



116613
**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

**ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO Y FÍSICOQUÍMICO
DEL ACUÍFERO DEL VALLE DEL MEZQUITAL,
ESTADO DE HIDALGO, MÉXICO.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN MICROBIOLOGÍA**

**PRESENTA:
BIOL. EMELIA CAMPOY OTERO**

DIRECTORA DE TESIS: M. EN C. ELIZABETH RAMÍREZ FLORES

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO

2003

D



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

El presente trabajo se desarrollo en el laboratorio de Microbiología Ambiental del Proyecto de Conservación y Mejoramiento del Ambiente (CyMA) en la Unidad de Investigación Interdisciplinaria para las Ciencias de la Salud y la Educación (UIICSE) de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala, U.N.A.M. y con el apoyo de la Subgerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua (C.N.A.) y el British Geological Survey.

A la memoria de mi Madre,

*Por su enseñanza de fortaleza y de lucha
ante las adversidades de la vida !*

*Somos viajeros del Universo,
Polvo de estrellas dando vueltas en los remolinos del infinito...
La vida es eterna, pero las expresiones de vida son
efímeras, momentáneas y transitorias.*

Deepak Chopra

Agradecimientos

Con mi especial agradecimiento a la **Q.F.B. Esperanza Robles Valderrama**, quién además de jugar un papel primordial en la planeación del estudio, me brindó su apoyo cuando más lo necesite desde lo moral hasta lo económico.

Doy las gracias al **Ing. Oscar Escolero Fuentes** (Subgerente de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua) su apoyo y codirección del estudio, así como su confianza y amistad.

A la Comisión Nacional del Agua (CNA), en especial a los Ingenieros,

Ing. Orlando García Rojas,
Ing. Gabriel Salinas

Por su asesoría técnica en campo, su invaluable apoyo y amistad.

Al los Doctores del British Geological Survey,

John Chilton,
Stephen Foster

Al M. en C. Gustavo Valencia del Toro, agradezco su asesoría y la realización del análisis estadístico.

Especialmente:

A la M. en C. Nidia Aragón Salgado, por su empeño y dedicación, parte fundamental para el enriquecimiento de este trabajo.

Al Biól. Juan C. Estrada Mora, por el apoyo brindado para la realización del presente trabajo.

Al Dr. Pedro Ramírez García, quién representa un eslabón importante en mi desarrollo profesional.

A los integrantes del jurado, por su tiempo, sugerencias y valiosas observaciones.

Presidente:	Dr. Victor Rivera Aguilar,
Vocal:	Clara Inés Álvarez Manrique,
Secretario:	M. en C. Nidia Aragón Salgado,
Primer suplente:	Dra. Patricia Bonilla Lemus,
Segundo suplente:	M. en C. Alma Virginia Lara Sagahon.

Dedicatorias

A Dios por permitirme el reto de vivir y luchar.

A los tres hombres mas importantes de mi vida:

Mi Padre: Gerardo Campoy Martínez,
"sin palabras", a quién le debo la vida y lo que soy.

Mi esposo Juan Carlos Estrada Mora.
Mi hijo: Juan Carlos Estrada Campoy.

Con todo mi amor y respeto a mi Esposo **Juan Carlos Estrada Mora**, por compartir todos aquellos retos, fracasos y victorias en la vida, parte fundamental en mi vida profesional y personal.

Te Amo

Con todo mi carino y amor a mis hermanos Margarita, Ismael, Noé y Elodia.

A mis sobrinos Javier, Rocío, Evelio y Shannat.

A mis cuñados Evelio, Raymundo, David, Irma, Gabriel, Pilar.

F

A mis suegros, especialmente a mi "Suegra Mía" por todo su amor y apoyo cuando más los he necesitado.

A mis queridos padrinos Gustavo Valencia y Mara Eugenia Garín, por todo su amor y apoyo incondicional.

A todos mis amigos...

*Eres lo que tu mas profundo y vigoroso deseo es.
Como es tu deseo, es tu voluntad.
Como es tu voluntad, son tus actos.
Como son tus actos, es tu destino.*

— *Brihadaranyaka Upanishad IV. 4.5*

Contenido

Relación de figuras y tablas	i
Resumen	iii
Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Antecedentes	3
Capítulo 3. Generalidades	8
3.1 Importancia de las aguas subterráneas	8
3.2 Ecología microbiana	13
3.3 Amibas de vida libre	15
3.4 Ubicación Taxonómica de las amibas de vida libre	20
3.5 Importancia patógena de las amibas de vida libre	21
Capítulo 4. Justificación	25
Capítulo 5. Objetivos	26
Capítulo 6 Materiales y Métodos	27
6.1 Selección del área de estudio	27
6.2 Selección de los sitios de muestreo	30
6.3 Fase 1. Perforación de los pozos de monitoreo y análisis de suelo	33
6.4 Fase 2. Monitoreo del acuífero	36
Capítulo 7. Resultados y Discusión	40
7.1 Localización y estructura de los pozos de estudio	40
7.2 Parámetros Bacteriológicos	44
7.2.1 Análisis del suelo	44
7.2.2 Análisis del acuífero	48
7.3 Parámetros Físicoquímicos	56
7.3.1 Análisis del acuífero	56
7.4 Amibas de vida libre	68
7.4.1 Análisis del suelo	68
7.4.2 Análisis del acuífero	72
7.4.3 Pruebas de patogenicidad	77
Capítulo 8. Conclusiones	81
Capítulo 9. Recomendaciones	83
Capítulo 10. Referencias Bibliográficas	84
Anexo	90

Relación de figuras y tablas

Figuras

1. Croquis de la estructura hidrológica del DR 03.
2. Ciclo hidrológico.
3. Tipos de acuíferos existentes en México.
4. Ciclo de vida de *Naegleria sp.* y *Acanthamoeba sp.*
5. Ubicación geográfica de las zonas de estudio en el Valle del Mezquital, Hgo. México.
6. Diagrama de flujo de la metodología utilizada durante el desarrollo del monitoreo del acuífero.
7. Diagrama de construcción del pozo de El Bondho, San Salvador (MA)
8. Diagrama de construcción del pozo de El Tinaco, Mixquiahuala (MB)
9. Diagrama de construcción del pozo de San José Boxay (MC)
10. Diagrama de construcción del pozo de Cerro Colorado (MD)
11. Diagrama de construcción del pozo de Tula (ME)
12. Diagrama de construcción del pozo de Actopan (MF)
13. Coliformes totales encontrados en los pozos de monitoreo.
14. Coliformes fecales encontrados en los pozos de monitoreo.
15. Bacterias mesofílicas encontrados en los pozos de monitoreo.
16. Indicadores bacteriológicos encontrados en el acuífero a dos diferentes profundidades.
17. Indicadores bacteriológicos encontrados en el acuífero en dos diferentes épocas del año.
18. Conductividad en cada uno de los pozos de monitoreo.
19. Sólidos disueltos totales en cada uno de los pozos de monitoreo del acuífero.
20. Nitratos en cada uno de los pozos de monitoreo del acuífero.
21. Nitritos en cada uno de los pozos de monitoreo del acuífero.
22. Cloruros en cada uno de los pozos de monitoreo del acuífero.
23. Sulfatos en cada uno de los pozos de monitoreo del acuífero.
24. Alcalinidad en cada uno de los pozos de monitoreo del acuífero.
25. Géneros amibianos aislados en el acuífero.
26. Aislamientos amibianos para cada uno de los seis pozos del acuífero.
27. Aislamientos amibianos en dos profundidades del acuífero.
28. Aislamientos amibianos del acuífero en dos épocas del año.
29. Abundancia de las especies representativas del género *Acanthamoeba* en el acuífero.

Tablas

1. Criterios para definir los sitios de perforación (sitios de muestreo).
 2. Resultados bacteriológicos del suelo de los seis pozos de monitoreo.
 3. Análisis edafológicos de la zona de estudio.
 4. Parámetros fisicoquímicos que presentaron diferencias estadísticas de acuerdo a la prueba ANOVA multifactorial.
 5. Parámetros fisicoquímicos que presentaron diferencias estadísticas para el factor profundidad.
 6. Parámetros fisicoquímicos que presentaron diferencias estadísticas para el factor época.
 7. Amibas de vida libre aisladas de suelo de los seis pozos de monitoreo.
 8. Frecuencia de los géneros amibianos aislados en cada uno de los seis pozos.
 9. Pruebas de patogenicidad de las especies del género *Acanthamoeba*.
-
- I Parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos del acuífero en los pozos de San Salvador y Mixquiahuala.
 - II Parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos del acuífero en los pozos San José Boxay y Cerro Colorado.
 - III Parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos del acuífero en el pozo de Tula y Actopan.
 - IV Parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos del acuífero a dos diferentes profundidades.
 - V Parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos del acuífero en dos épocas del año.
 - VI Abundancia y diversidad de las especies representativas del género *Acanthamoeba*.
 - VII Amibas aisladas en el pozo de San Salvador.
 - VIII Amibas aisladas en el pozo de Mixquiahuala.
 - IX Amibas aisladas en el pozo de San José Boxay.
 - X Amibas aisladas en el pozo de Cerro Colorado.
 - XI Amibas aisladas en el pozo de Tula.
 - XII Amibas aisladas en el pozo de Actopan.

Resumen

Las aguas residuales que se depositan en el Valle del Mezquital desde hace más de cien años procedentes de la Ciudad de México y Zona Metropolitana son destinadas para uso agrícola, ocasionando contaminación del acuífero.

Se realizó un estudio en el acuífero del Valle del Mezquital, Hgo. con la finalidad de evaluar su calidad bacteriológica y fisicoquímica, así como el aislamiento de amibas de vida libre potencialmente patógenas al hombre.

El estudio se realizó en dos fases. En la primera se seleccionaron seis sitios de muestreo en donde se perforó un pozo de monitoreo en cada uno de ellos hasta los 30 m de profundidad. Se tomaron muestras de suelo cada 1.5 m, a las cuales se les realizó análisis edafológicos (textura, capacidad de intercambio catiónico (CIC), pH y color); se determinaron coliformes totales y fecales. Se aislaron amibas de vida libre evaluando en especial aquellas potencialmente patógenas al hombre.

La segunda fase consistió en monitorear el acuífero durante nueve meses, con la finalidad de abarcar época de sequía y lluvias, se tomaron muestras de aguas cada treinta días a dos diferentes profundidades del acuífero. Se determinaron los parámetros fisicoquímicos pH, temperatura, conductividad y sólidos disueltos, alcalinidad al calcio al magnesio, sulfatos, nitratos y nitritos, además de los indicadores bacteriológicos y amibas de vida libre.

La evaluación de la calidad del acuífero se realizó en base a los criterios ecológicos establecidos en la Norma Oficial Mexicana para aguas potables.

De acuerdo con el análisis estadístico ANOVA multifactorial se presentaron diferencias significativas para el factor pozo. Los resultados mostraron que la calidad del agua en los seis pozos no cumple con los criterios de calidad para agua potable. El pozo de Cerro Colorado registró el más alto índice de contaminación bacteriológica, por el contrario San Salvador presentó la menor contaminación.

La prueba de comparación múltiple Post Hoc de Duncan demostró que el pozo de Actopan fue el más contaminado y en cierta medida el pozo de Cerro Colorado, Tula, y San José Boxay, los cuales presentaron un comportamiento similar en la mayoría de los parámetros fisicoquímicos, por lo que se establece que comparten las mismas características químicas del agua al del resto de la región. Se encontraron diferencias estadísticas significativas para el factor profundidad y época para los sulfatos y nitratos.

Entre las amibas de vida libre aisladas, el género *Acanthamoeba* fue el más representativo, junto con *Hartmannella*. Los resultados positivos de las pruebas de patogenicidad de los aislamientos del género *Acanthamoeba* representan un alto riesgo a la salud humana, por lo

que se recomienda una mayor difusión sobre su importancia médica por el impacto que tienen en las aguas subterráneas.

Por otro lado el alto índice de coliformes fecales, las concentraciones considerables de sólidos disueltos totales, nitratos, sulfatos en algunos de los pozos, alcalinidad y la existencia de las amibas de vida libre sugieren que las aguas residuales deben recibir un tratamiento adecuado antes de reutilizarse con fines agrícolas, por el impacto en la contaminación tanto del suelo como en las aguas subterráneas.

Capítulo 1. Introducción

El bajo costo y la excelente calidad natural del agua subterránea, ha justificado su amplia utilización como fuente de agua potable, aún en las regiones con buena precipitación pluvial.

Dada su importancia, podría pensarse que existe una atención detallada para prevenir el deterioro de la calidad de los acuíferos, particularmente en las grandes áreas urbanas. Sin embargo, por un sinnúmero de razones no se le ha dado la suficiente importancia a su protección, ya que el flujo del agua y el transporte de contaminantes no son fáciles de observar ni de medir, y ambos procesos son generalmente lentos, de ahí que exista una despreocupación acerca del riesgo de su contaminación (23) (24).

No obstante, el asunto es de importancia práctica y directa por la escala y la persistencia de muchos episodios de contaminación y por el impacto que tiene en los abastecimientos de agua potable, además del alto costo e impráctico que sería rehabilitar un acuífero (23) (24).

Actualmente, en América Latina el reuso del agua en su mayoría se efectúa en donde los cursos de agua superficiales contienen una alta proporción de efluentes que son utilizados para riego de forma indiscriminada. Tal es el caso de las aguas residuales crudas que se emplean sin control alguno en cultivos de verduras y frutas, representando un riesgo directo a la salud como resultado de la propagación de bacterias intestinales patógenas, protozoos, huevecillos de helmintos además de otros organismos parásitos, así como la existencia de elementos tóxicos como el plomo, cadmio, mercurio y zinc, sumándose a esto la contaminación de las aguas subterráneas por la infiltración de estos agentes (14) (23) (24).

En algunos países como Argentina, Chile, Costa Rica, El Salvador, Nicaragua, y Guatemala, las aguas subterráneas representan una importante proporción en el abastecimiento de agua potable. En otros como Perú, Cuba y México, suministran la mayor parte del abastecimiento de agua municipal (23) (24).

México, un país en vías de desarrollo, ha llevado a cabo grandes reformas enfocadas a la localización de nuevas fuentes de agua potable y al mejoramiento de los servicios de abastecimiento, sin embargo, el futuro del agua en sus ciudades residentes al igual que en muchas ciudades del mundo es incierto, en donde la falta de oportunidades de trabajo en las áreas rurales, la declinación de las economías de subsistencia y la esperanza de acceder a una vida mejor ha propiciado el nacimiento de nuevos asentamientos humanos, en los cuales desafortunadamente la infraestructura urbana y los recursos naturales hídricos resultan insuficientes para responder al ritmo de su expansión, lo que representa un gran reto para quienes tienen la responsabilidad de abastecer a las ciudades de agua potable (52).

Por si fuera poco, es uno de los pocos países en donde las aguas residuales que se generan se destinan a la agricultura, lo que representa un peligro inminente por la innumerable cantidad de desechos y excretas humanas o de animales que lleva consigo, incorporando inevitablemente una gran variedad de organismos patógenos bacterianos y parasitarios, cuya presencia está relacionada con enfermedades intestinales principalmente (29) (53).

Este problema del reuso de las aguas residuales no se limita solo a este contexto, existe además un riesgo directo por la contaminación de las aguas superficiales y de las subterráneas, en donde el impacto es aún mas alarmante (20).

Si dicha contaminación es reciente y entre los factores que contribuyeron a ella se hallan agentes portadores de enfermedades entéricas transmisibles. Por tanto beber agua así contaminada o emplearla en la preparación de determinados alimentos, puede producir mayor número de infecciones (20) (29).

El reconocimiento de que las infecciones microbianas pueden ser transmitidas por el agua ha dado lugar al desarrollo de métodos para efectuar exámenes de rutina que garanticen que el consumo de ésta se halla libre de contaminación por excretas. Aunque ahora es posible detectar la presencia de múltiples organismos patógenos en el agua, es impráctico someter a vigilancia el agua potable para detectar todo tipo de microbio patógeno que pudiera presentarse con la contaminación. Una opción lógica es determinar los organismos que normalmente se hallan en las heces de los seres humanos y animales de sangre caliente como indicadores de contaminación por excrementos, así como la eficacia de los sistemas de tratamiento del agua y de desinfección. La búsqueda de dichos indicadores de contaminación fecal proporciona de esa forma un medio de controlar la calidad del agua (29) (54).

Sin dejar pasar desapercibido otro tipo de microorganismos de interés a nivel salud como hongos, algas y protozoos, que además de producir sabores, olores indeseables en el agua, albergan gérmenes patógenos que los protegen contra la desinfección con cloro. Desgraciadamente no se puede recomendar una vigilancia sistemática de ellos debido a su naturaleza diversa y su presencia impredecible, aunque debe tenerse siempre presente que los mismos pueden afectar la calidad del agua (29) (54).

Ante esta problemática, es importante evaluar la calidad bacteriológica y fisicoquímica, así como la presencia de amibas de vida libre con potencial patógeno para el humano en el acuífero del Valle del Mezquital en el estado de Hidalgo, México, por ser uno de los ejemplos más importantes a nivel mundial del uso controlado a gran escala de las aguas residuales con fines agrícolas en donde las aguas crudas provenientes de la Ciudad de México y zona Metropolitana se depositan en su suelo para el riego de cultivos desde hace mas de cien años.

Capítulo 2. Antecedentes

Dadas las características geográficas, orográficas y climáticas que presenta México, existe una mala distribución de los recursos hídricos superficiales, de ahí que se recurra al uso excesivo de las aguas subterráneas e incluso que se utilicen éstas en forma desmedida en actividades agrícolas (32).

La demanda de los acuíferos con fines agrícolas motivó la creación de los distritos de riego en los años cincuenta, rebasando considerablemente la disponibilidad de las aguas superficiales y subterráneas con la perforación de pozos que alcanzan profundidades hasta los 250 m (3) (9).

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 encuentran 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 (9) (10) (52).

Debido a los altos costos que representa trabajar en este campo poco se sabe sobre la calidad actual de las aguas subterráneas. El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) junto con el British Geological Survey (B.G.S.) y la Organización Panamericana de la Salud sintetizan una serie de trabajos realizados en Estados Unidos, Europa y Latinoamérica entre los que destacan los realizados por Bouwer y Rice 1984 en un acuífero de Arizona, en estos estudios ellos observaron una reducción en los coliformes fecales de 3500 UFC/100 ml a 0.3 UFC/100 ml en la zona no saturada, mientras que los virus fueron totalmente removidos a 3 m de profundidad (23) (52).

Wellings y col. 1975, aislaron virus en las aguas subterráneas después de ser regadas con aguas residuales con tratamiento secundario sobre un suelo arenoso. La presencia de virus a 6 m de profundidad lo atribuyeron a las fuertes lluvias que se habían presentado en la zona. Por el contrario, en suelos limosos no se recuperó ningún virus en las muestras de aguas por debajo de los 6 m de profundidad (23) (67).

Schaub y Sorber 1978, estudiaron la migración del colifago F2 a través de un suelo compuesto de arena consolidada y grava, la tabla freática se localizó a 18 m. Al aplicarse agua residual se observó una infiltración rápida, al cabo de dos días el virus se detectó en las aguas subterráneas (23) (67).

En otro estudio realizado en un acuífero de calizas al sur de Inglaterra, sujeto a infiltraciones con aguas residuales con tratamiento primario y secundario, se evaluó la remoción de bacterias y virus. En la zona regada con aguas residuales con tratamiento secundario se detectaron 15 UFC/100 ml de coliformes fecales entre los 10-15 m de profundidad. En las zonas regadas con aguas residuales sin tratamiento alguno se encontraron 1000 UFC/100 ml a 10-12 m de profundidad (23) (67).

En San Juan de Miraflores, en las afueras de Lima Perú, se estudio el efecto de las aguas residuales descargadas de estanques de estabilización ubicados en un ambiente desértico. Se observó que el agua infiltrada al subsuelo en tasas de 10-20 mm/d después de una retención normal de 5-10 días, era de muy buena calidad para uso agrícola. La población de los coliformes fecales y patógenas como *Salmonella*, así como rotavirus decrecieron en 1-2 ordenes de magnitud durante su paso a través de los estanques primarios y secundarios (23).

En México también se han realizado algunos estudios, entre los que destacan los realizados por Luis Felipe Sánchez D., 1991 realizados en el acuífero granular de la Comarca Lagunera. Se evaluó la calidad fisicoquímica de 96 pozos, encontrando una concentración de sólidos totales disueltos que va de 205 a 14,210 mg/l, así como la existencia de 14 tipos de aguas, con predominio de las sulfatadas sódicas. Además existen una serie de efectos colaterales que están impactando a la Comarca Lagunera entre los que destacan la incrustación y/o corrosión de los equipos de bombeo con la consecuente pérdida de la eficiencia hidráulica y electromecánica del sistema y la salinidad del suelo, con una tendencia a la improductividad de la región (53).

Otro estudio realizado fue en el acuífero de Yucatán como parte de un proyecto conjunto entre el grupo de hidrología del British Geological Survey, la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán y la Gerencia Estatal en Yucatán de la Comisión Nacional del Agua, durante un periodo de 3 años, de 1991 a 1993. El estudio tuvo la finalidad de comprender como la rápida urbanización afecta la cantidad y calidad del agua subterránea subyacente. Se observó que el agua presenta un deterioro significativo en su calidad química y bacteriológica. La principal causa del deterioro de las aguas subterráneas son las descargas "in situ" de las aguas de drenaje sobre las calizas fracturadas a solo 2-3 m sobre el espejo de agua, por lo que no es raro encontrar cuentas de coliformes fecales de varios miles por 100 ml de muestra, así también se encontraron aunque en menor grado en pozos profundos de hasta 10 NMP/100 ml (53).

También se evaluó el efecto de las aguas residuales sobre las aguas subterráneas de la ciudad de León, Gto. Se eligió esta zona por que es una de las áreas urbanas de mayor crecimiento en el país, es uno de los centros procesadores de piel mas importante de México y América Latina y por lo mismo genera aguas residuales altamente contaminadas, además de que depende en gran medida del agua subterránea para su abastecimiento. El estudio fue emprendido también por el British Geological Survey, la Gerencia de Aguas subterráneas, y la Gerencia Estatal de la Comisión Nacional del Agua, además de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Chihuahua, iniciándose en 1993 y finalizó en 1996. Los resultados confirmaron por un lado la sobreexplotación del acuífero, además de la mala calidad del agua hasta profundidades de entre 50 a 100 m, con niveles altos de nitratos, fosfatos y cloruros, además de concentraciones significativas de metales pesados (53).

Por su parte, la Ciudad de México también enfrenta problemas de contaminación del acuífero que se localiza en su subsuelo, si bien es cierto que éste es muy grande, su calidad es susceptible de sufrir algún deterioro debido a una permanente actividad humana, a la falta de tratamientos de las aguas residuales y al control insuficiente de los desechos

peligrosos, exponiéndolo así a un alto riesgo de contaminación química y microbiológica además de la serie de factores relacionados con el hundimiento del suelo. De ahí que la principal fuente de abastecimiento de agua sea la cuenca del río Lerma-Balsas. Por otro lado, las aguas residuales que se generan se destinan al Valle del Mezquital, Edo. Hgo. con fines agrícolas desde hace cien años, trayendo como consecuencia la contaminación de las aguas subterráneas que se localizan en la zona (10) (11) (52).

Este Valle representa una de las regiones de gran importancia agrícola en el País, desde 1789 recibe las aguas pluviales del Valle de México y desde 1900 las aguas pluviales y residuales de la Ciudad de México y zonas conurbadas. A principios de este siglo, empezó a vislumbrarse la importancia de éste para sus moradores y es en 1904 cuando la Compañía de Luz y Fuerza de la ciudad de Pachuca Hgo. obtuvo la concesión para instalar tres plantas hidroeléctricas conocidas como Juandhó, Cañada y Elba. En 1907 se construyó la presa Tlamaco con el fin de derivar las aguas negras del río Salado, esta iniciativa motivó a los campesinos de la región a utilizar para el riego de sus cultivos los escurrimientos permanentes de las aguas negras (11) (12).

En 1912, entra en operación la presa Taxhimay y en 1922 termina la construcción de la presa Requena. En 1926 todos estos aprovechamientos hídricos anteriores pasan a ser controlados por la Comisión Nacional de Irrigación.

En 1951 entra en operación la presa Endhó y en 1955 la Secretaría de Recursos Hidráulicos organiza en forma definitiva estos aprovechamientos al integrar el **Distrito de Riego 03, Tula**, el cual es el principal interés para el presente estudio.

En la **figura 1** se observa la situación actual del distrito de riego 03, y las zonas destinadas a la agricultura (12).

Actualmente el Valle recibe aproximadamente 40 m³/seg de aguas residuales no tratadas, que se utilizan parcialmente mezcladas con el escurrimiento natural del Río Tula, para regar alrededor de 45,215 hectáreas (12).

Realmente no existe una estimación precisa sobre el impacto directo en la salud humana por el riego con aguas residuales dada la ausencia de datos epidemiológicos confiables. De acuerdo con la Secretaría de Salud en Tula, Hgo., de 1988 al primer semestre de 1993, aproximadamente el 25% de los casos atendidos fueron por infecciones gastrointestinales y un 10% atribuido a parásitos intestinales. Sin embargo no es posible determinar el origen de todas estas enfermedades ya que existen diversas rutas de infección, como el consumo de agua y alimentos contaminados o por el contacto directo con el agua residual o con el suelo (11) (13) (53).

Rivera *et al.* 1980, mostró que el incremento del uso de agua residual en Tula entre 1975 y 1979 ocasionó un ascenso en la incidencia de enfermedades gastrointestinales y amibiasis (12).

Cifuentes y col. 1992, compararon la incidencia de tres parásitos: *Ascaris lumbricoides*, *Giardia lamblia*, y *Entamoeba histolytica*. El género *Ascaris* presentó la mayor incidencia, sobre todo en los trabajadores expuestos directamente al agua residual cruda (12).

En diferentes estudios realizados en la zona en suelos y aguas residuales se han reportado quistes de amibas, huevecillos de nemátodos, huevos de *Taenia saginata*, lo que significa un alto riesgo directo a la salud humana (12) (13).

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua detectó un alto índice de coliformes fecales en manantiales y pozos de agua potable, así como niveles significativos de nitratos y sólidos disueltos (12).

En lo que respecta a las amibas de vida libre, a la fecha no se han reportado estudios de éstas en aguas subterráneas, su importancia radica en el hecho de que existen algunos géneros que son capaces de producir en el hombre dos padecimientos mortales a nivel del sistema nervioso central (SNC), como son la meningoencefalitis amibiana primaria (MAP) cuyo agente causal es *Naegleria fowleri* y la encefalitis amibiana granulomatosa (EAG) causada por diversas especies del género *Acanthamoeba* (40) (46) (47).

La infección causada por *Naegleria fowleri* (MAP) se caracteriza por ser aguda y fulminante que puede llevar hasta la muerte, ocurre principalmente en niños y adultos jóvenes con un historial de ser nadadores activos y presumiblemente sanos (7) (45) (63).

Por su parte *Acanthamoeba* spp. además de relacionársele con padecimientos del SNC, cuyo desenlace general es fatal, también causa otro tipo de padecimientos como la queratitis, otitis, rinitis etc., comportándose como un agente oportunista, se presenta sobre todo en individuos no sanos inmunosuprimidos, o que muestren algún padecimiento crónico. Generalmente el enfermo no muere pero su padecimiento suele ser crónico y con secuelas (16) (34) (60).

De ahí la importancia de estudiar este tipo de microorganismos en las aguas subterráneas especialmente en el Valle del Mezquital en donde las prácticas de riego se llevan a cabo sin control alguno y donde el impacto es directo como fuente de abastecimiento de agua potable y del uso recreativo que se le da al acuífero, en donde existen un número considerable de balnearios.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 3. Generalidades

3.1 Importancia de las aguas subterráneas

El agua subterránea constituye solo una parte del conjunto de eventos que describen el ciclo hidrológico, eventos en los que interviene la atmósfera, la hidrósfera, y la litósfera.

Ciclo hidrológico

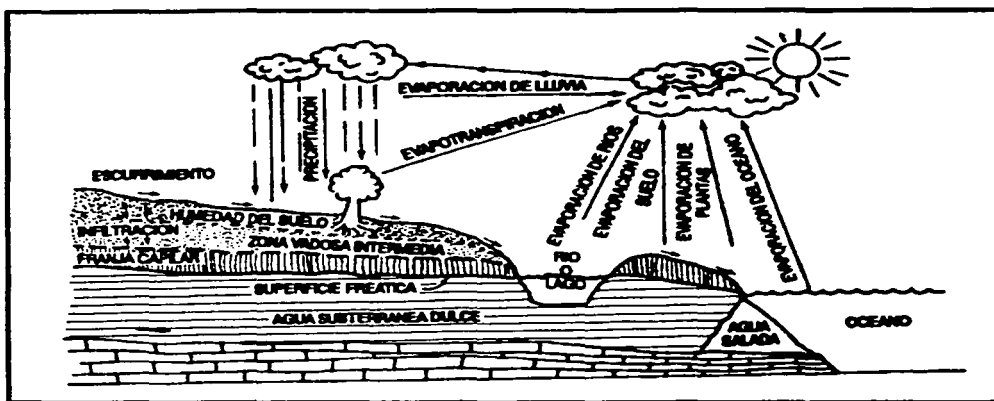
Es importante mencionar el ciclo del agua para poder apreciar el papel que juega en la formación y recarga de los mantos acuíferos.

En la **figura 2** se esquematiza el ciclo en del agua que al evaporarse en los océanos y en la tierra se almacena como humedad en la atmósfera, en donde al condensarse forma las nubes, posteriormente se precipita cerrando el ciclo hidrológico al producirse nuevamente la evaporación. Parte del agua que se precipita sobre la tierra es captada por las plantas, y por transpiración regresa a la atmósfera, otra parte de ella se escurre por la superficie terrestre a través de los cauces de arroyos y ríos y el resto se infiltra en el suelo, incrementando la humedad del mismo y las reservas de agua subterránea (10).

Las aguas infiltradas en el subsuelo no permanecen estáticas, parcialmente retornan a la atmósfera por evaporación, o emergen a la superficie como manantiales, o se almacenan en acuíferos costeros que retornan directamente al mar.

Prácticamente toda el agua subterránea tiene su origen en la precipitación y los escurrimientos superficiales. En forma natural se recarga como resultado de la precipitación sobre suelos y rocas permeables, así como por la infiltración en cauces naturales, o por canales de riego y sobreriego de terrenos agrícolas (10).

Figura 2. Ciclo hidrológico.



Fuente: Comisión Nacional del Agua 1994, (10).

Concepto de acuífero y clasificación

Se les conoce con el nombre de acuíferos a las formaciones geológicas o estratos constituidos por poros, pasajes, o fisuras interconectados entre sí, capaces de almacenar agua y de cederla con facilidad.

En la figura 3 se ilustran los tres tipos de acuíferos que existen, los cuales se describen a continuación:

Un **acuífero del tipo libre** es aquel en el que el agua subterránea posee una superficie libre sujeta a la presión atmosférica (10).

La parte superior de la zona de saturación recibe el nombre de superficie freática o espejo del agua. El ascenso o descenso de la superficie freática trae como consecuencia el correspondiente incremento o decremento de la zona de saturación.

El **acuífero confinado** es aquel que se encuentra limitado por estratos impermeables superior e inferior. También reciben el nombre de **acuíferos artesianos**, no se da la mezcla de aguas superficiales con las de éste, por lo que no es posible encontrar evidencias de contaminación. Los ascensos o descensos del nivel del agua en un pozo que se perforó en

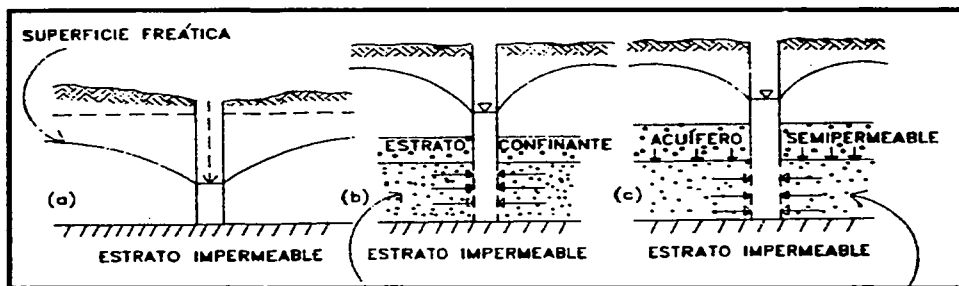
TRAMITE
FALLA DE ORIGEN

un acuífero confinado trae como resultado una disminución o incremento en la presión del agua dentro del acuífero (10).

La superficie imaginaria que alcanzaría el nivel del agua en un pozo de las características antes señaladas recibe el nombre de *superficie piezométrica*.

Un *acuífero semiconfinado* es aquel que está limitado por estratos de baja permeabilidad, y cuya capacidad de almacenamiento esta en función de su espesor de ahí que los posibles efectos de contaminación no puedan despreciarse (10).

Figura 3. Tipos de acuíferos existentes en México.



a) libre

b) confinado

c) semiconfinado

Fuente: Comisión Nacional del Agua 1994, (10).

En el caso de que una corriente subterránea presente una contaminación de naturaleza fisicoquímica debido a la disolución de ciertos materiales durante su curso (contaminación natural), o bien, por algún contaminante artificial como productos organoclorados (contaminación artificial), la utilización del acuífero para fines de agua potable estará en función de la naturaleza misma del contaminante, determinándose ya sea su clausura o bien, mediante un tratamiento adecuado se decide a su explotación (23) (24) (36).

Sin embargo, cuando se demuestra que el acuífero presenta una contaminación microbiológica no puede procederse de la misma manera, la contaminación microbiológica de los cuerpos de agua subterránea es íntegramente artificial y al igual que la fisicoquímica sus efectos son particularmente fatales.

TESIS COM
FALLA DE ORIGEN

En México y en todos los países en vías de desarrollo la falta de investigación microbiológica no ha permitido definir con claridad el efecto producido por el consumo de aguas contaminadas. En la toma de decisiones sobre el empleo de un pozo profundo o cualquier fuente de abastecimiento el cumplimiento de las normas fisicoquímicas es criterio suficiente para destinar el agua para el uso potable, y con las habituales prácticas de desinfección con cloro se da solución al problema (23) (36) (53).

El peligro potencial de la contaminación de las aguas subterráneas está en función de los siguientes parámetros:

- Tasa de supervivencia de los microorganismos
- Tasa de infiltración del mismo, la cual depende de la velocidad de infiltración del agua y la permeabilidad del terreno, dado que es el único medio por el cual pueden alcanzar las corrientes subterráneas,
- Condiciones hidrodinámicas dentro del cuerpo de agua subterránea, afectado por las tasas de extracción.

Muchos autores piensan que dadas las condiciones tan severas que reinan en los depósitos subterráneos, no es posible que puedan existir microorganismos patógenos. Sin embargo hay quienes sugieren que los acuíferos proveen las condiciones reductoras adecuadas para el establecimiento de un ecosistema anaerobio organotrófico, y es de esperarse que exista una comunidad microbiana activa adaptada, esto solo es posible si el acuífero está recibiendo una aportación continua de nutrientes (materia orgánica) y que exista bióxido de carbono. Es cierto que la falta de nutrientes y temperaturas no adecuadas reduce la multiplicación y aún la viabilidad de los microorganismos, sin embargo su capacidad de resistencia a las condiciones adversas les permite sobrevivir aún en esos ambientes desarrollando mecanismos de defensa (1) (10) (35) (50).

El verter aguas residuales en la superficie de terrenos agrícolas tiene como finalidad primordial deshacerse de un volumen importante de líquido indeseable, lo que representa una de las mayores amenazas en la contaminación de los acuíferos subterráneos. Una pequeña fracción de este líquido se evapora, pero otra se infiltra considerablemente, llevando consigo los contaminantes, los cuales en el suelo sufren modificaciones debidas a su reacción con el medio, aunado a aquellos que se van disolviendo a su paso por las distintas capas insaturadas. Una vez que el contaminante llega al acuífero, se diluye y las reacciones son más lentas. Aquí los procesos de degradación adquieren un nuevo aspecto en un medio anaerobio, la materia orgánica que no se degradó en el camino lo hará en condiciones anaerobias con la producción de gases, particularmente metano y con el desarrollo progresivo de biomasa bacteriana (1) (8) (23) (42).

La contaminación de aguas subterráneas debida a las sales incorporadas como consecuencia de prácticas agrícolas es más común en áreas de riego intenso ligado a una serie de fenómenos físicos, químicos y biológicos durante la circulación vertical del efluente, entre los fenómenos físicos, sin duda el más importante es el efecto filtrante del suelo que se

manifiesta en la retención de los sólidos en suspensión, entre los efectos químicos los más importantes son el cambio iónico, adsorción, y alteraciones químicas (8) (11) (12) (23).

Formaciones Acuíferas de México.

El territorio Mexicano presenta una gran variedad de características geohidrológicas en sus casi dos millones de kilómetros cuadrados de extensión.

Para su análisis los acuíferos en explotación pueden ser divididos en tres tipos según el tipo de formación geológica.

El primero está constituido por rocas sedimentarias no consolidadas como gravas, arenas y arcillas, se les conoce como rellenos aluviales.

El segundo tipo lo conforman los sedimentos eólicos y lacustres con afloramientos de rocas calizas, se encuentran en los valles, cuencas, planicies costeras y deltas, diseminados por todo el país, cubriendo extensiones muy importantes (10) (52) (53).

El tercer tipo esta representado por los acuíferos en las planicies costeras del océano pacífico de los golfos de California y Tehuantepec. Los acuíferos de este tipo suministran la mayor cantidad de agua subterránea del país (10).

3.2 Ecología microbiana

Estructura y dinámica de las poblaciones microbianas en el suelo.

El suelo es un medio muy complejo compuesto de tres fases (sólido, líquido y gas) que están dispuestas en diversas formas tanto a nivel macroscópico como microscópico (8).

La materia orgánica (restos de animales y plantas) que al descomponerse se convierte en humus junto con el componente mineral como las partículas de arcilla constituyen un sistema coloidal, cuya superficie es muy importante en los fenómenos de adsorción y adhesión, los cuales tienen efectos directos en los microorganismos, pues los nutrientes adsorbidos están disponibles y pueden ser desplazados del sitio de adsorción con H^+ producido por los microorganismos, aunque esto puede traer efectos indeseables en el pH local (8) (22) (70).

La estructura del suelo está estrechamente ligada con el agua y la atmósfera existente, esto repercute en las poblaciones microbianas que viven en las superficies de las partículas o en los espacios de interconexión (poros) entre los fragmentos. **El agua del suelo**, (una solución débil de sales) es importante por dos razones: la primera, es el sistema disolvente en el que las plantas absorben sus nutrientes minerales y la otra, la cantidad de agua del suelo es inversamente proporcional con la cantidad de atmósfera del suelo, puede conservarse por drenaje obstruido, por fuerzas de adhesión y cohesión y por adsorción a las partículas del suelo, de tal forma que existe agua que las plantas y microorganismos no pueden utilizar debido entre otras cosas a las fuerzas físicas de Vander Waals (5). El agua que existe en las partículas del suelo a manera de una película influye de manera determinante en los microorganismos, aún en suelos muy secos en donde puede estar formando una capa muy delgada de tan solo unas cuantas moléculas de grosor. Así pues la colonización y la supervivencia de los microorganismos se ve afectada por la estructura del suelo que es la que determina las condiciones hídricas (8) (22) (70).

La atmósfera del suelo está representada por los espacios en el suelo que no están ocupados por agua, su composición depende de la actividad biológica y de las tasas de difusión de los gases, que resulta de la solubilidad en el agua y del tamaño del poro. Por lo general en la atmósfera del suelo existe de 10 a 100 veces más bióxido de carbono que oxígeno en el aire. Se presentan gradientes de oxígeno y de bióxido de carbono, incluso en la superficie se producen ambientes microaerofílicos o anaeróbicos en donde la materia orgánica particulada y disuelta se oxida rápidamente, de ahí que no hay una simple relación entre la profundidad del suelo y las proporciones de organismos aerobios y anaerobios (8) (70).

El pH del suelo está determinado en gran medida por la naturaleza química de los minerales y la materia orgánica presente, su función en la distribución de los microorganismos es muy compleja ya que tiene efectos sobre la lixiviación y en la disponibilidad de nutrientes (8) (22) (70).

La profundidad del suelo influye en la variación de factores ambientales como la temperatura y la aereación, así como en la distribución de las partículas por tamaño y en la concentración de materia orgánica a veces en forma muy marcada y otras en forma discontinua (8).

Al descomponerse la materia orgánica sobre la superficie del suelo, los minerales solubles son arrastrados a las zonas más profundas formando secuencias de capas más o menos definidas llamadas horizontes (8) (22) (70).

Para algunas especies de algas y otros autótrofos, la materia orgánica puede inhibir su desarrollo, otras se relacionan particularmente con hábitats ricos en este componente. En el caso de los protozoos su abundancia depende del número de bacterias, aunque las amibas testadas pueden depender directamente de la materia orgánica (8) (48).

3.3 Amibas de vida libre

Las amibas de vida libre se hallan ampliamente distribuidas en el suelo, aire y agua, pueden aislarse con relativa facilidad de cuerpos de agua de casi cualquier tipo, como ríos, piscinas, aguas de desecho, hasta en aguas termales, y de manera sorprendente de agua potable embotellada (5) (57) (59)(61) (62) (73).

En los últimos años el estudio de las amibas de vida libre ha generado una gran inquietud, pues se sabe que existe un grupo muy restringido cuyos miembros son capaces de provocar en el hombre dos enfermedades mortales del sistema nervioso central, que incluso pueden llevarlo a la muerte, además de afectar otros órganos, como pulmón, oído, piel. Estos padecimientos son: la **Meningoencefalitis Amibiana Primaria (MAP)** causada por *Naegleria fowleri* y **La Encefalitis Amibiana Granulomatosa (EAG)** causada por *Acanthamoeba* spp. Se han aislado a partir de líquido cefalorraquídeo, de la región nasobucofaringea, e incluso también de pacientes con rinitis crónica, y con quemaduras (7) (26) (46) (47) (51) (60).

El grupo de amibas de vida libre patógenas se circunscribe principalmente a los géneros *Naegleria*, *Acanthamoeba*, *Balamuthia*, y *Hartmannella* (16) (26) (56) (64) (69) (71).

Características Estructurales de las Amibas

Las amibas de vida libre son microorganismos unicelulares, uninucleares, su núcleo se caracteriza por presentar un gran nucleólo denso centralmente localizado ó también llamado cariosoma y una membrana nuclear sin gránulos de cromatina (55) (66).

Su morfología y fisiología es muy variada dependiendo del género y especie de que se trate.

Forma trófica

El trofozoito es la forma proliferativa de la amiba, es muy activo, su tamaño y forma dependen de la especie. Para el caso del género *Naegleria*, el trofozoito se caracteriza por presentar un pseudópodo redondeado llamado lobópodo, cuando está redondeado mide de 8 a 30 μm de diámetro. Su citoplasma es finamente granular presenta un núcleo con un nucleólo denso central con vacuolas contráctiles y digestivas, además de estructuras fagocíticas distintivas conocidas como amebostomas que varían de 1 a 12 por amiba dependiendo de la especie (55) (65) (66).

Los trofozoitos de las diferentes especies de *Naegleria* son similares en apariencia y se conocen como amibas limax, son elongados y su movimiento es en forma unidireccional por sus pseudópodos abruptos llamados lobópodos.

Los trofozoítos de *N. australiensis* son patógenos en ratón, miden aproximadamente 21 µm de diámetro cuando crecen en agar nutritivo con *E. coli* a 37°C (55) (63) (73).

Forma flagelada

El término ameboflagelado se aplica para describir amibas que pueden transformarse en organismos flagelados. Cuando *Naegleria* se encuentra en un medio no nutritivo tal como agua destilada o solución buffer se transforma transitoriamente a este estado, esta típica forma es una especie de rombo elongado a manera de pera con dos flagelos que emergen por debajo de la cara anterior (28) (55) (65).

De las diferentes especies de *Naegleria*, *N. australiensis* llega a presentar hasta ocho flagelos por célula, para *N. gruberi* se han reportado de uno a cinco (28) (55).

Los miembros del género *Acanthamoeba* no presentan forma flagelar (55).

Forma quística

El enquistamiento es la forma como las amibas responden a cualquier variación ambiental que amenace su existencia, de esta manera pueden sobrevivir a las sequías, a cambios de pH, de oxígeno y a la escasez de nutrientes. Las amibas en su forma quística pueden ser transportadas por el aire mediante corrientes de convección, o turbulencias. El quiste representa la forma más común de vida en el aire, puede inactivarse debido a las interacciones con los contaminantes, aunque éstos también pueden servirle como agentes protectores de otros químicos (8) (17) (55).

Temperatura

Las temperaturas extremas para las amibas de vida libre son las que están por abajo de los 4°C, ó por encima de los 37°C. Algunas son termotolerantes, pudiendo sobrevivir a temperaturas mayores de 45°C; aunque por lo general, las especies patógenas son termotolerantes, no todas las amibas que crecen a más de 40°C son patógenas. Por tanto, los cuerpos de agua que tienen temperaturas estables por arriba de los 35°C son lugares ideales para la sobrevivencia y el desarrollo de las especies patógenas (5) (8) (39) (59) (68).

pH

El intervalo de pH en el que las amibas pueden desarrollarse está entre 5.5 a 8.6. Se ha observado que los integrantes del género *Acanthamoeba* toleran cambios de salinidad cuando se hallan en su forma trófica e incluso sus quistes son resistentes a la acción del cloro (17).

En los cuerpos de agua las amibas viven en la superficie, o adheridas a partículas flotantes en la columna de agua o en los sedimentos, o bien viven en la interface **agua-aire, suelo-aire, agua-suelo o agua/aire-organismos**, en esta última se alimentan de los exudados y de las bacterias adheridas a la superficie (8) (73).

Aunque las amibas de vida libre patógenas tienen velocidades de crecimiento inferiores a las no patógenas, pueden llegar a reproducirse e incrementar su número hasta llegar a niveles infectivos ante la escasez de competidores (8) (73).

Reproducción

Naegleria se reproduce por fisión binaria simple. La división nuclear es promitótica, de tal manera que el nucleólo y la membrana nuclear persisten durante la división nuclear (cariocinesis). El nucleólo se elonga formando una estructura esférica, dividiéndose en dos masas polares o nucleólos, durante este proceso la membrana nuclear se mantiene intacta (8) (55) (73).

Acanthamoeba spp. se divide por mitosis convencional, es decir el nucleólo y la membrana nuclear desaparecen durante la división (8) (55) (73).

Ciclo de Vida

El ciclo de vida es relativamente simple y consta de dos fases: La primera es la fase infectiva en donde el parásito presenta una movilidad activa (**trofozoíto**); y la segunda es la fase inactiva y de resistencia (**quiste**) (16) (66).

Ciclo de vida de *Naegleria fowleri*.

Es la única especie patógena del género *Naegleria* que se ha podido aislar y detectar en humanos. La vía de infección es por inhalación de las amibas ya sea contenidas en el agua o en el polvo en forma de quiste revirtiéndose rápidamente al estado ameboide para invadir la mucosa nasal, la placa cribiforme y bulbos olfatorios hasta llegar al cerebro causando inflamación y daño extenso al tejido nervioso, necrosando tanto la materia gris como la blanca. Este padecimiento es fatal y se produce la muerte dentro de las 72 hrs después de la aparición de los síntomas (16) (41) (**Fig. 4**).

Probablemente un nadador activo pueda infectarse de *N. fowleri* adquiriéndolo del agua a través de la nariz ya sea en la forma flagelar o ameboide o bien en estado quístico, sin embargo no se han logrado aislar formas flageladas o quísticas de *N. fowleri* en tejidos o fluido cerebroespinal (16) (65).

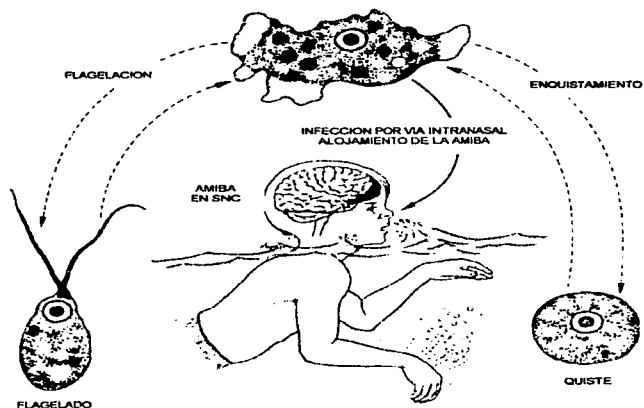
Ciclo de vida de *Acanthamoeba*.

Para el caso de *Acanthamoeba* la forma ameboide y la quística son las infecciosas en el hombre. La invasión del sistema nervioso central parece ser vía sanguínea, penetrando las amibas probablemente a través del tracto respiratorio o úlceras en la piel o mucosas. La encefalitis amibiana granulomatosa tiende a presentarse en individuos débiles, con padecimientos crónicos o inmunosuprimidos (16) (65) (Fig. 4).

Pueden observarse en los tejidos tanto trofozoitos como quistes a diferencia de la infección causada por *Naegleria*, en donde solo se aprecian trofozoitos. A este respecto *Acanthamoeba* parece ser verdaderamente un organismo anfizoico (16) (46).

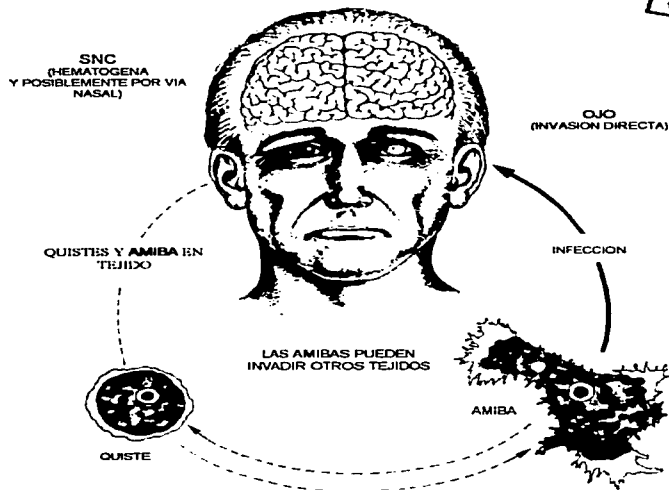
En cuanto al género *Acanthamoeba*, el blanco de infección no solo se restringe al sistema nervioso central, involucra pulmón, hígado, riñón entre otros órganos. También causa queratitis cuya infección es por invasión directa de las córneas a través de un traumatismo de los ojos o el uso de lentes de contacto contaminados (16) (60) (73).

Figura 4. Ciclo de vida de las amibas de vida libre.



Ciclo de vida de *Naegleria sp.*, (T. John D. 1993)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Ciclo de vida de *Acanthamoeba sp.*, (T. John D. 1993)

3.4 Ubicación taxonómica de las amibas de vida libre

Pertencen al Reino Protozoa: son animales constituidos por una sola célula, con formas sumamente variadas, con dimensiones que oscila entre 10 micrómetros a 3 mm de longitud, cosmopolitas, varios grupos son parásitos de invertebrados y de vertebrados superiores (51) (66).

Phylum Sarcomastigophora: poseen uno o más núcleos iguales, no forman esporas. Pueden ser organismos de vida libre o parásitos, se reproducen asexualmente.

Subphylum Sarcodina: se caracterizan por presentar pseudópodos como carácter distintivo, aunque algunos presentan etapas flageladas, de forma irregular, su cuerpo es desnudo. Su citoplasma está diferenciado en ectoplasma y endoplasma. La mayoría de los sarcodinos son uninucleados, sin embargo existen especies multinucleadas. Su reproducción es asexual por fisión binaria (66).

Superclase Rhizopoda: poseen lobópodos.

Clase Lobosea; característica forma ameboide, principalmente con pseudópodos de tipo lobópodo, cuerpo desnudo. Las amibas de agua dulce presentan una o más vacuolas contráctiles.

Subclase Gymnamoebia: organismos de vida libre, desnudos.

Orden Amoebida: habitan en toda clase de agua, dulce, salobre, salada y suelo, pueden ser patógenos. Típicamente poseen un solo núcleo, se caracterizan por carecer de un estadio estar desprovistos de una cubierta protectora (66).

Suborden Acanthopodina: Los organismos pertenecientes a este suborden habitan en aguas dulces, suelos húmedos, pueden ser coprozóicos, su cuerpo es redondo, irregular o elongado y tiene una zona anterior clara, sus pseudópodos son redondeados, poseen quistes que miden de 10 a 20 micrómetros. Su división nuclear es mesomitótica o metamitótica (66).

Orden Schizopyrenida: Los miembros de este orden presentan un cuerpo cilíndrico, miden de 10 a 40 micrómetros, normalmente poseen un solo núcleo que sufre una división promitótica. Todos los representantes de este orden son de vida libre y se localizan generalmente en aguas estancadas. Muchas especies se consideran difásicas, ya que pasan por una etapa flagelada y la ameboide, siendo predominante esta última. El género *Vahlkamphia* carece de estadio flagelar, por el contrario *Naegleria* en su fase flagelar es muy pequeña y posee dos flagelos (2) (51) (66).

3.5 Importancia patógena de las amibas de vida libre

Culbertson (1958), estableció las características de *Acanthamoeba* y probó su potencialidad patogénica en ratones y monos al realizar una prueba rutinaria de vacunación vía intracerebral, intranasal e intravenosa todos los animales murieron. El estudio histopatológico reveló la existencia de amibas que de manera accidental contaminaron el cultivo, las cuales producían placas similares a las originadas por virus. Aisló e identificó esta amiba como *Acanthamoeba*, la cual la inoculó en ratones vía nasal, descubriendo que era capaz de invadir la mucosa olfatoria, migrar al cerebro y producir una encefalitis fatal, demostrando así de manera contundente y concluyente la capacidad patogénica de las amibas y fue el primero en sugerir la capacidad infectiva de éstas (16) (46) (47).

En 1965 Fowler y Carter reportan el primer caso de **Meningoencefalitis Amebiana Primaria (MAP)** en Australia. Así demostraron las lesiones cerebrales en ratones y monos los cuales morían a los siete días de ser inoculados por vía intracerebral, sugiriendo así que las amibas de vida libre podían ser patógenas para el ser humano, de manera simultánea se reportó otro caso en Checoslovaquia (16) (46) (47).

Un año mas tarde en 1966, Butt y col. describieron tres casos en Florida, Estados Unidos. La sintomatología descrita fue marcadamente similar a la observada en Australia, adquirida vía intranasal y con el antecedente de que los pacientes eran nadadores activos. **Acuñaando así el término de Meningoencefalitis Amebiana Primaria (MAP)**. Así Patras y Andujar reportan otro caso de MAP en el estado de Texas (16) (46) (47).

En 1968 nuevamente Butt y col. lograron obtener los primeros aislamientos de *N. fowleri* a partir de fluido cerebroespinal y de tejido de cerebro de pacientes en Florida, observando que ésta podía transformarse a estado flagelar cuando se mantenía en agua destilada (16) (46) (47).

Todos los casos reportados de amibiasis de 1962 a 1967 en Europa fueron detectados por sus características histopatológicas, clínicas y epidemiológicas; estableciéndose como agente causal a las amibas de vida libre, dando la pauta a la creación de una serie de programas de investigación en todo el mundo para la realización de estudios de diagnóstico, epidemiológicos, farmacológico, así como en el campo taxonómico (16) (46) (47).

En 1970, Carter publicó los primeros casos de meningoencefalitis en humanos debidamente comprobados, cuyo agente causal fue *Naegleria fowleri*. En este año sucedieron más casos, en la mayoría de ellos se identificó a *N. fowleri* sin dejar de mencionar que algunos otros se debieron a *Acanthamoeba spp.*, destacaron los reportados por Stamm 1970, Kenney 1971, y Robert & Rorke 1973 (16) (46) (47).

Martínez (1980), propuso el término **Encefalitis Amebiana Granulomatosa (EAG)** para describir la infección del sistema nervioso central por *Acanthamoeba* y distinguirla de la producida por *Naegleria fowleri* (46) (47).

Más tarde se descubrió que algunas infecciones oculares y de la piel eran causadas por este tipo de amibas. Se reportaron dos casos de queratitis por el género *Acanthamoeba*, en la Gran Bretaña por Nagington y col., cuyo agente causal fue *Acanthamoeba polyphaga* y *A. castellanii* (16) (46) (47).

En un principio muchos de los casos de queratitis por *Acanthamoeba* se les asoció con traumas en ojo en pacientes expuestos a agua contaminada. Sin embargo en 1985 al registrarse un incremento en el número de casos, se relacionó también dicha infección con el uso de lentes de contacto, estableciéndolo como un factor de riesgo importante debido al uso de soluciones contaminadas para la limpieza de los lentes (16) (46) (47).

En la década de los 90's, son varios los grupos de investigadores que contribuyen significativamente al estudio de las amibas de vida libre y su potencial patogénico.

En México se han detectado ocho casos comprobados de meningoencefalitis amibiana primaria. El primero de ellos lo reportó Valenzuela 1984 en el Estado de Mexicali. Un paciente varón de 16 años de edad con el antecedente de que había nadado en un canal de riego de poca profundidad. El paciente presentó los síntomas característicos y murió tres días después de ser hospitalizado. La prueba de inmunoperoxidasa determinó como agente causal a *Naegleria fowleri* (69).

El segundo caso de **MEAP** causado por *Naegleria fowleri* fue detectado en la ciudad de Monterrey por Rodríguez 1984, el análisis realizado del líquido cefalorraquídeo indicó también la presencia de esta especie. El paciente no murió, se le aplicó un tratamiento a base de anfotericina B (69).

El tercer caso de **MEAP** reportado fue en Huetanamo, Mich. por López-Corella y col. 1989. Se trató de un joven de 13 años el cual presentó meningoencefalitis con necrosis parenquimatosa con destrucción del cerebelo; el análisis histoquímico reveló la presencia también de *N. fowleri* (43).

En 1990 se detectaron cinco casos más de **MEAP** en jóvenes que se bañaron en un canal de riego del Valle de Mexicali, el análisis del líquido cerebroespinal reveló la presencia de *Naegleria fowleri* a través de su patrón isoenzimático (40).

Rivera y col. 1989, detectaron infección causada por amibas del género *Acanthamoeba* en pacientes con rinitis crónica y en pacientes con lesiones de quemaduras. Los aislamientos se obtuvieron de exudados nasales y exudados seropurulentos, lo que se identificaron con base a su patrón de isoenzimas y su patogenicidad en ratones. Las especies aisladas fueron *Acanthamoeba palestinensis*, *A. rhyodes*, *A. polyphaga*, *A. lugdunensis*, *A. divionensis*, y *A. mauritaniensis*. (60).

En el 2000, se reportaron dos casos de infecciones por amibas de vida libre, estos fueron estudiados en el Hospital Infantil de México y el laboratorio de Microbiología Ambiental del Proyecto de Conservación y Mejoramiento del Ambiente de la FES Iztacala, fueron dos niños que tenían el antecedente de haber tenido contacto con aguas termales. Otro caso un niño de 11 años el cual murió a causa de hemorragia cerebral, un niño más de un año 8

meses, murió de hemorragia pulmonar. En ambos casos se detectó a una amiba del género *Leptomyxidæ* como agente oportunista de la enfermedad (2) (49).

En la actualidad las infecciones causadas por amibas de vida libre son un problema de gran preocupación dada su detección difícil desde el momento que su diagnóstico médico se realiza solo por investigadores, aunado a que el médico general y personal de análisis clínicos no cuentan con la información suficiente de este tipo de padecimientos de origen amibiano, además de que su diagnóstico es difícil por observación directa de los fluidos corporales como el líquido cefalorraquídeo.

La Meningoencefalitis Amibiana Primaria (MAP) generalmente se presenta en niños, adultos y en jóvenes sanos, sobre todo en aquellos individuos con el antecedente de ser nadadores activos o que tuvieron contacto con algún cuerpo de agua. No se han reportado casos en donde las personas no hallan tenido ningún tipo de contacto con algún cuerpo de agua, es posible además que en individuos sanos las amibas de vida libre vivan como flora normal en la nariz o en la garganta. A la fecha, se sabe que solo *Naegleria fowleri* está implicada como agente causal en la MAP, aún no se han reportado otras especies del género como agentes causales para este tipo de padecimientos en el hombre (16) (21) (47).

El período de incubación entre el contacto inicial del trofozoito y la serie de signos clínicos de la enfermedad (fiebre, rinitis, dolor de cabeza) puede ser variable, en muchos casos es de 2 a 3 días, algunos son más largos de 7 a 15 días, sin embargo los síntomas primarios están asociados con una severa irritación de las meninges, generalmente dolores de cabeza, rigidez en la nuca, anorexia, náusea, fiebre de 39 a 40°C y vómito, se presenta una faringitis o síntomas de obstrucción nasal, pueden presentarse convulsiones, aunque en muchos casos no son muy frecuentes, el individuo cae en coma, (es común que se presenten anomalías cardíacas) y finalmente muere, la cual sobreviene en el curso de días dependiendo del manejo y resistencia del paciente así como de la virulencia del invasor (16) (47).

En la mayoría de los casos la enfermedad es fatal, alrededor de un mes después de que aparecen los primeros síntomas. El diagnóstico *premortem* revela la presencia de trofozoitos en el fluido cerebroespinal.

La Encefalitis Amibiana Granulomatosa (EAG) El cuadro clínico puede confundirse los antecedentes del paciente y la presencia de nódulos cutáneos hacen pensar en tuberculosis cerebral, infecciones virales o un absceso cerebral. Sin embargo los antecedentes del paciente y la presencia de nódulos cutáneos nos hacen pensar en una acanthamebiasis (16) (41) (47).

El diagnóstico se confirma con el aislamiento de amibas y quistes de las lesiones o del líquido cerebroespinal, siendo también posible el aislamiento a partir de los nódulos cutáneos.

A diferencia de *Naegleria fowleri*, *Acanthamoeba* no está asociada con nadadores, y la invasión del sistema nervioso central es secundaria a la infección en el cuerpo. Las amibas llegan al sistema nervioso vía circulación sanguínea. La enfermedad tiende a ser crónica con un curso prolongado, sobre todo en individuos inmunocomprometidos comportándose como un agente oportunista, presenta un curso de invasión lento y preferentemente afecta a los ganglios basales y las lesiones se caracterizan por ser granulomatosas (16) (21).

Uno de los mayores problemas de las infecciones del tipo amibiana es por un lado, la dificultad para hacer el diagnóstico, ya que el médico general no está familiarizado con este tipo de infecciones, las cuales consideran como casos raros, cayendo en el grave error de confundirla con una meningoencefalitis bacteriana o viral y tratarla como tal, manejando en muchos casos un tratamiento inadecuado (16) (65).

Cinco especies de *Acanthamoeba* se han podido identificar en humanos en infecciones del sistema nervioso central: *A. castellanii*, *A. culbertsoni*, *A. polyphaga*, *A. astronyxis*, *A. lenticulata* (16) (34).

Otra amiba de vida libre capaz de provocar Encefalitis Amebiana Granulomatosa es *Balamuthia mandrillaris*, existen registros de casos clínicos en humanos por esta especie (2)(56)(69).

Farmacología

En la actualidad se carece de conocimientos a cerca del tratamiento adecuado para controlar la infección de manera efectiva.

Son varios los esfuerzos realizados para identificar los agentes terapéuticos más efectivos para *Naegleria* y *Acanthamoeba*, se han incluido antibióticos con acción bactericida como bacteriostático, fungicidas, etc.

Estudios realizados demuestran que existen diferentes efectos en el comportamiento de los agentes infecciosos a los diferentes antibióticos, inclusive algunos de estas sustancias actúan de diferente forma en amibas de la misma especie dependiendo del paciente (16) (41).

Se ha probado la polimixina B, la cloroquina y el metronidazol, sin embargo se ha detectado un efecto sinérgico entre trimetoprim sulfametoxazol y trimetoprim polimixina B. (16) (46).

Capítulo 4. Justificación

Actualmente, el Valle del Mezquital recibe alrededor de 40m³/seg de agua residual no tratada procedente de la Ciudad de México y zona conurbada y que se utiliza para regar una superficie 45,215 ha (11) (12).

Las aguas residuales son introducidas al Valle desde hace mas de 100 años mediante un sistema de interceptores, por el gran canal de desagüe y el drenaje general del Valle de México, además de las aguas superficiales que son interceptadas principalmente por las presas Taxhimay y Requena, y en menor medida por las presas Endhó, Rojo Gómez y Vicente Aguirre (3).

El sistema de distribución de las aguas residuales en el Valle está controlado por las autoridades del Distrito de Riego, así como las aguas del Río Salado, Tepeji y de las presas Requena y Taxhimay que también entran al sistema de distribución de aguas residuales y son por lo tanto controladas por el mismo Distrito de Riego y es liberada a los campesinos con base al tipo y área de cultivo (3) (12).

El Valle del Mezquital representa una de las zonas de mayor importancia agrícola para el estado de Hidalgo, en donde se cultiva maíz, alfalfa, cebada, frijol, avena, chile y hortalizas como calabaza entre otras. Además se desarrollan actividades agrícolas complementarias como la floricultura, fruticultura y en menor escala la ganadería de bovinos, porcino, caprino y ovino; actualmente también se está desarrollando la piscicultura.

Aunado al riesgo directo que representa en el sector salud los enormes volúmenes de aguas negras tanto para productores como para consumidores de los cultivos, también existe el riesgo de contaminación del acuífero que se haya en el subsuelo de este Valle, el cual abastece en un 90% de agua potable a las poblaciones residentes como Mixquiahuala, Ixmiquilpan, Tlahuelilpan, Actopan, San Salvador por citar algunas, cuyo volumen se ha incrementado por la recarga con aguas residuales con su consecuente contaminación.

Por todo lo anterior se creyó oportuno e importante realizar un estudio de la calidad del acuífero para conocer la influencia que tiene el reuso de las aguas residuales sobre éste, evaluando su grado de contaminación.

El proyecto fue planteado por la Comisión Nacional del Agua apoyado por la Inspección Geológica Británica del Reino Unido. Este proyecto se inicio en el año de 1993 contemplando para el estudio el Valle de León, estado de Guanajuato y el Valle del Mezquital, Edo. de Hidalgo.

En Agosto de 1996, se incorporó a él, El Proyecto de Conservación y Mejoramiento del Ambiente de la Unidad de Investigación (U.I.I.C.S.E.) de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala de la Universidad Nacional Autónoma de México (U.N.A.M.) abarcando solamente la zona del Valle del Mezquital.

Capítulo 5. Objetivos

Objetivo General:

- **Evaluar la calidad bacteriológica, fisicoquímica y caracterizar la población de AVL en especial aquellas con potencial patógeno al humano del acuífero del Valle del Mezquital, Hgo. México.**

Objetivos Específicos:

- Determinar la presencia de las bacterias indicadoras de contaminación fecal en el acuífero del Valle del Mezquital, Hgo. tanto en época de sequía como de lluvias.
- Aislar e identificar amibas de vida libre con potencial patógeno al humano en época de sequía y época de lluvias.
- Evaluar la patogenicidad de los aislamientos amibianos en animales de laboratorio.
- Determinar los parámetros fisicoquímicos: pH, temperatura, conductividad, sólidos disueltos, alcalinidad y, dureza al calcio y al magnesio, sulfatos, nitratos y nitritos en época de sequía y época de lluvias.

Capítulo 6. Materiales y Métodos

6.1 Selección del área de estudio

El presente trabajo se realizó con el propósito de evaluar el impacto de las infiltraciones de las aguas residuales en el acuífero del Valle del Mezquital.

El Valle del Mezquital se ubica al suroeste del Estado de Hidalgo, a una altitud de 2100 msnm, se caracteriza por su extensa planicie, presencia de montañas y colinas de diversas altitudes, está comprendido en las coordenadas 99° 23' y 98° 55' de longitud oeste y 20°00' y 20°20' de latitud norte.

Clima

De acuerdo con la clasificación de Koopen modificada por García, el clima de la región es seco semiárido templado con lluvias en verano.

Con una temperatura media anual de 18.3°C, presentándose la máxima en mayo y la mínima en noviembre con 9.4°C. Con lluvias sólo durante el verano, aunque llegan a presentarse algunos torrenciales en Marzo-Abril.

Datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua indican para los últimos diez años una precipitación media anual de 450 mm/año, con su máxima incidencia en septiembre con 117.4 mm/año y la mínima en enero con 8.8 mm, así como una evaporación de 2,100 mm/año.

Agricultura

Uno de los renglones con más valor en la economía Hidalguense es la agricultura la cual se distribuye en dos variantes: de temporal y de riego.

Solo una quinta parte del Valle del Mezquital presenta buenas condiciones para la agricultura debido a las características topográficas de la zona. En las ultimas décadas estas actividades se han incrementado con la utilización de los sistemas de riego mediante los cuales se aprovechan en gran escala las aguas residuales de la ciudad de México, además de las aguas provenientes de la presa Endhó y Requena.

Este tipo de agricultura cubre la mayor parte de la superficie del distrito de riego de Tula en las cercanías de las localidades de Tula, Tezontepec, Mixquiahuala de Juárez y Progreso entre otras; se siembra en terrenos casi planos, suelos profundos y fértiles; los cultivos

principales de la zona son alfalfa, maíz, cebada, trigo y frijol, en la zona cercana a la ciudad de Tula, también se siembra jitomate, haba, calabaza y frutales, en terrenos con pendientes pronunciadas se cultiva maguey y nopal.

Geología

El Valle del Mezquital forma parte del Altiplano Mexicano, dentro de la provincia Neovolcánica. Está rodeado de valles y montañas, con un relieve entre el punto más alto al más bajo del orden de 500 m.

El suelo es del tipo "Chesnut", presenta rocas volcánicas de diferente edad y composición, así como rocas sedimentarias calcáreas. La presencia de una compleja estructura de fracturas y fallas en estas rocas hacen pensar la existencia de una actividad volcánica (3).

Los depósitos fluviales y aluviales que conforman el valle datan del holoceno; Los sedimentos más antiguos corresponden al Cretácico Inferior y Superior, los cuales están formados por rocas depositadas en los periodos terciario medio y superior del Oligoceno, Mioceno y Plioceno los cuales están compuestos de flujos de lava y cenizas volcánicas de composición basáltica y andesítica, capas intermedias de arcillas con grava, calizas lacustres y depósitos calcáreos de origen marino, encontrándose dolomitas que de alguna manera cubren esta secuencia, el material de relleno está constituido por aluviones y materiales clásticos del periodo reciente (3) (4) (12).

Las secciones geológicas muestran que las laderas del Valle están asociadas con fallas que descansan sobre estas rocas antiguas y flujos de lava las cuales forman colinas, y los estratos de la secuencia aluvial varían considerablemente. En el área de Tula de Allende estos depósitos están por debajo de arcillas del Cretácico a una profundidad de 200 a 300 m. Al oeste de Actopan la secuencia aluvial está a menos de 30 m de espesor sobre lava del terciario y rocas piroclásticas (4) (12).

Las rocas que predominan son de origen ígneo, aunque también existen sedimentarias y en menor cantidad metamórficas. Las rocas ígneas son del tipo andesítico, riolítico y basáltico; entre las rocas sedimentarias se encuentran las pizarras, calizas, magras, conglomerados, brechas, aluviones y areniscas; dentro de las rocas metamórficas se encuentran el mármol y los esquistos en menor cantidad.

Hidrología

El estado de Hidalgo se encuentra comprendido casi en su totalidad dentro de la región hidrológica "Río Pánuco", con una superficie de 19,793.60 Km². Debido a su gran superficie la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos dividió esta región en dos zonas: "Alto Pánuco" y "Bajo Pánuco".

La zona del "Alto Pánuco" comprende las cuencas de los ríos Tula y San Juan del Río que son afluentes del río Moctezuma y las cuencas de Metztlán y Amajac que originan el río Amajac.

El área del "Bajo Pánuco" comprende las cuencas de los ríos Exotóraz, Bajo Amajac, Temporal, Moctezuma, Tropaón y Pánuco.

El río Tula, generado en el Estado de México, inicia su recorrido con dirección norte hasta Ixmiquilpan. Esta cuenca reviste gran importancia tanto por su extensa superficie y la cantidad de afluentes que alimentan sus corrientes principales, como por los distritos de riego que se ubican en ella, de los cuales destaca el de Tula (DR03) que después de los del norte de la República, es uno de los más importantes del país.

El distrito de Tula (DR03), integrado por 17 municipios con una superficie total de 52,270 hectáreas, una superficie regable de 45,214 ha y una población actual estimada de 500,000 habitantes, está ubicado en la porción suroeste del estado y se abastece de los ríos San Luis, Tepeji, El Salto y Tula, así como de los volúmenes de agua almacenados por las presas Taxhimay del Estado de México, Requena y Endhó de Hidalgo (3)(11)(12).

En el Valle existen tres distritos más, que ocupan áreas de menor dimensión y que son:

- Metztlán (DR8), en la porción central, aprovecha las aguas de los ríos Tulancingo, Tizahuapan y principalmente las de la laguna de Metztlán.
- Tulancingo (DR28) que se localiza en la parte oriental y cuenta con dos presas, La Esperanza y El Girón, además de las corrientes de Tizahuapan y Tulancingo.
- Alfajucan (DR100) en la porción occidental, el cual se beneficia con las aguas del río Tula principalmente, y los de la presa Javier Rojo Gómez.

El principal drenaje del Valle del Mezquital es: **al norte** por los ríos de Tula y Actopan, **al suroeste** por el río de Tepeji, el cual también recibe agua de las presas Taxhimay y Requena. Después de pasar por la presa Endhó, recibe el nombre de río Tula, (abastecido por el río Salado), continua su curso hasta dejar el Valle por el lado norte; **el lado este**, es abastecido por el río de Actopan, que desciende de las montañas de Pachuca y Chicvasco, uniéndose con el río de Tula e Ixmiquilpan.

Su hidrología natural se ha venido modificando por la importación de los grandes volúmenes de aguas residuales que llegan de la Ciudad de México, así como por los diversos sistemas de drenaje natural y artificiales.

Aguas subterráneas

Los depósitos de lava conforman el más importante acuífero en el distrito y representan la principal fuente del agua subterránea, estas rocas tienen una permeabilidad moderada asociada principalmente con fallas y fracturas de las rocas, son de diferente espesor y pueden interconectarse con depósitos permeables.

Otra fuente importante de aguas subterráneas está representada por aluvión el cual contiene secuencias de arena y grava con una alta permeabilidad, toda esta formación se considera de baja transmisibilidad por la presencia de grandes estratos de arcillas y depósitos limosos. Este acuífero frecuentemente es no confinado cerca de la superficie, pero llega a ser semiconfinado a una determinada profundidad.

Generalmente en donde existen secuencias de arcillas se consideran zonas de baja permeabilidad, en las regiones ubicadas alrededor de las montañas, se observa que típicamente tienen una alta permeabilidad, debido probablemente a la existencia de una disolución del material rocoso.

Las aguas subterráneas también existen en las calizas del Cretácico inferior localizadas a baja profundidad del suelo del valle, pero las características hidráulicas de este acuífero no están definidas (3) (4).

El empleo de aguas residuales en el riego, a pesar de ser de mala calidad son de mayor aceptación por parte de los agricultores debido a los altos contenidos de materia orgánica, los cuales proveen nutrientes a los suelos, propiciando una alta productividad.

El Valle representa una de las principales áreas de explotación acuíferas del estado de Hidalgo cuya recarga se incrementó notablemente al iniciarse el riego con aguas negras y al establecerse la refinería y la planta termoeléctrica en Tula.

El acuífero que se localiza en su subsuelo descarga la mayor parte de su alimentación a través del cauce del río Tula y de numerosos manantiales, entre los que destacan el de Cerro Colorado que abastece a un gran número de poblados.

6.2 Selección de los sitios de muestreo

En forma global para fines del proyecto se seleccionaron seis sitios de muestreo, los cuales se ubicaron con base al historial de riego con aguas negras, zonas de descarga, localización de canales de riego, distribución espacial del acuífero, condiciones hidrogeológicas de la zona, profundidad del nivel estático y al acceso del equipo de perforación.

En la **tabla 1** se presentan los criterios de selección utilizados para los sitios de muestreo y en la **figura 5** aparecen localizados.

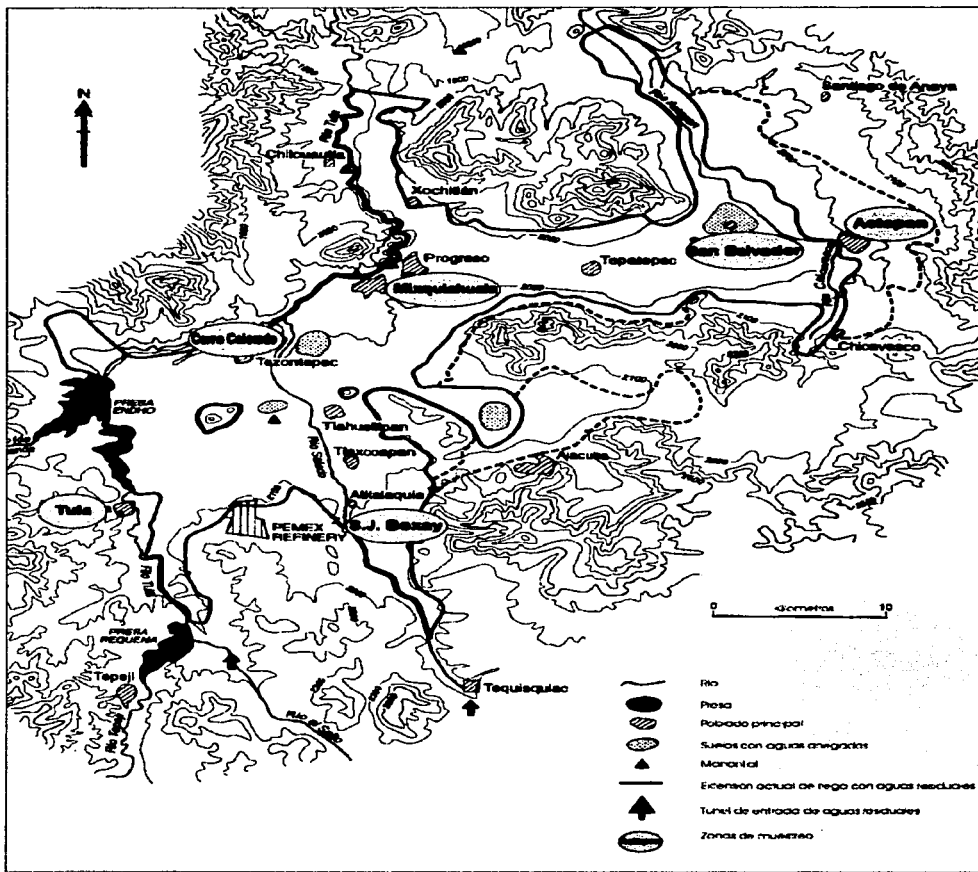
Tabla 1. Criterios para definir los sitios de perforación (sitios de muestreo), de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua.

Sitio	Pozo	Criterios de selección
MA	El Bondho, San Salvador	Área con riego agrícola a partir del año 1960, con aguas mezcladas, nivel somero, existen pozos artesianos.
MB	El Tinaco, Mixquiahuala	Área con riego agrícola a partir del año 1920, con aguas negras, al margen izquierdo del canal Requena, no existe referencia del nivel freático.
MC	Exhacienda San José Boxay, Atitalaquia.	Área con riego agrícola a partir del año 1976, con aguas negras, la profundidad del nivel freático se encontró a 2.5 m.
MD	Cerro Colorado, Tezontepec	Área con riego agrícola a partir del año 1961, con aguas negras, el nivel freático se encontró a 2 m, sitio ubicado cerca del manantial de Cerro Colorado.
ME	Tula, Tula	Área con riego agrícola a partir del año 1975, con aguas negras, sitio ubicado al margen derecho del río Tula, el nivel freático se encontró a 2.5 m.
MF	Actopan, Actopan	Área con riego agrícola a partir del año 1973, con aguas negras, el nivel freático se localizó a 1.5 m.

M: Mezquital. A,B,C,D,E,F: Indica cada uno de los pozos perforados.

TESIS CON
FALLA DE CANCELACIÓN

Figura 5. Ubicación geográfica de las zonas de estudio en el Valle del Mezquital, Edo. Hgo.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Una vez seleccionados los sitios de muestreo se procedió a la perforación de los pozos, a lo que se le denominó fase 1.

Fase 1. Perforación de pozos de monitoreo y análisis de suelo

La perforación de los pozos de aproximadamente 40 cm de diámetro se realizó por el método de rotación con lodo bentónico, con una perforadora Gardner Denver 2000, y una bomba de lodos Gardner Denver modelo C-150, GMC471 (11) (12).

Se obtuvieron muestras de suelo (núcleos) cada 1.5 m hasta los 30 m de profundidad con ayuda de un muestreador tipo Kelly.

Al término de cada pozo se colocaron multipiezómetros (3 piezómetros a tres diferentes profundidades en zonas de mayor permeabilidad) y se procedió al sellado de estos.

Preservación de la muestra:

Las muestras de suelo se envolvieron en papel aluminio, se colocaron en bolsas de polietileno para evitar la descomposición de su estructura y se trasladaron al laboratorio.

Procesamiento de la muestra:

Para el análisis de la muestra se empleó la parte central del núcleo (15-20 cm de longitud), se les realizaron los análisis bacteriológicos y edafológicos además del aislamiento de las amibas de vida libre.

Análisis Bacteriológicos

Indicadores de contaminación:

Para la determinación de coliformes totales y fecales se utilizaron 5g de suelo en 200 ml de agua peptonada estéril, posteriormente se siguió la técnica de tubos múltiples del número más probable (NMP) de acuerdo al manual de métodos estándar (Fig. 6) (27).

Bacterias mesofílicas

Se utilizó la técnica de cuenta en placa de acuerdo al manual de métodos estándar (27).

Análisis edafológicos

La muestra de suelo se seco en horno a 180°C durante 24 horas, para posteriormente realizar los siguientes análisis edafológicos (Fig. 6):

Parámetro	Método
• Color	Tablas de color de Munsell
• pH	Potenciométrico
• Textura	Método de Bouyocos
• Densidad	Densitometría
• Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	Método del Verssenato

Amibas de vida libre

El aislamiento e identificación de las amibas de vida libre se realizó bajo condiciones de esterilidad, se tomaron 2 g de suelo y se colocaron en cajas de Petri conteniendo agar no nutritivo (NNE) con bacteria muerta *Enterobacter aerogenes*, y se mantuvieron a temperatura ambiente para su posterior aislamiento. Las placas se revisaron con la ayuda de un microscopio invertido y se seleccionaron las zonas de crecimiento amibiano para luego transferirlas a placas nuevas con medio NNE para su aislamiento e identificación.

Axenización de los cultivos:

Los aislamientos amibianos se axenizaron con la finalidad de obtener cultivos puros para la realización de las pruebas de identificación amibiana y pruebas de patogenicidad (Fig. 6).

De los cultivos amibianos crecidos en agar no nutritivo se cortaron pequeños cubos de agar de aprox. 1.0 cm² conteniendo trofozoitos, se transfirieron a tubos de ensaye con medio Chang modificado para mantenerlos a temperatura ambiente hasta obtener un crecimiento aproximado de 1x10⁴ a 1x10⁶ células/ml. como cuenta total (55).

Identificación:

La identificación de las amibas aisladas se realizó de acuerdo a Page (1988) tomando en cuenta las características morfológicas, pruebas de tolerancia a temperatura, transformación ameboflagelar y pruebas de patogenicidad (53).

- **Transformación ameboflagelar:**

Esta prueba consistió en colocar trofozoitos en un tubo de ensaye conteniendo agua destilada e incubar a 37°C durante 3 h, realizando una observación constante con ayuda del microscopio invertido cada 30 minutos para observar la presencia de formas flageladas. Las amibas que no flagelaron en este lapso de tiempo, se incubaron 24 h para su posterior observación (**Fig. 6**).

- **Tolerancia a la temperatura**

Para ésta se incubaron los trofozoitos a una temperatura de 37, 42 y 45°C durante 24 h con el objeto de valorar su tolerancia a temperaturas más altas de incubación (**Fig. 6**).

- **Identificación morfológica**

Las amibas aisladas se identificaron de acuerdo con las claves de Page (1988) observando las características morfológicas de 50 células a 400 y 1000 aumentos con un microscopio de contraste de fases, se tomaron las medidas de longitud y ancho para los trofozoitos y diámetro para los quistes (**Fig. 6**) (53).

- **Pruebas de patogenicidad**

La prueba de patogenicidad se realizó inoculando vía nasal a ratones blancos machos cepa CD-I. Se utilizó un lote de 5 individuos de tres semanas de edad inoculando una concentración de trofozoitos de 1.0×10^4 a 1.0×10^6 en cultivo axénico en medio Chang, las células se concentraron centrifugando a 2000 rpm durante 10 min, y se contaron con una cámara de Neubauer.

Se evaluaron de manera cualitativa los síntomas neurológicos, motriz, temperatura e ingesta de alimento de los ratones.

Fase 2. Monitoreo del acuífero

Concluidos los pozos de monitoreo, se seleccionaron dos niveles piezométricos en cada uno de ellos para la toma de muestras de agua, a lo que se le denominó profundidad 1 y 2.

Los niveles piezométricos quedaron establecidos de la siguiente manera:

• Pozo 1 (MA)	El Bondho	21 y 29 m.
• Pozo 2 (MB)	El Tinaco	7 y 14 m.
• Pozo 3 (MC)	San José Boxay	11 y 25 m.
• Pozo 4 (MD)	Cerro Colorado	7 y 25 m.
• Pozo 5 (ME)	Tula	7 y 25 m.
• Pozo 6 (MF)	Actopan	7 y 25 m.

De acuerdo con los datos de precipitación en los últimos 40 años y en especial el año en que se monitoreo el acuífero (1997), proporcionados por el Sistema Nacional de Metrología, las dos épocas quedaron establecidas de la manera siguiente:

1. Febrero	sequía (1997)
2. Abril	lluvia "
3. Mayo	lluvia "
4. Junio	lluvia "
5. Agosto	lluvia "
6. Septiembre	lluvia "
7. Octubre	lluvia "
8. Noviembre	sequía "
9. Enero	sequía (1998)

Se tomaron muestras de agua cada 30 días a dos niveles piezométricos en cada uno de los pozos con la ayuda de un muestreador BYLE de 1000 ml de capacidad.

Análisis Bacteriológicos

Indicadores de contaminación:

Para determinar las bacterias coliformes totales y coliformes fecales se tomaron 500 ml de agua y se colocaron en botellas ámbar estériles de boca ancha, se mantuvieron en hielo y se trasladaron al laboratorio para su análisis empleando la misma técnica del NMP (27).

Análisis Físicoquímicos

Para la determinación de los parámetros físicoquímicos se utilizaron 2 lts. de agua, 1 litro se vertió en un garrafón de plástico, se preservó con ácido sulfúrico a pH de 1; el otro litro se colocó en un garrafón de plástico y se mantuvo en refrigeración.

Los parámetros físicoquímicos se determinaron de acuerdo a las técnicas estandarizadas del manual de métodos estándar (Fig. 6) (27).

Parámetro	Método
pH	Potenciométrico (4500)
Conductividad eléctrica	Conductimétrico (2510)
Dureza total	Titulación con EDTA (2340)
Dureza al calcio	“ (2340)
Dureza al magnesio	“ (2340)
Alcalinidad total	Titulación con ácido sulfúrico (2320)
Sólidos totales y sólidos disueltos	Gravimétrico (2540)
Sulfatos	Turbidimétrico (4500 E)
Nitritos	Diazotización (Norma Oficial Mexicana)
Nitratos	Colorimétrico-Brucina (4500 A)

Amibas de vida libre

Para el aislamiento de las amibas de vida libre se tomaron 500 ml de agua y se colocaron en botellas ámbar de boca ancha estériles, se mantuvieron a temperatura ambiente y se trasladaron al laboratorio para su análisis.

En el laboratorio se homogeneizó la muestra de agua y se tomaron 50 ml en condiciones de esterilidad, se centrifugaron a 2000 rpm durante 10 min, se desechó el sobrenadante y el sedimento celular se colocó en cajas de Petri con agar (NNE). Las muestras se incubaron a temperatura ambiente.

La identificación para este grupo de microorganismos fue de igual manera que en la fase 1.

Análisis estadístico

Para realizar el análisis de los datos durante el estudio fue necesario una transformación en logaritmos de los valores para los parámetros bacteriológicos.

Posteriormente se aplicó una ANOVA de tres factores: (6) Pozo x (2) Profundidad x (2) Época, con la finalidad de identificar las diferencias estadísticas presentes ($P < 0.05$) entre las variables.

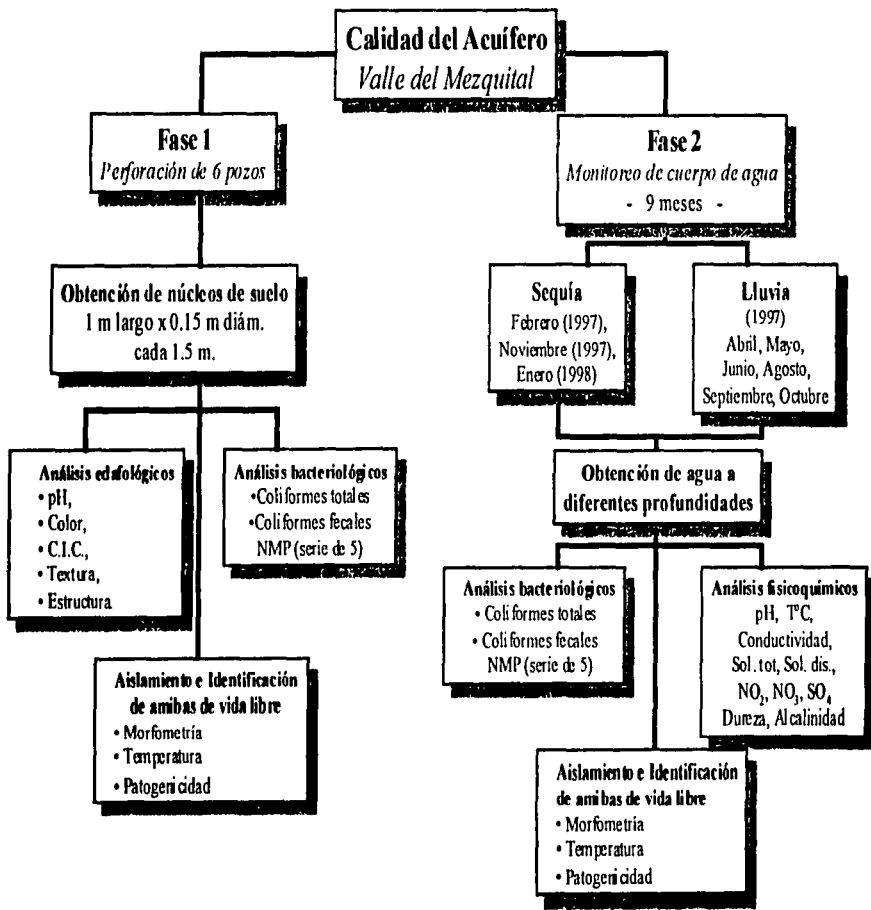
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En los factores (pozo, profundidad, época) en los que se encontraron diferencias significativas se aplicó la prueba de comparación múltiple Post Hoc de Duncan para detectar los parámetros en los que se encontraron dichas diferencias.

Finalmente, el análisis global de la calidad bacteriológica y fisicoquímica del acuífero del Valle del Mezquital se realizó con base a los valores estándar para agua potable que establece la Norma Oficial Mexicana publicada en 1996 y a los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua publicados en el Diario Oficial del 13 de Diciembre de 1989. Así como por los criterios de salud pública para ambientes acuáticos publicados por Helmer, R. tomado de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (18) (29).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 6 Diagrama de flujo de la metodología utilizada durante el desarrollo del monitoreo del acuífero.



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Capítulo 7. Resultados y Discusión

Antes de iniciar el análisis de los resultados es necesario describir la localización y estructura para cada uno de los seis pozos.

7.1 Localización y estructura de los pozos de estudio.

El pozo de El Bondho (MA), se localizó en el poblado de San Salvador, se perforó hasta los 30 m de profundidad y se recuperaron 7 de 8 núcleos en total. El problema en este pozo es que resulto ser brotante, lo que complicó mucho el proceso de perforación y sellado, de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua, ya se tenían experiencias de pozos brotantes en la zona perforados a 200 m de profundidad, pero se pensó que perforar un pozo a 30 m no necesariamente sería brotante. Se colocaron dos piezómetros a 21 y 29 m (Fig. 7).

El pozo de El Tinaco (MB), quedó ubicado cerca del poblado de Mixquiahuala al margen del canal Requena. La profundidad final de este pozo fue de 14 m y se recuperaron 3 de 4 núcleos totales. El motivo por el cual la perforación se concluyó a esta profundidad fue debido a la presencia de roca volcánica compacta que impidió seguir con la perforación. Se colocaron dos piezómetros a 7 y 14 m. El piezómetro de 7 m no fue posible monitorearlo porque disminuyó el nivel estático (Fig. 8).

El pozo de San José Boxay (MC), se situó entre el poblado de Texas y el Municipio de Atitalaquia se perforó hasta las 25 m de profundidad con la recuperación de 6 de 9 núcleos. En este pozo se colocaron tres piezómetros a las profundidades de 11, 17.5 y 24.5 m, debido a que se encontraron problemas de interconexión hidráulica, probablemente por la presencia de arenas finas en este lugar (Fig. 9).

El pozo de Cerro Colorado (MD), se ubicó a 300 m del manantial de Cerro Colorado cerca del municipio de Tlahuelilpan. La profundidad alcanzada fue de 29.5 m, de donde se recuperaron 5 de 6 núcleos; el motivo por el que no se obtuvieron núcleos entre los 14 y 24 m se debió a la existencia de gravas de 0.5 cm, haciendo imposible la recuperación de las muestras por el muestreador. También se colocaron tres piezómetros a 7, 14 y 25 m (Fig. 10).

El pozo de Tula (ME), se ubicó cerca de la zona arqueológica Tula. La profundidad final de este pozo fue de 40 m, recuperándose solo 2 de 3 núcleos en total. La razón por la que ya no recuperaron más núcleos después de los 9 m fue también por las gravas, arenas finas y arenas gruesas sueltas existentes lo que impidió la compactación de las muestras de suelo. Se colocaron dos piezómetros a 14 y 30 m (Fig. 11).

El pozo de Actopan (MF), se localizó en el municipio de Actopan al margen del canal Actopan. La profundidad final fue de 31.5 m con la recuperación de 7 de 8 núcleos. Se colocaron tres piezómetros a 7, 21 y 30 m (Fig. 12).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 7. Diagrama de construcción del pozo del Bodho, San Salvador (MA).

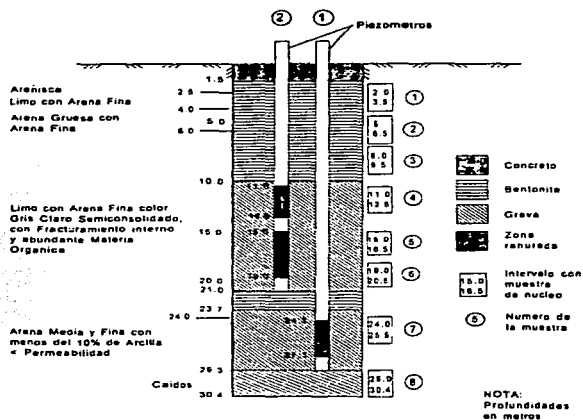
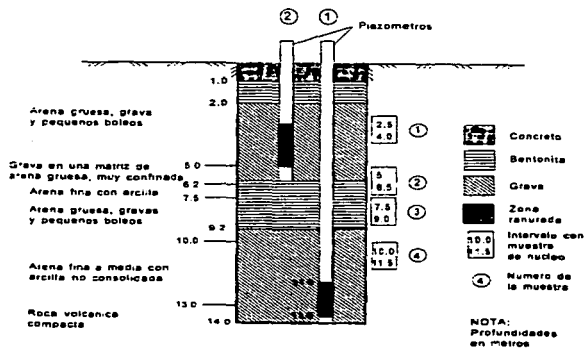


Fig. 8. Diagrama de construcción del pozo de El Tinaco, Mixquiahuala (MB).



Fuente: Comisión Nacional del Agua (1998).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 9. Diagrama de construcción del pozo San José Boxay (MC).

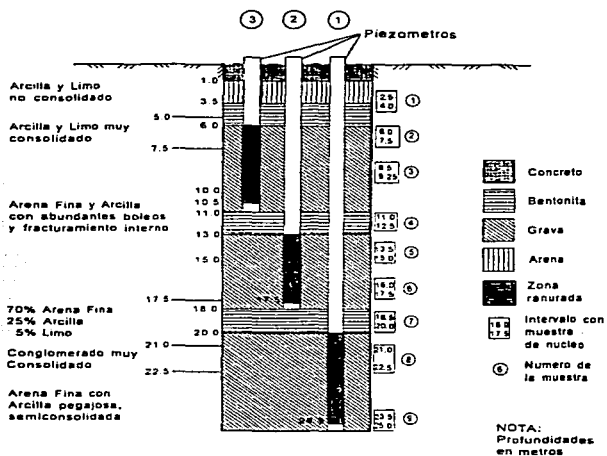
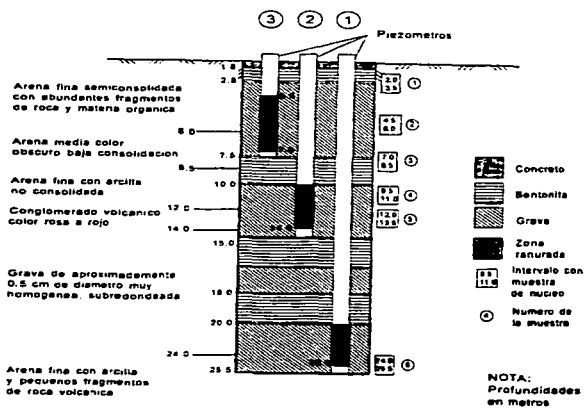


Fig. 10. Diagrama de construcción del pozo Cerro Colorado (MD).



Fuente: Comisión Nacional del Agua (1998).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 11. Diagrama de construcción del pozo Tula (ME).

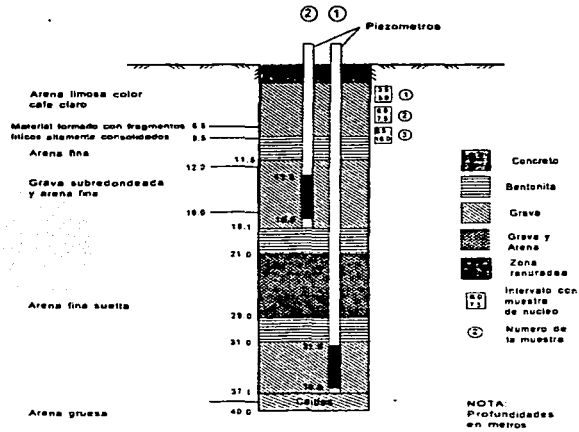
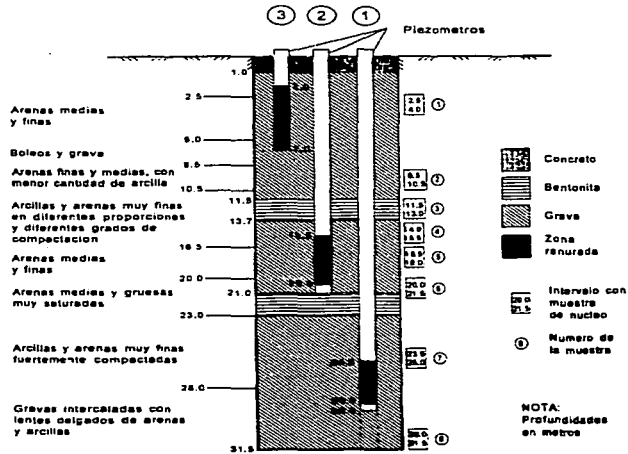


Fig. 12. Diagrama de construcción del pozo Actopan (MF).



Fuente: Comisión Nacional del Agua (1998).

TESIS CON
CALIFICACIÓN DE BIEN



Fotografía 1. Obtención del núcleo de suelo con ayuda de un muestrador tipo Kelly.



Fotografía 2. Sellado del pozo y colocación de piezometro en San Salvador.



Fotografía 3. Descarga natural del acuífero en San Salvador.



Fotografía 4. Descarga natural del acuífero Manantial en Cerro Colorado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para el análisis de los resultados obtenidos se describirá cada uno de los parámetros bacteriológicos en primer lugar en suelo y en segundo lugar del acuífero.

7.2 Parámetros bacteriológicos

7.2.1. Suelo.

En la **tabla 2** se muestran las concentraciones de coliformes totales y fecales registradas en cada uno de los núcleos de suelo.

Se observa al pozo de **San Salvador** con la concentración bacteriana más baja, registrando para coliformes totales una cuenta bacteriana de 3500 NMP/g en los 3 primeros metros, se aprecia que dicha concentración decrece en gran medida conforme se incrementa la profundidad hasta 2 NMP/g organismos.

En cuanto a coliformes fecales, se obtuvo una concentración de 2 NMP/g, este dato realmente no es significativo si se compara con los pozos de Tula y Actopan los cuales mostraron índices mucho más altos.

El pozo de **Tula** registró una concentración de 1100 NMP/g de coliformes totales y 460 NMP/g de fecales a 7 m de profundidad.

Las concentraciones registradas en este pozo probablemente se asocien a su ubicación geográfica, el cual se construyó al margen del río Tula en donde desembocan las aguas residuales provenientes de la Ciudad de México, es aquí en donde se distribuyen hacia las diferentes áreas de riego. En el curso del efluente quizás se de un efecto de dilución de los contaminantes lo que justifica que las cuentas bacterianas en los pozos de San José Boxay, Cerro Colorado y Mixquiahuala hayan sido más bajas.

El pozo de **Actopan** presentó una cuenta de 2400 NMP/g para coliformes totales desde los 9 hasta los 25 m de profundidad, mientras que para coliformes fecales se obtuvieron concentraciones por arriba de 2400 NMP/g en los primeros 10 m, y disminuyeron significativamente de 9 a 3 NMP/g entre los 11 a 25 m. Este se perforó al margen del canal que lleva el mismo nombre el cual transporta las aguas negras provenientes de la Ciudad de Pachuca y probablemente sus infiltraciones influyen en este punto.

La presencia de coliformes en los pozos de monitoreo tienen relevancia, los miembros de este grupo son organismos que provienen no solo de las heces de animales de sangre caliente, sino también de la vegetación y del suelo.

Escherichia coli tiene origen específicamente fecal, incluyendo aves, y rara vez se le encuentran en el agua y/o en el suelo que no haya sufrido algún tipo de contaminación de este tipo, además son microorganismos que tienen un periodo de vida corto de ahí que su

detección en todos los pozos esté indicando que se está dando una contaminación fecal reciente en el acuífero (29) (31) (54).

No obstante que los coliformes fecales en el suelo indiquen una contaminación reciente, es posible apreciar también el papel que desempeña el subsuelo en la atenuación y eliminación de éstos, lo cual se refleja en las cuentas bacterianas registradas que disminuyen con respecto a la profundidad.

Aunque generalmente las bacterias no siguen un patrón de distribución uniforme en el perfil del suelo, se desarrollan habitualmente en los primeros 30 cm de profundidad en relación a la cantidad de materia orgánica que se concentra en el horizonte "A" y disminuyen hacia los horizontes B y C en donde la mayoría de los casos la materia orgánica es menor. (8) (12) (22) (33) (70).

De acuerdo con la **tabla 3** y con los análisis edafológico, el suelo de la zona de estudio es del tipo migajón-arenoso-arcilloso, en donde el contenido de limos junto con la presencia de las arenas calcáreas en un 80% y arcillas en un 20% que favorecen la capacidad de intercambio iónico sustancial cuyo valor obtenido fue de 200 a 400 meq/Kg y un pH de entre 7 y 8, lo que facilita las reacciones del suelo con los contaminantes favoreciendo su infiltración y su adsorción.

TESIS CON
FACULTAD DE INGENIERIA

Tabla No. 2 Resultados bacteriológicos del suelo de los seis pozos de monitoreo en el acuífero del Valle del Mezquital, Hgo.

Profundidad	Bacterias Mesofilicas NMP/2.5 mg	Coliformes totales NMP/100 ml	Coliformes fecales NMP/100 ml
Pozo MA El Bondo, San Salvador. Mpo. De San Salvador			
MA 1 - 2.0 - 3.3 m	1,728	3,500	2
MA 2 - 5.0 - 6.5 m	128	20	2
MA 4 - 11.0 - 12.4 m	238	2	2
MA 5 - 15.0 - 16.4 m	448	2	2
MA 6 - 19.0 - 20.4 m	192	2	2
MA 7 - 24.0 - 25.4 m	18	2	2
MA 8 - 29.0 - 30.4 m	288	2	2
Pozo MB El Tinaco. Mpo. De Mixquiahuala			
MB 2 - 5.0 - 6.5 m	24	2	2
MB 3 - 7.5 - 9.0 m	384	90	2
MB 4 - 10.0 - 11.5 m	1,440	2	2
Pozo MC San José Boxav. Mpo. de Atitalaquia			
MC 1 - 2.4 - 4.0 m	160	49	2
MC 2 - 6.0 - 7.5 m	544	110	2
MC 5 - 13.5 - 15.0 m	99	2	2
MC 6 - 16.0 - 17.5 m	102	2	2
MC 7 - 18.5 - 20.0 m	207	2	2
MC 9 - 23.5 - 25.0 m	320	2	2
Pozo MD Cerro Colorado. Mpo. De Tezontepec			
MD 1 - 2.0 - 3.5 m	2,016	26	2
MD 2 - 4.5 - 6.0 m	1,152	5	2
MD 3 - 7.0 - 8.5 m	365	2	2
MD 4 - 9.5 - 11.0 m	137	2	2
MD 6 - 24.0 - 25.5 m	0	2	2
Pozo ME Tula. Mpo. de Tula			
ME 1 - 3.5 - 5.0 m	320	23	9
ME 2 - 6.0 - 7.5 m	113	1,100	460
Pozo MF Actopan. Mpo. de Actopan			
MF 1 - 2.5 - 4.0 m	79	93	11
MF 2 - 9.0 - 10.5 m	7,296	>2,400	>2,400
MF 3 - 11.5 - 13.0 m	55	9	9
MF 4 - 14.0 - 15.5 m	119	>2,400	3
MF 5 - 16.5 - 18.0 m	277	>2,400	4
MF 6 - 20.0 - 21.5 m	36	21	3
MF 7 - 23.5 - 25.0 m	92	>2,400	4

M: Mezquital. A,B,C,D,E,F: Indica cada uno de los pozos perforados.

NMP: Número más probable de bacterias encontradas en 100 ml de muestra.

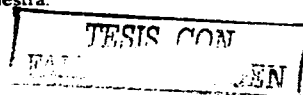


Tabla No. 3 Análisis edafológicos de la zona de estudio del Valle del Mezquital. Hgo.

Pozo	Color	pH	Densidad Real g/cm ³	Porosidad (%)	Textura	Intercambio Cationico total meq/kg
San Salvador, Mpo. San Salvador	Blanco, Gris claro, Gris rosado	7.4	1.2	44	Arena migajosa- Migajón arenoso	350.62
El Tinaco, Mpo. Mixquiahuala	Gris claro, Gris pardo, Gris café	8.2	2.19	44.33	Arena Migajón	200.59
San José Boxay Mpo. Atitalaquia	Café, Café rojizo, Gris olivo	7.1	2	46.5	Arcilla limoso, Arena migajosa, Migajón arenoso	400.09
Cerro Colorado, Mpo. Tezontepec	Café claro, Café amarillento, Amarillo rojizo	7.6	2.18	47.4	Arena migajosa, Migajón arenoso, Arena	410.20
Tula Mpo. Tula	Blanco	7.8	2.34	51.5	Migajón arenoso	310.9
Actopan, Mpo. Actopan	Gris claro, Gris rosado, Gris café	7.4	2.0	38.8	Arena migajosa, Migajón arenoso	310.86

TESIS CON
FALLA DE CUBIERTA

7.2.2. Análisis del Acuífero

Para el análisis bacteriológico del acuífero fue necesario aplicar una prueba estadística ANOVA de 3 factores 6 (Pozo) x 2 (Profundidad) x 2 (Epoca) para detectar las fuentes de variación.

Coliformes totales

En cuanto a los coliformes totales, la prueba de ANOVA indicó diferencias estadísticas significativas para el factor *pozo* $F(5,94)=2.85$; $p=0.02$, lo que significa que la concentración bacteriana está en función de las características de los pozos, y por lo tanto la contaminación es diferente para cada uno.

Para el factor *pozo*, el análisis de comparación múltiple de medias **Post Hoc de Duncan**, mostró la formación de tres grupos.

En el primer grupo se encuentra **San Salvador** el cual registró la más baja concentración bacteriana cuyo valor fue de 0.576 (4 NMP/100 ml). Este pozo se situó en una zona de descarga natural del acuífero, en donde existe una asociación de las aguas negras y subterráneas de retorno. Cuando se perforó, el agua emergió por diferencia de presiones originando tal vez un efecto de dilución. En este lugar existen varios pozos brotantes debido a que el área se ubica dentro de las elevaciones topográficas mas bajas del Valle (1940 msnm).

Otro factor que pudo influir en las cuentas bacterianas bajas, fue el hecho de que el acuífero en este pozo se monitoreó a una profundidad de 21 y 29 m a diferencia del resto de los pozos en donde se muestreó a los 7 y 11 m (**Fig. 13**).

El segundo grupo quedó integrado por los pozos de **Mixquiahuala, San José Boxay, Tula y Actopan**, cuyas concentraciones fueron 1.1475 (14 NMP/100 ml), 0.894 (8 NMP/100 ml), 1.3995 (25 NMP/100 ml) y 1.131 (14 NMP/100 ml) respectivamente.

El pozo de **Cerro Colorado** conforma el tercero con un valor de 1.571 (51 NMP/100 ml), registrando el mayor índice de contaminación bacteriana (**Fig. 13**).

Este pozo al igual que San Salvador también se situó en una zona de descarga natural del acuífero (manantial), que de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua, cuando ésta surgió su calidad era excelente por lo que se le dio el uso potable, sin embargo al paso del tiempo se ha venido deteriorando de forma gradual debido al incremento en las infiltraciones de las aguas residuales, así como también por la modificación que sufrió el flujo subterráneo, asociado a los fenómenos geológicos (fallas, acuífero) como resultado de la construcción de la presa **Requena**, dándose por ende un reemplazo de las aguas originales por las aguas negras que se descargan en dicha presa, además de las que se depositan en los canales no revestidos.

Coliformes fecales

En cuanto a los coliformes fecales la prueba estadística ANOVA mostró diferencias significativas para el **factor pozo** $F(5,94)=2.65$; $p=0.03$ y para el **factor profundidad** $F(1,94)= 8.89$; $p=0.004$.

La prueba **Post Hoc de Duncan** para el **factor pozo** arrojó la formación de tres grupos.

El primer grupo nuevamente quedó integrado por el pozo de **San Salvador y San José Boxay** con 0.253 (2 NMP/100 ml), y 0.564 (4 NMP/100 ml).

En el segundo se encuentran los pozos de **Mixquiahuala, Tula y Actopan**, cuyas concentraciones fueron de 0.809 (6 NMP/100 ml), 0.676 (5 NMP/100 ml) y 0.854 (7 NMP/100 ml) respectivamente.

El tercer grupo quedó representado por el pozo de **Cerro Colorado**, con la más alta concentración bacteriana, cuyo valor fue de 1.211 (16 NMP/100 ml) (**Fig. 14**).

Las concentraciones bacterianas registradas en este sitio son interesantes, pues actualmente el manantial aun se aprovecha para abastecer de agua potable a las poblaciones cercanas, aquí el agua recibe un tratamiento de cloración antes de entrar a la red de distribución, pero además existe un afluente que se utiliza para el regadío de cultivos donde los campesinos lavan sus verduras y aprovechan para bañarse. De ahí que el riesgo es inminente, no solo por el hecho de que la población utilice el agua de forma directa para su uso personal por la presencia de las bacterias coliformes, sino también por la existencia de amibas de vida libre, agentes causales de la meningoencefalitis además de otros padecimientos como la otitis y queratitis entre otros.

En cuanto a la evaluación de la calidad bacteriológica del acuífero, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-127SSA1-1996, que establece una cuenta máxima permitida de 2 NMP/100 ml para coliformes totales y no detectables o bien de 0 (cero) NMP/100 ml para coliformes fecales, se puede decir que este no cumple con los niveles permitidos para uso potable (19).

La Organización Panamericana de la Salud (OPS), indica que la presencia de algunos organismos coliformes en aguas subterráneas en una concentración de (1-10 UFC/100 ml de muestra) que no hayan sido tratadas puede tener poca importancia desde el punto de vista sanitario siempre y cuando no existan coliformes fecales (54).

La noria de Actopan y el manantial de Cerro Colorado reciben un tratamiento de cloración antes de entrar a la red para suministrar de agua potable a la mayor parte de la población de la zona.

Conforme a lo establecido por la Norma Oficial Mexicana el acuífero no es apto para utilizarse como agua potable, sin embargo de acuerdo con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua publicados en el Diario Oficial de la Federación en 1989 en los cuales se establece para fuentes de abastecimiento de agua potable un límite máximo de 1000 NMP/100 ml de coliformes, siempre y cuando se sometan a un proceso de potabilización para utilizarse para consumo humano, de acuerdo con esto, se infiere que el acuífero si puede emplearse para este fin (18).

En el Valle existen norias, pozos profundos y manantiales cuyas aguas se emplean de manera directa sin tratamiento alguno, lo que representa un riesgo para la salud pública, debido a la presencia de aislamientos bacterianos resistentes al cloro y de otros microorganismos que interfieren en la calidad del agua como algunos protozoos que además de ser vectores de agentes patógenos desarrollan estructuras de resistencia, de ahí la importancia que adquieren los procesos de desinfección (6) (19) (25) (37).

Entre los múltiples usos que se le da al acuífero está el agrícola; el 2.5 % del total del agua que se aprovecha para riego en algunas áreas proviene del acuífero, el 97.5 % restante lo aportan las aguas residuales. De acuerdo con los Criterios Ecológicos de 1989 y con las guías de calidad para la protección de ambientes acuáticos propuestos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (1991), recomiendan un límite máximo de 1000 NMP/100 ml en el agua con fines agrícolas, por lo anterior el acuífero se considera adecuado para esta actividad (18) (54).

Si bien la calidad del agua subterránea es la adecuada para la agricultura, en nuestro País desafortunadamente no es costeable aunque existen algunas zonas en donde se emplea el agua de pozo profundo cuando la prioridad inmediata es la de abastecer de agua potable a las poblaciones residentes, además de que en muchos de los casos los campesinos prefieren las aguas residuales para riego por la gran cantidad de nutrientes que llevan, lo que les asegura buenas cosechas.

Lo conveniente ante esta situación es que las aguas negras reciban un tratamiento previo antes de vertirse al suelo, para disminuir el riesgo directo tanto al agricultor como del consumidor, además de la contaminación de las aguas subterráneas.

Otro aspecto importante del uso de las aguas subterráneas en el Valle del Mezquital es la piscicultura de gran importancia en el municipio de San Salvador en donde se cultiva trucha, y mojarra, de acuerdo con los Criterios Ecológicos una concentración menor de 1000 NMP/100 ml, el agua es adecuada para este uso.

Sin embargo la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda evaluar el grado de contaminación que presenten las aguas para esta actividad y que establece un límite menor de 10 NMP/100 ml para coliformes fecales en el 80 % de las muestras y menos de 100 NMP/100 ml en el 20 % de las muestras restantes.

La existencia de zonas de descarga naturales del acuífero en el Valle del Mezquital con fines recreativos como balnearios, en especial en la región de San Salvador, adquieren importancia. De acuerdo con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua que establecen no más de 200 NMP/100 ml de coliformes fecales para uso recreativo con contacto primario, el agua si se considera apta para este fin.

Aunque se cumplan los niveles de calidad para organismos coliformes, no debe olvidarse que la presencia de éstos en el agua dan la pauta a establecer que existen otros microorganismos patógenos perjudiciales para el hombre, tanto por la ingesta del agua como por contacto directo, además de la presencia de amibas de vida libre las cuales no son consideradas en las guías de calidad de agua, y no obstante, son de gran importancia médica para el hombre por los dos padecimientos que causan, la meningoencefalitis amibiana primaria (MAP) y la encefalitis amibiana granulomatosa (EAG), cuya vía de entrada en el cuerpo humano por la inhalación de quistes y trofozoítos, sobre todo en individuos que practican el deporte de natación (17).

Todos estos resultados no solo establecen el grado de contaminación que existe en la zona, plantean además la posibilidad de proponer métodos adecuados de control en la vigilancia del agua natural de manera permanente en el que involucran no solo a los indicadores de contaminación fecal, sino a las amibas de vida libre entre otros microorganismos (54).

Bacterias mesofílicas

El estadístico ANOVA mostró diferencias significativas para el **factor pozo** $F(5,94)=4.106$; $p=0.002$, y para la **interacción época-profundidad** $F(=4.488)$, (p) de 0.038 (**Tabla 6**).

En cuanto al **factor pozo**, la prueba **Post Hoc de Duncan** indicó la formación de dos grupos.

En el primero quedó el pozo de **San Salvador** con 2.620 (417 NMP/100 ml), siendo nuevamente el de menor concentración bacteriana.

El segundo grupo quedó integrado por los cinco pozos restantes con valores por arriba de los (3600 NMP/100 ml) (**Fig. 15**).

Realmente, el recuento de bacterias mesofílicas no tiene gran valor en la determinación de contaminación fecal, no se consideran esenciales al evaluar la inocuidad de los abastecimientos de agua potable. Sin embargo su importancia radica en que su repentino incremento en el recuento de colonias da un indicio de una posible contaminación del acuífero (25) (54).

En lo que respecta al **factor profundidad** el análisis de ANOVA mostró diferencias estadísticas para los **coliformes fecales** $F(1,94)=8.89$; $p=0.004$. Mientras que para los **coliformes totales** y **mesofílicos** no se encontraron diferencias, $F(1,94)=2.34$; $p=0.13$ y $F(1,94)=1.58$; $p=0.21$.

La Prueba **Post Hoc de Duncan** aplicada a los coliformes fecales indicó diferencias estadísticas significativas cuyos valores fueron de 0.954 (9 NMP/100 ml) en la **profundidad uno** y 0.6144 (4 NMP/100 ml) en la **profundidad dos**, lo que quiere decir que la profundidad influyó en la distribución de las bacterias (**Fig. 16**).

En cuanto a las **épocas muestreadas**, el análisis de ANOVA de tres factores mostró que no existen diferencias estadísticas significativas para **coliformes totales** $F(1,94)=0.073$; $p=0.788$, ni para **Coliformes fecales** $F(1,94)=0.037$; $p=0.847$, y **mesofilicos** $F(1,94)=0.482$; $p=0.490$, lo que significa que la época lluviosa probablemente no fue un factor determinante en la concentración bacteriana. En sequía se obtuvo una cuenta bacteriana de 1.092 (3 NMP/100 ml) y 1.170 (3 NMP/100 ml) para coliformes totales, mientras que para los fecales se registraron valores de 0.784 (6 NMP/100 ml) en sequía y 0.759 (2 NMP/100 ml) en lluvias. Las bacterias mesofilicas registraron concentración de 3.598 (37 NMP/100 ml) en sequía y 3.692 (40 NMP/100 ml) para lluvias (**Figura 17**).

No es posible asegurar hasta el momento que el incremento del agua en la época lluviosa en la zona del Valle sea o no un factor que determine el grado de contaminación del acuífero. Para ello es conveniente realizar un mayor número de monitoreos, en donde puedan obtenerse datos más representativos que reflejen mejor el papel que juega el suelo en el grado de infiltración del agua y la existencia de un comportamiento estacional en la distribución de las bacterias.

Fig. 13. Coliformes totales encontrados en cada uno de los pozos en el acuífero del Valle del Mezquital.

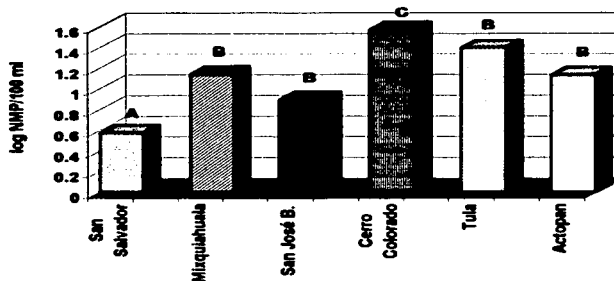
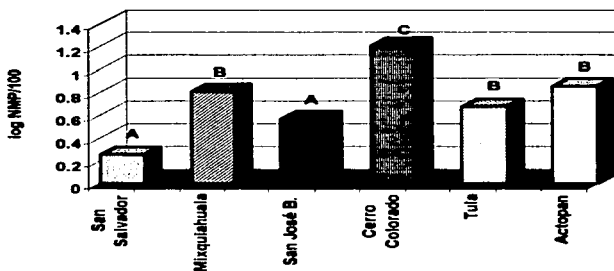
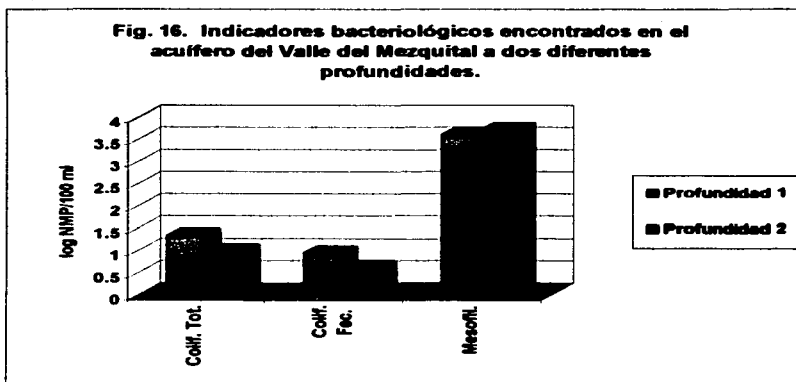
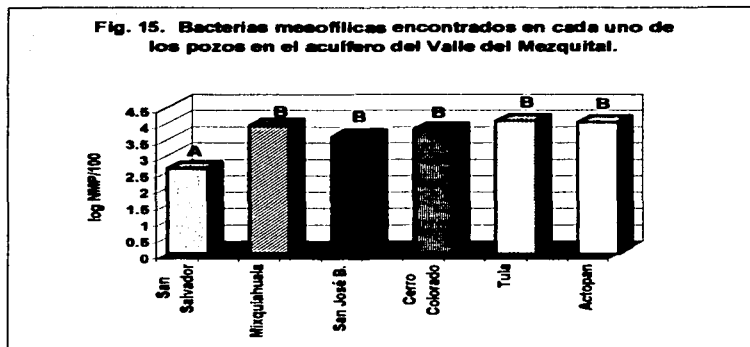


Fig. 14. Coliformes fecales encontrados en cada uno de los pozos en el acuífero del Valle del Mezquital.



Las letras A,B,C indican los grupos homogéneos formados por la prueba Post Hoc de Duncan ($p < 0.05$).

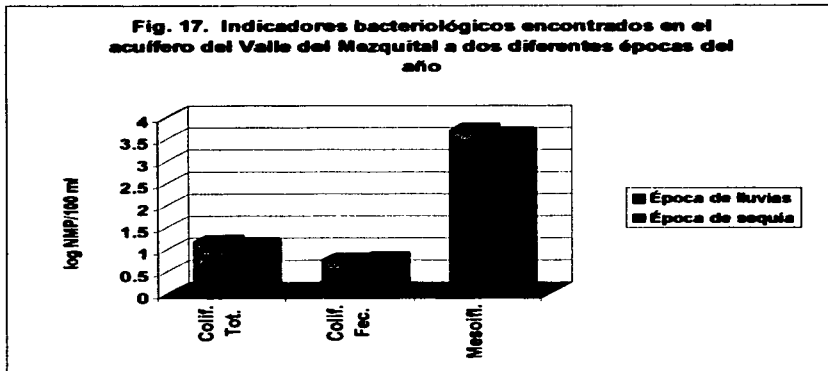
TESIS CON
PALLA DE ORIGEN



Las letras A,B,C indican los grupos homogéneos formados por la prueba Post Hoc de Duncan ($p < 0.05$).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 17. Indicadores bacteriológicos encontrados en el acuífero del Valle del Mazquital a dos diferentes épocas del año



Las letras A,B,C indican los grupos homogéneos formados por la prueba Post Hoc de Duncan ($p < 0.05$).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

7.3 Parámetros físicoquímicos

7.3.1 Análisis del acuífero

En la **Tabla 4** se muestran los parámetros físicoquímicos que registraron diferencias estadísticas significativas de acuerdo al ANOVA de 3 factores 6 (pozo) x 2 (época) x 2 (profundidad).

Para el **factor pozo**, los parámetros que registraron diferencias estadísticas significativas fueron: **temperatura** $F(5,94)=5.875$; $p=0.00$, **conductividad** $F(5,94)=29.354$; $p=0.00$, **sólidos disueltos** $F(5,94)=23.141$; $p=0.00$, **nitratos** $F(5,94)=12.458$; $p=0.00$, **nitritos** $F(5,94)=33.003$; $p=0.00$, **sulfatos** $F(5,94)=20.745$; $p=0.00$, **cloruros** $F(5,94)=84.429$; $p=0.00$ y **alcalinidad** $F(5,94)=13.404$; $p=0.00$.

La prueba de comparación múltiple de medias **Post Hoc de Duncan** para cada uno de los parámetros mostró lo siguiente:

Para la **conductividad**, la prueba mostró la formación de tres grupos. En el primero se encuentran los pozos de **San Salvador** y **Mixquiahuala** cuyos valores registrados fueron de 1623.6 y 1631.833 micromhos/cm respectivamente. El segundo lo integran, **San José Boxay**, **Cerro Colorado** y **Tula** con 1400.3, 1402.084 y 1469.584 mmhos/cm. El pozo de **Actopan** conforma el tercero con 2247.5 mmhos/cm, siendo el de mayor conductividad (**ver Fig. 18**).

El análisis indicó que los pozos de San José Boxay, Tula y Cerro Colorado comparten la misma conductividad y es que se ubicaron precisamente en los alrededores del Río Tula, y en el área de descarga de Cerro Colorado, lo que revela que el acuífero está fuertemente influenciado por las aguas de retorno mezcladas con aguas residuales.

A la fecha no existe un valor indicativo de conductividad para agua potable, sin embargo de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud es aceptable una conductividad menor de 500 mmhos/cm.

La conductividad registrada en el acuífero del Valle del Mezquital puede relacionarse en parte a su origen lacustre aluvial en donde las concentraciones de sodio y bicarbonatos de calcio representan la calidad natural del agua, y a los depósitos minerales, a las rocas volcánicas y calizas que conforman su suelo.

También se le puede asociar a los altos niveles de sales incorporadas por las aguas residuales (desechos domésticos, comerciales, agrícolas e industriales) que se inyectan al suelo y que por infiltración están llegando a la zona saturada.

En cuanto a los **sólidos disueltos totales**, la prueba **Post Hoc de Duncan** indicó la existencia de dos grupos, el primero lo integra los pozos de **San Salvador**, **Mixquiahuala**, **San José Boxay**, **Cerro Colorado** y **Tula** cuyas concentraciones oscilaron entre los 1100 a 1300 mg/L. El segundo grupo quedó representado por **Actopan** con la más alta concentración con un valor de 1762.5 mg/L. **Actopan** fue el que presentó el más alto contenido de SDT. Como se

cito anteriormente este pozo se situó al margen del canal Actopan, en donde probablemente los escurrimientos de éste influyen directamente sobre éste. Además un factor que presumiblemente está determinando la concentración de sólidos en este sitio, es el hecho de que este pozo no quedó perfectamente sellado y tal vez se esté dando una infiltración del material del subsuelo, contribuyendo de forma considerable en los niveles de los SDT (Fig. 19).

De acuerdo con La Norma Mexicana la cual establece 1000 mg/L de sólidos disueltos totales, ninguno de los pozos cumple con los niveles máximos permitidos (18).

No obstante, que el contenido de los sólidos disueltos totales están estrechamente relacionados con la composición química de los estratos rocosos, y en donde es común encontrar concentraciones de sólidos disueltos totales de 195 a 1100 mg/L, también se relacionan directamente con las descargas residuales urbano-industriales que se depositan en el suelo y que por procesos de lixiviación naturales llegan hasta el manto acuífero (54).

Aunque no se han registrado efectos fisiológicos nocivos por sólidos disueltos totales por arriba de los 1000 mg/L, se ha considerado como regla general que será **inaceptable** exceder este nivel, el cual se recomienda como valor guía (54).

Para los **nitratos**, la prueba **Post Hoc**, mostró tres grupos. El primero conformado por los pozos de **San Salvador** y **San José Boxay** con concentraciones de 15.275 y 13.389 mg/L respectivamente. El segundo grupo lo representan Cerro Colorado y Tula con 10.919 y 8.219 mg/L. El tercero quedó integrado por **Mixquiahuala** y **Actopan** siendo este último de mayor índice de contaminación cuyos valores fueron de 17.810 y 21.209 mg/L respectivamente (Fig. 20).

De acuerdo con La Norma Mexicana que establece un máximo permisible de 10.0 mg/L, solo Tula quedó dentro del valor guía (18).

En cuanto a los **nitritos**, la prueba **Post Hoc**, reveló la existencia de tres grupos. El primero integrado por los pozos de **San Salvador**, **Mixquiahuala**, **San José Boxay** y **Tula** cuyos valores oscilan entre 0.000 a 0.012 mg/L. El segundo grupo lo representa **Cerro Colorado** con 0.024 mg/L y el tercero por **Actopan** con 0.067 mg/L siendo el de más alta concentración (Fig. 21).

De acuerdo con La Norma Mexicana que establece 0.05 mg/L, sólo Actopan no cumple con los niveles establecidos (18).

En la **tabla I del anexo**, se observa en detalle que los pozos de San Salvador y Mixquiahuala se presentan valores de 0, este dato no significa que no se hallan registrado nitritos, el valor citado más bien, se refiere al límite de detección de la técnica empleada, que es de 0.005 a 0.050 miligramos de N/L, por lo que la concentración pudo estar por debajo de los 0.005 mg.

La presencia de los nitratos y nitritos en el acuífero está estrechamente relacionado con la descarga directa de las aguas residuales que por percolación a lo largo del tiempo (puede ser después de varios años) llegan a la zona saturada, además del uso de fertilizantes, materia descompuesta de animales y vegetales, y el arrastre pluvial. De acuerdo con la OPS, los niveles de nitrato en el agua típicamente están por debajo de los 5 mg/L, aunque en ciertas fuentes pueden exceder los 10 mg/L (54).

En numerosos estudios realizados se han encontrado niveles de nitratos que fluctúan entre 20 y más de 200 mg/L en aguas superficiales, aunque los niveles más altos de nitrato se encuentran en las aguas subterráneas, ya que tienden a ser más estables durante un año (54).

Se dispone de información suficiente y adecuada como para sustentar que en ciertos países, en donde los abastecimientos de agua que contenían niveles elevados de nitratos fueron los responsables de casos de metahemoglobinemia y de muerte en infantes. Los alcances de este problema de carácter mundial se estudio por la O.M.S. (1996), por lo que se recomendó que los abastecimientos de agua que contengan niveles de nitratos (>100 mg/L) no deben de utilizarse para la preparación de alimentos. No se tiene conocimiento de casos de metahemoglobinemia infantil en zonas donde el agua potable contenga menos 10 mg/L de nitratos. Este aspecto no está bien confirmado, pues son muchos los infantes que han consumido niveles mucho más altos que éste y que no han desarrollado ninguna enfermedad, solo un 2.3% de todos los casos se asocia con los niveles de nitratos entre 10 y 20 mg/L (54).

Para los **cloruros**, la prueba **Post Hoc**, mostró la formación de cinco grupos. El primero integrado por los pozos de **San Salvador** y **San José Boxay** cuyos valores fueron de 247.93 y 257.15 mg/L. El segundo grupo lo formó **Mixquiahuala** con 196.009 mg/L. El tercero lo integra **Cerro Colorado** con 135.196 mg/L. El cuarto por **Tula** que registró la más baja concentración con un valor de 89.412 mg/L. Y el quinto y último por **Actopan** con 369.471 mg/L, que registró la más alta concentración fue (ver Fig. 22).

La Norma Mexicana establece un límite máximo permisible de 250 mg/L, **San José Boxay** y **Actopan** estuvieron por arriba de los niveles permitidos (18).

La presencia de los cloruros en el agua resulta en gran medida de las descargas de efluentes de las enormes descargas de aguas residuales de las industrias químicas y que por efecto de las infiltraciones a través de las prácticas de riego que llegan a las aguas subterráneas.

Las concentraciones considerables de nitratos y cloruros que comparten los pozos de Tula y Cerro Colorado indican una clara contaminación con aguas residuales ya que estos iones no se afectan por la actividad geotérmica dada por la presencia de la planta termoeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad ubicada en la parte sur del Valle (11) (12).

En cuanto a los sulfatos, la prueba **Post Hoc** arrojó tres grupos. El primero quedó integrado por los pozos de **San Salvador, Mixquiahuala, San José Boxay y Cerro Colorado** cuyas concentraciones oscilaron entre 76 a 136 mg/L. El segundo quedó integrado por **Tula** con 408.283 mg/L. **Actopan** conformó el tercero con 482.321 mg/L, siendo el de mayor concentración (**ver Fig. 23**).

El pozo de Tula presentó los niveles más altos de sulfatos con respecto a los pozos de San José Boxay, Cerro Colorado, Mixquiahuala, probablemente se deba al hecho de que la dirección de las aguas subterráneas va de sur a norte y quizás se esté dando un efecto de dilución (11) (12).

Los sulfatos llegan al medio acuático por los desechos provenientes de una multiplicidad de industrias, como la metalúrgica.

Su concentración en las aguas dulces es muy baja, son comunes los niveles entre 20 y 50 mg/L. La dosis mínima letal que se ha informado del sulfato de magnesio en los mamíferos es de 200 mg/Kg de peso corporal. Se ha observado que en concentraciones por arriba de 1000 mg/L actúa como purgante en individuos normales, aunque en personas sensibles responden incluso a niveles de sulfato de magnesio incluso de solo 400 mg/L (54).

De acuerdo con la Norma que establece 400 mg/L, solo Tula y Actopan estuvieron fuera de los límites establecidos (18).

En forma general Actopan registró los índices más altos de contaminación. En Junio de 1996 se realizó una piezometría por la Comisión Nacional del Agua, midiendo la profundidad del nivel estático de todos los aprovechamientos de la zona de estudio (norias, pozos, etc.). El estudio demostró por un lado que el agua subterránea se mueve en una dirección preferencial de sur a norte. Y en la parte noreste de la zona el nivel estático es de 2050 msnm al oeste de Actopan y de 1935 msnm en la zona de San Salvador, lo que sugiere que el flujo en esta zona va de Actopan a San Salvador, lo que justifica el que el pozo de Actopan haya sido el más contaminado, mostrando así un comportamiento independiente (12).

Por otro lado, aunque los otros cinco pozos registraron algunas diferencias estadísticas significativas en algunos parámetros fisicoquímicos, realmente la química del agua es la misma.

En la parte sur de la zona los niveles someros se localizaron en Atitalaquia 2080 msnm y se profundiza hacia Tlahuelilpan 2050 msnm en dirección del río Salado, cambiando la dirección del flujo ligeramente hacia Mixquiahuala. Hacia la zona sur el flujo va de Teocalco donde se tienen elevaciones del nivel estático de 2070 msnm, hacia el este de Cerro Colorado con elevaciones de 2065 msnm.

Este estudio piezométrico junto con estudios geológicos del área pueden definir el sistema general de flujo del agua subterránea. La Comisión Nacional del Agua propone un modelo

conceptual en el que se contempla bajo las condiciones de preirrigación, la existencia de dos cuencas de agua subterránea vecinas asociadas con el Valle Salado-Tula y el Valle de Actopan en el este, cuyo régimen de flujo esta modificada por el incremento de agua residual importada y la consecuente extensión del riego (12).

Por otro lado, a excepción del sitio en donde se ubica el pozo El Tinaco con 80 años de riego con aguas negras, los cinco restantes comparten el mismo historial de 30-40 años, por lo que la influencia de las aguas de riego es la misma en todas las zonas de muestreo.

En 1962, aparentemente el primer análisis químico realizado dentro de la zona de riego del Valle, reveló la contaminación de las aguas subterráneas por las aguas residuales a nivel somero, en donde las norias situadas cerca de los ríos Salado y Tula presentaron concentraciones de nitratos y cloruros superiores a las del agua potable. Por otro lado el agua de pozo profundo presentó buena calidad.

En cuanto a la **alcalinidad**, la prueba **Post Hoc** reveló la presencia de tres grupos. El primero quedó integrado por **San José Boxay, Cerro Colorado, y Tula** con concentraciones que van de los 390 a los 560 mg/L. En el segundo por los pozos de **San Salvador, y Mixquiahuala** con valores de 561.91, 587.542 mg/L. y **Actopan** con el más alto índice de contaminación conformó el tercer grupo cuyo valor fue de 615.196 mg/L (**Fig. 24**).

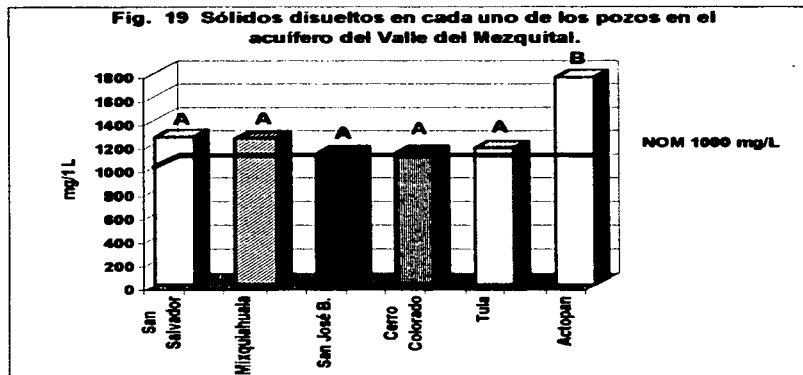
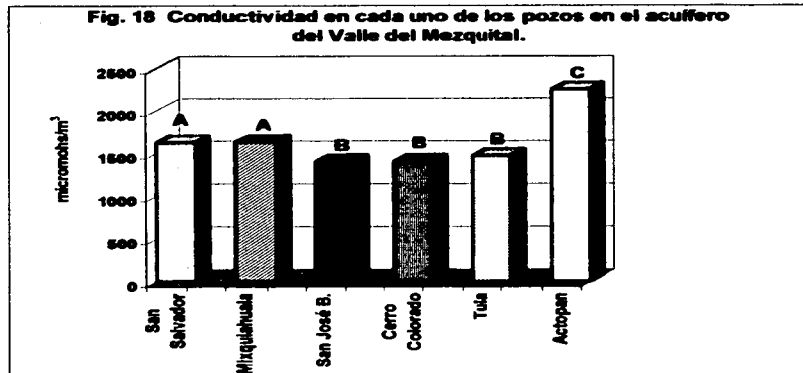
De acuerdo con la Norma que establece 400 mg/L, solo San José Boxay estuvo dentro de los límites establecidos (18).

Para mayor detalle de los valores obtenidos para cada pozo, (ver **tablas I, II y III en el Anexo**).

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos que presentaron diferencias estadísticas significativas de acuerdo la prueba ANOVA ($p < 0.05$) de 3 factores 6 (Pozo) x 2 (Profundidad) x 2 (Época).

Fuentes De variación	pH	Temp.	Conduct.	Sólidos totales	Sólidos disueltos	Nitratos	Nitritos	Cloruros	Sulfatos	Alcalinidad
Pozo		*	*	*	*	*	*	*	*	
Profundidad					*				*	
Época	*		*	*	*	*				
Época-pozo					*		*	*		
Época-Profundidad							*			
Pozo-Profundidad				*	*		*		*	
Pozo-Prof.-Época	*		*	*	*	*	*			*

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Las letras A,B,C indican los grupos homogéneos formados por la prueba Post Hoc de Duncan ($p < 0.05$).

TESIS CON
FALLA DE CUBIEN

Fig. 20 Nitratos en cada uno de los pozos del acuífero del Valle del Mezquital.

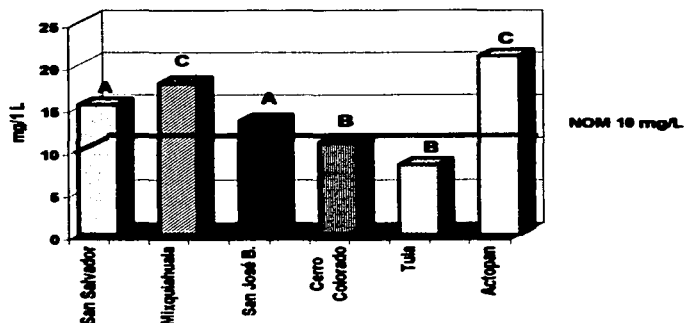
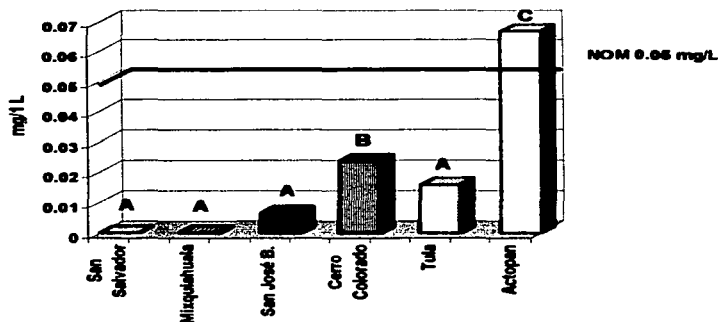
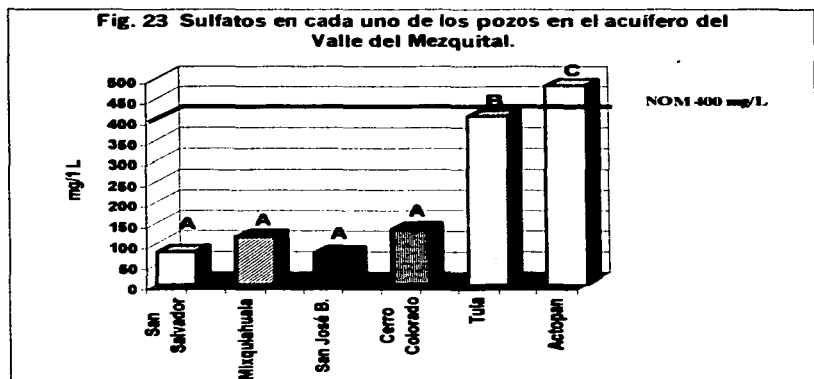
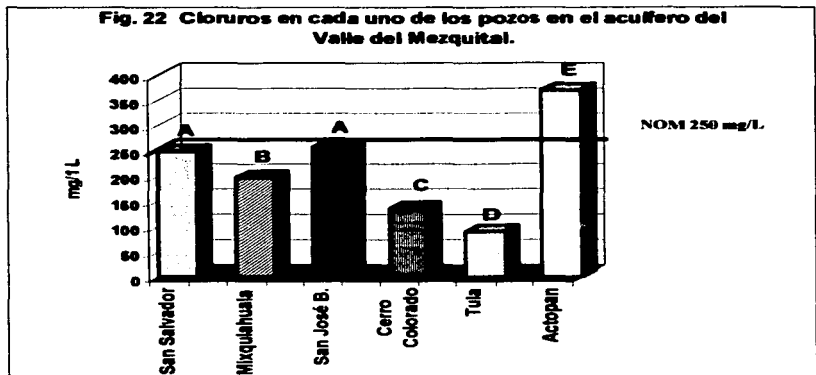


Fig. 21 Nitritos en cada uno de los pozos en el acuífero del Valle del Mezquital.

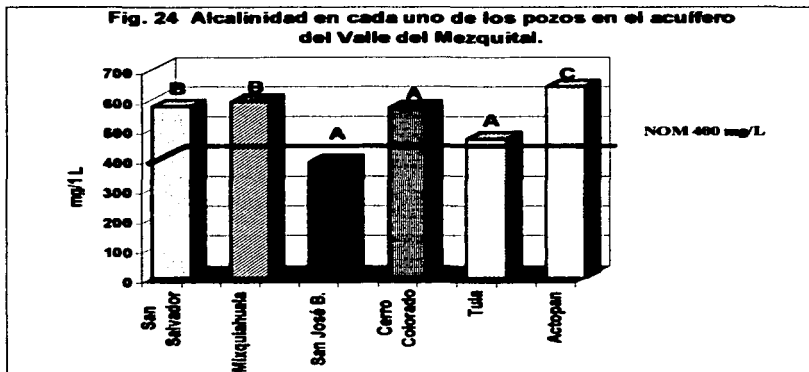


Las letras A,B,C indican los grupos homogéneos formados por la prueba Post Hoc de Duncan ($p < 0.05$).



Las letras A,B,C indican los grupos homogéneos formados por la prueba Post Hoc de Duncan ($p < 0.05$).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Las letras A,B,C indican los grupos homogéneos formados por la prueba Post Hoc de Duncan ($p < 0.05$).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Con respecto al **factor profundidad** el análisis de ANOVA se registraron diferencias estadísticas significativas en los sólidos disueltos totales $F(1,94)=19.49$; $p=0.00$ y para los sulfatos $F(1,94)=17.88$; $p=0.00$.

Los **sólidos disueltos totales** registraron 1175.95 mg/L en la profundidad uno y 1309.735 mg/L en la dos. Mientras que los **sulfatos** presentaron 163.3481 y 267.5062 mg/L respectivamente (**Tabla 5**).

Los resultados indican la alta tasa de lixiviación de iones que se está dando en el Valle, asociado por un lado a la litología de la zona (material aluvial-fluvial constituido por gravas, arenas y limos) los cuales son considerados de buena permeabilidad.

Además de la naturaleza de cada uno de los iones, algunos son más móviles, tal es el caso de los sulfatos, los cuales se lixivian fácilmente acumulándose en las zonas más profundas del suelo hasta llegar incluso a las aguas subterráneas, sobre todo en el Valle en donde las aguas freáticas están a poca profundidad, y si a esto se le agregan los volúmenes de aguas negras que se depositan en el suelo día con día y que llevan grandes cantidades de sulfatos.

En cuanto al **factor época** se obtuvieron diferencias estadísticas significativas para pH, conductividad, sólidos disueltos totales y nitratos.

El **pH** promedio registrado en sequía fue de 7.31, mientras que en lluvia fue de 6.88. La **conductividad** detectada fue de 1684.607 y 1540.758 micromhos/m3 respectivamente. En cuanto a **sólidos totales** se registraron 1402.786 en sequía y 1233.911 mg/L en lluvias, y para **sólidos disueltos** las concentraciones fueron de 1321.143 y 1219.759 mg/L respectivamente y finalmente para los **nitratos** se obtuvieron valores de 16.550 en sequía y 11.627 en lluvias (**Tabla 6**).

En cuanto al **pH** del agua, se aprecia claramente como en época de precipitación bajan los niveles de los contaminantes, generalmente el pH del suelo tiende a acidificarse con la precipitación, a medida que esta aumenta como resultado de una serie de reacciones de oxidación-reducción, lo que trae consigo un agotamiento de cationes básicos repercutiendo directamente en el pH y conductividad del agua, sin olvidar el efecto de dilución que pudiera presentarse.

Realmente el movimiento del agua en la zona no saturada puede ser compleja y es difícil de predecir su capacidad para atenuar contaminantes. En muchos casos el grado de atenuación será dependiente del tiempo de residencia y que a su vez se determinan por sus características hidráulicas, además de la geología del suelo.

Por otra parte, en cuanto al **factor pozo** y el **factor profundidad** no se registraron diferencias significativas, se presentó un comportamiento muy homogéneo en los seis pozos con un intervalo de 6.8 a 7.3.

Con respecto a la **temperatura**, esta también fue muy homogénea durante los nueve meses del estudio, en cada uno de los seis pozos, así como en las dos profundidades muestreadas, el intervalo fue de 17.8 a 21.3 °C.

Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos que presentaron diferencias estadísticas significativas para el factor profundidad.

PARÁMETRO	PROFUNDIDAD 1	PROFUNDIDAD 2
Sulfatos	163.348 ± 30.094	267.506 ± 36.424
Sólidos disueltos totales	1175.950 ± 54.839	1309.737 ± 47.592

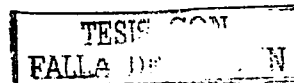
Valor promedio + error estandar.

Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos que presentaron diferencias estadísticas significativas para el factor época.

PARÁMETRO	SEQUÍA	LLUVIAS
pH	7.31 ± 0.047	6.88 ± 0.056
Conductividad	1684.607 ± 71.674	1540.758 ± 47.605
Sólidos totales	1402.786 ± 78.096	1233.911 ± 46.337
Sólidos disueltos totales	1321.143 ± 63.577	1219.759 ± 44.100
Nitratos	16.550 ± 1.571	11.627 ± 0.551

Valor promedio ± error estándar.

Los valores correspondientes para todos los parámetros determinados en época y profundidad se aprecian en las tablas IV y V del anexo.



7.4 Amibas de vida libre

7.4.1 Análisis del Suelo.

En la **tabla 7 y 7a**, se resumen las especies de amibas de vida libre encontradas en los núcleos de suelo, *Acanthamoeba* fue la más representativa con sus diferentes especies, junto con *Hartmannella vermiformis* se presentaron en todos los pozos desde los 2 hasta los 30 m de profundidad.

En el pozo de **Tula** solo se aisló a *Hartmannella vermiformis* hasta los 7 m de profundidad, cabe recordar que en es sitio por cuestiones edáficas (textura, estructura) solo se obtuvieron dos núcleos de suelo, de ahí que el número de aislamientos halla sido el mínimo.

Así mismo en el **Tinaco** solo se perforó hasta los 11 m de profundidad debido a que se llegó al material de origen (roca madre), solo se obtuvieron tres núcleos, de donde se aisló a *Acanthamoeba triangularis*, *A. castellanii*, *A. quina*.

En el pozo de **San Salvador** fue en donde se obtuvo el mayor número de aislamientos, se encontró a *A. tubiashii* en los tres primeros metros de profundidad, y *A. quina*, *A. castellanii*, *A. triangularis* hasta los 30 m de profundidad

En **San José Boxay** se aisló a *Acanthamoeba lenticulata*, además de otras especies de *Acanthamoeba* y *Hartmanella*.

En **Cerro Colorado** se aisló a *A. castellanii* y *A. culbertsoni*.

En **Actopan** se aisló a *A. castellanii* y *A. astronyxis* junto con *hartmannella vermiformis* hasta los 25 m de profundidad.

Otras especies que se aislaron, que aunque no tienen importancia médica pero que juegan un papel importante en el control bacteriano en el sistema fueron *Filamoeba nolandi* en San José Boxay a los 17 m, *Valkampflia enterica* en Cerro Colorado a los 25 m y *Leptomyxa sp.*, en Actopan a los 25 m de profundidad.

La temperatura registrada en el acuífero de 18 a 22 °C favoreció el desarrollo de este tipo de amibas, en particular los integrantes del género *Acanthamoeba*, están ampliamente distribuidos, toleran temperaturas bajas, y crecen perfectamente por debajo de 25-35 °C. Otra característica que favorece al género *Acanthamoeba* es la facultad de formar quistes muy resistentes a cambios adversos del ambiente, incluso se ha reportado que son capaces de sobrevivir y permanecer viables por periodos prolongados desde días, semanas hasta meses, incluso bajo condiciones de baja salinidad, concentraciones mínimas de oxígeno y a altas temperaturas. En el laboratorio se conservan por más tiempo a diferencia de los quistes de *Naegleria* y *Hartmannella* (16) (21) (39) (59).

Las amibas de vida libre al igual que muchos otros protozoos comunes del suelo conforman la fauna normal, generalmente se distribuyen en la zona de la rizósfera, son capaces de adaptarse a un amplio rango de factores físicos y químicos dado sus características morfológicas y fisiológicas como su tamaño pequeño, estructura simple, flexible, su alta capacidad de multiplicarse bajo condiciones favorables para la búsqueda de alimento, así como el desarrollo de mecanismos de adaptación ante fluctuaciones de humedad para tolerar la desecación, salinidad, pH, y temperatura. Hay indicios de que en un pequeño porcentaje los quistes pueden sobrevivir a la congelación. (8) (16) (38) (72) (73).

Todos estos mecanismos de adaptación han favorecido su colonización hasta zonas muy profundas del suelo, incluso hasta en los sistemas de aguas subterráneas especialmente cuando existen poblaciones bacterianas en altas densidades, que junto con las condiciones edáficas aseguran su supervivencia en estos ambientes (14) (19).

Definitivamente la textura y estructura del suelo influye determinadamente en la distribución de estos protozoos, en el que la porosidad dado por los porcentajes de arena (60-80 %), arcillas y limos, genera ambientes propicios para el desarrollo de éstos, lo que explica la presencia de amibas de vida libre hasta los 30 m de profundidad. Sin embargo conocer más sobre la distribución de estos microorganismos en el suelo y las aguas subterráneas está fuera de alcance en este estudio, sería necesario realizar trabajos más específicos en el campo del conocimiento de la población de las amibas de vida libre en los suelos, así como en la implementación de métodos de identificación y cuantificación en estos ambientes (66) (73).

Por otro lado se ha observado que especies no formadoras de quistes tal como el género *Mayorella* toman ventaja en ambientes con suficiente alimento y humedad, sin embargo cuando este falta mueren en un tiempo relativamente corto (21).

Tabla No. 7. Amibas de vida libre aisladas de los núcleos de suelo de los seis pozos de monitoreo en el acuífero del Valle del Mezquital, Hgo.

Nombre del Pozo	Muestra de suelo. Profundidad en metros	Especie amibiana
1.-El Bondho, San Salvador	2.0-3.5	<i>Hartmannella vermiformis</i> <i>Acanthamoeba tubiushi</i> (Grupo I) (Page, 1988) <i>Acanthamoeba quina</i> (Grupo II) (Page, 1988)
	5.0-6.5	<i>Hartmannella vermiformis</i> <i>Acanthamoeba quina</i> (Grupo II) (Page, 1988)
	11.0-12.5	<i>Hartmannella vermiformis</i> <i>Acanthamoeba quina</i> (Grupo II) (Page, 1988)
	15.0-16.5	<i>Hartmannella vermiformis</i>
	19.0-20.5	<i>Hartmannella vermiformis</i> <i>Acanthamoeba quina</i> (Grupo II) (Page, 1988) <i>Acanthamoeba triangularis</i> (Grupo II) (Page, 1988) <i>Acanthamoeba castellanii</i> (Grupo II) (Page, 1988)
	24.0-25.5 29.0-30.5	<i>Hartmannella vermiformis</i> <i>Hartmannella vermiformis</i> <i>Acanthamoeba triangularis</i> (Grupo II) (Page, 1988)
2.- El Tinaco, Mixquiahuala	5.0-6.5	No determinado
	7.5-9.0	<i>Hartmannella vermiformis</i> <i>Acanthamoeba castellanii</i> (Grupo II) (Page, 1988) <i>Acanthamoeba triangularis</i> (Grupo II) (Page, 1988)
	10.0-11.5	<i>Hartmannella vermiformis</i> <i>Acanthamoeba quina</i> (Grupo II) (Page, 1988) <i>Acanthamoeba castellanii</i> (Grupo II) (Page, 1988)
3.- San José Boxay	2.5-4.0	<i>Hartmannella vermiformis</i> <i>Acanthamoeba castellanii</i> (Grupo II) (Page, 1988) <i>Acanthamoeba culbertsoni</i> (Grupo III) (Page, 1988)
	6.0-7.5	<i>Hartmannella vermiformis</i> <i>Acanthamoeba castellanii</i> (Grupo II) (Page, 1988) <i>Acanthamoeba triangularis</i> (Grupo II) (Page, 1988)
	13.5-15.0	No determinado
	16.0-17.5	<i>Hartmannella vermiformis</i> <i>Filamoeba nolandi</i>
	18.5-20.0	<i>Hartmannella vermiformis</i> <i>Acanthamoeba culbertsonii</i> (Grupo III) (Page, 1988) <i>Acanthamoeba lenticulata</i> (Grupo III) (Page, 1988)
	23.5-25.0	<i>Hartmannella vermiformis</i>

Tabla No. 7a. Amibas de vida libre aisladas de los núcleos de suelo de los seis pozos de monitoreo en el acuífero del Valle del Mezquital, Hgo.

Nombre del Pozo	Muestra de suelo. Profundidad en metros	Especie amibiana
4.- Cerro Colorado	2.0-3.5	<i>Hartmannella vermiformis</i>
	4.5-6.0	No determinado
	7.0-8.5	<i>Hartmannella vermiformis</i>
	9.5-11.0	No determinado
	24.0-25.5	<i>Valkampfia enterica</i> <i>Acanthamoeba castellanii</i> (Grupo II) <i>Acanthamoeba culbertsoni</i> (Grupo III)
5.- Tula	3.5-5.0	<i>Hartmannella vermiformis</i>
	6.0-7.5	<i>Hartmannella vermiformis</i>
6.- Actopan	2.5-4.0	<i>Acanthamoeba castellanii</i> (Grupo II)
	9.0-10.5	No determinado
	11.5-13.0	No determinado
	14.0-15.5	No determinado
	16.5-18.0	No determinado
	20.0-21.5	<i>Hartmannella vermiformis</i>
	23.5-25.0	<i>Leptomyxa</i> sp. <i>Acanthamoeba astronyxis</i> (Grupo I)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

7.4.2. Análisis del Acuífero

En la **figura 25** se observan los géneros amibianos encontrados en el acuífero con su respectivo número de aislamientos totales durante los nueve meses de monitoreo, del total de 229 aislamientos amibianos, el género *Acanthamoeba* fue el más abundante con 149 aislamientos, el segundo lugar lo ocupa el género *Hartmannella* con 36, en tercero está *Vanella* con 16, le sigue *Mayorella* con 14, de *Valkampfia* se registraron 5, *Platyamoeba* 8 y finalmente *Naegleria* con un solo aislamiento.

En la **figura 26** se observa el número de aislamientos amibianos totales para cada uno de los pozos. En donde **San Salvador** registró el mayor número con 48 aislamientos, en segundo lugar fue **San José Boxay** con un total de 44, **Actopan** con 38, **Tula** con 37, **Cerro Colorado** con 35 aislamientos y finalmente el pozo de **Mixquiahuala** con 25.

En cuanto a las profundidades muestreadas, no se apreció una diferencia considerable en el número de amibas aisladas, en la profundidad uno se obtuvieron 110 aislamientos y 115 en la dos (**Fig. 27**).

Para las épocas muestreadas, en sequía se aislaron un total de 63 aislamientos de amibas y 160 en lluvias (**Fig. 28**).

Acanthamoeba con sus 149 aislamientos amibianos fue la más abundante y con mayor diversidad. *A. polyphaga* fue la más abundante con 25 aislamientos, en segundo lugar *A. culbertsoni* con 21 y *A. castellanii* con 4 (**Fig. 29**).

En la **Tabla 8** se observan las frecuencias para cada una de las especies amibianas en el acuífero, en donde se aprecia que *Hartmannella vermiformis* fue la de más alta frecuencia para todos los pozos, registrándose en San Salvador siete meses, en Actopan cinco y dos en el pozo de Tula.

Entre las especies del género *Acanthamoeba*, *A. polyphaga*, *A. lenticulata*, *A. culbertsoni* fueron las de mayor frecuencia, y de menor *A. comandoni* y *A. tubiashi*, *Naegleria sp.* se registró solo en un mes en el pozo de San José Boxay.

Las especies amibianas encontradas en cada uno de los pozos mostraron un comportamiento estacional, registrando un ligero incremento a partir del mes de Agosto, que abarca parte de la época cálida-lluviosa, disminuyendo conforme se aproxima la época fría (**ver tablas VII a la XII en el anexo**). Generalmente en el invierno los protozoos solo permanecen activos bajo la capa superior del suelo. En suelos salinos en donde las sales se acumulan en la superficie, los protozoos tienden a distribuirse en el horizonte B debido a la disminución de la concentración de sales (8) (70).

Fig. 25 Géneros amibianos aislados en el acuífero del Valle del Mezquital.

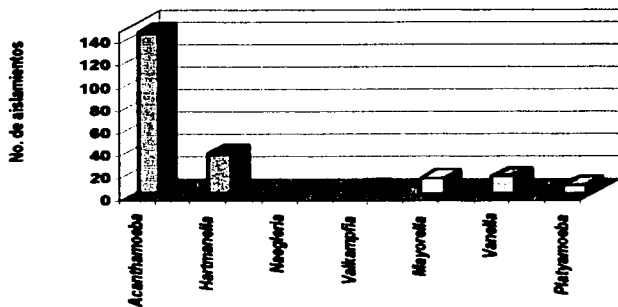
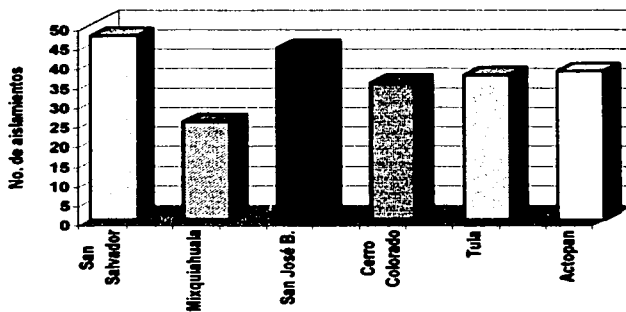


Fig. 26 Aislamientos amibianos totales para cada uno de los seis pozos del acuífero del Valle del Mezquital.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 27 Aislamientos ambientales totales en dos profundidades del Acuífero del Valle del Mezquital

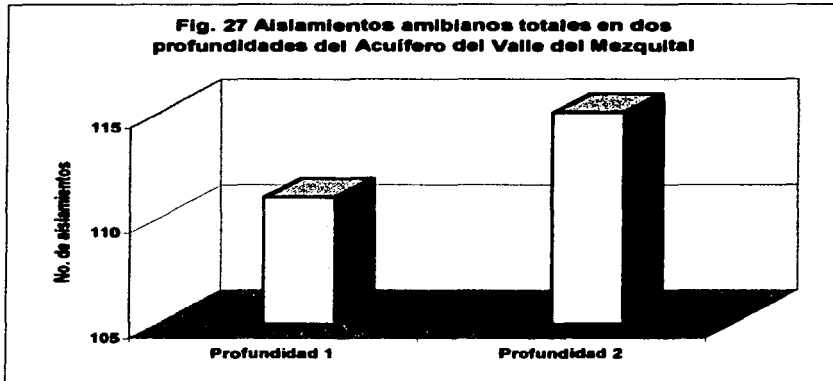
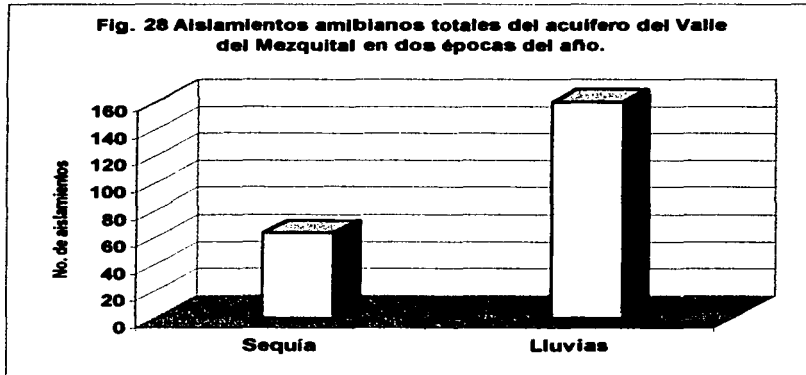
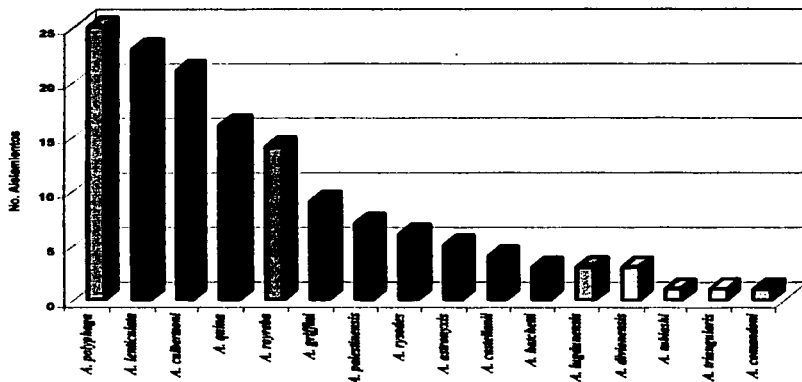


Fig. 28 Aislamientos ambientales totales del acuífero del Valle del Mezquital en dos épocas del año.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 29 Abundancia de las especies representativas del Género *Acanthamoeba* a lo largo de todo el estudio del acuífero del Valle del Mezquital, Edo. Hgo.



La información de la gráfica se encuentra en la tabla VI del Anexo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla No. 8. Frecuencia de los géneros amibianos aislados en cada uno de los seis pozos.

Especie amibiana	Pozo 1 Frecuencia	Pozo 2 Frecuencia	Pozo 3 Frecuencia	Pozo 4 Frecuencia	Pozo 5 Frecuencia	Pozo 6 Frecuencia
<i>Hartmannella vermiformis</i>	7	3	4	3	2	5
<i>Hartmannella cantabrigiensis</i>	3	0	3	1	1	2
<i>Acanthamoeba quina</i>	2	1	3	4	0	4
<i>Acanthamoeba royreba</i>	2	3	3	1	1	3
<i>Acanthamoeba palestinensis</i>	1	2	1	0	2	1
<i>Acanthamoeba lenticulata</i>	4	3	2	4	5	2
<i>Acanthamoeba polyphaga</i>	5	4	4	2	3	4
<i>Acanthamoeba triangularis</i>	1	0	4	0	2	0
<i>Acanthamoeba culbertsoni</i>	2	2	2	3	4	4
<i>Acanthamoeba hatchetti</i>	1	0	0	1	0	1
<i>Acanthamoeba astronyxis</i>	0	0	2	0	1	1
<i>Acanthamoeba griffini</i>	1	2	1	2	1	3
<i>Acanthamoeba ryzodes</i>	1	1	0	1	0	2
<i>Acanthamoeba lugdunensis</i>	0	2	0	0	1	0
<i>Acanthamoeba castellanii</i>	0	0	1	2	1	0
<i>Acanthamoeba divionensis</i>	0	0	0	2	0	0
<i>Acanthamoeba comandoni</i>	0	0	1	0	0	0
<i>Acanthamoeba tubiashti</i>	0	0	0	0	1	0
<i>Valkampfia avara</i>	0	1	1	0	1	0
<i>Valkampfia enterica</i>	0	0	0	1	0	1
<i>Naegleria sp.</i>	0	0	1	0	0	0
<i>Vanella inornata</i>	2	0	1	0	0	2
<i>Vanella platypodia</i>	1	0	2	2	2	1
<i>Platyamoeba stenopodia</i>	0	0	1	0	0	0
<i>Platyamoeba placida</i>	0	0	1	1	2	0
<i>Mayorella cultura</i>	2	0	3	0	3	2
<i>Mayorella microcrupta</i>	2	0	0	0	0	0
<i>Mayorella spatula</i>	0	0	0	0	1	0

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

7.4.3. Pruebas de patogenicidad

Del total de 229 aislamientos de amibas de vida libre, la prueba de patogenicidad se llevó a cabo solamente en las especies del género *Acanthamoeba* debido a que de todos los géneros aislados es en el que se reportan especies potencialmente patógenas. De las 149 amibas aisladas, solo a 68 se sometieron a la prueba por motivos de capacidad del laboratorio. Cada aislamiento se probó en un lote de cinco ratones machos línea CD1 vía inoculación nasal y se monitorearon 21 días (55).

El aislamiento de *Naegleria sp.* no fue posible realizarle la prueba de patogenicidad ya que son amibas que no se adaptan fácilmente a los medios de cultivo y mueren en corto tiempo.

De los 68 aislamientos probados, *A. culbertsoni* resultó ser patógena; la amiba mató todos los ratones en el lapso de los 21 días de prueba y se recuperaron de cerebro, pulmón, hígado y riñón (Tabla 9).

Por su parte, los aislamientos de *A. mauritaniensis*, *A. castellanii*, *A. polyphaga*, *A. quina*, *A. lenticulata*, *A. royreba*, y *A. rhyodes* se reportaron como invasivas, lo que significa que mataron al menos 2 o 3 ratones cumplidos los 21 días de monitoreo, los ratones se sacrificaron y se recuperó la amiba de los órganos antes citados (Tabla 9).

Por otro lado los aislamientos de *A. lugdunensis*, *A. astronyxis*, *A. divionensis*, *A. quina*, *A. palestinensis*, *A. griffini*, *A. triangularis*, *A. hatchetti*, *A. tubiashi*, *A. comandoni*, se reportaron como negativas debido a que no mataron a ningún ratón y no se recuperaron al sacrificar a los animales (Tabla 9).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 9. Pruebas de patogenicidad realizadas en las especies del género *Acanthamoeba*.

Especie	Patogenicidad		Órgano del que se recuperó la amiba
	Positiva (+)	Negativa (-)	
<i>A. muritaniensis</i> (2)	Invasiva		Cerebro, pulmón, hígado, riñón
<i>A. polyphaga</i> (11)	Invasiva		Cerebro, pulmón, hígado, riñón
<i>A. comandoni</i> (1)	-		No se recuperó
<i>A. astronyxis</i> (1)	-		No se recuperó
<i>A. divionensis</i> (1)	-		No se recuperó
<i>A. castellanii</i> (7)	Invasiva		Cerebro, pulmón, hígado, riñón
<i>A. culbertsoni</i> (10)	+		Cerebro, pulmón, hígado, riñón
<i>A. triangularis</i> (3)	-		No se recuperó
<i>A. tubiashi</i> (1)	-		No se recuperó
<i>A. lugdunensis</i> (2)	-		No se recuperó
<i>A. royreba</i> (7)	Invasiva		Cerebro, pulmón, hígado, riñón
<i>A. lenticulata</i> (8)	Invasiva		Cerebro, pulmón, hígado, riñón
<i>A. quina</i> (3)	-		No se recuperó
<i>A. hatchetii</i> (1)	-		No se recuperó
<i>A. palestiniensis</i> (2)	-		No se recuperó
<i>A. griffini</i> (4)	-		No se recuperó
<i>A. rhyssodes</i> (2)	Invasiva		Cerebro, pulmón, hígado, riñón

El número dentro del paréntesis que aparece al lado derecho de cada especie amibiana representa el número de aislamientos que fueron sometidos para la prueba de patogenicidad.

La presencia de aislamientos amibianos que resultaron ser potencialmente patógenos como *Acanthamoeba* indica un alto riesgo a nivel salud por los múltiples usos que se hace del acuífero.

En primer lugar, la múltiples balnearios que existen como resultado de las zonas naturales de descarga del acuífero sobre todo en San Salvador, permite el contacto directo de estas amibas con el hombre, cuya penetración es por vía nasal, mas que por el hecho de beberla, luego entonces el riesgo es inminente favorecido por las temperaturas por arriba de los 30 °C que predominan en la zona sobre todo en los meses mas cálidos, que es cuando se dan las condiciones idóneas para su reproducción y cuando la actividad deportiva se incrementa (15) (30) (58) (72).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Otro factor que influyó en el desarrollo de estos protozoos fue el pH, el cual durante los nueve meses de muestreo fue homogéneo y constante en un intervalo de 6.8 a 7.3, generalmente las amibas toleran un rango amplio de pH que va de 4 hasta 8.6 (73)

La presencia de amibas de vida libre en este acuífero hasta los 30 m de profundidad comprueban claramente y sin lugar a dudas la capacidad de estos microorganismos de poder poblar estos ambientes que antes se creía imposible, sobre todo cuando se está modificando la recarga natural con las aguas residuales.

Definitivamente el impacto directo en la salud humana por el riego con aguas negras es un aspecto que debe ponerse en consideración durante el manejo del reuso de las aguas residuales, tanto por el contacto directo a la población así como por el peligro de la contaminación del acuífero, ya que realmente no existe una estimación precisa de estas en salud pública.

A la fecha no hay antecedentes de la existencia de estas amibas en las aguas subterráneas, por lo que este estudio representa uno de los primeros indicios en un acuífero de origen aluvial, lacustre, a los 30 m de profundidad y con la deposición de aguas negras sin tratamiento alguno.

Son varios los estudios que se han realizado en el ámbito de la microbiología de las aguas subterráneas en el mundo, como los realizados en Estados Unidos, en donde solo se concretan al estudio de bacterias y virus.

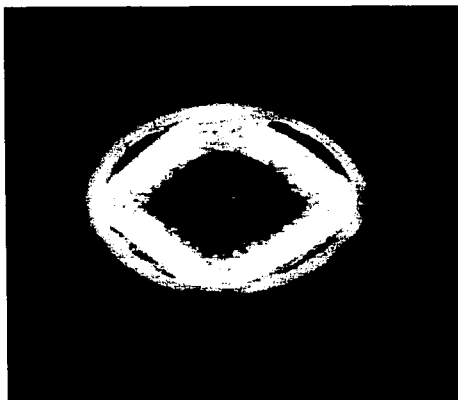
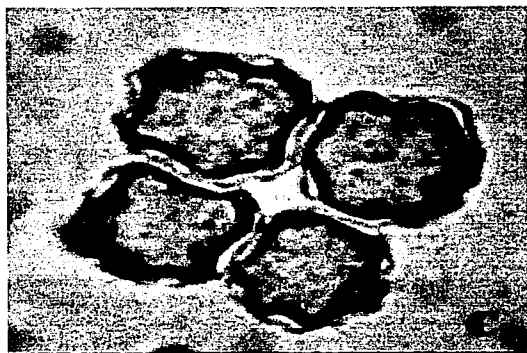
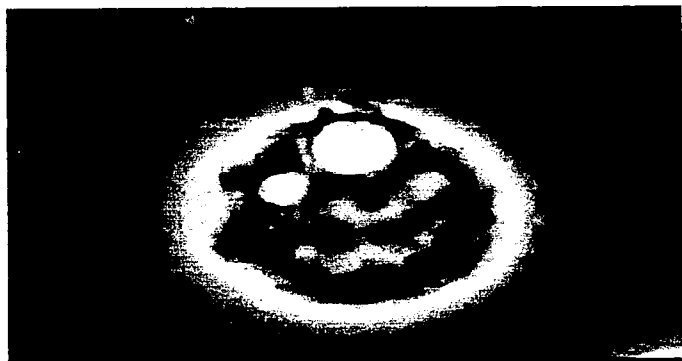
En Arizona, se observó una reducción de coliformes fecales de 3500 UFC/100ml a 0.3 UFC/100ml en la zona no saturada, mientras que los virus se removieron a los 3 m de profundidad. En 1975 Wellings, recuperó virus en las aguas subterráneas después de realizar el riego con aguas residuales sobre un terreno arenoso. Su presencia a los 6 m de profundidad fue atribuida a las lluvias (43) (44) (48).

En Europa se realizaron exámenes microbianos en diversos lugares de infiltración de aguas residuales en el acuífero de Chalk al sur de Inglaterra, constituido de rocas calizas microporosas. Se observó que en sitios donde se da una recarga de aguas residuales con un tratamiento secundario y una tasa de infiltración de 220 mm/d se recuperaron a 15 m de profundidad 15 UFC/100ml de coliformes fecales. En sitios donde se da una recarga de 80 mm/d, con tratamiento alguno se detectaron a 15 m 1000 UFC/100ml de coliformes fecales (23) (24).

Los resultados obtenidos en este estudio repercuten en el ámbito de la contaminación de los acuíferos y aunque los eventos no sean perceptibles a simple vista, los problemas se están presentando en forma lenta y persistente. De ahí la urgencia de identificar y analizar estos eventos y ponerlos en un contexto junto con otros riesgos inmediatos que afectan a la salud pública, para implementar una vigilancia más estricta en los procesos de tratamiento de estas fuentes de abastecimiento de acuerdo a los estándares adecuados para este tipo de aguas,

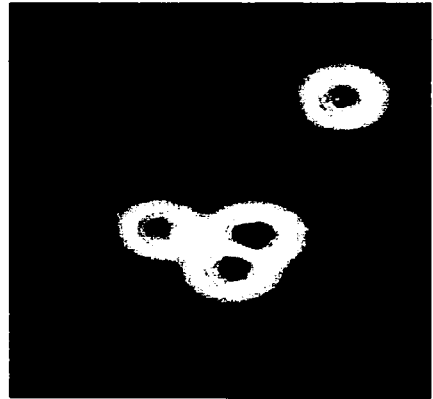
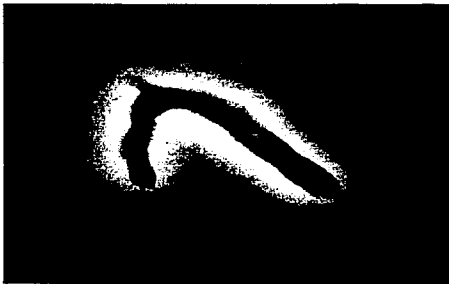
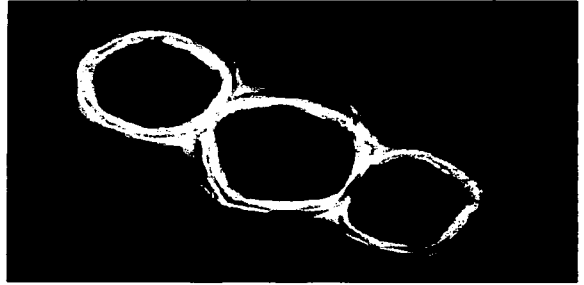
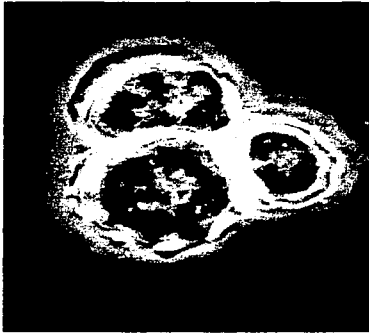
además de la difusión de las medidas de seguridad e higiene del uso adecuado de las aguas subterráneas y del reuso de las aguas negras para los cultivos agrícolas, así como divulgar sobre la existencia de las amibas de vida libre y su alto potencial patógeno al hombre.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotografía 5. A) Trofozoito de *Acanthamoeba* sp.,
B) Trofozoito redondeado de *Acanthamoeba* sp.,
C) Quistes de *Acanthamoeba castellanii* (grupo II),
D) Quistes de *Acanthamoeba polyphaga* (grupo II).
A-D) (400x). Óptica de Nomarski.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotografía 6. A) Quistes de *Acanthamoeba astronyxis* (grupo III).
B) Quistes de *Acanthamoeba culbertsoni* (grupo III).
C) Trofozoito de *Hartmannella vermiformis*.
D) Quistes de *Hartmannella vermiformis*.
A-D) (400x), Óptica de Nomarski.

TESIS CON
FALLA DE URGEN

Capítulo 8. Conclusiones

- La ubicación geográfica y estructura física de cada pozo son factores determinantes en el grado de contaminación tanto bacteriológica como química.
- La contaminación bacteriana se propicia por las continuas descargas de aguas residuales, mal sellado de los pozos así como por fallas y fracturas geológicas.
- Los niveles de contaminación encontrados no son determinantes para limitar el grado de potabilidad del agua.
- Los coliformes totales fueron significativos en todos los pozos, limitando así su uso como agua potable.
- Sin embargo este criterio no es de peso en el caso de aguas destinadas a riego, actividades recreativas y piscícolas.
- Los coliformes fecales de suelo y agua hasta los 25 m de profundidad reflejan contaminación reciente del acuífero.
- El pozo de **San Salvador** registró la concentración bacterianas **más bajas** en suelo y agua.
- El pozo de **Actópan** mostró el mayor grado de contaminación química en agua.
- El deterioro gradual de la calidad del agua se refleja en los pozos de **Tula, Cerro Colorado y San José Boxay**.
- El pozo de **Cerro Colorado** obtuvo el **índice más alto** de contaminación bacteriana en agua.
- La determinación de bacterias mesófilas debe considerarse como indicador de contaminación reciente.
- Los aspectos edafológicos de textura y estructura (migajón-arenoso) favorecen la infiltración y la adsorción de los contaminantes tanto biológicos como químicos.
- Las concentraciones de sulfatos, nitratos y cloruros dentro de norma en la mayoría de los pozos no impiden el uso potable del acuífero.

- Los rangos de temperatura y pH registrados en el acuífero favorecieron el desarrollo de amibas de vida libre (AVL)
- La variable profundidad del suelo no fue determinante en la distribución de AVL.
- Se determinaron amibas de vida libre hasta los 30 m de profundidad.
- La época de lluvias influyó marcadamente en la detección de AVL a lo largo del perfil de los pozos.
- El género *Acanthamoeba* y sus diferentes especies fue el más importante en número, tanto en suelo como en agua.
- En suelo, además del género *Acanthamoeba*, se aislaron los géneros *Hartmanella*, *Filamoeba* y *Leptomyxa*.
- En agua se aislaron los géneros *Hartmanella*, *Vanella*, *Mayorella*, *Valkampfia*, *Paltiameba* y *Naegleria* además de *Acanthamoeba*.
- *Acanthamoeba polyphaga* presentó el mayor número de aislamientos.
- La especie *Hartmanella vermiformis* se aisló con la más alta frecuencia durante los nueve meses de muestreo en suelo y agua en los seis pozos.
- El riesgo potencial a la salud humana es el generado por el género *Acanthamoeba*, en específico grave en la zona del pozo de **San Salvador**.
- El menor número de aislamientos amebianos en agua se encontró en el pozo de **Mixquiahuala**.

Capítulo 9. Recomendaciones

- En base a los criterios ecológicos y a la concentración de coliformes fecales, sugieren el uso o destino más adecuado del acuífero (recreativo, agrícola y piscícola)
- Dada la concentración de coliformes fecales, el acuífero es apto como fuente de abastecimiento de agua potable siempre y cuando sea sometido a un proceso de potabilización.
- El tratamiento previo de las descargas de aguas residuales en el Valle del Mezquital dada la alta contaminación infringida al manto acuífero.
- Difundir o realizar un programa de información a la comunidad respecto al riesgo que representa el contacto directo con aguas en donde se han detectado amibas de vida libre.
- Establecer campañas de concientización a la población sobre el uso y manejo del agua potable, así como el reuso de aguas residuales.

Capítulo 10. Referencias bibliográficas

1. Allen, J. M. (1980). Microbiology of groundwater. *J. WPCF.* 52(6):1804-1807.
2. Alvarez, R. F., Méndez, D.R.R. (1995). Síndrome hemofagocítico relacionado con septicemia por amibas de vida libre de la familia Leptomyxidae. *Rev. Salud. Distr. Fed.* 3(6):93-95.
3. Arenal, R. (1978). Carta Hidrogeológica del área de Actopan-Ixmiquilpan, Estado de Hidalgo. *Inst. Geol. Méx.* 2(1): 98-103.
4. Arenal, R. (1985). Estudio Hidrogeoquímico de la porción Centro-Oriental del Valle del Mezquital. Hidalgo. *Inst. Geol. Méx.* 6(1): 86-97.
5. Biddick, J. C., Rogers, H. L., y Brown, J. T. (1984). Viability of pathogenic and nonpathogenic free-living amoebae in long-term storage at a range of temperatures. *App. and Environ. Microbiol.* 48(4):859-860.
6. Bitton, G. (1975). The Adsorption of viruses onto surfaces in soil and water. *Water Res.* 9:473-483.
7. Brenniman, G. R., y Rosemberg, S. H. (1981). Microbial sampling variables and recreational water quality standards. *AJPH.* 71(3) 283-299.
8. Cabral, M. F. (1988). Biology of *Naegleria spp.* *Microbiol. Rev.* 52(1):114-133.
9. Campbell, R. (1987). Ecología Microbiana. Ed. Limusa. México. 268 pp.
10. Comisión Nacional del Agua. (1990). Balance de sales en el Distrito de Riego 03, DDR063, Mixquiahuala, Hgo. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. *Comisión Nacional del Agua*. México.
11. Comisión Nacional del Agua. (1994). Manual para evaluar recursos hidráulicos subterráneos. México.
12. Comisión Nacional del Agua. (1995). Impacto del reuso de las aguas residuales sobre las aguas subterráneas en el Valle del Mezquital, Edo. Hgo. México.
13. Comisión Nacional del Agua, B. G. S. (1998). Impact of water reuse on groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo state, México.

14. Cullimore, R. D. (1993). *Practical Manual of Groundwater Microbiology*. Lewis Publishers. U.S.A.
15. Curds, C. R. (1982). The ecology and role of protozoa in aerobic sewage treatment processes. *Ann. Rev. Microbiol.* 25:231-254.
16. David, T. J. (1993). Opportunistically pathogenic free-living amebae. En Kreier, J.P. & Baker, J.R. (eds.). Parasitic protozoa. Academic Press Inc. San Diego, Ca. U.S.A. pp. 143-246.
17. De Jonckheere, J. (1976). Differences in destruction of cysts of pathogenic and nonpathogenic *Naegleria* and *Acanthamoeba* by chlorine. *App. and Environ. Microbiol.* 31(2):294-297.
18. Diario oficial de la Federación (1996). Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. Reglamento de la Ley general de salud en materia de control sanitario para establecimientos, productos y servicio. México.
19. Donald, J. R. (1983). Microbiology of potable water and groundwater. *Water Pollution.* 891-895.
20. Fahmy, S. y Gawad, A. (1989). Some environmental factors affecting survival of fecal pathogens and indicator organisms in seawater. *Wat. Res. Tech.* 21(2):115-120.
21. Fenchel, T. (1987). Ecology of Protozoa: The biology of free-living phagotrophic protists. Springer-Verlag. New York. pp. 197.
22. FitzPatrick, E. A. (1980). Suelos. "Su formación, clasificación y distribución". Ed. Continental, S.A. de C.V. México. 418 pp.
23. Foster, S. y Gale, I. (1994). Impacto del uso y disposición de las aguas residuales en los acuíferos. Centro Panamericano de Ingeniería sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) Programa Regional de la prevención y Control de la Contaminación de Aguas Subterráneas. Lima Peru.
24. Foster, S. y Gomes, C. D. (1994). Monitoreo de la calidad de las Aguas Subterráneas. Centro Panamericano de Ingeniería sanitaria y Ciencias del Ambiente(CEPIS) Programa Regional de la prevención y Control de la Contaminación de Aguas Subterráneas. Lima Peru.
25. Field, R. y M. L. O'Shea. (1992). Detection and disinfection of pathogens in storm-generated flows. *Can. J. Microbiol.* 38: 267-276.

26. Gallegos, N. E. (1992). Caracterización biológica de una ameba de vida libre patógena aislada de un paciente con meningoencefalitis amebiana primaria en el estado de Puebla, México. Tesis de maestría en Ciencias. U.N.A.M. México. 75 pp.
27. Greenberg, E. A. y Eaton, D. A. (1995). Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th. APHA, AWWA, WPCF. U.S.A.
28. Griffin, L. J. (1983). The pathogenic amoeboflagellate *Naegleria fowleri*: Environmental isolations, competitors, ecologic interactions and the flagellate-empty habitat hypothesis. *J. Protozool.* 30(2):403-409.
29. Helmer, R., Hespanhol, I. Y Saliba, J. (1991). Public health criteria for the aquatic environment: Recent who guidelines and their application. *Wat. Sci. Tech.* 24(2):35-42.
30. Huizinga, W. H. y McLaughlin, L. G. (1990). Thermal ecology of *Naegleria fowleri* from a power plant cooling reservoir. *App. and Environ. Microbiol.* 56:2200-2205.
31. Jacobs, N. J. (1986). Comparison of membrane filter, multiple. fermentation-tube and presence-absence techniques for detecting total coliforms in small community water systems. *App. and Environ. Microbiol.* 51(5):1007-1012.
32. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (1997). Estadísticas del Medio Ambiente. Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente, 1995-1996. INEG., SEMARNAP.
33. Jackson, M. L. (1976). Análisis químico de suelos. 3^a. Ed. Omega. España.
34. Jones, D. B., Visvesvara G. S. y Robinson N. M (1975) *Acanthamoeba polyphaga* keratitis and *Acanthamoeba* *uveitis* associated with fatal meningoencephalitis. *Trans. Ophthalmol. Soc.* 95:221-232.
35. Jurgen, M. (1988). Investigations into the number of respiring bacteria in groundwater from sandy and gravelly deposits. *Microb. Ecol.* 16: 65-72.
36. Kemmer, F. N. (1990). Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. McGraw Hill. México. pp. 210-310
37. Kippin, S. J. y Reilly, K. J. (1983). Relationship of bacterial counts with turbidity and free chlorine in two distribution systems. *Res. Technol.* 309-312.
38. Kevin, A. y Andele, J. (1974). Bacterial suspensions for the growth of *Naegleria* species. *Pathol.* 6:79-84.
39. Kyle, E.D. y Noblet P. G. (1986). Seasonal Distribution of thermotolerant Free-Living Amoebae. I. Willard's Pond. *J. Protozool.* 33(3): 422-434.

40. Lares, V. F., y Jonckheere, J. F. (1993). Five Cases of Primary Amebic Meningoencephalitis in Mexicali, Mexico: Study of the Isolates. *J. of Clinical Microbiol.* 31 (3).
41. Lennette, H. E. (1987). Manual de Microbiología Clínica. 4ª ed. Ed. Panamericana. Buenos Aires, Argentina. pp. 783-788.
42. Lesage, S. y Jackson. R. E. (1992). Groundwater contamination and analysis at hazardous waste sites. Marcel Dekker Press. New York. pp. 543.
43. Lipson, S.M., Stotzky, G. (1987) Interactions between viruses and clay minerals. In Rao VC, Melnick JL (eds.) Human viruses in sediments, sludges, and soils. Boca Raton, FL: CRC Press. pp 197-230
44. Lipson, S.M., Stotzky, G. (1983) Adsorption of reovirus to clay minerals: Effects. Of cation exchange capacity, cation saturation and surface area. *Appl. Environ. Microbiol.* 46:673-682.
45. López-Corella, E., De León B. B. y De Jonckheere, J. F. (1989). Meningoencefalitis amibiana primaria por *Naegleria fowleri* en un adolescente de Huetamo Mich. México. *Bol. Med. Hosp. Infant. Méx.* 46 (9):619-622.
46. Martínez, A. J. (1985). "Free-living amibas: Natural History, Prevention, Diagnosis, Pathology and treatment of disease". CRC Press, Boca Raton, Florida. 156 pp.
47. Martínez, A. J. (1987). Clinical Manifestations of Free-living Amebic Infections. En Rondannelli, E. G. (ed.) "Amphizoic Amoebae: Human Pathology" Ed. Piccin Nuova Libreria . Padua Italy. pp.161-177.
48. Mallory, L. M. , Yuk, C. S., y Liang, L. N. (1983). Alternative prey: A mechanism for elimination of bacterial species by protozoa. *App. and Environ. Microbiol.* 46(5):1073-1079.
49. Méndez, D. R., Bonilla, L. P. (2000). Amibas de vida libre y anemia aplástica grave en niños. *Bol. Med. Hosp. Inf. Méx.* 57(8): 449-452.
50. Mitchell, R. (1993). Environmental Microbiology. 3ª. ed. Wiley-Liss Press. New York. 411 pp.
51. Murray, R. P. y Lawrence W. D. (1992). Microbiología Médica. 2ª ed. Mosby Year Book Press. España. pp. 349-368.

52. National Research Council. Academia de la Investigación Científica, A.C. (1995). El suministro de agua de la Ciudad de México. Mejorando la sustentabilidad. National Academy of Sciences. Washington.
53. OMS, OPS, BGS. (1996). Los recursos hídricos subterráneos y la disposición de aguas residuales urbanas. Interacciones positivas y negativas. Seminario asociado con el VIII Curso Internacional. Querétaro. México.
54. Organización Panamericana de la Salud. (1987). Guías para la calidad del agua potable. Criterios relativos a la salud Vol. 2. Washington, D.C. U.S.A.
55. Page, C. F. (1988). A new key to freshwater and soil Gymnamoebae. Freshwater Biological Association Scientific Publication. England. 122 pp.
56. Riestra, M. J., González, C. S., Moreno, P. P. (1997). Granulomatous amebic encephalitis due to *Balamuthia mandrillaris* (Leptomyxiidae): reports of four cases from México. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 56(6):603-607.
57. Rivera, A. F., Galvan, M Robles, E. Leal, P., y González, L. (1981). Bottled mineral waters polluted by protozoa in México. *J. Protozool.* 28(1):54-56.
58. Rivera, A. F., Ramírez, G. P. y Medina, F. (1983). A survey of pathogenic and free-living amoebae inhabiting swimming pool water in México city. *Environ. Res.* 32: 205-211.
59. Rivera, A. F., Lares, V. F., Ramírez, E., y Bonilla, P. (1986). Pathogenic Amoebae in natural thermal waters of three resorts of Hidalgo, México. *Inviron. Res.* 50:289-295.
60. Rivera, A. F., Lares, V. F., Ramírez, E., Bonilla, P. y Calderón, A. (1989). *Acanthamoeba* spp. en quemaduras infectadas y rinitis. *Rev. Lat-amer. Microbiol.* 31:137-140.
61. Rivera, A. F., Ortega, A. y López, O. P. (1979). A quantitative morphological and ecological study of protozoa polluting tap water in Mexico City. *Trans. Amer. Micros. Soc.* 98(3):465-469.
62. Rar, T. M., Brown, T. J. (1985). Amoebae from antarctic soil and water. *App. and Environ. Microbiol.* 44(2): 491-493.
63. Rivera, A. Romero, R. y Medina, F. (1984). Meningoencefalitis amibiana primaria producida por *Naegleria fowleri*. *Rev. Fac. de Medicina. México.* 22(3):113-122.
64. Rodríguez, P. E. (1984). Meningoencefalitis por *Naegleria fowleri*: Informe de un caso. *Infectol.* 4 (10):263-266.

65. Rondanelli, E.G. (ed.). (1987) Amphizoic amoebae: Human Pathology. Infectious diseases. Color atlas monographs. Piccin, Pavia, Italy. 279 pp.
66. Ruppert, E. E. y Barnes, R. D. (1995). Zoología de los invertebrados. 6ª. ed. Ed. McGraw-Hill Interamericana. México. pp. 10-51.
67. Scheuerman, P. R., Biton G. Overman A.R., Gifford G.E. (1979) Transport of viruses through organic soils and sediments. *J. Environ. Eng. Div.* 105:629-640
68. Tyndall, R. L., Ironside, S. K. y Metler, P. L. (1989). Effect of thermal additions on the density and distribution of thermophilic amoebae and pathogenic *Naegleria fowleri* in a newly created cooling lake. *App. and Environ. Microbiol.* 55(3):722-732.
69. Valenzuela, G., López-Corella E y De Jonckheere J. E. (1984). Primary amoebic meningoencephalitis in a young male from northwestern México. *Trans. of Royal Soc. of Trop. Med. and Hyg.* 78:558-559.
70. Villanueva, O. B. y Solorio, O. A. (1984). Edafología. 4ª ed. Universidad Nacional Autónoma de Chapingo. México.
71. Visvesvara, G. S., Martinez, A. J., Schsuter, F. L. y Anderson, M. (1990) Leptomyxid ameba, a new agent of amebic meningoencephalitis in humans and animals. *J. Clin. Microbiol.* 28:2750-2756.
72. Wadowsky, R. M. (1991). Multiplication of *Legionella* spp. in tap water containing *Hartmanella vermiformis*. *App. Environ. Microbiol.* 57(7):1950-1955.
73. Zaragoza, R. S. (1994). Ecology of free-living amoebae. *Crit. Rev. in Microbiol.* 20(3):225-241.

Anexo. Tablas de Resultados

Tabla I. Parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos del acuífero para los pozos San Salvador y Mixquihuala.

Parámetro	San Salvador (pozo 1)			Mixquihuala (pozo 2)		
	Sequia	Lluvia	Total	Sequia	Lluvia	Total
Temperatura	21.860 ± 0.244	21.850 ± 0.804	21.855 ± 0.524	20.000 ± 0.764	21.317 ± 0.753	20.6585 ± 0.7585
pH	7.14 ± 0.088	6.968 ± 0.051	7.054 ± 0.0695	7.57 ± 0.055	7.127 ± 0.132	7.3485 ± 0.0935
Conductividad	1708.800 ± 58.077	1538.333 ± 40.110	1623.6 ± 49.094	1720.333 ± 132.177	1543.333 ± 39.889	1631.833 ± 86.033
Sólidos totales	1399.200 ± 87.486	1122.883 ± 42.209	1261 ± 64.848	1372.666 ± 106.966	1135.883 ± 42.774	1254.2745 ± 74.87
Sólidos disueltos	1395.400 ± 85.633	1117.633 ± 42.393	1256.5 ± 64.013	1351.000 ± 110.961	1132.717 ± 43.397	1241.8585 ± 77.179
Ortofósforos	0.039 ± 0.032	0.000 ± 0.000	0.0195 ± 0.016	0.923 ± 0.089	8.832 ± 0.205	4.8775 ± 0.147
Fósforo total	0.045 ± 0.031	0.000 ± 0.000	0.0225 ± 0.0155	1.244 ± 0.081	1.466 ± 0.141	1.355 ± 0.111
Nitratos	17.824 ± 2.732	12.726 ± 0.863	15.275 ± 1.7975	21.193 ± 2.832	14.428 ± 0.550	17.8105 ± 1.691
Cloruros	253.420 ± 4.722	242.434 ± 5.270	247.93 ± 4.996	193.700 ± 5.300	198.318 ± 19.651	196.009 ± 12.4755
Sulfatos	62.644 ± 9.67	96.632 ± 12.158	79.638 ± 10.914	75.410 ± 23.495	159.217 ± 43.625	117.3135 ± 33.56
Alcalinidad	529.240 ± 20.864	594.575 ± 23.816	561.91 ± 22.34	577.467 ± 57.286	597.617 ± 36.758	587.542 ± 47.022
Dureza total	397.700 ± 39.082	445.668 ± 53.471	421.68 ± 46.277	237.833 ± 26.334	341.362 ± 44.057	289.5975 ± 35.1955
Dureza al calcio	185.120 ± 42.745	204.641 ± 57.898	194.88 ± 50.322	91.800 ± 9.188	119.462 ± 23.484	105.631 ± 11746.594
Dureza al magnesio	212.560 ± 8.862	241.025 ± 24.732	226.79 ± 16.797	146.033 ± 25.109	221.883 ± 30.928	183.958 ± 28.0185
In Colif. Totales	0.527 ± 0.031	0.625 ± 0.115	0.576 ± 0.073	1.166 ± 0.395	1.129 ± 0.471	1.1475 ± 0.433
In Colif. Fecales	4.477 ± 7.16E-18	0.594 ± 0.117	2.5355 ± 0.0585	0.636 ± 0.159	0.982 ± 0.480	0.809 ± 0.3195
Bact. Mesofílicas	2.444 ± 0.399	2.795 ± 0.277	2.6195 ± 0.338	3.640 ± 1.083	4.226 ± 0.580	3.933 ± 0.8315

*Valor promedio de todos los pozos

TEXAS
 FALLA DE ORIGEN

Tabla II. Parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos del acuífero para los pozos San JoséBoxay y CerroColorado.

Parámetro	San JoséBoxay (pozo 3)			CerroColorado (pozo 4)		
	Sequía	Lluvia	Total	Sequía	Lluvia	Total
Temperatura	18.117 ± 0.470	17.717 ± 1.035	17.917 ± 0.7525	18.690 ± 0.700	19.717 ± 0.546	19.1585 ± 0.623
pH	7.333 ± 0.123	6.836 ± 0.119	7.0845 ± 0.121	7.335 ± 0.120	6.863 ± 0.136	7.099 ± 0.128
Conductividad	1500.667 ± 73.307	1300.000 ± 40.881	1400.3 ± 57.094	1481.667 ± 106.772	1322.500 ± 42.340	1402.0835 ± 74.556
Sólidos totales	1228.333 ± 90.967	1022.4917 ± 31.803	1125.4 ± 61.385	1194.667 ± 79.883	1081.775 ± 49.995	1138.221 ± 64.939
Sólidos disueltos	1215.250 ± 92.455	1016.7417 ± 32.083	1116 ± 62.269	1172.000 ± 90.010	1072.317 ± 52.804	1122.1585 ± 71.407
Ortofósforos	0.174 ± 0.169	0.0041 ± 0.0028	0.0891 ± 0.0859	1.744 ± 0.783	1.599 ± 0.500	1.6715 ± 0.6415
Fósforo total	0.487 ± 0.459	0.004 ± 0.002	0.2455 ± 0.2305	2.743 ± 1.350	2.272 ± 0.728	2.5075 ± 1.039
Nitratos	15.285 ± 1.798	11.492 ± 1.064	13.389 ± 1.431	13.157 ± 4.120	8.680 ± 1.513	10.9185 ± 2.8165
Cloruros	255.183 ± 12.020	259.115 ± 5.526	257.15 ± 8.773	131.983 ± 16.259	138.409 ± 5.635	135.196 ± 10.947
Sulfatos	44.278 ± 8.009	107.741 ± 47.798	76.01 ± 27.9035	97.300 ± 21.726	172.950 ± 28.376	135.125 ± 25.051
Alcalinidad	391.922 ± 21.400	388.642 ± 33.34	390.28 ± 27.37	560.783 ± 33.778	575.800 ± 21.290	568.2915 ± 27.534
Dureza total	363.533 ± 45.358	416.984 ± 42.624	390.26 ± 43.991	286.117 ± 36.696	373.498 ± 57.034	329.8075 ± 46.865
Durezaal calcio	171.917 ± 41.133	247.318 ± 63.013	209.62 ± 52.073	115.133 ± 31.430	161.431 ± 34.485	138.282 ± 32.9575
Durezaal magne.	191.583 ± 17.313	203.000 ± 46.473	197.29 ± 31.893	170.983 ± 33.707	213.731 ± 33.025	192.357 ± 33.366
Ln.Colif. Totales	0.744 ± 0.267	1.043 ± 0.217	0.8935 ± 0.242	1.424 ± 0.463	1.996 ± 0.369	1.71 ± 0.416
Ln.Colif. Fecales	0.477 ± 6.922E-18	0.652 ± 0.127	0.5645 ± 0.0635	1.326 ± 0.383	1.096 ± 0.209	1.211 ± 0.296
Bact. Mesofílicas	3.610 ± 0.208	3.562 ± 0.310	3.586 ± 0.259	3.868 ± 0.236	3.758 ± 0.324	3.813 ± 0.28

*Valor promedio de todos los pozos

INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
 CALLE DE URQUEN

Tabla III. Parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos del acuífero para los pozos Tula y Actopan.

Parámetro	Tula (pozo 5)			Actopan (pozo 6)		
	Sequía	Lluvia	Total	Sequía	Lluvia	Total
Temperatura	18.200 ± 0.478	18.642 ± 0.322	18.421 ± 0.4	19.925 ± 0.624	20.833 ± 0.529	20.379 ± 0.5765
pH	7.258 ± 0.125	6.716 ± 0.204	6.987 ± 0.1645	7.333 ± 0.084	6.948 ± 0.130	7.1405 ± 0.107
Conductividad	1617.500 ± 171.150	1321.667 ± 79.381	1469.5835 ± 125.2655	2275.000 ± 286.865	2220 ± 77.528	2247.5 ± 182.1965
Sólidos totales	1238.500 ± 255.351	1094.000 ± 81.524	1166.25 ± 168.4375	2168.000 ± 150.422	1897.417 ± 88.877	2032.7085 ± 119.6495
Sólidos disueltos	1235.875 ± 254.530	1084.375 ± 83.697	1160.125 ± 169.1135	1673.750 ± 258.207	1851.250 ± 72.280	1762.5 ± 165.2435
Ortofosfatos	0.050 ± 0.005	0.033 ± 0.006	0.0415 ± 0.0055	0.056 ± 0.020	0.039 ± 0.016	0.0475 ± 0.018
Fosforo total	0.083 ± 0.017	0.055 ± 0.012	0.069 ± 0.0145	0.098 ± 0.029	0.1990 ± 0.077	0.1485 ± 0.053
Nitratos	8.550 ± 1.080	7.888 ± 0.870	8.219 ± 0.975	26.465 ± 4.542	15.953 ± 0.816	21.209 ± 2.679
Cloruros	71.100 ± 17.823	107.723 ± 19.570	89.4115 ± 18.6965	408.350 ± 31.4778	330.592 ± 10.323	369.471 ± 20.9004
Sulfatos	476.805 ± 227.602	339.761 ± 89.688	408.283 ± 158.645	457.650 ± 60.745	506.992 ± 67.517	482.321 ± 64.131
Alcalinidad	385.025 ± 41.815	493.478 ± 30.663	439.2515 ± 36.239	563.325 ± 32.939	667.067 ± 29.186	615.196 ± 31.0625
Dureza total	451.750 ± 163.573	436.083 ± 76.928	443.9165 ± 120.2505	371.200 ± 94.699	464.852 ± 49.039	418.026 ± 71.869
Durezaal calcio	202.500 ± 56.743	96.743 ± 24.734	149.6215 ± 40.7385	136.400 ± 74.567	108.069 ± 34.687	122.2345 ± 54.627
Durezaal magne.	249.250 ± 110.610	330.387 ± 81.397	289.8185 ± 96.0035	336.800 ± 76.948	357.777 ± 40.114	347.2885 ± 40.114
In.Colif. Totales	1.532 ± 0.404	1.267 ± 0.331	1.3995 ± 0.3675	1.322 ± 0.695	0.940 ± 0.220	1.131 ± 0.4575
In.Colif. Fecales	0.509 ± 0.031	0.843 ± 0.262	0.676 ± 0.1465	1.210 ± 0.726	0.498 ± 0.014	0.854 ± 0.37
Bact. Mesofilicas	3.855 ± 0.252	4.148 ± 0.213	4.0015 ± 0.2325	4.337 ± 0.425	3.932 ± 0.318	4.1345 ± 0.3715

*Valor promedio de todos los pozos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla IV. Parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos del acuífero a dos diferentes profundidades.

Parámetro	Profundidad 1	Profundidad 2	Significancia
Temperatura	19.400 ± 0.372	20.006 ± 0.349	
pH	6.997 ± 0.061	7.030 ± 0.069	*
Conductividad	1515.548 ± 63.988	1638.577 ± 49.926	*
Sólidos totales	1242.807 ± 69.367	1317.658 ± 47.430	
Sólidos disueltos	1175.950 ± 54.840	1309.735 ± 47.592	*
Nitratos	12.738 ± 1.011	13.384 ± 0.842	*
Nitritos	0.010 ± 0.003	0.029 ± 0.009	
Cloruros	218.010 ± 14.870	212.654 ± 12.737	
Sulfatos	163.348 ± 30.094	267.506 ± 36.424	
Alcalinidad	540.052 ± 18.343	527.433 ± 18.259	
Dureza total	390.527 ± 24.175	407.308 ± 27.860	
Dureza al calcio	129.896 ± 17.068	179.970 ± 22.031	
Dureza al magnesio	258.133 ± 19.881	243.255 ± 24.531	
In Coliformes totales	1.334 ± 0.152 (4 NMP/100ml)	0.995 ± 0.130 (3 NMP/100ml)	
In Coliformes fecales	0.954 ± 0.130 (3 NMP/100ml)	0.614 ± 0.066 (2 NMP/100ml)	
In Bacterias mesofílicas	3.600 ± 0.160 (37 NMP/100ml)	3.716 ± 0.153 (41 NMP/100ml)	

*Valor promedio de todos los pozos

PAJALA DE URUGUAY

Tabla V. Parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos del acuífero en dos épocas del año.

Parámetro	Sequía	Lluvias	Significancia
Temperatura	19.361 ± 0.336	19.894 ± 0.334	
pH	7.313 ± 0.047	6.888 ± 0.057	*
Conductividad	1684.607 ± 71.674	1540.758 ± 47.605	*
Sólidos totales	1402.786 ± 78.096	1233.911 ± 46.337	
Sólidos disueltos	1321.143 ± 63.577	1219.759 ± 44.100	*
Nitratos	16.550 ± 1.571	11.627 ± 0.552	*
Nitritos	0.027 ± 0.015	0.017 ± 0.004	
Cloruros	217.464 ± 20.592	214.079 ± 10.697	
Sulfatos	183.098 ± 46.018	237.033 ± 29.256	
Alcalinidad	496.008 ± 19.699	548.795 ± 16.151	
Dureza total	353.275 ± 30.060	419.594 ± 23.163	
Dureza al calcio	152.818 ± 18.575	159.624 ± 19.224	
Dureza al magnesio	215.018 ± 21.808	264.702 ± 20.898	
In Coliformes totales	1.092 ± 0.168 (3 NMP/100ml)	1.170 ± 0.124 (3NMP/100ml)	
In Coliformes fecales	0.784 ± 0.140 (2 NMP/100ml)	0.759 ± 0.082 (2 NMP/100ml)	
In Bacterias mesofílicas	3.598 ± 0.184 (37 NMP/100ml)	3.692 ± 0.138 (40 NMP/100ml)	

*Valor promedio de todos los pozos

TESIS CON
 CITA DE ORIGEN

Tabla No. VI. Abundancia y diversidad de las especies representativas del Género *Acanthamoeba* aisladas del acuífero del Valle del Mezquital.

Espece ambiente	Número de aislamientos
<i>A. polyphaga</i>	25
<i>A. lenticulata</i>	23
<i>A. culbertsoni</i>	21
<i>A. quina</i>	16
<i>A. royreba</i>	14
<i>A. griffini</i>	9
<i>A. palestinensis</i>	7
<i>A. ryzodes</i>	6
<i>A. astronyxis</i>	5
<i>A. castellani</i>	4
<i>A. hatchetti</i>	3
<i>A. lugdunensis</i>	3
<i>A. divionensis</i>	3
<i>A. tubiashi</i>	1
<i>A. triangularis</i>	1
<i>A. comandoni</i>	1

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla No. VII. Amibas aisladas en el pozo de San Salvador a lo largo de los nueve meses de monitoreo.

Especie amibiana	San Salvador																	
	Febrero/96		Abril		Mayo		Junio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Enero	
	21m	29m	21m	29m	21m	29m	21m	29m	21m	29m	21m	29m	21m	29m	21m	29m	21m	29m
<i>Hartmannella vermiformis</i>		*			*	*	*		*			*	*				*	*
<i>Hartmannella cantabrigensis</i>		*				*			*									
<i>Acanthamoeba quinti</i>		*										*	*					
<i>Acanthamoeba royreba</i>		*			*	*												
<i>Acanthamoeba palestinensis</i>															*			
<i>Acanthamoeba lenticulata</i>						*					*	*			*			*
<i>Acanthamoeba polyphaga</i>							*	*	*	*	*	*	*					*
<i>Acanthamoeba triangularis</i>									*									*
<i>Acanthamoeba culbertsoni</i>									*								*	*
<i>Acanthamoeba hatchetii</i>													*					
<i>Acanthamoeba griffini</i>									*									
<i>Acanthamoeba ryzodes</i>									*									*
<i>Vanella platypodia</i>							*											
<i>Vanella inornata</i>					*	*				*								
<i>Mayorella cultura</i>						*									*	*		
<i>Mayorella microerupta</i>							*		*									

Género *Hartmannella* 12 aislamientos

Género *Acanthamoeba* 26 aislamientos

Género *Mayorella* 5 aislamientos

Género *Vanella* 4 aislamientos

Total aislamientos 47

TESIS CON
 VALIA DE ORIGEN

Tabla No. VIII. Amibas aisladas en el pozo de Mixquiahuala a lo largo de los nueve meses de monitoreo.

Mixquiahuala																	
Especie amibiana	Febrero/96		Abril	Mayo		Junio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Enero	
	7m	14m	14m	7m	14m	7m	14m	7m	14m	7m	14m	7m	14m	7m	14m	7m	14m
<i>Hartmannella vermiformis</i>		*			*				*								
<i>Acanthamoeba quina</i>												*					
<i>Acanthamoeba royreba</i>					*				*			*					
<i>Acanthamoeba palestinensis</i>												*					*
<i>Acanthamoeba lenticulata</i>									*			*		*			*
<i>Acanthamoeba polyphaga</i>							*		*			*		*			
<i>Acanthamoeba lugdunensis</i>									*					*			
<i>Acanthamoeba culbertsoni</i>					*					*							
<i>Acanthamoeba griffini</i>					*					*							
<i>Acanthamoeba ryzodes</i>					*						*						
<i>Valkampfia avara</i>										*							

Género *Hartmannella* 3 aislamientos

Género *Acanthamoeba* 21 aislamientos

Género *Valkampfia* 1 aislamiento

Total aislamientos 25

TESIS DE
 FALTA DE ORIGEN

TablaNo. IX. Amibas aisladas en el pozo de SanJoseBoxay a lo largo de los nueve meses de monitoreo.

Especie amibiana	San José Boxay																		
	Febrero/96		Abril		Mayo		Junio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Enero		
	11m	25m	11m	25m	11m	25m	11m	25m	11m	25m	11m	25m	11m	25m	11m	25m	11m	25m	
<i>Hartmannella vermiformis</i>					*	*	*				*							*	
<i>Hartmannella cantabrigensis</i>									*										
<i>Acanthamoeba quinana</i>									*				*			*			
<i>Acanthamoeba royreba</i>						*			*	*								*	
<i>Acanthamoeba palestinensis</i>											*								
<i>Acanthamoeba lenticulata</i>												*				*			
<i>Acanthamoeba polyphaga</i>					*			*								*			*
<i>Acanthamoeba triangularis</i>					*				*	*		*							*
<i>Acanthamoeba culbertsoni</i>													*		*	*			
<i>Acanthamoeba astronyxis</i>					*										*				
<i>Acanthamoeba griffini</i>										*									
<i>Acanthamoeba castellanii</i>														*					
<i>Acanthamoeba comandoni</i>					*														
<i>Valkampfia avara</i>					*														
<i>Mayorella cultura</i>			*					*											
<i>Vanella inornata</i>					*	*													
<i>Vanella platypodia</i>					*			*	*										
<i>Platyamoeba placida</i>									*										
<i>Naegleria fowleri</i>			*																
<i>Platyamoeba stenopodia</i>								*											

Género *Hartmannella* 6 aislamientos
 Género *Acanthamoeba* 26 aislamientos
 Género *Valkampfia* 1 aislamiento
 Género *Mayorella* 3 aislamientos
 Género *Vanella* 5 aislamientos
 Género *Naegleria* 1 aislamiento
 Género *Platyamoeba* 2 aislamientos
Total aislamientos 44

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Tabla No. X. Amibas aisladas en el pozo de Cerro Colorado a lo largo de los nueve meses de monitoreo.

Especie ambiente	Cerro Colorado																	
	Febrero/96		Abril		Mayo		Junio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Enero	
	7m	25m	7m	25m	7m	25m	7m	25m	7m	25m	7m	25m	7m	25m	7m	25m	7m	25m
<i>Hartmannella vermiformis</i>					*						*	*				*		
<i>Hartmannella cantabrigensis</i>											*							
<i>Acanthamoeba quina</i>					*	*	*				*		*					
<i>Acanthamoeba royreba</i>																	*	
<i>Acanthamoeba lenticulata</i>											*	*		*	*		*	
<i>Acanthamoeba polyphaga</i>							*				*							
<i>Acanthamoeba culbertsonii</i>	*									*						*		
<i>Acanthamoeba hatchetii</i>									*									
<i>Acanthamoeba castellani</i>										*							*	
<i>Acanthamoeba divionensis</i>													*			*	*	
<i>Acanthamoeba griffini</i>										*								*
<i>Acanthamoeba ryzodes</i>													*	*				
<i>Valkampfia enterica</i>													*					
<i>Platyamoeba placida</i>							*											
<i>Vanella platypodia</i>									*							*		

Género *Hartmannella* 5 aislamientos

Género *Acanthamoeba* 26 aislamientos

Género *Valkampfia* 1 aislamiento

Género *Vanella* 2 aislamientos

Género *Platyamoeba* 1 aislamiento

Total aislamientos 35

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla No. XI. Amibas aisladas en el pozo de Tula a lo largo de los nueve meses de monitoreo.

Especie amibiana	Tula																		
	Febrero/96		Abril		Mayo		Junio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Enero		
	7m	25m	7m	25m	7m	25m	7m	25m	7m	25m	7m	25m	7m	25m	7m	25m	7m	25m	
<i>Hartmannella vermiformis</i>								*											
<i>Hartmannella cantabrigensis</i>									*										
<i>Acanthamoeba royreba</i>										*									
<i>Acanthamoeba palestiniensis</i>																			*
<i>Acanthamoeba lenticulata</i>									*				*			*	*		*
<i>Acanthamoeba polyphaga</i>									*			*	*						
<i>Acanthamoeba triangularis</i>													*					*	*
<i>Acanthamoeba culbertsoni</i>											*	*	*		*	*		*	*
<i>Acanthamoeba tubiashi</i>													*					*	
<i>Acanthamoeba castellanii</i>													*						
<i>Acanthamoeba lugdunensis</i>									*										
<i>Acanthamoeba astronyxis</i>												*	*						
<i>Acanthamoeba griffini</i>												*							
<i>Valkampfia avira</i>							*		*										
<i>Mayorella cultura</i>						*			*								*		
<i>Mayorella spatula</i>									*										
<i>Platyamoeba placida</i>					*					*									
<i>Vanella platypodia</i>								*		*									

Género *Hartmannella* 3 aislamientos

Género *Acanthamoeba* 25 aislamientos

Género *Valkampfia* 1 aislamiento

Género *Mayorella* 4 aislamientos

Género *Vanella* 2 aislamientos

Género *Platyamoeba* 2 aislamientos

Total aislamientos 37



Tabla No. XII. Amibas aisladas en el pozo de Actopan a lo largo de los nueve meses de monitoreo.

Actopan																			
Especie ambiana	Febrero/96		Abril		Mayo		Junio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Enero		
	7m	25m	7m	25m	7m	25m	7m	25m	7m	25m	7m	25m	7m	25m	7m	25m	7m	25m	
<i>Hartmannella vermiformis</i>					*			*	*				*						*
<i>Hartmannella cantabrigensis</i>						*					*								
<i>Acanthamoeba quina</i>								*		*	*		*						
<i>Acanthamoeba royreba</i>									*					*					*
<i>Acanthamoeba palestinensis</i>																			*
<i>Acanthamoeba lenticulata</i>													*						
<i>Acanthamoeba polyphaga</i>								*		*				*					*
<i>Acanthamoeba culbertsoni</i>											*	*	*				*	*	
<i>Acanthamoeba hatchetii</i>										*									
<i>Acanthamoeba astronyxis</i>												*							
<i>Acanthamoeba griffini</i>																	*	*	
<i>Acanthamoeba ryzodes</i>										*									*
<i>Valkampfia enterica</i>						*													
<i>Mayorella cultura</i>						*										*			
<i>Vanella inornata</i>						*		*											
<i>Vanella platypodia</i>										*									

Género *Hartmannella* 7 aislamientos

Género *Acanthamoeba* 25 aislamientos

Género *Valkampfia* 1 aislamiento

Género *Mayorella* 2 aislamientos

Género *Vanella* 3 aislamientos

Total aislamientos 38

BALIA DE SANGRE
 FEB 1996