0
V. min.	70.7	36.4	20	10.4	1	3.7	0	0.2	0
V. máx.	105.06	63.4	42	35.7	8.9	11.1	0	0.63	0

b) Comportamiento temporal del OD y temperatura

La concentración de oxígeno disuelto (OD) es un parámetro importante para evaluar la calidad del agua, su contenido depende de la concentración y estabilidad del material orgánico presente en un cuerpo de agua (Jiménez, 2001; Romero, 1999). En la figura 7 el oxígeno disuelto (OD) presentó valores que oscilaron entre 6.3 y 2.5 mg/L. En los meses de septiembre y octubre se presentan las concentraciones más bajas de OD con 2.5 y 2.8 mg/L respectivamente. Existen tres factores que afectan su concentración en un cuerpo de agua natural y son la temperatura, presión atmosférica y la salinidad o contenido de sólidos disueltos; en condiciones de altas temperatura el oxígeno es menos soluble. Debido a estas razones casi todas las condiciones críticas relacionadas con la deficiencia de oxígeno disuelto ocurre durante los meses de verano, cuando la temperatura es alta (Robles *et al.*, 2004). Sin embargo en los meses de noviembre de 2005 a mayo de 2006 se presentaron las concentraciones más altas que van de 5.4 a 6.3 mg/L de OD. En 1995 la CNA obtuvo para esta misma zona 6.99 mg/L de oxígeno disuelto.

La temperatura se observó con poca variación a lo largo del estudio que van de 17 a 18 °C, en aguas subterráneas es muy poco variable, sin embargo es un parámetro importante ya que cuando existen variables diferencias de temperatura estas afectan la disolución de sustancias (Price, 2003).

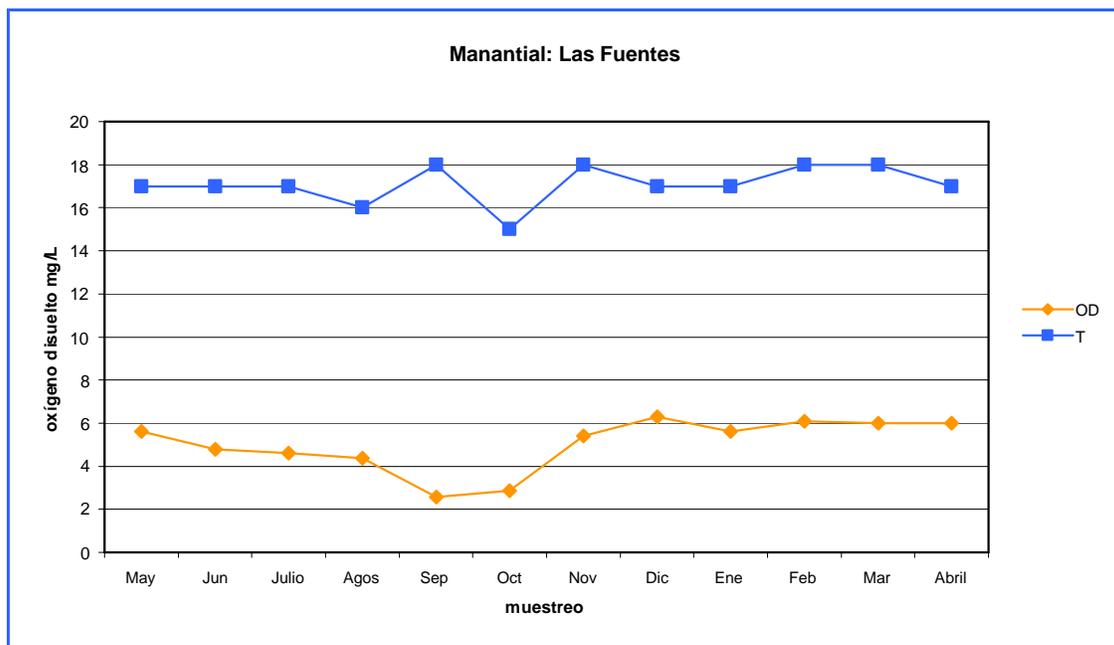


Figura 7. Concentraciones de oxígeno disuelto y temperatura en el manantial Las Fuentes

c) Comportamiento temporal de la alcalinidad total y dureza total

La dureza total de las aguas es un componente con bastante significancia en la calidad fisicoquímica del agua. Siendo un parámetro para agua potable y agua de uso industrial principalmente (Jiménez, 2001).

Como se aprecia en la figura 8, los valores más altos de durezas se presentaron de agosto a enero mientras que los valores más bajos fueron en mayo y febrero. La media fue de 47.38 mg/L lo cual de acuerdo a la clasificación de la tabla 6, la coloca en un agua suave. Este resultado no coincide con lo reportado por la CNA en 1995 (citado en CNA, 2002), ellos obtiene 85 mg/L de dureza total la cual la coloca en un agua de tipo moderadamente dura.

La dureza total se origina por un exceso de sales minerales en el agua debida a la presencia de iones Ca y Mg, estas tienen repercusiones en las prendas de vestir cuando son enjuagadas con esta agua, por lo tanto concentraciones altas impiden que el jabón actúe de manera adecuada e impide la cocción rápida de las legumbres. Por lo tanto como el agua del manantial Las Fuentes tuvo una dureza baja adecuada para estos usos.

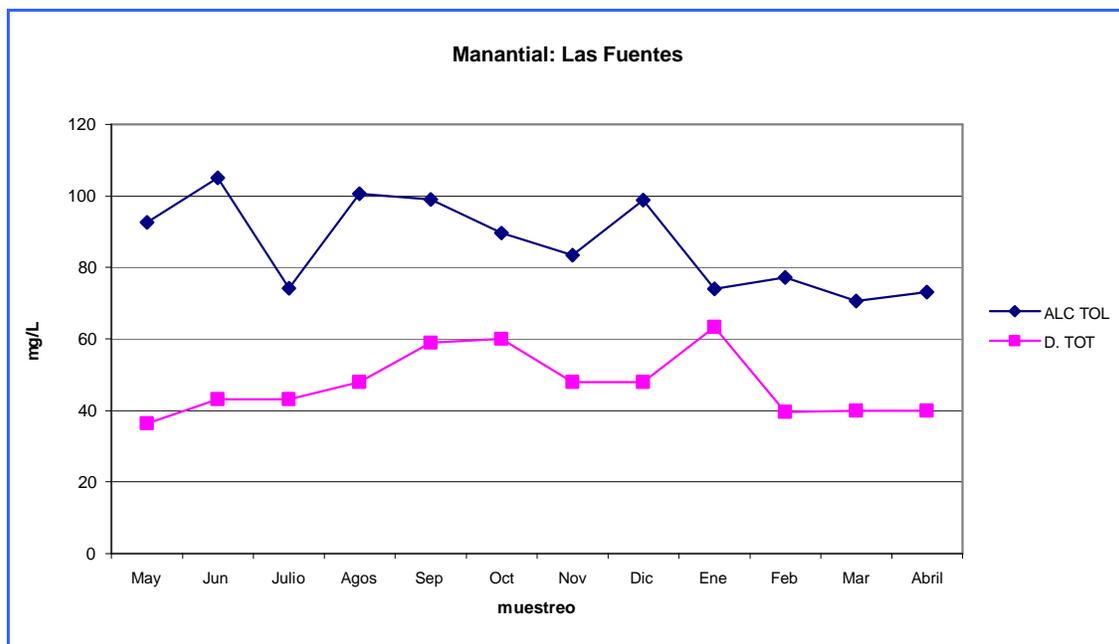


Figura 8. Concentración de alcalinidad total y dureza total en el manantial Las Fuentes

Tabla 6. Clasificación del agua de acuerdo a su dureza

Agua suave	1-60 mg/L
Moderadamente dura	61-120 mg/L
Dura	121-180 mg/L
Muy Dura	> 180 mg/L

Referencia: Robles *et al.*, 2004.

Con los datos de las medias de la alcalinidad total (86.55 mg/L) y de la dureza total (47.38 mg/L), se pudo observar que la dureza de este pozo es temporal o carbonatada (ya que la dureza total es menor a la alcalinidad total), cuya concentración es de 47.38 mg/L. Este tipo de dureza desaparece cuando se hierve el agua, es decir que puede precipitarse mediante ebullición prolongada. Esto se produce porque los bicarbonatos sirven como fuentes de iones carbonato para precipitar Ca^{++} como CaCO_3 a temperaturas elevadas. La dureza carbonatada esta dada principalmente por carbonatos y bicarbonatos.

La dureza no carbonatada fue de 39.17 mg/L (diferencia entre la alcalinidad total y la dureza total) y corresponde principalmente a sulfatos, cloruros y nitratos de calcio y de magnesio. La dureza de no carbonatos, sobre todo cuando el anión es el sulfato, puede dar como resultado la formación de escamas duras en las calderas y otras partes del equipo de intercambio de calor. Este tipo de dureza es más costosa y difícil de eliminar (Romero, 1999., Robles, *et al.*, 2004).

En general la alcalinidad se mantuvo más o menos constante a lo largo de todos los muestreos. La media fue de 86.55 mg/L y la alcalinidad que presentó este pozo fue debida a bicarbonatos de acuerdo a la relación de alcalinidad total y alcalinidad a la fenolftaleina. La CNA en 1995 (citado en CNA, 2002) reporta para esta misma estación 61.8 mg/L de alcalinidad total. En aguas con pH inferior a 8.3 (en la mayoría de las aguas subterráneas naturales), la especie carbonatada dominante es el ion bicarbonato (Price, 2003). Concentraciones elevadas pueden tener efecto negativo en cultivos, según sea su composición química. El agua residual domestica tiene, por lo general, alcalinidad menor o, cuando mucho, ligeramente superior a la de l abastecimiento; es del orden de 50 a 200 mg/L CaCO_3/L . El principal efecto de la alcalinidad es la reacción de esta con ciertos cationes en el agua, lo que conduce a la formación de precipitados (Jiménez, 2001).

d) Comportamiento temporal de los aniones cloruros y sulfatos

El cloruro en forma de ión es uno de los aniones inorgánicos más importantes en las aguas y aguas de desecho (APHA-AWWW-WEF, 1998). Los cloruros presentaron valores muy bajos de 1 a 8.9 mg/L incrementándose ligeramente en los meses de julio, agosto y enero (Figura 9). También la CNA reporta una concentración de 4 mg/L de cloruros durante octubre-noviembre de 1995. Los cloruros logran acceso a las aguas naturales en muchas formas: el poder disolvente del agua introduce cloro de la capa vegetal y de las formaciones más profundas, también los excrementos humanos, principalmente la orina, contienen cloruros en una cantidad casi igual a la de los cloruros consumidos con los alimentos y el agua. Esta cantidad es en promedio de unos 6 gramos de cloruros por persona por día, e incrementa el contenido de Cl^- en las aguas residuales en unos 20 mg/L por encima del contenido propio del agua. Por consiguiente, los efluentes de aguas residuales añaden cantidades considerables de cloruros a las fuentes receptoras, también muchos residuos industriales contienen cantidades apreciables de cloruros. Los cloruros en cantidades razonables no son peligrosos para la salud y son un elemento esencial para las plantas y los animales. En concentraciones por encima de los 250 mg/L produce un sabor salado en el agua y no se recomienda su consumo en caso de hipertensión o problemas renales (Cortes, 2004).

Los sulfatos son muy abundantes en la naturaleza y su presencia varía de algunos miles de miligramos por litro. En aguas dulces la concentración normal puede variar de entre 2 y 150 mg/L. (Prince, 2003). Como se aprecia en la figura 9, los sulfatos estuvieron dentro del ámbito de 3.7 a 11.1 mg/L bajando ligeramente en noviembre y diciembre, para esta misma zona la CNA reportó 8.0 mg/L de sulfatos que también se encuentra dentro del rango encontrados en este estudio. El ion sulfato es uno de los aniones más comunes en las aguas naturales que varían desde unos pocos hasta varios miles de mg/L. El contenido de sulfatos en concentraciones altas actúa como laxante, también es importante porque las aguas con alto contenido de sulfatos incrementan la corrosión de los metales (Jiménez, 2001).

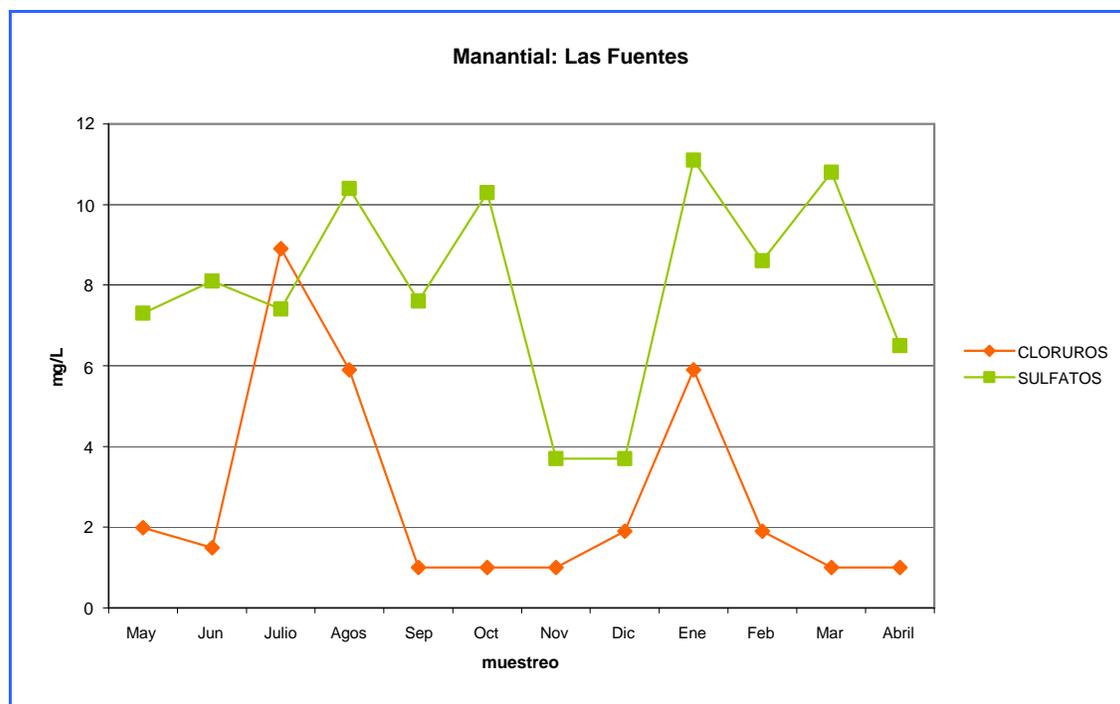


Figura 9. Concentración en de cloruros y sulfatos en el manantial Las Fuentes.

e) Variación temporal de los parámetros bacteriológicos

La variación temporal de las bacterias Coliformes totales y Coliformes fecales a lo largo del muestreo se observa en la tabla 7 con el fin de detectar en que meses se tiene la mayor incidencia de bacterias.

Los valores presentados de Coliformes totales durante los muestreos se observan de manera general variables ya que se presentan rangos que van de 270 a 20,000 colonias, siendo el mes de agosto el que presentó la menor concentración de bacterias y la mayor se observó en el mes de abril. En cuanto a las bacterias Coliformes fecales se tiene que el mes de octubre presenta la mayor concentración (1,220 ufc/100mL) y la menor en el mes de agosto (120 ufc/100 mL). Muchas de estas bacterias provienen del aire, el suelo animales o plantas vivas o en descomposición, fuentes minerales y materia fecal, además a la disposición inadecuada de los desechos domésticos, de hecho cerca del manantial a unos cuantos metros pasa un canal que lleva aguas residuales haciendo al manantial más propenso a dicha contaminación, entre otros (Tabla 7, Figura 10 y 11). Todo ello conlleva a la transmisión a través del agua de organismos patógenos los cuales pueden producir graves epidemias, cuyas enfermedades más conocidas que pueden ser transmitidos por el

agua están los problemas gastrointestinales, cólera, tifoidea y salmonelosis entre otras, estas son casi siempre el resultado de contaminación fecal (Jiménez, 2001).

Tabla 7. Resultados bacteriológicos del manantial Las Fuentes (ufc/100mL).

	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abril
C.T	300	1900	8600	270	1300	1300	1000	400	620	6200	6200	20000
C.F	140	800	320	120	1000	1220	700	300	460	700	700	700

C.T= Coliformes totales C.T= Coliformes fecales

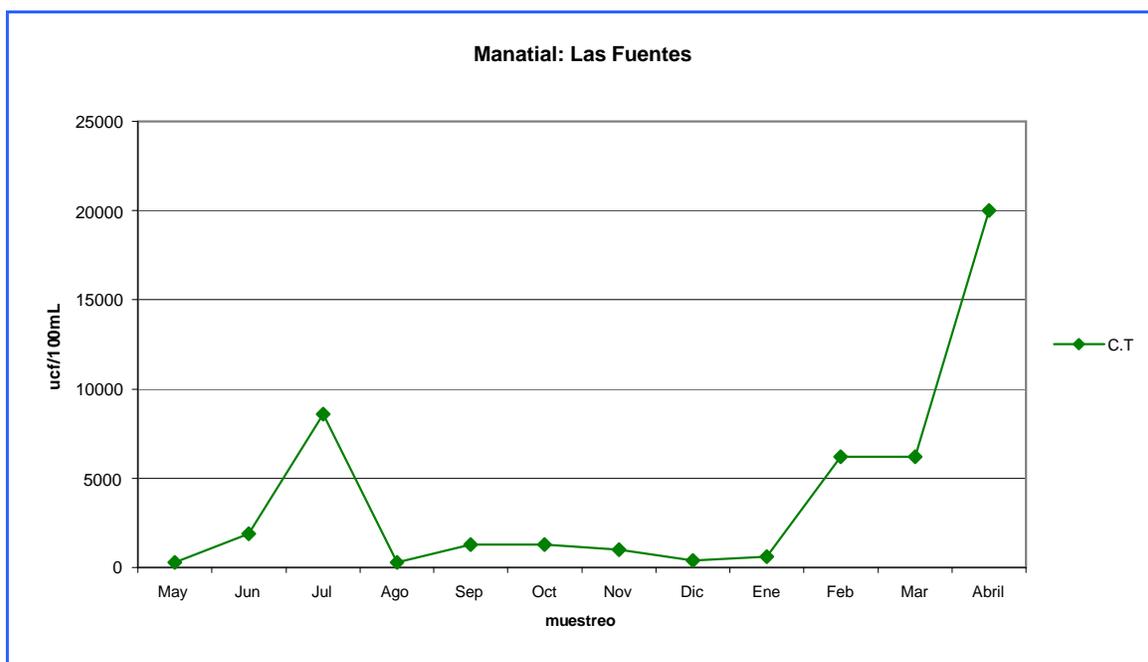


Figura 10. Concentración de bacterias Coliformes totales en el manantial Las Fuentes.

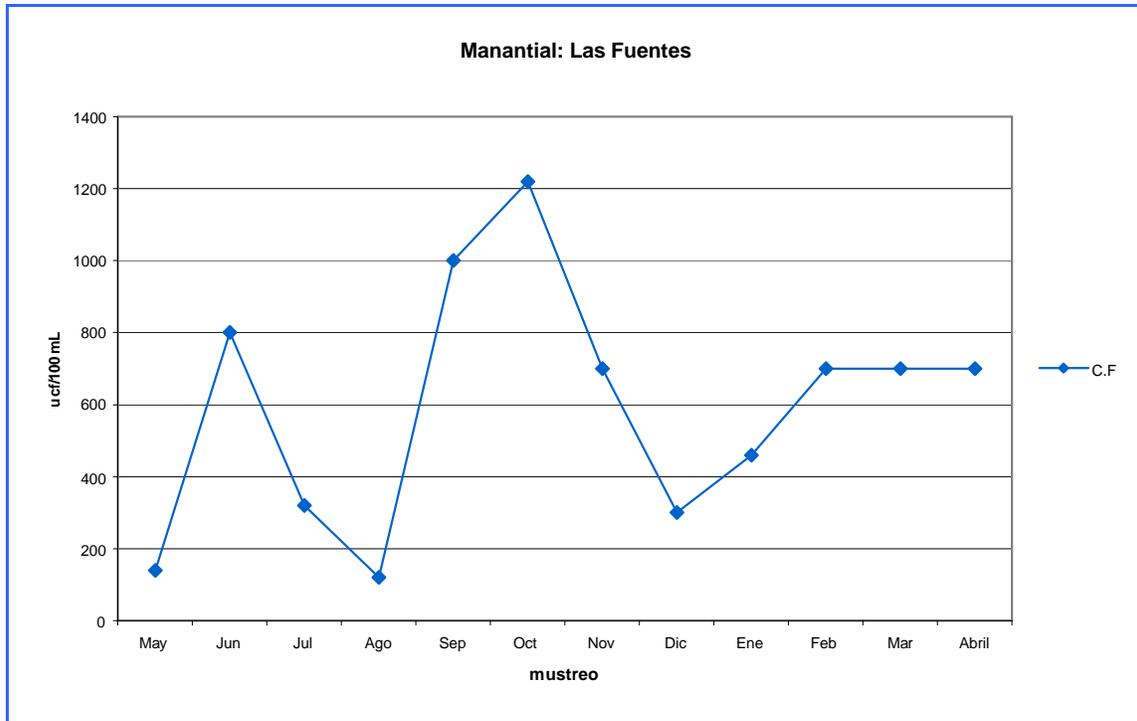


Figura 11. Concentración de bacterias Coliformes fecales en el manantial Las Fuentes.

f) Comparación de las medias, valor mín. y valor máx. de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos con la NOM-127-SSA, 1994.

Comparando las medias y los valores mínimo y máximo de los parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos con los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA-1994 tenemos que todos los parámetros fisicoquímicos, a excepción del valor mínimo de pH, se encontraron por debajo de los límites máximos permisibles sin embargo, se rebasan los límites permisibles de Coliformes totales y Coliformes fecales (Tabla 8).

Tabla 8. Comparación de los resultados obtenidos con la Norma oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

Parámetro	Resultados de las muestras		Límite máx perm. De acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994
Dureza total en mg/L	Media	47.38	500
	Valor mín	36.4	
	Valor máx.	63.4	
Sólidos disueltos en mg/L	Media	107.91	1000
	Valor mín	96	
	Valor máx.	118	
pH	Media	6.79	6.5-8.5
	Valor mín	6.01	
	Valor máx.	7.3	
Nitratos en mg/L	Media	0.815	10
	Valor mín	0.453	
	Valor máx.	1.34	
Nitrógeno amoniacal en mg/L	Media	0	0.50
	Valor mín	0	
	Valor máx.	0	
Nitritos en mg/L	Media	0.002	1
	Valor mín	0	
	Valor máx.	0.016	
SAAM en mg/L	Media	0	0.50
	Valor mín	0	
	Valor máx.	0	
Turbiedad en UTN	Media	0.475	5
	Valor mín	0.2	
	Valor máx.	0.63	
Sulfatos en mg/L	Media	7.95	400
	Valor mín	3.7	
	Valor máx.	11.1	
Cloruros en mg/L	Media	2.74	250
	Valor mín	1	
	Valor máx.	8.9	
Coliformes totales en ufc/100 mL	Media	1935	Ausencia o no detectables
	Valor mín	270	
	Valor máx.	20000	
Coliformes fecales en ufc/100 mL	Media	486	Ausencia o no detectables
	Valor mín	120	
	Valor máx.	1220	

Aunque la media de pH y el valor máximo de este parámetro estuvieron dentro de los límites de la norma hay que tomar en cuenta que hubo algunos muestreos en los que el valor estuvo fuera del límite.

La presencia de bacterias Coliformes tanto fecales como totales en este manantial es importante pues indican contaminación de tipo fecal, por lo que esto representa un problema sanitario, independientemente de que de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994, el uso del de agua de este manantial para consumo directo, no podría utilizarse sin antes pasar por una desinfección.

g) Índice de calidad del agua (ICA)

Con los resultados obtenidos se calcularon las medias por cada parámetro, calculándose con ellas los índices individuales. Posteriormente se calculó el índice de calidad del agua (ICA) por cada muestreo realizado (Tabla 9). Con la media de todos los ICA se determinó el uso mas adecuado de acuerdo con la tabla 4.

Tabla 9. Resultados de los Índices de Calidad del Agua por muestreo.

Periodo	Manantial Las Fuentes (%)
May	79.4
Jun	71.2
Ago	73.5
Ago	80.4
Sep	64.2
Oct	60.3
Nov.	74.7
Dic	84.5
Ene	74.3
Feb	68.7
Mar	71.1
Abril	68.8
MEDIA	72.6

De acuerdo a la tabla 9, a lo largo del estudio el manantial Las Fuentes presentó los porcentajes más bajos durante los meses de septiembre y octubre; en general obtuvo en promedio un ICA con 72.6%, indicando con ello que el agua requiere tratamiento para el abastecimiento público, siendo aceptable pero no recomendable para recreación, aceptable también para pesca y vida acuática excepto y dudoso para especies sensibles y especies muy sensibles.

7.1.2 POZO: OJO DE AGUA

a) Variación temporal de los parámetros fisicoquímicos

Los valores mínimos y máximos, las medias y desviaciones estándar por cada parámetro se presentan en la tabla 10. Los valores de las medias, valores mínimos y máximos para DBO₅ y nitrógeno amoniacal, se encontraron por debajo del límite de detección del método. Esto nos confirma la ausencia de contaminación por materia orgánica, también los valores de detergentes se encontraron por debajo del límite de detección del método.

Los sólidos suspendidos y la DQO también presentaron en diversas ocasiones valores en el límite de sensibilidad del método en varias ocasiones y en otras los valores en general fueron muy bajos.

Tabla 10. Media, desviación estándar, valor mínimo y máximo de los parámetros fisicoquímicos del Pozo: Ojo de Agua

	DBO	DQO	OD	pH	Temp	Cond	S. Tot.	S. Susp	S. Dis.	NO ₃	NO ₂
Media	2	12.9	2.37	6	21.9	486	311	3.33	308.1	2.54	0.0019
D. Std	0	3.11	1.32	0.47	0.33	27.4	20.28	4.84	19.13	0.95	0.002
V. mín.	2	3.46	0.31	4.65	21	437	272	0	272	1.24	0
V. máx.	2	15.1	5.4	6.57	22.5	531	347	14	340	4.62	0.008

El contenido de sales representadas por la alcalinidad, durezas, sulfatos y cloruros en general se pueden considerar bajas obteniéndose un valor mínimo de sólidos disueltos de 272 y un máximo de 340 mg/L (Tabla 10).

Tabla 10. Continuación. Media, desviación estándar, valor mínimo y máximo de los parámetros fisicoquímicos del Pozo: Ojo de Agua

	Alcalin. Total	Dureza T	Dureza de Ca	Dureza de Mg	Cl ⁻	SO ₄	SAAM	Turbiedad	NH ₃
Media	204.32	195.64	99.308	95.75	27.525	69.358	0	0.408	0
D. Std.	14.465	14.122	8.27	11.418	5.411	10.60	0	0.878	0
V. min.	182.2	172.55	88	73.5	20.1	52.8	0	0.06	0
V. máx.	228	223.5	113.7	109.8	35.9	83	0	3.18	0

b) Comportamiento temporal del OD y temperatura

En la figura 12 los valores de oxígeno disuelto presentaron un rango de 5.4 a 0.31 mg/L, siendo el valor más alto en el mes de marzo y el menor en el mes de octubre. Es importante señalar que el valor tan alto de OD obtenido en marzo pudo deberse a la forma de tomar la muestra pues al abrir la bomba esta sale con mucha fuerza oxigenándose en el aire y además en todos los otros muestreos el OD fue bajo, lo cual es lógico ya que el agua subterránea no tiene forma de oxigenarse y normalmente el agua sale con bajos valores de OD. En general estos valores presentan fluctuaciones a lo largo del año, presentando en promedio 2.37 mg/L de OD.

La temperatura fue de 21 a 22.5 °C, presentando el valor más bajo en el mes de febrero y el más alto en el mes de mayo.

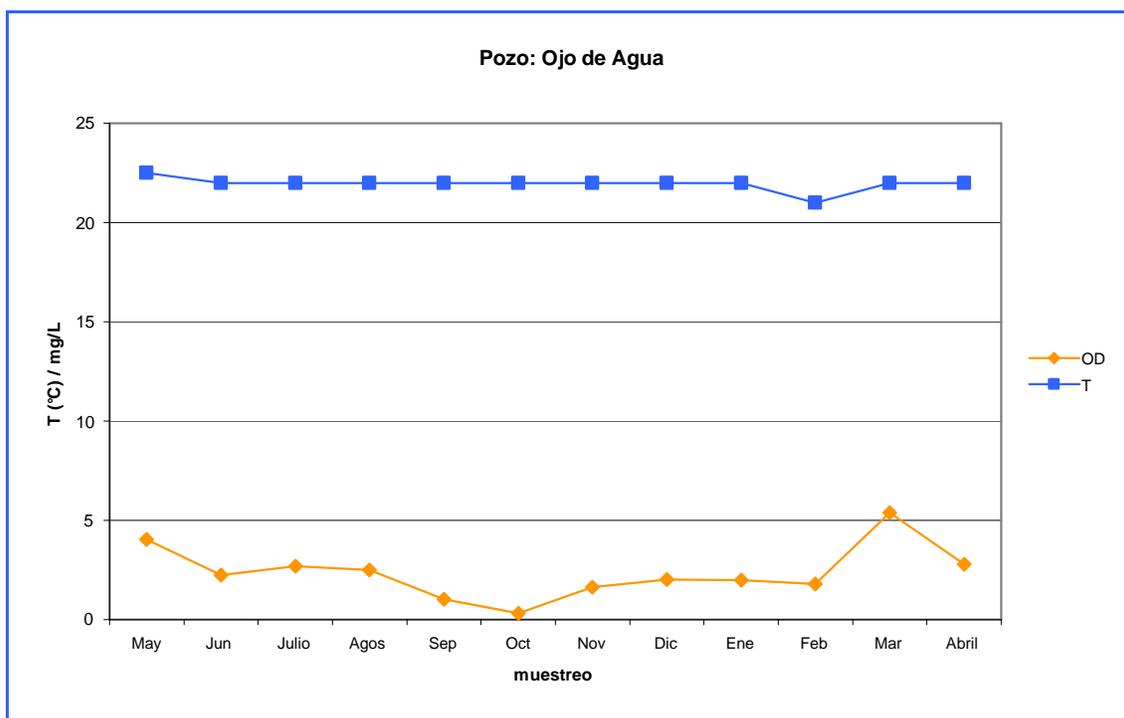


Figura 12. Concentración de oxígeno disuelto y temperatura en el pozo Ojo de Agua.

c) Comportamiento temporal de la alcalinidad total y dureza total

Como se aprecia en la figura 13, los valores más altos de durezas se presentaron de julio a febrero mientras que los valores más bajos fueron de marzo a junio. La media fue de 195.64 mg/L lo cual de acuerdo a la clasificación de la tabla 6 la coloca en un agua muy dura.

Ojo de Agua presenta la mayor concentración de alcalinidad en el mes de septiembre con 228 mg/L y la menor concentración en el mes de enero con 182.2 mg/L (Figura 13).

El agua dura requiere demasiado jabón para la formación de espuma y crea problemas de lavado, además tiende a formar incrustaciones sobre las superficies con las cuales entra en contacto. El valor de la dureza determina, por lo tanto su conveniencia para uso doméstico e industrial (Robles *et al.*, 2004).

Con los datos de alcalinidad y dureza se pudo observar que la dureza temporal o carbonatada de este pozo es igual a 195.6 mg/L y es debida principalmente carbonatos y bicarbonatos.

La dureza no carbonatada es igual a 8.58 mg/L y es debida principalmente a sulfatos, cloruros y nitratos.

Los efectos de la dureza carbonatada y no carbonatada se explican en el rubro 7.1.1 del manantial Las Fuentes.

En general la alcalinidad se mantuvo más o menos constante a lo largo de todos los muestreos. La media fue de 204.32 mg/L y la alcalinidad que presentó este pozo fue debida a bicarbonatos de acuerdo a la relación de alcalinidad total y alcalinidad a la fenolftaleína.

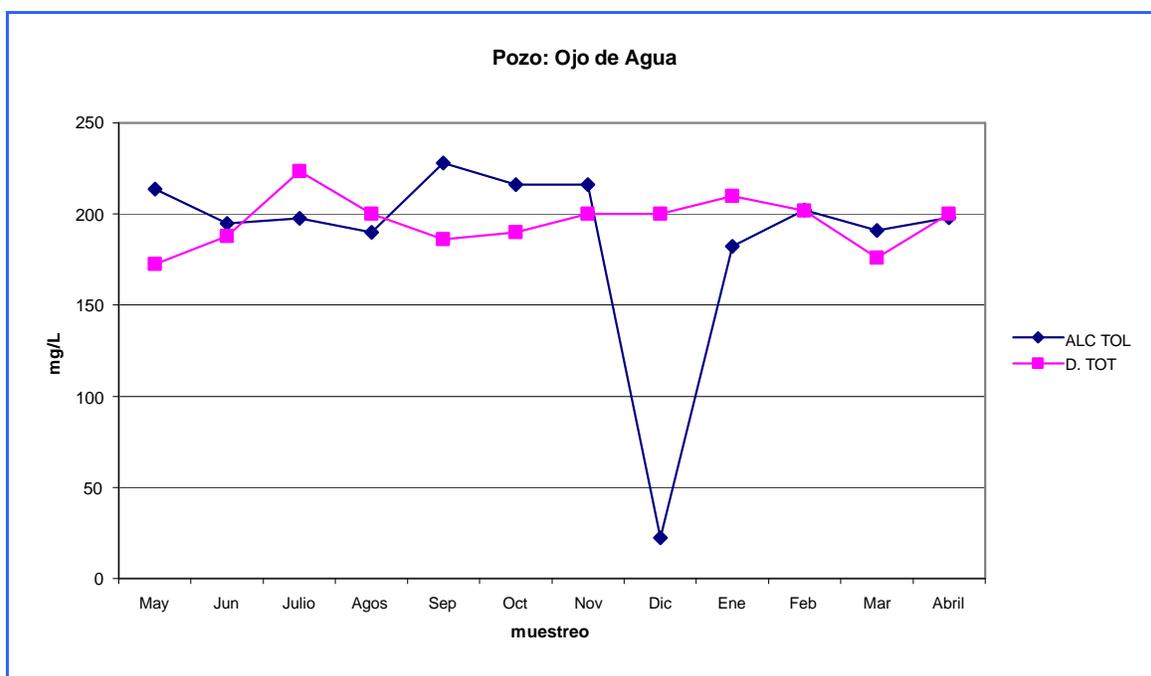


Figura 13. Concentración de alcalinidad total y dureza totales en el pozo Ojo de Agua.

d) Comportamiento temporal de los aniones cloruros y sulfatos

Cloruros, la concentración promedio del ión cloruro es de 27.52 mg/L, presentando una desviación estándar de 5.41, con valores máximos y mínimos de 35.9 mg/L y 20.1 mg/L (Tabla 10). Los cloruros se incrementaron ligeramente en los meses de diciembre a marzo.

Aunque no se presentaron valores que rebasaran la norma para agua potable (250 mg/L). El ion cloruro procede del agua de lluvia y su concentración en el terreno, de rocas aunque en general las concentraciones son bajas por ser un elemento escaso en la corteza terrestre, mas raramente puede proceder de gases y líquidos asociados a emanaciones volcánicas pero principalmente los altos valores de cloruros se interpretan como índice para impacto antropogénico (Caballero, 2006).

Los sulfatos también estuvieron dentro del ámbito de 52.8 a 83 mg/L (Figura 14). En general tanto los sulfatos y cloruros no presentaron altos valores ni grandes fluctuaciones durante el muestreo.

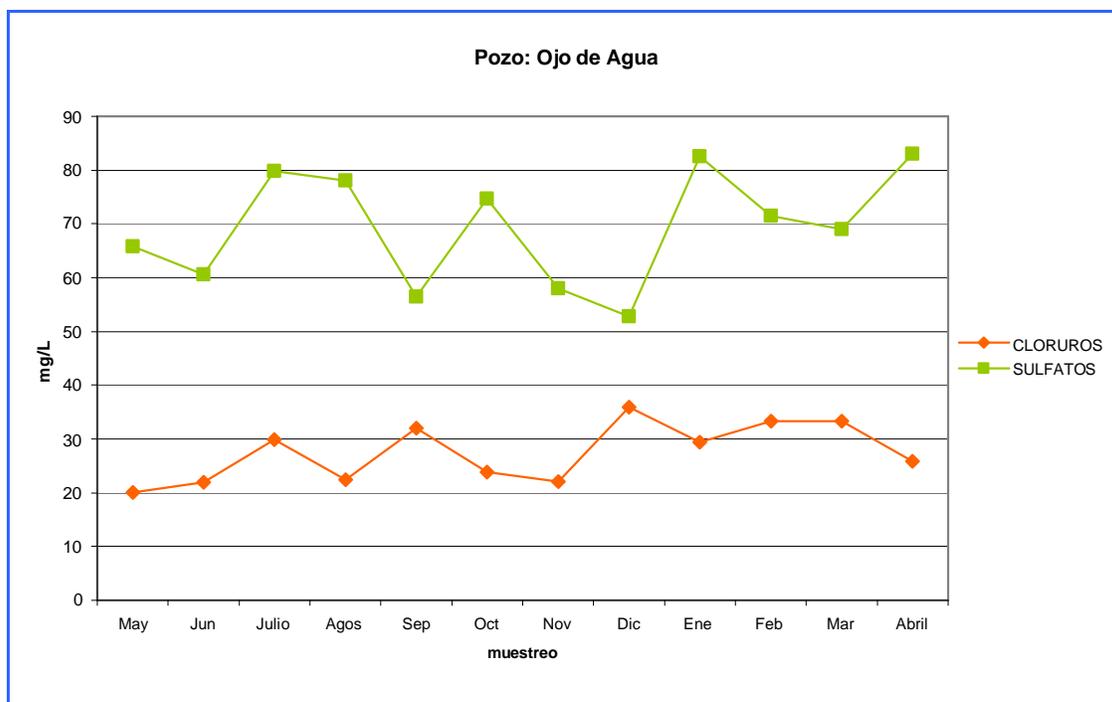


Figura 14. Concentración de cloruros y sulfatos en el pozo Ojo de Agua.

e) Variación temporal de los parámetros bacteriológicos

La variación temporal de las bacterias Coliformes totales y Coliformes fecales a lo largo del muestreo se observa en la tabla 11 con el fin de detectar en que meses se tiene la mayor incidencia de bacterias.

Tabla 11. Resultados bacteriológicos del pozo Ojo de Agua (ufc/100mL).

	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abril
C.T	25	800	2	2	1000	50	0	0	600	170	250	0
C.F	2	60	0	1	100	20	0	0	400	110	110	0

C.T= Coliformes totales C.F= Coliformes fecales

Los valores presentados de Coliformes totales fueron variables en casi todos los muestreos. En los meses de noviembre, diciembre y abril se presenta la ausencia de bacterias y la mayor números se observa en el mes de septiembre con 1000 colonias, y en cuanto a las bacterias Coliformes fecales se tiene que el mes de enero presenta la mayor concentración con 400 y su ausencia en los meses de julio, noviembre, diciembre y abril (Tabla 11, Figuras 15 y 16). Por lo tanto la presencia del grupo Coliforme en el agua es considerada como un índice evidente de la ocurrencia de contaminación fecal y por lo tanto de contaminación por organismos patógenos.

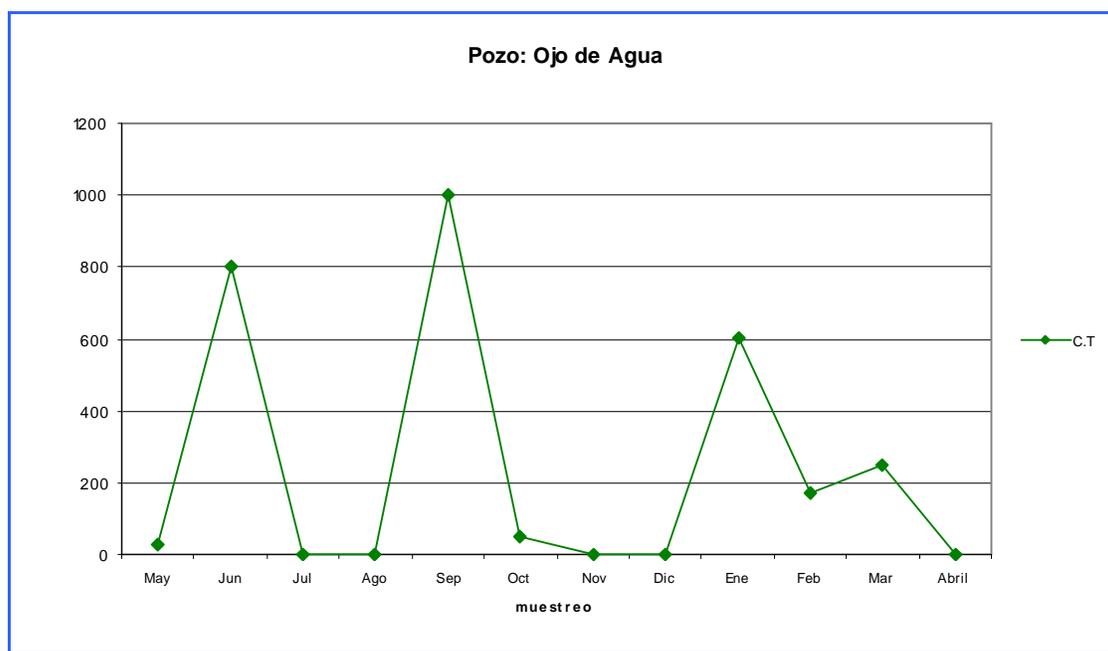


Figura 15. Concentración de bacterias Coliformes totales en el pozo Ojo de Agua.

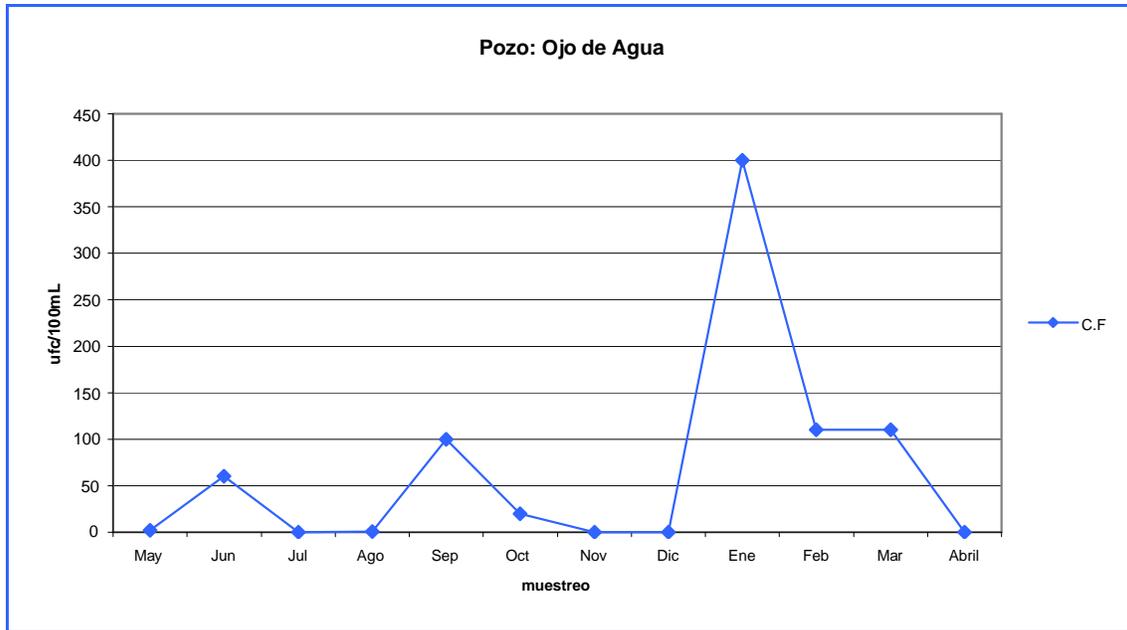


Figura 16. Concentración de bacterias Coliformes fecales en el pozo Ojo de Agua.

f) Comparación de las medias, valor mín. y valor máx. de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos con la NOM-127-SSA, 1994.

Comparando las medias y los valores mínimo y máximo de los parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos con los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1.1994 tenemos que a excepción del pH, todos los parámetros fisicoquímicos se encontraron por debajo de los límites máximos permisibles sin embargo se rebasan los límites permisibles de Coliformes totales y Coliformes fecales (Tabla 12).

Tabla 12. Comparación de los resultados obtenidos con la Norma oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

Parámetro	Resultados de las muestras		Límite máx perm. De acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994
Dureza total en mg/L	Media	195.64	500
	Valor mín	172.55	
	Valor máx.	223.5	
Sólidos disueltos en mg/L	Media	308.16	1000
	Valor mín	272	
	Valor máx.	340	
pH	Media	6	6.5-8.5
	Valor mín	4.65	
	Valor máx.	6.57	
Nitratos en mg/L	Media	2.54	10
	Valor mín	1.24	
	Valor máx.	4.62	

Nitrógeno amoniacal en mg/L	Media	0	0.50
	Valor mín	0	
	Valor máx.	0	
Nitritos en mg/L	Media	0.0019	1
	Valor mín	0	
	Valor máx.	0.008	
SAAM en mg/L	Media	0	0.50
	Valor mín	0	
	Valor máx.	0	
Turbiedad en UTN	Media	0.408	5
	Valor mín	0.06	
	Valor máx.	3.18	
Sulfatos en mg/L	Media	69.35	400
	Valor mín	52.8	
	Valor máx.	83	
Cloruros en mg/L	Media	27.52	250
	Valor mín	20.1	
	Valor máx.	35.9	
Coliformes totales en ufc/100 mL	Media	241	Ausencia o no detectables
	Valor mín	0	
	Valor máx.	1000	
Coliformes fecales en ufc/100 mL	Media	142	Ausencia o no detectables
	Valor mín	0	
	Valor máx.	100	

En este pozo los valores de pH estuvieron fuera de los límites permitidos por la norma e incluso el valor máximo de pH obtenido estuvo en el límite permisible.

La presencia de bacterias coliformes tanto fecales como totales en este pozo (antes de la cloración), es importante pues indican contaminación fecal del acuífero en dicha zona, es decir que las descargas de aguas residuales están afectando esta parte del acuífero.

g) Índice de calidad del agua (ICA).

Con los resultados obtenidos en cada muestreo, se calcularon los índices individuales por cada parámetro. Posteriormente se calculó el índice de calidad del agua (ICA) por cada muestreo realizado (Tabla 13). Luego se calculó la media de todos los ICA para determinar el uso más adecuado del agua de este pozo de acuerdo a la tabla 4.

Tabla 13. Resultados de los Índices de Calidad del Agua por muestreo.

Periodo	Ojo de Agua (%)
May	93
Jun	61.9
julio	99
Ago	98
Sep	56.7
Oct	85
Nov.	100
Dic	100
Ene	57.8
Feb	78
Mar	69.4
Abril	100
MEDIA	83.2

Ojo de agua presentó un ICA promedio de 83.2 %, indicando que requiere una ligera purificación para el abastecimiento público (Tabla 4). Sin embargo también presentó fluctuaciones bajas en los meses de junio, septiembre, enero, febrero y marzo, siendo el más bajo enero con 57.8 % requiriendo todos ellos un mayor tratamiento. Estos resultados en el ICA se deben básicamente a la contaminación bacteriana de Coliformes totales y Coliformes fecales ya que en estos meses se presento la mayor concentración de bacterias.

7.1.3. POZO: TEZOYUCA

a) Variación temporal de los parámetros fisicoquímicos

Los valores mínimos y máximos, las medias y desviaciones estándar por cada parámetro se presentan en la tabla 14. Las medias, valores mínimos y máximos para DBO, detergentes y nitrógeno amoniacal, se encontraron por debajo del límite de detección del método, indicando con ello que en este pozo tampoco hubo contaminación por materia orgánica.

El contenido de sales representadas por la alcalinidad, durezas, sulfatos y cloruros en general se pueden considerar bajas obteniéndose un valor mínimo de sólidos disueltos de 401 y un máximo de 492 mg/L (Tabla 14). La conductividad es un parámetro relacionado con el conjunto de iones y por lo tanto del contenido de sales disueltas en el agua; los valores encontrados en general no mostraron grandes cambios.

Tabla 14. Media, desviación estándar, valor mínimo y máximo de los parámetros fisicoquímicos del Pozo: Tezoyuca

	DBO	DQO	OD	pH	Temp.	Cond	S. Tot.	S. Susp.	S. Dis.	NO ₃	NO ₂
Media	2	14.30	1.93	6.74	20.08	602.4	457.08	6.58	450.5	0.137	0.002
D. Std	0	1.022	1.02	0.49	0.79	26.08	25.653	9.287	27.67	0.243	0.002
V. mín.	2	11.38	0.41	5.19	19	569	406	0	401	0	0
V. máx.	2	15.1	4.23	7.05	21	645	492	32	492	0.821	0.007

Tabla 14. Continuación. Media, desviación estándar, valor mínimo y máximo de los parámetros fisicoquímicos del Pozo: Tezoyuca

	Alcalin. Total	Dureza T	Dureza de Ca	Dureza de Mg	Cl ⁻	SO ₄	SAAM	Turbiedad	NH ₃
Media	328.67	350.32	230.8	119.52	8.305	128.2	0	3.146	0
D. Std.	28.707	21.389	11.161	24.213	2.839	24.391	0	2.023	0
V. min.	287	314	204	74	4.99	96	0	0.8	0
V. máx.	373.89	396	245	156	11.7	163.7	0	7.25	0

b) Comportamiento temporal del OD y temperatura

En este pozo la concentración de oxígeno disuelto va de 0.41 a 4.23 mg /L, a lo largo del muestreo se presenta en cantidades variables y bajas, teniendo la concentración más alta en el mes de mayo y la menor en el mes de octubre con 0.41 mg/L, valores que lo colocan en uno de los pozos con menor concentración de oxígeno disuelto (Figura 17). Esto podría deberse a que este pozo presenta en promedio 450.5 mg/L de sales disueltas lo cual lo coloca en segundo lugar en concentración de sales respecto a los demás pozos, por lo tanto, el oxígeno disuelto disminuye al aumentar la salinidad y la temperatura ya que las concentraciones más bajas de OD se presentan en la temporada de verano.

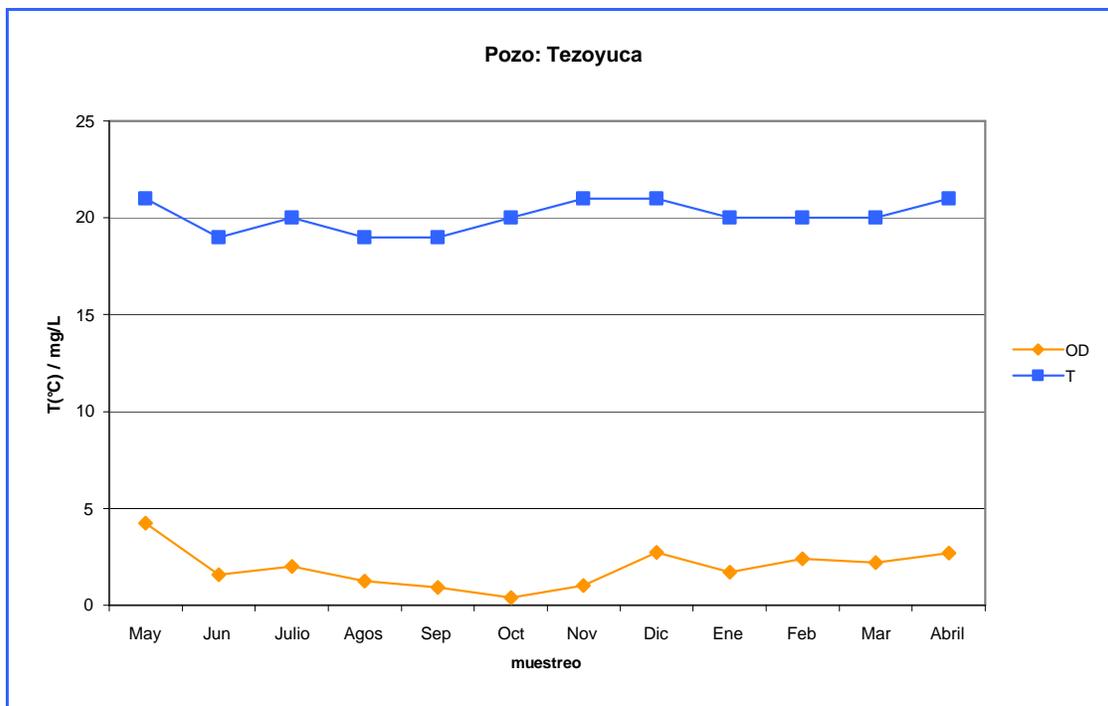


Figura 17. Concentración de oxígeno disuelto y temperatura en el pozo Tezoyuca.

c) Comportamiento temporal de la alcalinidad total y dureza total

Como se aprecia en la figura 18 la mayor concentración de dureza total la presenta en el mes de enero con 396 mg/L y su menor concentración en el mes de septiembre con 314 mg/L. La media fue de 350.32 mg/L lo cual de acuerdo a la clasificación de la tabla 6 la coloca en un agua muy dura. Cuyos efectos se mencionan en el rubro 7.1.1 del manantial Las Fuentes.

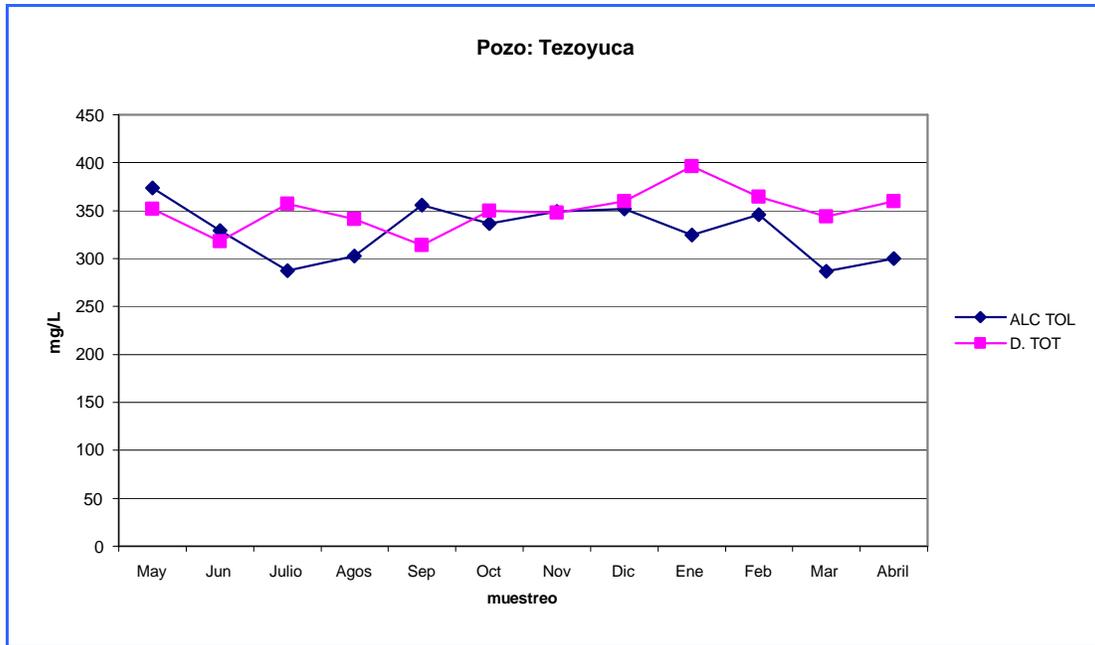


Figura 18. Concentración de alcalinidad total y dureza total en el pozo Tezoyuca

Tezoyuca presenta la mayor concentración de alcalinidad total en el mes de mayo con 373.89 mg/L y su menor concentración en el mes de marzo con 287 mg/L. Con los datos de alcalinidad y dureza se pudo observar que la dureza temporal o carbonatada de este pozo es de 328.67 mg/L (ya que en este caso la alcalinidad total fue menor que la dureza total) y la dureza no carbonatada es de 21.65 mg/L. Las características de estos tipos de dureza ya se mencionaron en el rubro 7.1.1 del manantial Las Fuentes. Por lo tanto, la alcalinidad está estrechamente relacionada con la dureza (Martínez, 1995).

En general la alcalinidad se mantuvo más o menos constante a lo largo de todos los muestreos. La media fue de 328.67 mg/L y la alcalinidad que presentó este pozo fue debida a bicarbonatos de acuerdo a la relación de alcalinidad total y alcalinidad a la fenolftaleina.

El contenido de sales representadas por la alcalinidad, durezas, sulfatos y cloruros en general se pueden considerar bajas obteniéndose un valor mínimo de sólidos disueltos de 401 y un máximo de 492 mg/L (Tabla 14). La conductividad es un parámetro relacionado con el conjunto de iones y por lo tanto del contenido de sales disueltas en el agua; los valores encontrados en general no mostraron grandes cambios.

d) Comportamiento temporal de los aniones cloruros y sulfatos

Como se observa en la figura 19, Tezoyuca presenta la mayor concentración de cloruros en el mes de julio con 13.9 mg/L y su menor concentración en el mes de junio con 4.99 mg/L. En general la presencia de este ión es escaso en la corteza terrestre, pero abundante en el agua de mar, sin embargo los vertidos urbanos e industriales pueden aportar cantidades importantes.

La concentración más alta de sulfatos se registro en el mes de enero con 163.7 mg/L, su menor concentración en el mes de noviembre con 96 mg/L, la presencia de sulfatos puede derivarse de las actividades urbanas e industriales que generen descargas de aguas residuales con concentraciones de sulfatos y que por infiltración pueden llegar al acuífero, ya que este pozo se ubica en una zona urbana e industrial. (Figura 19).

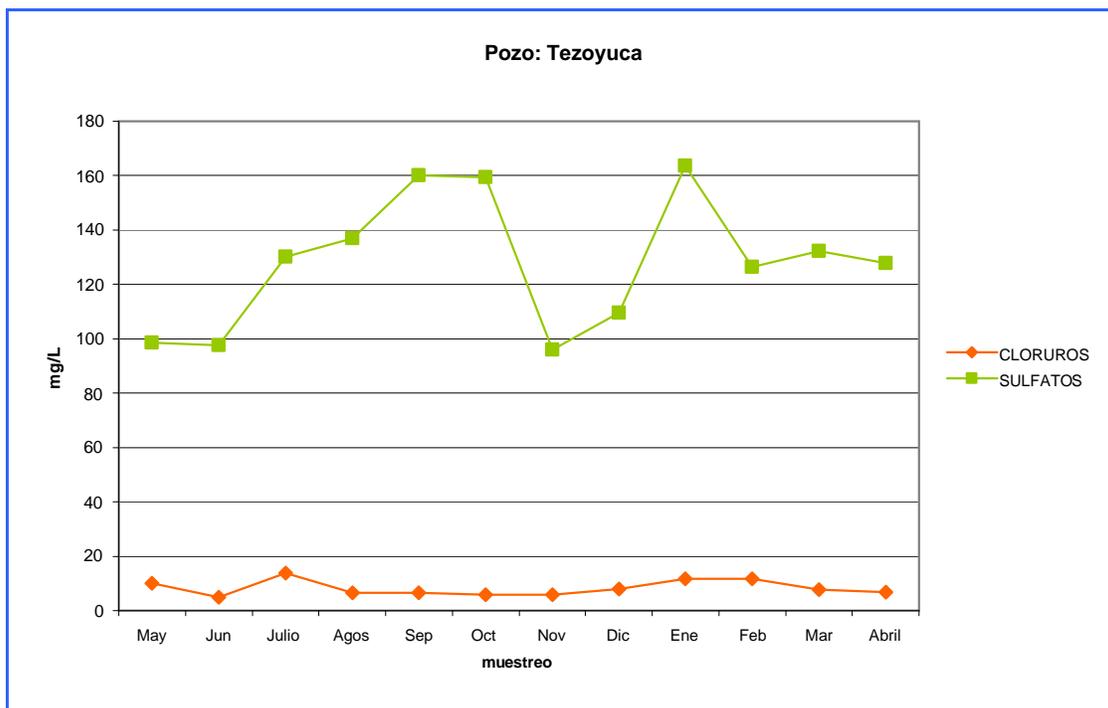


Figura 19. Concentración de cloruros y sulfatos en el pozo Tezoyuca.

e) Variación temporal de los parámetros bacteriológicos

La variación temporal de las bacterias Coliformes totales y Coliformes fecales a lo largo del muestreo se observa en la tabla 15.

Tabla 15. Resultados bacteriológicos del pozo Tezoyuca (ufc/100 mL).

	May	Jun	Julio	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abril
C.T	50	80	70	8	80	1	0	0	6	0	0	0
C.F	32	60	30	10	50	0	0	0	4	0	0	0

C.T= Coliformes totales C.F= Coliformes fecales

La presencia de bacterias Coliformes totales solo se observan en los primeros meses de mayo a octubre con valores de 1 a 80 colonias y para los meses de noviembre a abril a excepción de enero se tiene la ausencia de bacterias. En cuanto a las bacterias Coliformes fecales se tuvo un rango de 60 a 4 colonias (Tabla 15). En la figura 20 se observa que la concentración se registró en el mes de septiembre y junio, para las bacterias fecales el pico mas alto lo presentan los meses de junio y septiembre figura 21. Esto podría deberse a que las lluvias en el acuífero inician durante el mes de mayo y terminan a finales del mes de octubre, lo que podrían estar arrastrando bacterias a las zonas mas bajas del acuífero, aunque la concentración de bacterias no es muy alta, su presencia en el agua del acuífero nos indica que las descargas directas al suelo de las aguas residuales sin tratar están ya empezando a afectar el acuífero en esa zona.

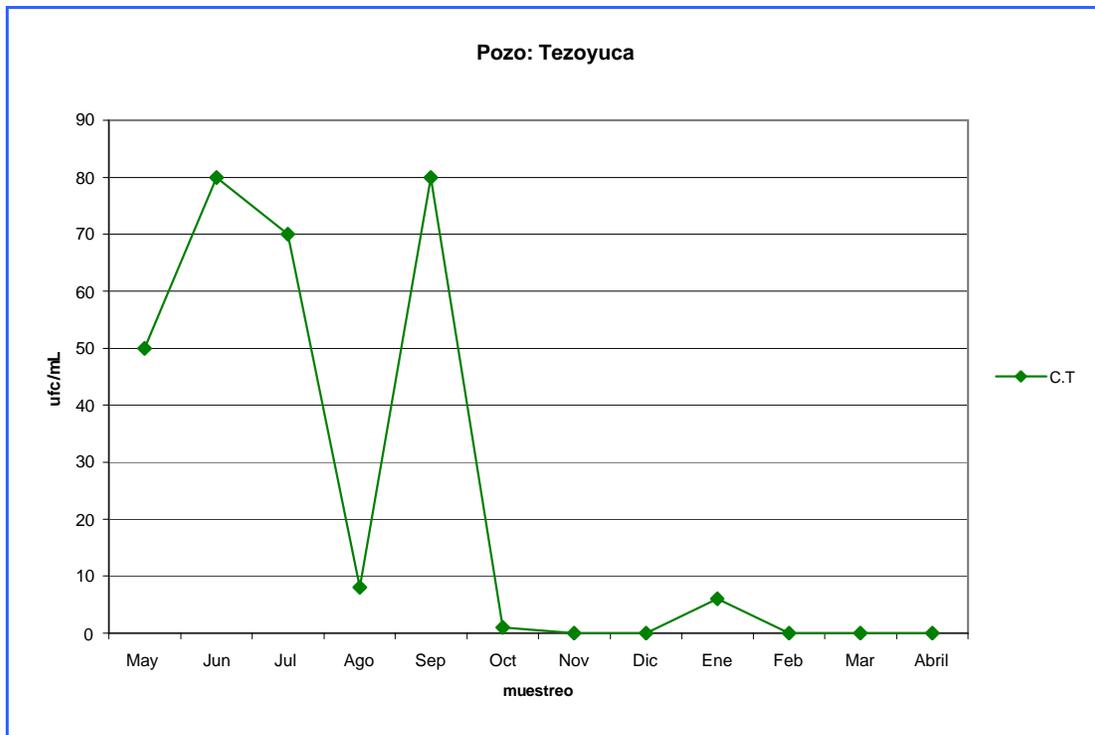


Figura 20. Concentración de bacterias Coliformes totales en el pozo Tezoyuca.

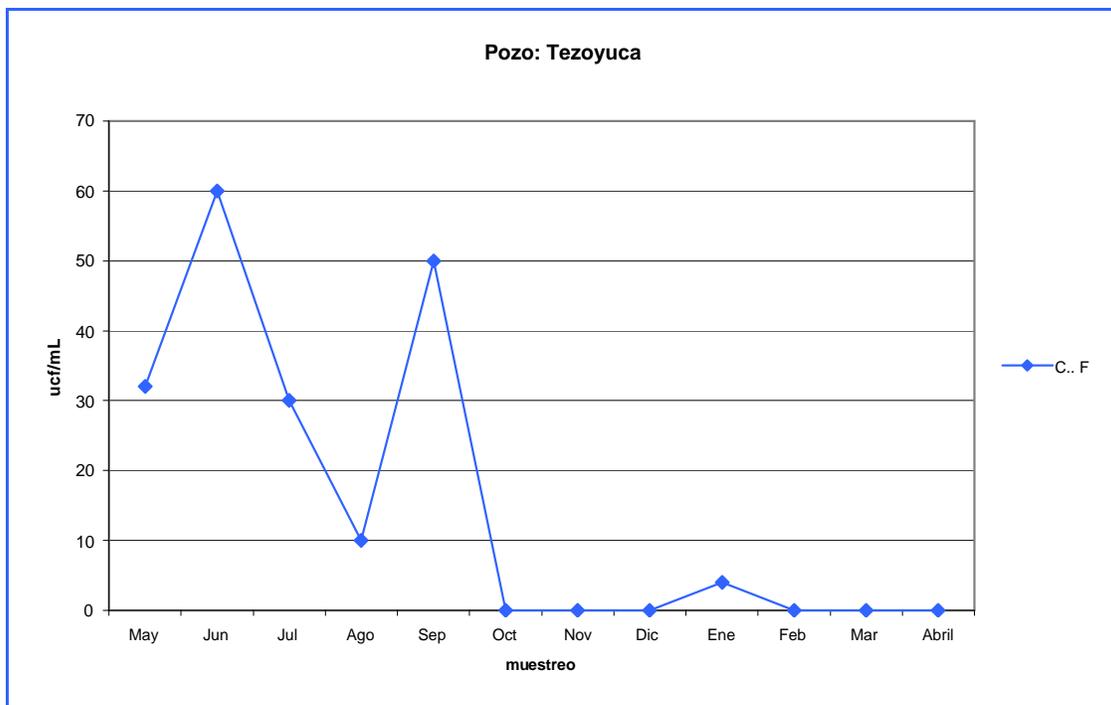


Figura 21. Concentración de bacterias Coliformes fecales en el pozo Tezoyuca.

f) Comparación de las medias, valor mín. y valor máx. de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos con la NOM-127-SSA, 1994.

Comparando las medias y los valores mínimo y máximo de los parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos con los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA.1994 tenemos que todos los parámetros fisicoquímicos se encontraron por debajo de los límites máximos permisibles sin embargo se rebasan los límites permisibles de Coliformes totales y Coliformes fecales (Tabla 16).

En general los parámetros fisicoquímicos presentan promedios muy por debajo de los límites establecidos, excepto turbiedad y pH se encuentra en lecturas superiores al límite tolerable de la NOM con 7.25 UTN en el mes de mayo, la turbiedad en el agua puede ser causada por una gran variedad de materiales en suspensión, que varían en tamaño, como arcilla, limo, materia orgánica o inorgánica finamente dividida, descargas de aguas residuales y desechos industriales (Caballero, 2006., Robles, *et al*, 2004). Para el pH en el mes de mayo se obtuvo una lectura de 5.19, por lo tanto se tiene una ligera acidificación en el agua para este mes. Al parecer se sugieren una calidad buena del agua en condiciones naturales, aunque se observa la presencia de bacterias Coliformes totales y Coliformes fecales dado que las muestras se colectaron antes de la cloración correspondiente del agua en cada sistema.

Tabla 16. Comparación de los resultados obtenidos con la Norma oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

Parámetro	Resultados de las muestras		Límite máx perm. De acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994
Dureza total en mg/L	Media	350.32	500
	Valor mín	314	
	Valor máx.	396	
Sólidos disueltos en mg/L	Media	450.5	1000
	Valor mín	401	
	Valor máx.	492	
pH	Media	6.74	6.5-8.5
	Valor mín	5.19	
	Valor máx.	7.05	
Nitratos en mg/L	Media	0.137	10
	Valor mín	0	
	Valor máx.	0.821	
Nitrógeno amoniacal en mg/L	Media	0	0.50
	Valor mín	0	
	Valor máx.	0	
Nitritos en mg/L	Media	0.002	1
	Valor mín	0	
	Valor máx.	0.007	

SAAM en mg/L	Media	0	0.50
	Valor mín	0	
	Valor máx.	0	
Turbiedad en UTN	Media	3.146	5
	Valor mín	0.8	
	Valor máx.	7.25	
Sulfatos en mg/L	Media	128.2	400
	Valor mín	96	
	Valor máx.	163.7	
Cloruros en mg/L	Media	8.305	250
	Valor mín	4.99	
	Valor máx.	11.7	
Coliformes totales en ufc/100 mL	Media	25	Ausencia o no detectables
	Valor mín	0	
	Valor máx.	80	
Coliformes fecales en ufc/100 mL	Media	16	Ausencia o no detectables
	Valor mín	0	
	Valor máx.	60	

g) Índice de calidad del agua (ICA).

Con los resultados obtenidos se calcularon las medias por cada parámetro, calculándose con ellas los índices individuales. Posteriormente se calculó el índice de calidad del agua (ICA) por cada muestreo realizado (Tabla 17). Con la media de todos los ICA se determinó el uso mas adecuado de acuerdo con la (Tabla 4).

Tezoyuca presenta un ICA promedio de 93.9%, por lo tanto el agua es de buena calidad para el abastecimiento publico y es aceptable para cualquier deporte acuático y por consiguiente aceptable para la vida acuática. Sin embargo hubo algunos muestreos en los que dicha calidad varió como el mes de junio que presentó el ICA mas bajo (83.6%) el cual nos indica que requiere ligera purificación para abastecimiento público

Tabla 17. Resultados de los Índices de Calidad del Agua por cada muestreo

Periodo	Tezoyuca (%)
May	86.1
Jun	83.6
Jul	86
Ago	94
Sep	84
Oct	99
Nov.	100
Dic	100
Ene	95
Feb	100
Mar	100
Abril	100
MEDIA	93.9

7.1.4 POZO: ZAPATA

a) Variación temporal de los parámetros fisicoquímicos

Los valores mínimos y máximos, las medias y desviaciones estándar por cada parámetro se presentan en la tabla 18. Las medias, valores mínimos y máximos para DBO₅, detergentes y nitrógeno amoniacal, se encontraron por debajo del límite de detección del método, lo cual nos confirma la ausencia de contaminación por materia orgánica.

Zapata presenta el valor promedio más alto de nitratos con 2.77 mg/L (Tabla 18). Las fuentes posibles pueden ser aguas residuales, granjas, fosas sépticas, basureros y la agricultura. En el suelo cuando existen condiciones de oxidación, el amonio es convertido en nitratos (nitrificación). Los nitratos tienen una alta solubilidad en el agua (100 g/L) y no son absorbidos en el suelo. Por lo que el aporte de nitratos en el agua subterránea es ilimitado (Caballero, 2006).

Los sólidos suspendidos y la DQO también presentaron en diversas ocasiones valores en el límite de sensibilidad del método en varias ocasiones y en otras los valores en general fueron muy bajos.

Los sólidos disueltos están relacionados con el contenido de sales disueltas en el agua, las concentraciones muy elevadas afectarían el sabor del agua para consumo humano. El contenido de sales representadas por la alcalinidad, durezas, sulfatos y cloruros en general se pueden considerar

bajas obteniéndose un valor mínimo de sólidos disueltos de 516 y un máximo de 772 mg/L (Tabla 18).

Tabla 18. Media, desviación estándar, valor mínimo y máximo de los parámetros fisicoquímicos del Pozo: Zapata

	DBO	DQO	OD	pH	Temp.	Cond.	S. Tot.	S. Susp.	S. Dis.	NO ₃	NO ₂
Media	2	21.7	1.73	6.54	23.41	857.7	685	4.25	681.16	2.77	0.003
D. Std	0	3.38	0.82	0.42	0.514	23.32	75.3	5.56	72.24	1.00	0.006
V. mín.	2	13.3	0.41	5.3	23	785	516	0	516	1.25	0
V. máx.	2	25.3	3	6.88	24	886	780	16	772	4.73	0.022

Tabla 18. Continuación. Media, desviación estándar, valor mínimo y máximo de los parámetros fisicoquímicos del Pozo: Zapata

	Alcalin. total	Dureza T	Dureza de Ca	Dureza de Mg	Cl ⁻	SO ₄	SAAM	Turbiedad	NH ₃
Media	443.02	457.31	305.47	151.84	81.916	89.66	0	0.232	0
D. Std.	30.907	16.428	18.294	17.396	8.611	7.364	0	0.426	0
V. min.	400	423.5	278	115	61.9	74.5	0	0.06	0
V. máx.	482.04	476	332	186	90.9	99	0	1.57	0

b) Comportamiento temporal del OD y temperatura

El OD se presenta en cantidades variables que van de 0.41 a 3 mg/L, como se observa en la (Figura 22) que en los tres primeros muestreos se tienen valores constantes, para los meses de agosto a diciembre la concentración de OD tiende a disminuir teniendo el pico más bajo en octubre con 0.41 mg/L mayor concentración la presenta en el mes de abril con 3 mg/L. El promedio es de 1.73 mg/L, siendo éste el valor mas bajo de oxígeno disuelto en comparación con los demás pozos. Esto se debe quizás a que la temperatura (23- 24°C) y la concentración de sales son más altas para este pozo lo cual influye en la concentración de OD.

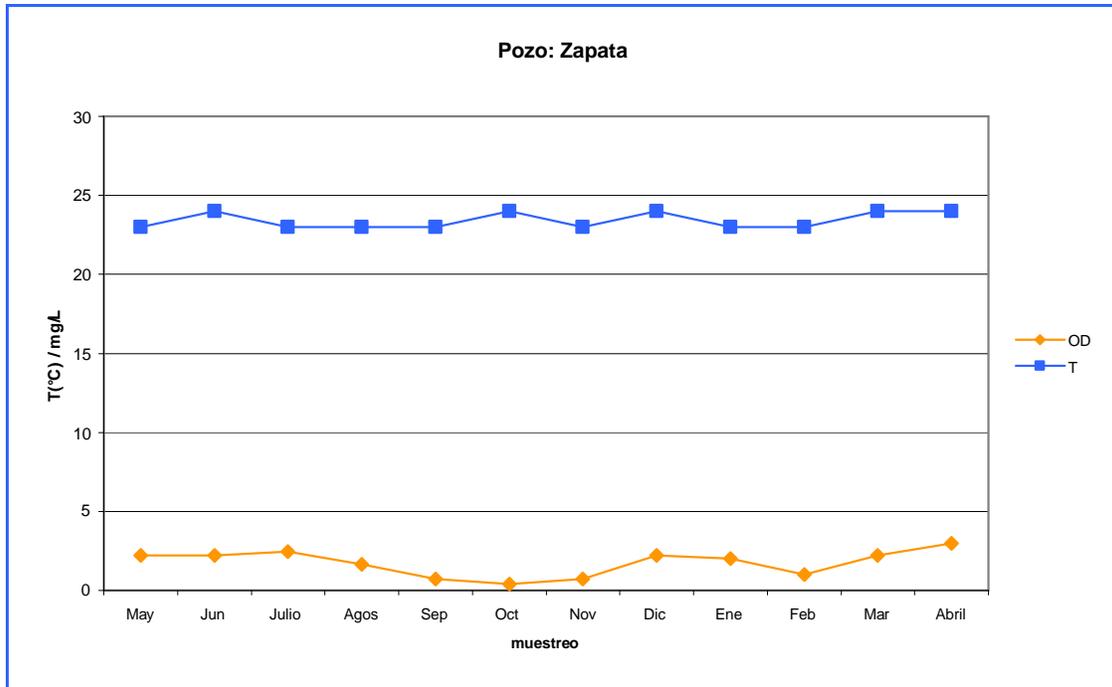


Figura 22. Concentración de oxígeno disuelto y temperatura en el pozo Zapata

c) Comportamiento temporal de la alcalinidad total y dureza total.

Como se aprecia en la (Figura 23) los valores más altos de durezas se presentaron de noviembre a marzo, mientras que el valor más bajo fue en mes de mayo. La media fue de 457.31 mg/L lo cual de acuerdo a la clasificación de la tabla 6 la coloca en un agua muy dura.

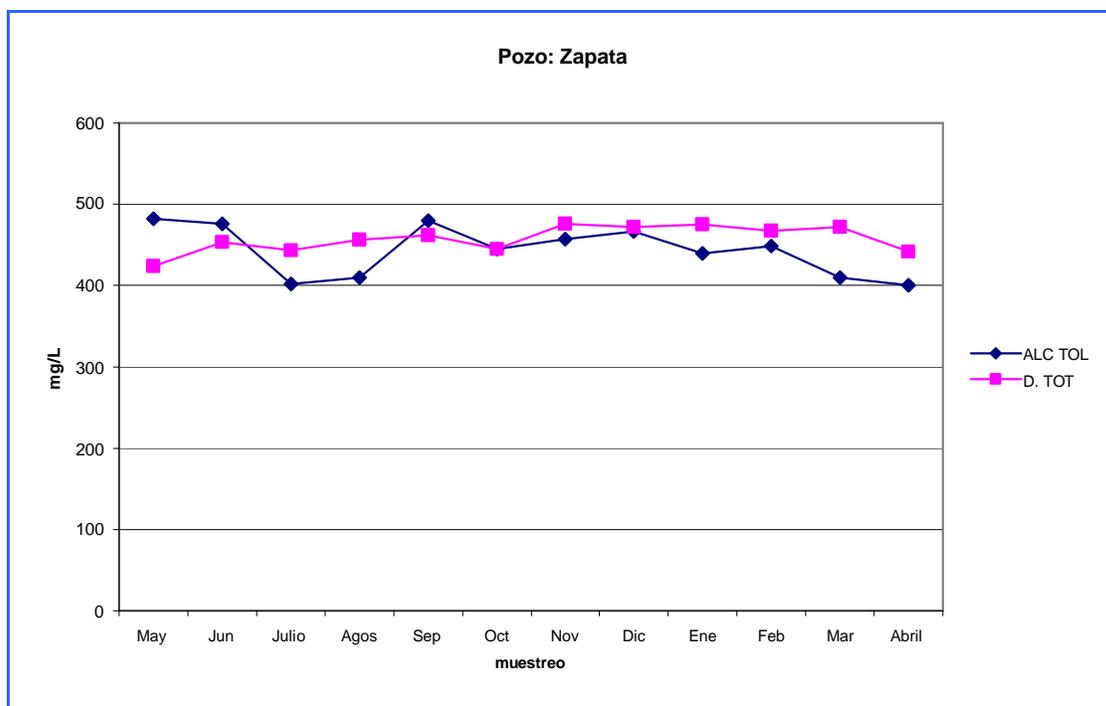


Figura 23. Concentración de alcalinidad total y dureza total en el pozo Zapata.

Con los datos de alcalinidad y dureza se pudo observar que la dureza de este pozo es temporal o carbonatada ya que la alcalinidad total fue menor que la dureza. Esto se produce porque los bicarbonatos sirven como fuentes de iones carbonato para precipitar Ca^{++} como CaCO_3 a temperaturas elevadas. La dureza carbonatada esta dada principalmente por carbonatos y bicarbonatos principalmente.

Zapata presenta los mayores valores de alcalinidad en el mes de mayo con 482.04 mg/L y la menor concentración en el mes de abril con 400 mg/L (Figura 23).

En general, la alcalinidad se mantuvo más o menos constante a lo largo de todos los muestreos. La media fue de 443.02 mg/L y la alcalinidad que presentó este pozo fue debida a bicarbonatos de acuerdo a la relación de alcalinidad total y alcalinidad a la fenolftaleina.

d) Comportamiento temporal de los aniones cloruros y sulfatos.

En comparación con los demás pozos Zapata presentó los valores mas altos en cloruros que van de 61.9 a 90.9 mg/L, teniendo su valor mas alto en el mes de diciembre. Los sulfatos estuvieron en un rango de 99 a 74.5 mg/L, teniendo su concentración mas alta en el mes de enero (Figura 24).

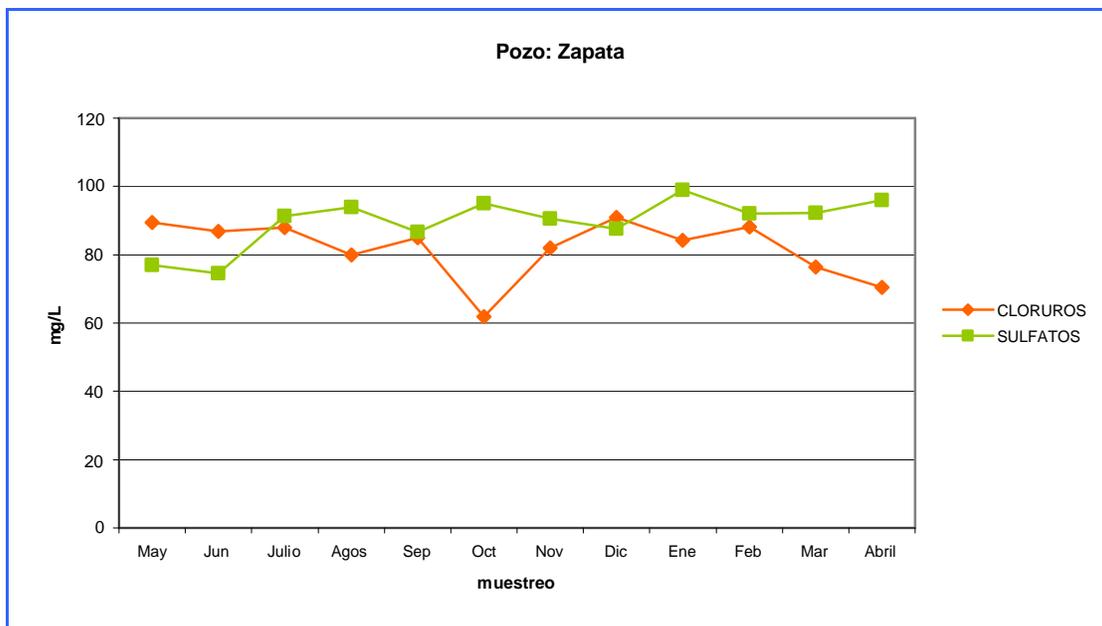


Figura 24. Concentración de cloruros y sulfatos en el pozo Zapata.

e) Variación temporal de los parámetros bacteriológicos

La variación temporal de las bacterias coliformes totales y coliformes fecales a lo largo del muestreo se observa en la tabla 19.

Tabla 19. Resultados bacteriológicos del pozo Zapata (ufc/100 mL)

	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abril
C.T	102	7	10	3	11	10	60	4	0	8	0	7
C.F	21	4	0	2	1	1	5	0	0	2	0	1

C.T= Coliformes totales C.T= Coliformes fecales

En comparación con los demás pozos Zapata presenta la menor concentración de bacterias Coliformes, siendo la mayor incidencia en el mes de mayo y la ausencia de estas en los meses de enero y marzo (Figura 25 y 26). La presencia de bacterias Coliformes en este pozo proviene al igual que en los anteriores de las descargas de aguas residuales que van directo al suelo y los contaminantes se infiltran de esta manera al acuífero. Esto es un problema en todo el Valle de Cuernavaca ya sea porque en algunas zonas no hay drenaje y en otras aunque lo tengan es costoso subir las conexiones de las casas hacia el drenaje dado el tipo de asentamientos que tienen con muchas subidas y bajadas. Por otro lado el hecho de que este pozo presentara la contaminación bacteriana mas baja coincide con las concentraciones más altas de sales las cuales en un momento

dato pueden inhibir un poco el crecimiento de las coliformes ya que estas no soportan tanto la salinidad de acuerdo a las desventajas de estas como indicadores de contaminación.

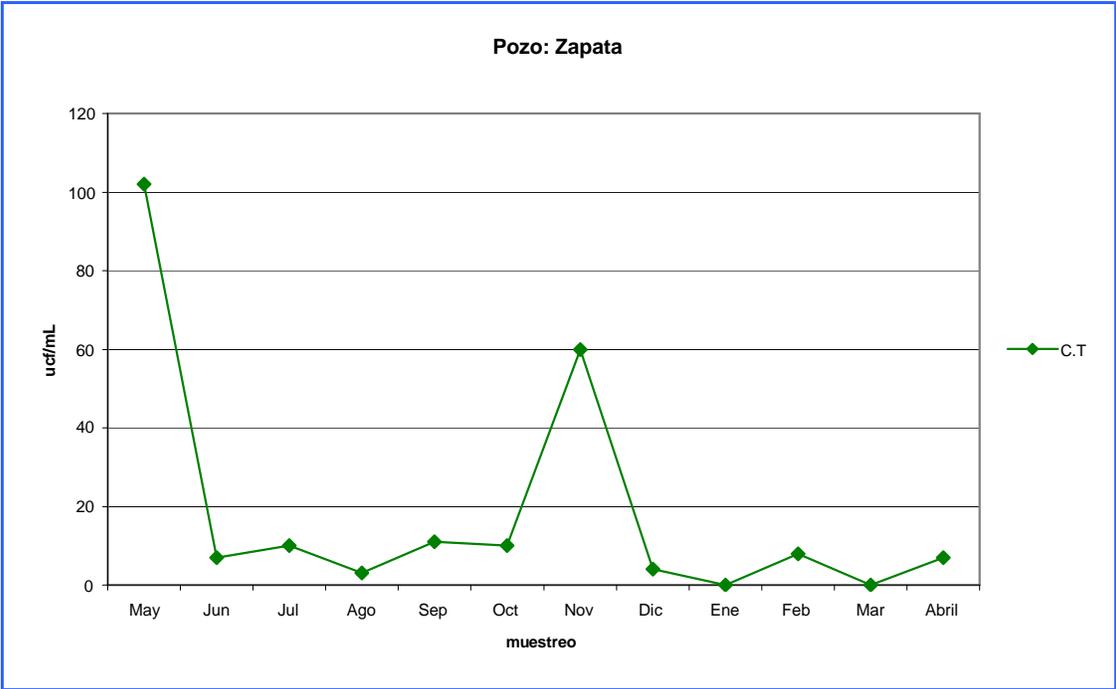


Figura 25. Concentración de bacterias Coliformes totales en el pozo Zapata.

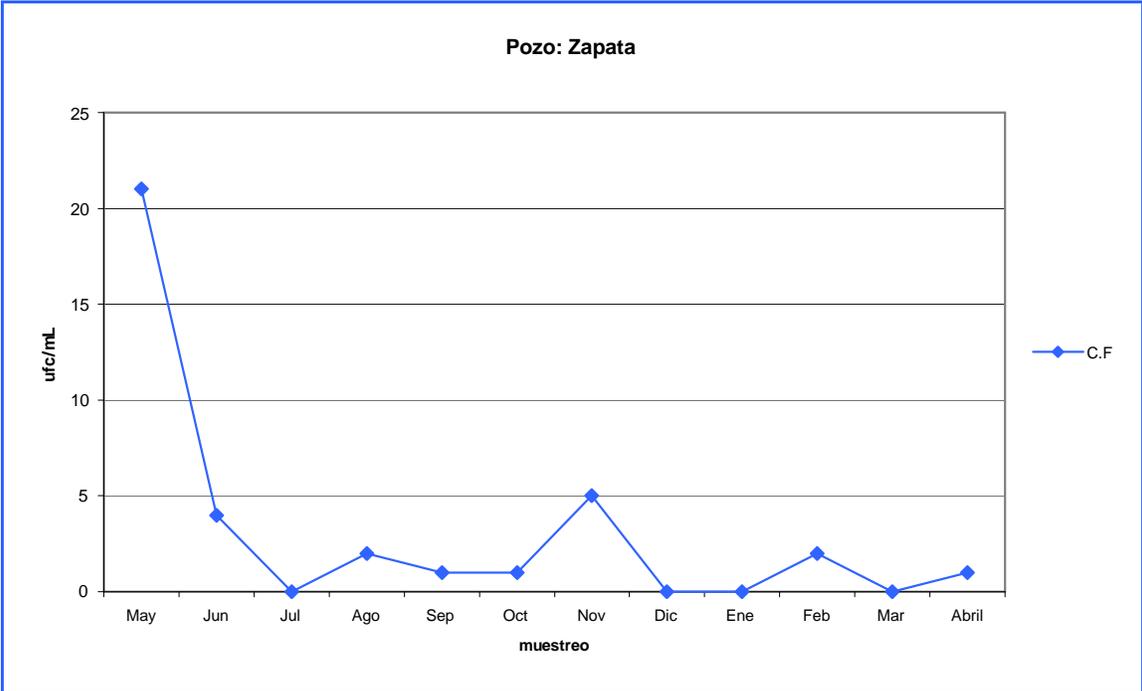


Figura 26. Concentración de bacterias Coliformes fecales en el pozo Zapata.

f) Comparación de las medias, valor mín. y valor máx. de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos con la NOM-127-SSA1, 1994.

Comparando las medias y los valores mínimo y máximo de los parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos con los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA.1994 tenemos que todos los parámetros fisicoquímicos se encontraron por debajo de los límites máximos permisibles sin embargo los parámetros bacteriológicos Coliformes totales y Coliformes totales (Tabla 20) si rebasaron los limites permisibles de la norma.

En cuanto a los nitratos Zapata presentó la mayor concentración en relación a los otros pozos y al manantial, (2.77 mg/L) pero aún así, no rebasó el límite establecido en la NOM (10 mg/L).

En la literatura ha habido casos en que el agua subterránea ha llegado a alcanzar niveles superiores a 20 mg/L o más. Sin embargo en la zona sur del Valle de Cuernavaca se han encontrado registros de valores de nitratos que han superado los límites permisibles de las normas oficiales mexicanas (CNA, 2002).

Sin embargo aunque en este estudio los valores de nitratos fueron los mas altos en comparación de los otros pozos, en general no podemos hablar de contaminación ya que los valores encontrados son parte del contenido de sales normal del agua potable.

Tabla 20. Comparación de los resultados obtenidos con la Norma oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

Parámetro	Resultados de las muestras		Límite máx perm. de acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994
Dureza total en mg/L	Media	457.31	500
	Valor mín	423.5	
	Valor máx.	476	
Sólidos disueltos en mg/L	Media	681.16	1000
	Valor mín	516	
	Valor máx.	772	
pH en mg/L	Media	6.54	6.5-8.5
	Valor mín	5.3	
	Valor máx.	6.88	
Nitratos en mg/L	Media	2.77	10
	Valor mín	1.25	
	Valor máx.	4.73	
Nitrógeno amoniacal en mg/L	Media	0	0.50
	Valor mín	0	

	Valor máx.	0	
Nitritos en mg/L	Media	0.003	1
	Valor mín	0	
	Valor máx.	0.022	
SAAM en mg/L	Media	0	0.50
	Valor mín	0	
	Valor máx.	0	
Turbiedad en UTN	Media	0.232	5
	Valor mín	0.06	
	Valor máx.	1.57	
Sulfatos en mg/L	Media	89.66	400
	Valor mín	74.5	
	Valor máx.	99	
Cloruros en mg/L	Media	81.916	250
	Valor mín	61.9	
	Valor máx.	89.4	
Coliformes totales en ufc/ 100 mL	Media	18	Ausencia o no detectables
	Valor mín	0	
	Valor máx.	102	
Coliformes fecales en ufc/ 100 mL	Media	3	Ausencia o no detectables
	Valor mín	0	
	Valor máx.	21	

g) Índice de calidad del agua (ICA).

Con los resultados obtenidos se calcularon las medias por cada parámetro, calculándose con ellas los índices individuales. Posteriormente se calculó el índice de calidad del agua (ICA) por cada muestreo realizado (Tabla 21). Con la media de todos los ICA se determinó el uso más adecuado de acuerdo con la (Tabla 4).

Tabla 21. Resultados de los Índices de Calidad del Agua por cada muestreo

Periodo	Zapata (%)
May	85
Jun	93
Jul.	97
Ago	95
Sep	95.6
Oct	95
Nov.	90
Dic	100
Ene	100
Feb	95
Mar	100
Abril	95
MEDIA	95

Zapata presento un ICA promedio de 95%, indicando que esta agua es de buena calidad para el abastecimiento público (Tabla 21). En general esta calidad la presento en todos los muestreos a excepción del mes de mayo que bajo un poco (85 %) indicando en este caso que el agua requiere de ligera purificación. Esto se debe a que en el mes de mayo se tiene la mayor presencia de bacterias Coliformes totales y Coliformes fecales con 102 y 21 colonias respectivamente, provocando que disminuya ligeramente el índice de calidad del agua para este mes.

7.2 SEGUNDA PARTE: COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LOS 3 POZOS Y EL MANANTIAL

7.2.1 CONCENTRACIÓN DE SALES DISUELTAS

Los sólidos disueltos están relacionados con el contenido de sales disueltas en el agua. Su valor es proporcional a la conductividad eléctrica del agua. Esta propiedad es resultado de la presencia de iones (carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos, sodio, potasio, calcio y magnesio) que son capaces de transportar carga eléctrica (Jiménez, 2001). En este estudio se observa que el pozo Zapata presenta los valores más altos de sales disueltas con respecto a su media (681.16 mg/L de sólidos disueltos) con valores mínimos y máximos de 516 y 772 mg/L respectivamente (Tabla 18), seguido de Tezoyuca con un promedio de 450.5 mg/L con valores mínimos y máximos de 401 y 492 mg/L (Tabla 15), Ojo de Agua con un promedio de 308.16 mg/L y valores mínimo y máximo de 272 y 340 mg/L (Tabla 10) y el manantial Las Fuentes con un promedio de 107.91 mg/L y valores mínimos y máximos de 96 y 118 mg/L (Tabla 5).

Las diferencias encontradas entre los pozos y el manantial (Figura 27). Se deben principalmente a la posición en que se encuentran los pozos de acuerdo a su altitud y al flujo del acuífero el cual inicia en este Valle por la zona norte en dirección a la zona sur que es la más baja. Por tal motivo las zonas como es el caso de Zapata y Tezoyuca con una altitud de 110 msnm, tienden a concentrar la mayor cantidad de sólidos disueltos ya que son las partes mas bajas de la zona sur, mientras el manantial Las Fuentes y el pozo Ojo de Agua son los puntos mas altos con altitudes de 1350 y 1200 msnm respectivamente y por lo tanto presentan concentraciones menores de sólidos disueltos ya que son los puntos mas altos de la zona sur del valle de Cuernavaca. Esto sin tomar en cuenta que el cause del acuífero va disolviendo las sales del suelo y al llegar a esta zona ya viene muy incrementada la concentración de las sales.

En general podemos decir que el incremento de sólidos disueltos depende del gradiente de altitudes, por el tipo de suelo, de la composición química del agua, de la solubilidad y composición de las rocas por las que circula y de los factores que afectan la solubilidad (Legarreta, 1994).

Respecto al tiempo la mayor variabilidad la presentó el pozo Zapata y el más constante en sus concentraciones fue el manantial Las Fuentes, seguido de Ojo de Agua.

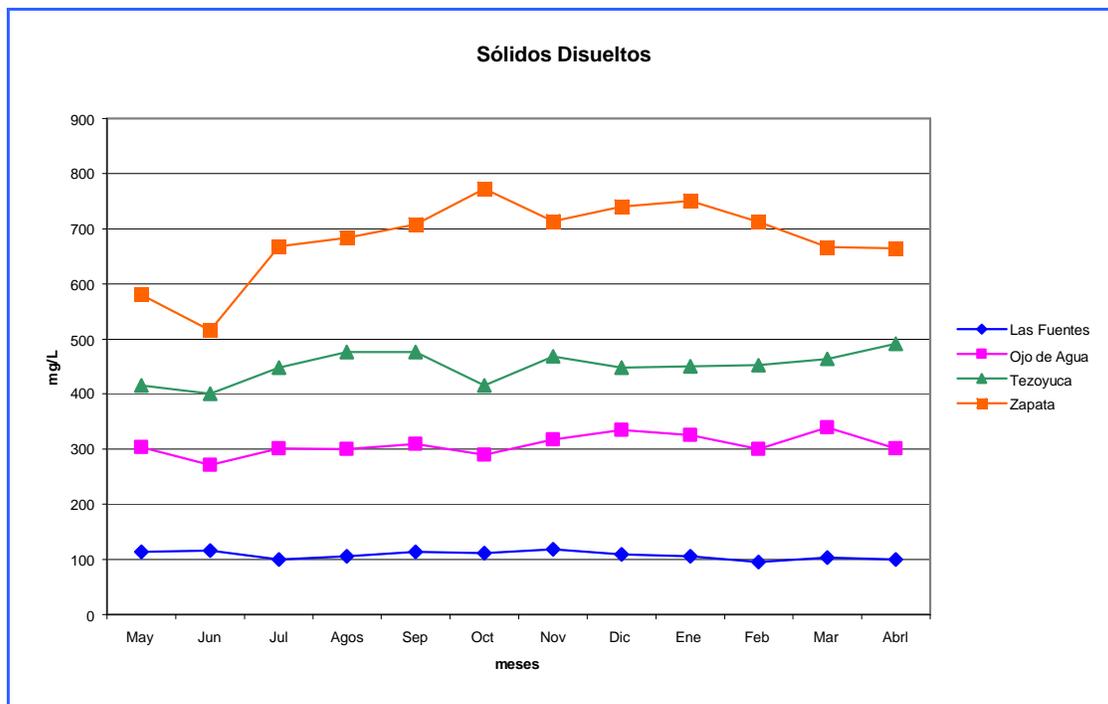


Figura 27. Comportamiento espacial de los sólidos disueltos en los diferentes pozos y el manantial.

En los recursos acuíferos la alcalinidad es causada principalmente por las sales disueltas de bicarbonato (HCO^{-3}). En el análisis realizado, el pozo Zapata presenta el valor más alto de alcalinidad con una media de 443.02 mg/L.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los cuatro pozos se tiene que el valor más bajo en Dureza Total lo presenta Fuentes (manantial) con 47.38 mg/L por lo tanto se considera un tipo de agua suave, sin embargo Ojo de Agua, Tezoyuca y Zapata presentan los valores más altos, este último con 457.31 mg/L, el valor más alto de los tres pozos y el manantial considerándose de esta manera un tipo de agua muy dura (Tabla 22).

Tabla 22. Tipo de Agua de acuerdo a la Dureza Total.

Pozo	mg /L	Tipo de Agua
Fuentes (manantial)	47.38	Agua Blanda
Ojo de Agua	195.6	Muy dura
Tezoyuca	350.3	Muy dura
Zapata	457.3	Muy dura

Para conocer la variabilidad temporal del contenido de sales se hizo un análisis de correlación de Pearson con los resultados de sólidos disueltos entre los sitios de muestreo a lo largo del año, Se observo que Zapata, Ojo de agua y Tezoyuca presentaron una correlación y por lo tanto podemos apreciar en la gráfica que en general no hay diferencias significativas entre ellos respecto a la variabilidad temporal, así podemos apreciar que en junio los tres pozos disminuyeron ligeramente su contenido de sales para después en los siguientes muestreos incrementarlo levemente; mientras que Fuentes con Tezoyuca, Zapata y Ojo de agua si presentaron diferencias significativas en su variabilidad temporal y fuentes casi fue muy constante en sus valores no coincidiendo con las variaciones de los otros tres pozos. Esto es lógico ya que Fuentes es un manantial cuyo comportamiento es diferente con respecto a los otros tres que son pozos.

Tabla 23. Coeficiente de correlación

Ojo de Agua / Fuentes	-0.12965651
Tezoyuca / Fuentes	-0.39776843
Zapata / Fuentes	-0.21852545
Zapara / Ojo de Agua	0.48422495
Zapata / Tezoyuca	0.4066432
Ojo de Agua / Tezoyuca	0.48422495

7.2.2. CONTAMINACIÓN BACTERIANA ENTRE LOS POZOS Y MANANTIAL.

De acuerdo a las Tablas 24 y 25, la frecuencia más alta de contaminación por Coliformes totales y fecales lo presenta el manantial Las Fuentes, ya que en los 12 muestreos se presento contaminación y en todos las concentraciones tanto de Coliformes totales como fecales estuvieron arriba de 100 ufc/100 ml.

El pozo Ojo de Agua solo en 3 muestreos de 12, estuvo libre de contaminación bacteriana, mientras que en 5 presentó contaminación bacteriana mayor de 100 ufc/100 mL y en 3, las concentraciones fueron menores de 100 ufc/100 mL.

En 5 de los 12 muestreos realizados en Tezoyuca no se registró contaminación bacteriana y los demás muestreos estuvieron por debajo de 100 ufc/100 mL.

En Zapata solo 2 muestreos de 12 estuvieron libres de bacterias Coliformes totales y fecales, uno mayor de 100 ufc/100 mL y el resto presentó concentraciones menores de 100 ufc/100 mL.

Por lo tanto en cuanto a la calidad bacteriológica de los pozos y el manantial, se tiene que Fuentes (manantial) presenta la mayor concentración de bacterias Coliformes, esta contaminación se puede deber a la disposición inadecuada de los desechos domésticos, como es el canal que corre a unos cuantos metros del manantial, las prácticas de saneamiento en el lugar, y sobre todo a que es un manantial y se encuentra más propenso a dicha contaminación, por estar más expuesto al acceso del hombre, entre otros.

Tabla 24. Frecuencia de bacterias Coliformes totales en los diferentes pozos y el manantial.

Intervalo de ufc/100mL	Frecuencias			
	Las Fuentes	Ojo de Agua	Tezoyuca	Zapata
0		3	5	2
1 a 10		2	3	7
11 a 99		2	4	2
100 a 500	3	2		1
501 a 1000	2	3		
1001 a 5000	3			
> 5000	4			

Tabla 25. Frecuencia de bacterias Coliformes fecales en los diferentes pozos y el manantial.

Intervalo de ufc/100mL	Frecuencias			
	Las Fuentes	Ojo de Agua	Tezoyuca	Zapata
0		4	6	4
1 a 10		2	2	7
11 a 99		2	4	1
100 a 500	5	3		
501 a 1000	6	1		
1001 a 5000	1			
> 5000				

7.2.3. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA)

De acuerdo a la figura 28, el manantial Fuentes presentó el índice de calidad del agua (ICA) más bajo (72.6 %), seguido del pozo Ojo de Agua (83.2 %), indicando que el agua requiere mayor tratamiento para el manantial y ligera purificación para el pozo. Mientras que los otros dos pozos, aunque presentaron la mayor cantidad de sólidos disueltos, éstos no sobrepasaron el límite permisible que especifica la norma que es de 1000 mg/L, coincidiendo con el ICA en que fueron estos pozos presentaron la mejor calidad. Cabe aclarar también que para el índice de calidad del agua los parámetros con mayor peso para evaluar la calidad del agua son el contenido de materia orgánica, las bacterias y otros mas, siendo las sales de un valor mas bajo ya que estas no afectan fuertemente la calidad del agua en general.

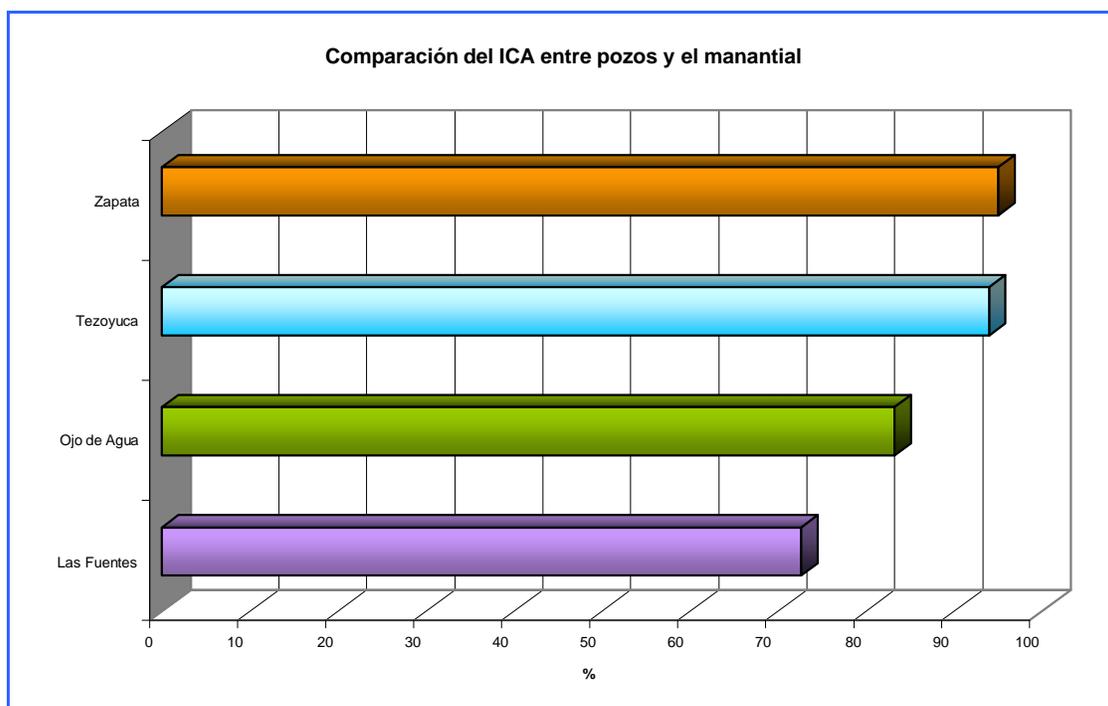


Figura 28. Índice de Calidad del Agua (ICA) por cada pozo a lo largo del muestreo.

7.2.4. COMPARACIÓN CON LA NOM-127.

El manantial Las Fuentes estuvo en todos los muestreos fuera de la norma en relación a los organismos Coliformes totales y Coliformes fecales, los cuales según ésta, no deben ser detectables en ninguna muestra de 100 mL. También el pH estuvo fuera de la norma en 2 muestreos (Tabla 26).

Ojo de Agua estuvo también fuera de la norma en 9 muestreos de 12 en el caso de los Coliformes totales y Coliformes fecales, mientras que para el pH fueron 10 los muestreos en los que estuvo por abajo del límite mínimo permisible, es decir que el agua en casi todas las ocasiones estuvieron ligeramente ácidas.

Zapata estuvo fuera de la norma para las bacterias indicadoras en 10 muestreos de 12 mientras que Tezoyuca estuvo fuera de la norma en 7 de 12 y para el pH Zapata en 2 de 12 y Tezoyuca en 1 de 12 aunque este último también tuvo un muestreo fuera de la norma para la turbiedad (Tabla 26).

Tabla 26. Parámetros fuera de la NOM-127.

		Manantial Fuentes	Ojo de agua	Tezoyuca	Zapata
Parámetros fuera de la NOM todos los muestreos	CT	12			
	CF	12			
Parámetros fuera de la NOM en algunos muestreos	CT		9	7	10
	CF		8	6	8
	pH	2	10	1	2
	Turbiedad			1	

8. CONCLUSIONES

De acuerdo a la normatividad mexicana en general, el agua de los pozos no sobrepasó los límites máximos permisibles, para los parámetros fisicoquímicos salvo en algunos muestreos que presentaron el pH ligeramente por debajo de la norma o la turbiedad que se salió del límite en una sola ocasión.

Zapata y Tezoyuca aunque no rebasaron los límites máximos permisibles presentaron la mayor concentración de sales como cloruros, alcalinidad total y dureza viéndose reflejada en los sólidos disueltos y por consiguiente en la conductividad. Esto es justificado por la ubicación que tienen estos pozos que aunque están ubicados en la zona sur del Valle de Cuernavaca, se encuentran un poco mas bajos de altitud con respecto al manantial Las Fuentes y al pozo Ojo de agua los cuales tienen una menor concentración de sólidos disueltos.

Por otro lado para los parámetros bacteriológicos el manantial Las Fuentes si presentó contaminación bacteriana en todos los muestreos sobrepasando los límites. Es importante tomar en cuenta que cerca de este manantial pasa un canal que lleva aguas residuales, lo cual nos indica que la cercanía de este canal esta contaminando el agua del acuífero en ese punto y como consecuencia el manantial.

Los demás pozos también estuvieron fuera de la normatividad en relación a la contaminación bacteriana, lo cual nos indica que esta zona del acuífero también se esta viendo afectada por las descargas de aguas residuales que se arrojan directamente al suelo.

Con los análisis de la dureza y de la alcalinidad podemos decir que el agua de estos pozos y del manantial es del tipo muy dura, dura y bicarbonatada.

En promedio los Índice de calidad del Agua de los pozos Zapata y Tezoyuca fueron los más altos con 95 y 93.9% respectivamente, por lo tanto las coloca en agua de buena calidad para uso y abastecimiento publico (previa cloración) y es aceptable para cualquier deporte acuático y por consiguiente aceptable para la vida acuática

El manantial Las Fuentes presentó un ICA de 72.6%, indicando con ello que el agua requiere una mayor necesidad de tratamiento para ser usada para abastecimiento publico, siendo aceptable pero no recomendable para recreación, aceptable también para pesca y vida acuática excepto y dudoso para especies sensibles y muy sensibles.

Ojo de Agua presento un ICA de 83.2%, por lo tanto requiere una ligera purificación para abastecimiento público, aceptable para recreación, aceptable para organismos de pesca y vida acuática.

Podemos decir que en general el agua subterránea de la zona sur del Valle de Cuernavaca muestra todavía algunas áreas de buena calidad como aquellas donde se encuentran los pozos Tezoyuca y Zapata pero que hay otras donde ya esta calidad se esta viendo mas afectada como Ojo de Agua y el manantial Las Fuentes siendo evidente el impacto de la actividad humana, lo que implica una disminución en la calidad del agua.

9. BIBLIOGRAFÍA

- ❖ Alcocer, D. J., Lugo, V. A., Sánchez, R. M., Escobar, B. E. 1998. Contaminación del agua subterránea en la península de Yucatán, México. *Imagen Veterinaria*. 41-50 pp.
- ❖ Andy, D. W and Stanley, W. T. 2002. *Environmental Hydrology*. 2ª edición. Lewis Publishers. USA. 4-7 pp.
- ❖ APHA-AWWA-WEF. 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20ª ed. USA.
- ❖ Appelo, C. A. J. 1994. *Geochemistry groundwater and pollution*. Balkman A. 2a Edition. Printed in the Netherlands.
- ❖ Atherholt, T., Feerst, E., Hovendon, B., Kwak, J., Rosen, JD. 2003. Evaluation of indicators of fecal contamination in groundwater. *Journal of the American Water Works Association*. 95. (10).
- ❖ Ávila, G. P. 2003. *Agua Medio Ambiente y Desarrollo en el siglo XXI. México desde una perspectiva Global y Regional*. Colegio de Michoacán. Secretaria de Urbanismo y Medio Ambiente. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México. Vulnerabilidad de los recursos hídricos.
- ❖ Barrón, R. L. 2004. *Evaluación de la contaminación del agua subterránea basado en índices de calidad del agua*. Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 69 pp.
- ❖ Batllori, S. E., Febles, P. J. L. 2002. *El agua subterránea en el desarrollo regional de la península de Yucatán*. *Avance y Perspectiva* (21): 67-77 pp.
- ❖ Brock. 2004. *Biología de los microorganismos* 10ª edición. Person Prentice Hall. Madrid. 927-940 pp.
- ❖ Caballero A. D. 2006. *La calidad del agua subterránea del Río Guanajuato*. Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. UNAM.

-
- ❖ Campoy O. E. 2001. Análisis microbiológico y fisicoquímico del acuífero del Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo, México. Tesis de Maestría. FES Cuautitlán. UNAM. México.
 - ❖ Castro, J. M. 2000. Análisis fisicoquímico y bacteriológico de la calidad del agua. Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 72 pp.
 - ❖ Comisión Nacional del Agua. 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero Cuernavaca, Morelos.
 - ❖ Cortes M. R. S. 2004. Evaluación de la calidad bacteriológica y fisicoquímica de la presa Valle de Bravo. Tesis de licenciatura en Biología. FES- Iztacala. UNAM.
 - ❖ EPA (Environmental Protection Agency). 2000. Estándares de reglamento Nacional Primario de aguas. Disponible en: <http://www.epa.gov/safewater/agua/estandares.html>.
 - ❖ Flores, J., Suárez, G., Puc, M., Heredia, M., Vivas, M., Franco, J. 1995. Calidad bacteriológica del agua potable de la ciudad de Mérida, Yucatán, México. Salud Pública de México. 37: 236-239.
 - ❖ Gallegos, E., Warren, A., Robles, E., Campoy, E., Calderón, A., Sainz, G. Ma., Bonilla, P., y Escolero, O. 1999. The effects of wastewater irrigation on groundwater quality en México. Wat. Sci. Tech. 40, (2): 45-52.
 - ❖ Granel, C. E y Gález, H. L. 2002. Deterioro de la calidad de agua subterránea por el desarrollo poblacional: Cancún, Q. R. Artículo de Investigación. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. 6-3: 41-53.
 - ❖ González. T. 1992. Estudio hidrogeofísico de la subcuenca de Chalco: Evaluación de impacto ambiental del basurero de Sta. Catarina. Tesis de Doctorado en Geofísica. Posgrado en Geofísica, México. CCH-UNAM, México.
 - ❖ Govantes, G. M. 2007. Estudio fisicoquímico y bacteriológico de la laguna negra de Puerto Marqués. Tesis de licenciatura en Biología. FEZ-Iztacala. UNAM. México.
 - ❖ Grathwoht, P. 1998. Diffusion in Natural Porous Media Contaminant Transport, Sorption/Desorption and Dissolution Kinetics. Kluwer academic publishers. 1-5 pp.

-
- ❖ Isaac-Márquez A., Lezama, C., Ku, P., Tama, P. 1994. Calidad sanitaria de los suministros de agua para consumo humano en Campeche. *Salud publica*. 36: 655-661.
 - ❖ Jiménez, C. B. E. 2001. *La contaminación ambiental en México*. Editorial Limusa. México.
 - ❖ Leal, A. Ma. T y Gelover, S. S. 2006. *Evaluación de acuíferos de la mesa del norte*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. pp 4.
 - ❖ Legarreta, L. N. 1994. *Contaminación del agua subterránea*. Tesis de Licenciatura (Ingeniería civil). Facultad de Ingeniería. UNAM. México. 195 p.
 - ❖ Martínez, J., Ruano, P. 1998. *Aguas subterráneas. Captación y Aprovechamiento*. PROGENSA (Promotora General de Estudios, S. A.). España. 401 p.
 - ❖ Martínez, P. Ma. E. 1995. *Evaluación de la calidad bacteriológica y fisicoquímica de las aguas embotelladas en la ciudad de México y área Metropolitana*. Tesis de licenciatura en Biología. FES-Iztacala. UNAM. México. 2-75 pp.
 - ❖ Mata, O. F. 2004. *Fundamentos de contaminación de agua subterránea*. Tesis para obtener el título de ingeniero civil. FES-Acatlán. UNAM. México
 - ❖ Mazari, H. M. 2002. *El potencial de contaminación del agua subterránea*. Instituto Nacional de Ecología. Centro de estudios UNAM.
 - ❖ Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. *Salud ambiental, agua para usos y consumo humano- límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización*. *Diario Oficial de la Federación del 18 de enero de 1996*. México.
 - ❖ Ottoson, J., Stenstroem, TA. 2003. *Faecal contamination of greywater and associated microbial risks*. *Water Research*. 37 (3): 645-655.
 - ❖ Pacheco, J., Cabrera, A., Steinich, B., Frías, J., Coronado, V., Vázquez, J. 2002. *Efecto de la aplicación agrícola de la excreta porcina en la calidad del agua subterránea*. Artículo de Investigación. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán 6-3: 7-17.

-
- ❖ Pacheco A. J., Cabrera S, A., Pérez C. R. 2004. Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México. *Ingeniería* 8-2: 165-179.
 - ❖ Perdomo, C. H., Casanova, O. N., y Ciganda, V. S. 2001. Contaminación de aguas subterráneas con nitratos y coliformes en el litoral sudoeste del Uruguay. *Agrociencia*. 1: 10-22.
 - ❖ Philip, B. B., Hanadi, S. R., Charles, J. N. 1999. *Ground Water Contamination transport and Remediation*. 2a edition. Prece-Hall. PTR. México S. A. 597 pp.
 - ❖ Price, M. 2003. *Agua subterránea*. Editorial Limusa. México. D. F.
 - ❖ Portgieter N. Mudau L.S, Maluleke F. R. 2006. Microbiological quality groundwater sources used by rural communities in Limpopo Province, South Africa. *Water Sci Tech*.54(11-12):371-7.
 - ❖ Robles, V. E., González, A. Ma. E., Castillo, N. P. 2004. Contaminantes químicos del agua y sus efectos en el hombre y el medio ambiente. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. 120 p.
 - ❖ Rodier, J., Georffray, Ch., Kovascsik, G., Laporte, J., Plissier, M., Sheidhaver., Verneaux, J., Vial, J. 1990. *Análisis de las aguas (aguas naturales, aguas residuales, agua de mar)*. Ediciones Omega S.A- Plato-26. Barcelona. 1059pp.
 - ❖ Romero, R. J. A. 1999. *Calidad del agua*. 2ª edición. Editorial Alfaomega. Escuela Colombiana de Ingeniería. 273 p.
 - ❖ Ryding, S. 1994. *Environmental Management Hadbook*. Federation of Swedish Industries. Stockholm. IOS Press. Amsterdam. Oxford
 - ❖ S. A. R. H. 1978. *Análisis de aguas y aguas de desecho. Manual del curso*. Vol. 3. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.
 - ❖ S. A. R. H. 1979. *Índice de calidad del agua*. Dirección General de Protección y Ordenamiento Ecológico. México. D. F. 40 p.

-
- ❖ Sharffter, N., and Parriaux A. 2002. Pathogenic-bacterial water contamination in mountainous catchments. *Water Research*. 36 (1): 131-139.
 - ❖ Seoanez, C. M. 1999. *Ingeniería del medio ambiente: aplicada al medio natural continental*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
 - ❖ Soto, G. E. 2000. *Análisis espacial de fuentes de contaminación de agua subterránea en la zona metropolitana de la ciudad de México*. Tesis de Maestría (Ecología Básica) Unidad Académica de los ciclos Profesionales y Posgrado (C.C.H). UNAM. 53 p.
 - ❖ Suárez, B. M. D. 1988. *Calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua subterránea del Valle de Cuernavaca, Morelos, México*. Tesis de licenciatura en Ingeniero Geólogo. Fac. Ingeniería. UNAM. México. 84 pp.
 - ❖ Tebbutt, T. H. Y. 1999. *Fundamentos de control de calidad del agua*. Editorial Limusa 6° edición. México. 223pp.
 - ❖ Torres, B. B. 1999. *Uso de indicadores biológicos de calidad de agua subterránea en un zona de la ciudad de México*. Maestría en ecología. Instituto de ecología. UNAM. México.
 - ❖ Winkler, M. 1996. *Tratamiento biológico de aguas de desecho*. Limusa. México.