



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**CONTAMINACIÓN BIOLÓGICA DE LAS FUENTES DE
SUMINISTRO DEL VALLE DE TULA**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL-SUELO-AGUAS SUBTERRÁNEAS

P R E S E N T A :

ING. ERIKA JIMENA ESPINOSA ORTIZ

TUTORA:

DRA. BLANCA ELENA JIMÉNEZ CISNEROS

2009



**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo de tesis.

Al Grupo de Tratamiento y Reúso, particularmente a la Dra. Blanca E. Jiménez Cisneros, por aceptarme bajo su tutela y apoyarme para lograr la obtención de este grado académico.

A la M. en I. Catalina Maya Rendón y a la Q.F.B. Matilde Galván García por su apoyo en el trabajo de laboratorio.

Contenido

RESUMEN	1
1 INTRODUCCIÓN	3
2 JUSTIFICACIÓN	5
3 ANTECEDENTES	7
3.1 DESCRIPCIÓN DEL VALLE DE TULA	7
3.1.1 ACUÍFEROS EN EL VALLE DE TULA	11
3.1.1.1 Acuífero Valle del Mezquital	12
3.1.1.2 Acuífero Ixmiquilpan	13
3.1.1.3 Acuífero Actopan-Santiago de Anaya	14
3.1.2 RECARGA DE ACUÍFEROS EN EL VALLE DE TULA	14
3.1.3 USO DEL AGUA DE ACUÍFEROS EN EL VALLE DE TULA	15
3.1.4 EFECTOS EN LA SALUD POR EL CONSUMO DE AGUA INFILTRADA A LOS ACUÍFEROS EN EL VALLE DE TULA	16
4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	18
4.1 AGUA POTABLE EN MÉXICO	18
4.2 ORGANISMOS PATÓGENOS EN EL AGUA	19
4.2.1 VIRUS	23
4.2.2 BACTERIAS	24
4.2.3 PROTOZOOS	25
4.2.4 HELMINTOS	26
4.3 INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA	27
4.3.1 BACTERIÓFAGOS	28
4.3.2 INDICADORES BACTERIANOS	31
4.3.2.1 Grupo coliformes	31

4.3.2.2	<i>Escherichia coli</i>	33
4.3.2.3	Esporas de <i>Clostridium</i>	33
4.3.2.4	Recuento en placa de bacterias heterótrofas	34
4.4	SUPERVIVENCIA Y TRANSPORTE DE PATÓGENOS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA	34
4.4.1	MOVIMIENTO A TRAVÉS DEL SUELO Y SUPERVIVENCIA DE LOS VIRUS	36
4.4.2	MOVIMIENTO A TRAVÉS DEL SUELO Y SUPERVIVENCIA DE LAS BACTERIAS	38
4.4.3	MOVIMIENTO A TRAVÉS DEL SUELO Y SUPERVIVENCIA DE LOS PROTOZOOS	39
4.4.4	MOVIMIENTO A TRAVÉS DEL SUELO Y SUPERVIVENCIA DE LOS HUEVOS DE HELMINTOS	39
4.5	RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS CON AGUA RESIDUAL	40
5	<u>HIPÓTESIS</u>	43
6	<u>OBJETIVOS</u>	43
6.1	OBJETIVO GENERAL	43
6.2	OBJETIVOS PARTICULARES	43
7	<u>ALCANCES</u>	44
8	<u>METODOLOGÍA</u>	45
8.1	ETAPA 1: DEFINICIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO Y ORGANISMOS A IDENTIFICAR	47
8.1.1	DEFINICIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO	47
8.1.1.1	Diseño del muestreo	47
8.1.1.2	Ubicación de los puntos de muestreo	48
8.1.3	PARÁMETROS BIOLÓGICOS	51
8.2	ETAPA 2: INSPECCIÓN SANITARIA	52
8.3	ETAPA 3: MUESTREO	58
8.4	ETAPA 4: CARACTERIZACIÓN DEL AGUA	62
8.4.1	CARACTERIZACIÓN EN CAMPO	62
8.4.2	CARACTERIZACIÓN BIOLÓGICA	62
8.5	ETAPA 5: ESTABLECIMIENTO DEL RIESGO	63

9	RESULTADOS Y ANÁLISIS	67
9.1	INSPECCIÓN SANITARIA	67
9.1.1	RESULTADOS DE LOS CUESTIONARIOS	69
9.2	CARACTERIZACIÓN EN CAMPO	70
9.3	CARACTERIZACIÓN BIOLÓGICA	72
9.3.1	ÉPOCA DE ESTIAJE	72
9.3.2	ÉPOCA DE LLUVIA	82
9.3.3	DIFERENCIAS ENTRE TEMPORALIDAD, ZONAS Y TIPO DE FUENTE	91
9.4	ESTABLECIMIENTO DEL RIESGO	93
10	CONCLUSIONES	101
11	RECOMENDACIONES	103
12	REFERENCIAS	105
ANEXO - A		119
ANEXO - B		138
ANEXO - C		142
ANEXO - D		156

Índice de Tablas

TABLA 3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS DEL VALLE DE TULA	7
TABLA 3.2 DISTRITOS DE RIEGO EN MÉXICO QUE UTILIZAN AGUA RESIDUAL	8
TABLA 3.3 ZONAS DE RIEGO DEL VALLE DE TULA	10
TABLA 4.1 CASOS POR ENTIDAD FEDERATIVA DE ENFERMEDADES INFECCIOSAS Y PARASITARIAS DEL APARATO DIGESTIVO, DURANTE EL PRIMER TRIMESTRE DEL 2008 EN MÉXICO	19
TABLA 4.2 ENFERMEDADES RELACIONADAS CON EL SUMINISTRO DE AGUA	20
TABLA 4.3 AGENTES POTENCIALES INFECCIOSOS PRESENTES EN EL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA	22
TABLA 4.4 CARACTERÍSTICAS DE VIRUS Y POSIBLES FAGOS SURROGADOS	28
TABLA 4.5 AGRUPAMIENTO Y CARACTERÍSTICAS DE LOS BACTERIÓFAGOS	30
TABLA 4.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS COLIFAGOS SOMÁTICOS Y MS F-RNA COMO INDICADORES DE CONTAMINACIÓN FECAL.	31
TABLA 4.7 ORGANISMOS ESPECÍFICOS QUE HAN SIDO EMPLEADOS COMO INDICADORES DE CONTAMINACIÓN FECAL	32
TABLA 4.8 TIEMPOS DE SUPERVIVENCIA DE LOS MICROORGANISMOS EN AGUA	35
TABLA 4.9 FACTORES QUE INFLUENCIAN LA SUPERVIVENCIA DE LOS VIRUS Y BACTERIAS EN EL SUELO	37
TABLA 4.10 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL MOVIMIENTO DE LOS VIRUS Y BACTERIAS HACIA EL AGUA SUBTERRÁNEA	38
TABLA 8.1 DISEÑO DEL MUESTREO	48
TABLA 8.2 PUNTOS DE MUESTREO SELECCIONADOS	49
TABLA 8.3 PARÁMETROS BIOLÓGICOS A DETERMINAR	51
TABLA 8.4 PUNTUACIÓN DE LA INSPECCIÓN SANITARIA Y NIVEL DE RIESGO ASOCIADO	54
TABLA 8.5 TÉCNICAS DE CUANTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS BIOLÓGICOS POR DETERMINAR	62
TABLA 8.6 CLASIFICACIÓN DEL RIESGO DEBIDO A LA CONTAMINACIÓN BIOLÓGICA	65
TABLA 9.1 DESCRIPCIONES DE LOS PUNTOS DE MUESTREO	67
TABLA 9.2 NIVEL DE RIESGO PARA CADA PUNTO DE MUESTREO	69
TABLA 9.3 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE CAMPO, ÉPOCA DE ESTIAJE	70
TABLA 9.4 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE CAMPO, ÉPOCA DE LLUVIA	71
TABLA 9.5 CALIDAD BIOLÓGICA DEL AGUA DE IRRIGACIÓN, ÉPOCA DE ESTIAJE	73
TABLA 9.6 CALIDAD BIOLÓGICA DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO, ÉPOCA DE ESTIAJE	76
TABLA 9.7 CALIDAD BIOLÓGICA DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO, ÉPOCA DE ESTIAJE	77
TABLA 9.8 CALIDAD BIOLÓGICA DEL AGUA DE IRRIGACIÓN, ÉPOCA DE LLUVIA	82
TABLA 9.9 CALIDAD BIOLÓGICA DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO, ÉPOCA DE LLUVIA	85
TABLA 9.10 CALIDAD BIOLÓGICA DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO, ÉPOCA DE LLUVIA	86
TABLA 9.11 RESUMEN DE RESULTADOS – RIESGO SANITARIO DE LAS FUENTES SANITARIAS	100

Índice de Figuras

FIGURA 3.1 DISTRITO DE RIEGO 003, VALLE DE TULA	9
FIGURA 3.2 ACUÍFEROS EN EL VALLE DE TULA	12
FIGURA 4.1 ESQUEMA GENERAL DE GENERACIÓN, TRATAMIENTO Y REÚSO DE AGUAS RESIDUALES Y SU INFILTRACIÓN AL ACUÍFERO: SITUACIÓN TÍPICA SIN PLANIFICACIÓN NI CONTROL	41
FIGURA 8.1 ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA DEL PROYECTO	46
FIGURA 8.2 LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO	50
FIGURA 8.3 FORMATO DE INSPECCIÓN SANITARIA PARA POZOS.	55
FIGURA 8.4 FORMATO DE INSPECCIÓN SANITARIA PARA MANANTIALES	56
FIGURA 8.5 FORMATO DE INSPECCIÓN SANITARIA PARA NORIAS.	57
FIGURA 8.6 ENVASES UTILIZADOS PARA RECOLECCIÓN DE MUESTRAS	58
FIGURA 8.7 PUNTOS DE MUESTREO ZONA 1 - ATITALAQUIA	59
FIGURA 8.8 PUNTOS DE MUESTREO ZONA 2 - TLAHUELILPAN	60
FIGURA 8.9 PUNTOS DE MUESTREO ZONA 3 - ACTOPAN	61
FIGURA 8.10 ESQUEMA DE ASIGNACIÓN DE NIVEL DE REMEDIACIÓN POR MEDIO DEL ANÁLISIS DE RIESGO	66
FIGURA 9.1 RESULTADOS DE BACTERIAS Y BACTERIÓFAGOS EN EL AGUA DE RIEGO, ÉPOCA DE ESTIAJE	74
FIGURA 9.2 RESULTADOS DE <i>GIARDIA</i> SPP. EN AGUAS DE IRRIGACIÓN, ÉPOCA DE ESTIAJE	74
FIGURA 9.3 RESULTADOS DE HUEVOS DE HELMINTOS EN AGUAS DE IRRIGACIÓN	75
FIGURA 9.4 CALIDAD DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO EN LA ZONA 1, ÉPOCA DE ESTIAJE	78
FIGURA 9.5 CALIDAD DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO EN LA ZONA 2, ÉPOCA DE ESTIAJE	79
FIGURA 9.6 CALIDAD DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO EN LA ZONA 3, ÉPOCA DE ESTIAJE	79
FIGURA 9.7 PORCENTAJE DE POZOS QUE PRESENTAN CF EN ÉPOCA DE ESTIAJE	81
FIGURA 9.8 RESULTADOS DE BACTERIAS Y BACTERIÓFAGOS EN EL AGUA DE RIEGO, ÉPOCA DE LLUVIA	83
FIGURA 9.9 RESULTADOS DE <i>GIARDIA</i> SPP. EN AGUAS DE IRRIGACIÓN, ÉPOCA DE LLUVIA	83
FIGURA 9.10 RESULTADOS DE HH EN AGUAS DE IRRIGACIÓN, ÉPOCA DE LLUVIA	84
FIGURA 9.11 CALIDAD DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO EN LA ZONA 1, ÉPOCA DE LLUVIA.	87
FIGURA 9.12 CALIDAD DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO EN LA ZONA 2, ÉPOCA DE LLUVIA	88
FIGURA 9.13 CALIDAD DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO EN LA ZONA 3, ÉPOCA DE LLUVIA	88
FIGURA 9.14 PORCENTAJE DE POZOS QUE PRESENTAN CF EN ÉPOCA DE LLUVIA	90
FIGURA 9.15 RESULTADOS DE LOS EFECTOS DE TEMPORALIDAD, ZONA Y TIPO DE FUENTE CON RESPECTO A LA PRESENCIA DE CF EN LOS PUNTOS DE MUESTREO	91
FIGURA 9.16 RIESGO SANITARIO DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO – COLIFORMES FECALES	95

FIGURA 9.17 RIESGO SANITARIO DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO – <i>E. COLI</i>	96
FIGURA 9.18 RIESGO SANITARIO DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO – ENTEROCOCOS	97
FIGURA 9.19 RIEGO SANITARIO DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO – <i>GIARDIA SPP.</i>	98
FIGURA 9.20 RIESGO SANITARIO DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO – HUEVOS DE HELMINTOS	99

RESUMEN

Durante más de 100 años, el Valle de Tula, Hgo., ha servido como sitio de disposición final de las aguas residuales de la ciudad de México. Dichas aguas son reutilizadas, sin tratamiento previo para la irrigación de más de 85,000 ha de campos de cultivo en esa región. El uso excesivo de altas láminas de riego y el inapropiado sistema de transporte y distribución de las aguas residuales (canales de riego y presas no revestidos) han provocado la recarga artificial del acuífero. Esta situación ha traído como consecuencia la elevación del nivel freático, provocando que nuevos puntos de descarga de agua en la superficie (manantiales) emerjan. Dichos cuerpos brotantes de agua, así como los pozos y norias de los cuales se obtienen recursos hídricos del subsuelo, conforman hoy en día las únicas fuentes de abastecimiento para los más de 450,000 habitantes del Valle de Tula. El suministro de agua proveniente de los acuíferos que se encuentran influenciados por las zonas de irrigación representa un riesgo potencial de salud para la población, ya que existe la posibilidad de que los organismos patógenos contenidos en las aguas residuales de riego puedan infiltrarse a los acuíferos, deteriorando su calidad.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar la calidad biológica de quince fuentes de suministro de agua de las principales zonas del Valle de Tula, las cuales incluyeran las tres diferentes fuentes de abastecimiento a la población: manantiales, norias y pozos. La calidad biológica fue analizada con base en siete parámetros: Coliformes fecales, *Escherichia coli*, esporas de *Clostridium* spp., enterococos, bacteriófagos somáticos, *Giardia* spp. y huevos de helmintos. Así mismo, se realizó una inspección sanitaria a todos los puntos de muestreo, empleando como metodología la aplicación de los Planes de Seguridad de Agua (Water Safety Plans) sugeridos por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2006). Los resultados de la caracterización biológica del agua y de la inspección sanitaria fueron utilizados en conjunto para la creación de un esquema de categorización del nivel de riesgo que representa cada fuente de agua analizada. Para el establecimiento del riesgo se utilizaron los coliformes fecales, *E. coli*, enterococos, *Giardia* y huevos de helmintos, de acuerdo a los criterios de selección considerados. Dicho esquema permitió evaluar las condiciones de riesgo de cada punto de muestreo y determinar la prioridad de acción requerida.

Los resultados mostraron que en general en todos los puntos de muestreo se detecta la presencia de por lo menos algún indicador de contaminación fecal (principalmente coliformes fecales), lo cual implica una situación de riesgo potencial para la salud de la población. La presencia de indicadores fecales en las fuentes de suministro sugiere la contaminación de las aguas subterráneas de la zona del Valle de Tula, debido a la infiltración e influencia de las aguas residuales empleadas para riego.

Los manantiales y las norias resultaron ser los puntos más afectados, con una alta presencia de todos los indicadores analizados. Esto se atribuye a que estos puntos de muestreo se encuentran a profundidades relativamente cercanas a la superficie, por lo que están más expuestos a la influencia del agua residual. El nivel de riesgo de estos puntos es muy alto, por lo que requieren de una acción urgente. Por su parte, los pozos presentaron un menor nivel de contaminación, encontrándose solamente la presencia de algunos indicadores bacterianos y de virus entéricos (bacteriófagos somáticos). Sin embargo, se observó que el 50% de los pozos en la época de estiaje, y poco más del 80% la época de lluvia, presentan densidades de coliformes fecales superiores a las establecidas por la normatividad mexicana. El nivel de riesgo de estos puntos generalmente es bajo cuando no se encuentran en zonas de irrigación, pero éste aumenta a intermedio-alto cuando los pozos están dentro de áreas de riego, lo que implica que requieren de una acción prioritaria alta. De manera general, para el establecimiento del riesgo con diferentes indicadores de contaminación biológica, se encontró que en las tres zonas del Valle de Tula, el 20-26% de los puntos muestreados (considerado la época de lluvia y estiaje) tienen un nivel de riesgo bajo, el 53-73% un nivel intermedio-alto y el 6-20% muy alto.

En cuanto a la variabilidad de los resultados en la época de lluvia y estiaje, los resultados indican que no hay una diferencia significativa ($Pvalue=0.5$), tampoco se observó una diferencia significativa para la diferencia entre zonas estudiadas ($Pvalue=0.27$). Por su parte, los resultados si son significativos en cuanto al tipo de fuente analizada ($Pvalue<0.0001$), indicando que las fuentes con mayor presencia de indicadores biológicos son las norias, seguidas de los manantiales y los pozos.

Las medidas de acción potenciales para la protección de los diversos puntos muestreados en este estudio también se sugieren, con la finalidad de mejorar la protección de dichas fuentes de suministro de agua a la población.

1 INTRODUCCIÓN

La calidad del agua potable es sumamente importante, ya que su alteración se ve reflejada en los índices de enfermedades, principalmente infecciosas que presenta la población. La presencia en el agua de organismos como virus, bacterias, protozoos y huevos de helmintos puede generar un problema de salud, ya que algunas especies de éstos son causantes de enfermedades infecciosas en humanos.

En este trabajo de tesis se evaluó la calidad biológica en algunas de las fuentes de suministro de agua del Valle de Tula, lugar ubicado en el Estado de Hidalgo, que por más de cien años ha servido como receptor de las aguas residuales de la ciudad de México, las cuales son reutilizadas sin tratamiento previo para riego agrícola. Esta práctica ha provocado la recarga artificial del acuífero, lo cual ha traído como consecuencia la elevación del nivel freático por lo que han emergido nuevos puntos de descarga de agua a la superficie, los cuales hoy en día se utilizan como fuentes de abastecimiento de agua potable para la población.

La recarga del acuífero con aguas residuales propicia el reúso de agua residual para consumo humano (Foster, 2001). Por lo tanto, se consideró importante llevar a cabo una evaluación global de la calidad biológica de las fuentes de suministro del Valle de Tula, a fin de conocer los riesgos potenciales de contaminación por la presencia de organismos patógenos.

Para cumplir con el objetivo planteado en este trabajo de investigación, se planteó analizar quince fuentes de suministro de agua del Valle de Tula, las cuales incluyeran las tres diferentes fuentes de abastecimiento presentes en la zona: manantiales, norias y pozos. La calidad biológica fue analizada con base en siete parámetros: Coliformes fecales, *Escherichia coli*, esporas de *Clostridium* spp., enterococos, bacteriófagos somáticos, *Giardia* spp. y huevos de helmintos. Se llevó a cabo una inspección sanitaria a todos los puntos de muestreo, empleando como metodología la aplicación de los Planes de Seguridad de Agua conocidos como Water Safety Plans y cuya utilidad ha sido recientemente destacada por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2006).

En este trabajo de tesis se presenta una descripción del uso del agua en la zona del Valle de Tula a partir de información bibliográfica, así como los fundamentos teóricos respecto de la contaminación biológica del agua y los posibles factores que afectan a la supervivencia y el transporte de los patógenos en el agua. Así mismo, se describe la metodología empleada para la realización de las inspecciones sanitarias y del análisis biológico del agua en campo. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de las fuentes de suministro del Valle de Tula, así como las conclusiones y recomendaciones obtenidas.

2 JUSTIFICACIÓN

Las aguas provenientes de los acuíferos representan una de las mayores fuentes de suministro de agua potable en México y en la mayor parte del mundo. En México, aproximadamente el 64% del abastecimiento público de agua potable proviene de fuentes subterráneas (CONAGUA-SEMARNAT, 2007). Durante décadas, se había considerado a los acuíferos como recursos protegidos de la contaminación biológica y química que se había presentado en los cuerpos de agua superficiales. Sin embargo, el incremento en la densidad de población, el desarrollo de la sociedad y la industrialización han incrementado los riesgos potenciales de contaminación a los acuíferos. La contaminación biológica de las aguas subterráneas se relaciona con diversas enfermedades, principalmente de tipo gastrointestinal. En México, las infecciones intestinales se encuentran entre las principales causas de morbilidad y mortalidad en el país. En efecto, durante el primer trimestre del 2008 se reportaron más de un millón de casos de enfermedades infecciosas intestinales relacionadas con el agua (SS, 2008).

La disposición de aguas residuales para riego agrícola ha sido una práctica común en todo el mundo, siendo México y China los países con mayores extensiones de territorio irrigados con aguas residuales. Sin embargo, análisis específicos indican la presencia de bacterias (*Salmonella* spp., *Shigella* spp. y *Vibrio cholerae*), virus y otros organismos patógenos (protozoos y huevos de helmintos) en las aguas residuales (Bouwer e Idelovitch, 1987), lo cual representa un riesgo potencial de salud, debido a su capacidad para transmitir en corto tiempo enfermedades a la población (Jiménez *et al.*, 2002), ya que junto con las aguas residuales los patógenos pueden infiltrarse e influir en la calidad de agua de los acuíferos y por lo tanto el agua de suministro a la población. Como ejemplo del problema que puede ser la contaminación biológica en las fuentes de suministro está el estudio realizado por Macler y Mercle (2002), dichos autores determinaron la presencia de contaminación fecal en aproximadamente la mitad de los pozos de agua potable en los Estados Unidos.

En este caso de estudio, el Valle de Tula ha recibido las aguas residuales de la ciudad de México sin previo tratamiento por más de 100 años. Dicha situación ha favorecido el

desarrollo económico de la región, ya que la producción agrícola se ha incrementado significativamente. Sin embargo, debido a las intensas láminas de riego que se utilizan en la zona, existe un riesgo potencial de contaminación biológica del agua subterránea. Por lo tanto, se considera importante evaluar la contaminación biológica en las fuentes de suministro de agua del Valle de Tula, a fin de obtener un mejor entendimiento del riesgo que dicha situación representa a la salud pública.

3 ANTECEDENTES

3.1 Descripción del Valle de Tula

El Valle de Tula se ubica dentro de la Cuenca del Río Tula en el estado de Hidalgo. Es un sitio con suelos salitrosos que por sus características hacían muy difícil su desarrollo agrícola. El Valle de Tula se ubica a aproximadamente 100 km al norte de la ciudad de México, entre las coordenadas 19° 54' y 20° 30' de latitud norte y 99° 22' y 98° 56' de longitud oeste, a una altitud promedio de 1900 msnm. Cuenta con un clima templado subárido y una temperatura media anual de 17 °C; presenta una precipitación de 550 mm, una evapotranspiración de 1750 mm y lluvias en verano (CNA-BGS, 1998; Jiménez *et al.*, 2004; INEGI, 2005).

La vegetación original del Valle son matorrales xerófilos, tales como el mezquite, acacia dulce, yuca y una amplia variedad de cactus (Siebe, 1998). Las tres principales clases de suelo (Tabla 3.1) de la zona son leptosoles, feozems y vertisoles, se caracterizan por ser pobres y finos, y estar localizados sobre una capa de sedimentos aluviales (Siebe, 1998). Los leptosoles son suelos poco profundos (0-30 cm), lo que limita el desarrollo de las raíces, la capacidad de retener agua y el contenido de nutrimentos. Los feozems son suelos de profundidad media, ricos en materia orgánica, de texturas medias y con capacidad productiva media a alta, especialmente si se cuenta con riego. Los vertisoles son suelos profundos, de texturas medias productivos de la zona, pero son vulnerables al ensalitramiento, sobre todo si el agua de riego contiene sales (Jiménez, *et al.*, 2004).

Tabla 3.1 Características de los suelos del Valle de Tula (Siebe, 1994)

Parámetro	Leptosoles	Feozems	Vertisoles
Valor pH	6.9-8.1	7.4-8.0	6.9-8.4
Materia orgánica	3.1-6.4	1.6-4.5	3.8-5.5
Textura	Franco arenosa a franco arcillosa	Franco arenosa a franco arcillosa	Arcillo limosa a arcilla

Desde hace más de 100 años se comenzaron a aprovechar las aguas residuales de la ciudad de México en la región del Valle de Tula (CNA-BGS, 1998; Blumenthal *et al.*, 1996), haciéndolas llegar a los tres distritos de riego del Valle (DR03 Tula, DR112 Ajacuba y DR100 Alfajayucan) a través de un complejo sistema de riego. Dicho sistema consta de nueve presas (tres de ellas con agua limpia y seis con agua residual), tres ríos (Tula, Actopan y El Salado) y diversos canales (Jiménez *et al.*, 2004). La Figura 3.1 presenta el Distrito de Riego 003 y las áreas de irrigación. Actualmente, el Valle de Tula representa el 22% del área regada del país con el 30% del agua residual destinada al riego agrícola (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Distritos de Riego en México que utilizan agua residual (CNA-SEMARNAT, 2004; CONAGUA-SEMARNAT, 2007)

Distrito de Riego			Volumen usado (m ³ /s)			
			Total	Tratada	No tratada	Área (ha)
Noreste	010	Culiacán, Sinaloa	0.13	0	0.13	800
	014	Río Colorado, Baja California	0.011	0	0.11	69
	066	Sto. Domingo, Baja California Sur	0.004	0	0.004	22
Norte-Centro	005	Delicias Chihuahua	0.022	0	0.022	589
	009	Cd. Juárez, Chihuahua	3.72	0	0.56	7,503
	017	R. Lago, Coahuila-Durango	0.18	0	0.18	1,600
Noreste-Central	029	Xicoténcatl, Tampico	0.62	0	0.62	2,300
	035	La Antigua, Veracruz	0.39	0	0.39	1,000
	082	Río Blanco, Veracruz	9.41	0.08	9.33	13,000
Valle de México	003	Tula, Hidalgo	34.12	0	34.12	57,973
	100	Alfajayucan, Hidalgo	11.85	0	11.85	24,745
	112	Ajacuba, Hidalgo	4.25	0	4.25	8,500
	033	Estado de México	0.6	0	0.6	5,498
	028	Tulancingo, Hidalgo	0.14	0	0.14	300
	088	Chiconautla, México	0.8	0	0.8	3,123
	016	Estado de Morelos	11.7	1.1	9.6	23,000
Balsas-Lerma	013	Estado de Jalisco	4.87	0	4.87	13,077
	020	San Juan del Río, Qro.	0.07	0.07	0	230
	024	Ciénaga de Chapala, Mich.	0.2	0	0.2	10,469
	030	Valsequillo, Puebla	8.23	7.2	1.03	20,600
	045	Tuxpan, Michoacán	1.74	0.17	1.57	4,300
	056	Atoyac-Zahuapan, Tlaxcala	0.8	0.24	0.56	3,800
	061	Zamora, Michoacán	0.67	0	0.67	2,000
	068	Tepecuac y Quechul, Guerrero	0.07	0	0.07	100
	087	Rosario-Mezq, Michoacán	9.61	0	9.61	33,080
	097	Lázaro Cárdenas, Michoacán	9.08	0	9.08	21,899
	099	Quitupan Magdalena, Michoacán	0.18	0	0.18	5,000
Total			113.46	8.86	100.55	264,58

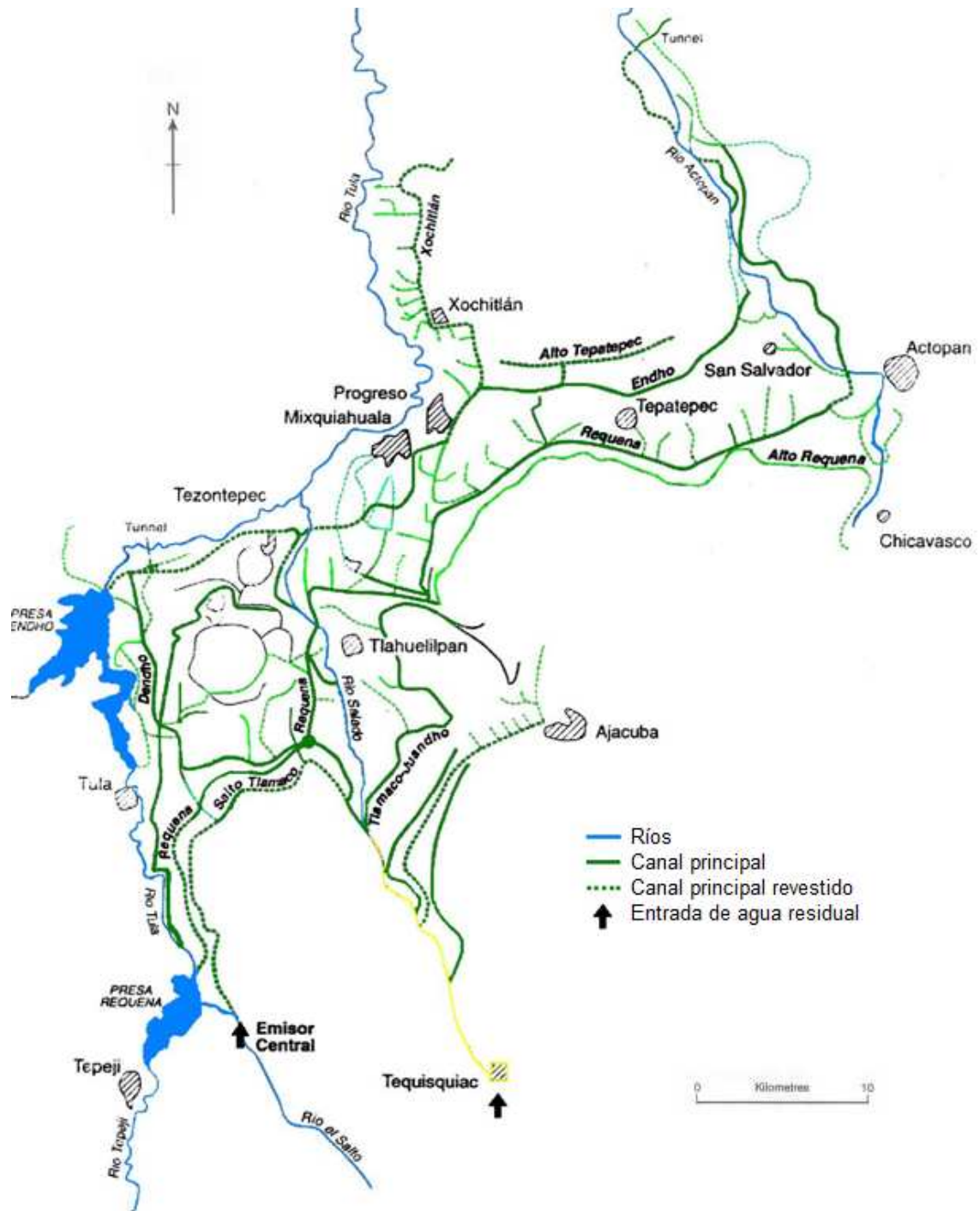


Figura 3.1 Distrito de riego 003, Valle de Tula (CNA-BGS, 1998)

El riego con dichas aguas propició la formación de suelos aptos para la agricultura, por lo que hoy en día es posible observar estratos de suelo fértil, en algunos casos de más de 1 m de profundidad, en extensas zonas del Valle. La superficie actualmente bajo cultivo es de más de 100,000 ha, de las cuales 84,500 ha se riegan con aguas residuales, y dan empleo y sustento a más de 66 mil familias, incluyendo zonas con alta presencia de población indígena (CONAGUA, 2006). La Tabla 3.3 presenta las zonas de riego del Valle de Tula.

Tabla 3.3 Zonas de riego del Valle de Tula

Zona de riego	Superficie (ha)	No. de usuarios
003 Tula	53,373	34,723
100 Alfayucan	21,384	9,905
112 Ajacuba	3,081	1,845
Otras	7,662	4,634
Total	85,500	51,107

Fuente: CONAGUA-SEMARNAT (2007); SEMARNAT 2003-2004.

En el Valle de Tula existen 283 fuentes de agua (pozos y manantiales), de las cuales el 52% se encuentran dentro del área de irrigación o próximos a los canales de distribución, por lo que se encuentran bajo el efecto directo de la infiltración de aguas residuales (CNA-BGS, 1998), situación que representa un riesgo sanitario y potencial de contaminación ambiental.

3.1.1 Acuíferos en el Valle de Tula

Debido a que el Valle de Tula está constituido por materiales geológicos diversos las características hidrogeológicas no son homogéneas, ya que dependen de las estructuras de las rocas, fallas existentes en la zona, permeabilidad y porosidad de los diferentes depósitos etc.

Diversos estudios mencionan la existencia de tres mantos acuíferos en la zona del Valle de Tula (CNA, 2002a,b,c; Jiménez *et al.*, 1997; Jiménez *et al.*, 1999) (Figura 3.2). El primer acuífero es el del Valle del Mezquital, el cual es relativamente somero, de profundidad variable, localizado irregularmente en los aluviones cuaternarios de origen fluvial. Los aluviones se consideran formaciones permeables y forman el acuífero superior. La recarga proviene principalmente de las infiltraciones del agua de lluvia, de las aguas de riego y por aporte lateral subterráneo. Adicionalmente, se le considera no confinado (Jiménez *et al.*, 1997, 1999). El segundo acuífero es el de Ixmiquilpan, está localizado principalmente en los basaltos con algunos intervalos de cenizas volcánicas e intercalaciones de lava de la Formación Tarango del Cuaternario. Se piensa que es un acuífero parcial o totalmente confinado. El tercer acuífero es el de Actopan-Santiago de Anaya, localizado en las calizas Cretácicas y en algunas ocasiones se manifiesta como acuífero libre y en otras como parcial o completamente confinado (Jiménez *et al.*, 1997, 1999).

El flujo de las corrientes subterráneas es de sur a norte, en el área del río Tula. Dentro del área del río Actopan el flujo es de sur y oriente hacia el norte. A la altura de Ixmiquilpan, los ríos mencionados confluyen determinando el flujo general del agua subterráneas (Jiménez *et al.*, 1999).

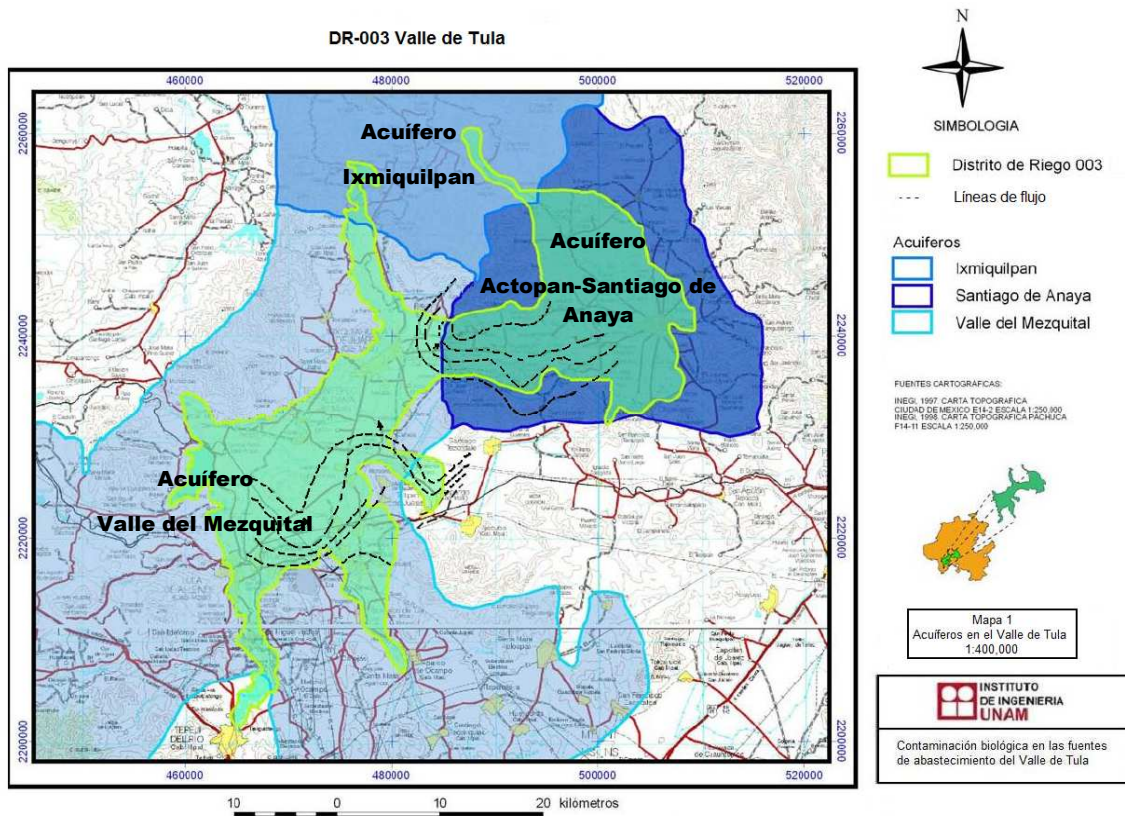


Figura 3.2 Acuíferos en el Valle de Tula (modificación Silva, 2008)

3.1.1.1 Acuífero Valle del Mezquital

Los derrames de lava forman los acuíferos más importantes del área y constituyen la principal zona de recarga de agua subterránea. Estos materiales poseen permeabilidad media a alta, asociada con el fracturamiento de las rocas. Su espesor es variable y en algunas áreas se encuentran interdigitados con depósitos de menor permeabilidad. En los sitios donde afloran o cerca de la superficie forma acuíferos de tipo libre, mientras que a profundidad se encuentran semiconfinados.

Otra fuente de agua subterránea es la secuencia de arenas y gravas dentro de los materiales aluviales. Esta formación aflora en una gran parte del distrito de riego con un espesor muy variable. Aun cuando las capas de arena y grava poseen buena permeabilidad intergranular, en general esta unidad se considera de baja permeabilidad,

debido a los grandes espesores de arcilla. Este acuífero es de tipo libre o semiconfinado en los sitios donde está presente y probablemente se encuentre confinado a profundidad (CNA, 2002a).

A mayor profundidad se localizan las calizas cretácicas. Alrededor del Valle, en donde afloran, poseen alta permeabilidad probablemente como resultado de procesos de disolución. Dado que pocas perforaciones han cortado esta unidad, sus características hidráulicas no están bien definidas. Se infiere que en algunas ocasiones se manifiesta como acuífero libre y en otras como parcial o completamente confinado.

En cuanto a las profundidades de los niveles estáticos, éstas permanecen variables de 10 a 55 m. Es notable que en la zona de Mangas-Tlahuelilpan los niveles se encuentran a pocos metros de profundidad o hay manantiales, debido a que en esta región la recarga por irrigación es muy alta, lo que ha provocado saturación del medio geológico, y en algunos sitios no sólo la recuperación del acuífero, sino la aparición de manantiales que descargan excedentes del almacenamiento subterráneo (CNA, 2002a).

3.1.1.2 Acuífero Ixmiquilpan

La zona denominada acuífero Ixmiquilpan se localiza en la porción central del estado de Hidalgo, cubriendo aproximadamente unos 1,152 km². Limita al norte con la sierra de Juárez hasta el poblado Nicolás Flores, al sur con la ciudad de Ixmiquilpan y el cerro Ventorrilla, al oriente con un tramo del río Amajac y al poniente con el río Tula (CNA, 2002b; Jiménez *et al.*, 1997). Políticamente, se localiza casi en la totalidad del municipio de Ixmiquilpan, y parcialmente en los de Tasquillo, Cardonal y Chilcuautla principalmente.

De las rocas mesozoicas, las calizas El Doctor constituidas en un medio kárstico con permeabilidad elevada en general, pero sus características hidráulicas los catalogan como heterogéneos debido a la distribución errática de las fracturas y medios de disolución. En cuanto a los materiales clásticos de la formación Tarango principalmente y aluviales, constituidos en un medio granular, constituyen también un acuífero heterogéneo (CNA, 2002b).

3.1.1.3 Acuífero Actopan-Santiago de Anaya

El acuífero Actopan-Santiago de Anaya comparte con el acuífero de Ixmiquilpan las calizas de formación El Doctor. Este acuífero se localiza principalmente en la zona de Mangas y San Salvador, en donde se presenta una depresión topográfica, por lo cual recibe escurrimientos superficiales y descargas subterráneas. En la zona de San Salvador, casi al centro del área, se presenta un artesianismo (norias) casi constante.

La presencia de calizas cretácicas tempranas de la formación El Doctor muestra la existencia, a profundidad en el Valle de Actopan, de estructuras favorables para la posible acumulación de agua confinada, existiendo una diferencia relativamente grande de profundidad entre los niveles de agua de esta zona y los de los acuíferos vecinos (Jiménez *et al.*, 1997).

En este acuífero de tipo semiconfinado, se recibe la recarga del sur y del este, los niveles más elevados dentro del subsistema se encuentran en la región de Actopan, esto se debe a que la zona se encuentra adyacente a la del Valle del Mezquital y por estar topográficamente más bajo, el volumen que recibe de agua subterránea produce manantiales y pozos brotantes en el Municipio de San Salvador. Se encuentra en una condición geohidrológica de subexplotación, la recarga es mayor que la extracción, su condición administrativa es de veda parcialmente flexible (CNA, 2002c).

3.1.2 Recarga de acuíferos en el Valle de Tula

Como consecuencia del aporte del agua de irrigación a la cuenca del Valle de Tula, se ha modificado sustancialmente la hidrogeología regional y se ha desarrollado un acuífero de mucha mayor extensión que el original (Jiménez *et al.*, 1999). Como se mencionó, la recarga del acuífero proviene principalmente de las infiltraciones de los canales de riego (271 km de canales no revestidos), del exceso de agua de irrigación en los campos de cultivo, y en menor proporción de aportes laterales del flujo subterráneo natural. El agua de lluvia también contribuye a la recarga, sin embargo, su aporte está limitado por la baja precipitación y alta evaporación en la región (CNA, 1993; CNA-BGS, 1998). Se sabe que

la recarga del acuífero ha aumentado aproximadamente 13 veces ($25 \text{ m}^3/\text{s}$) respecto de la recarga original (CNA-BGS, 1998).

Se considera que el exceso de irrigación ha recargado los acuíferos que se utilizan como agua para uso consumo humano, lo cual elevó los niveles piezométricos y formó nuevos puntos de descarga a la superficie, en forma de manantiales y descargas a los cauces naturales. Como resultado de ello, nuevas áreas de descarga han aparecido, las cuales se aprovechan como fuentes de abastecimiento de agua a la población. Un ejemplo de la aparición de afloramientos es el manantial Cerro Colorado, surgido en 1964 y que en promedio proporciona 600 L/s que son utilizados como suministro a muchos poblados del área (Jiménez *et al.*, 1999). Así mismo, se ha observado el incremento del caudal base del río Tula, en aproximadamente ocho veces su dimensión original, durante los últimos 60 años (CNA, 1993; CNA-BGS *et al.*, 1998).

Otra consecuencia de las altas tasas de infiltración en el Valle de Tula, fue el empobrecimiento de la calidad del acuífero, ya que hubo un desplazamiento del agua del almacenamiento original por aquella infiltrada del agua residual (Jiménez *et al.*, 1999). En 1938 se detectaba ya contaminación en las norias cercanas a los canales de riego, y para 1985 el agua de pozos profundos presentaba mucha semejanza en su composición química con el agua de riego, y desde entonces se han incrementado sus contenidos de boro, nitrógeno y sales. A pesar de esto, el acuífero es la principal fuente de abastecimiento para usos industriales, urbanos, domésticos, pecuarios y agrícolas (Jiménez *et al.*, 1999).

3.1.3 Uso del agua de acuíferos en el Valle de Tula

Se extraen aproximadamente 7.4 m^3 del subsuelo, de los cuales el 64% se destina para fines industriales (termoeléctrica, la refinería de Tula, cementeras y una fenoquímica), el 22% para actividades agropecuarias y 14% para consumo doméstico (Jiménez *et al.*, 2004).

Existen 294 localidades en el Distrito de Riego 003 con aproximadamente 380,000 habitantes, los cuales tienen como única fuente de suministro de agua aquella que puede ser extraída del subsuelo (INEGI, 2005). Del total de las 283 fuentes de abastecimiento que existen en el Valle de Tula, sólo el 55% de las fuentes municipales son cloradas y el 52% se encuentran localizadas en zonas de riego o cercanas a los canales, por lo que son influenciadas directamente por las infiltraciones (Jiménez y Chávez, 1997).

A partir de 1938 hubo un cambio notable en la calidad del agua de consumo de la región. Anteriormente, se pensaba que dicha situación se debía a un problema de contaminación del acuífero local, sin embargo, lo que en realidad ocurrió fue que se llevó a cabo la sustitución del agua original por el agua residual infiltrada, debido al agotamiento del acuífero el agua de recarga ocupó su lugar. Es decir, la población local ha consumido agua proveniente de la infiltración de las aguas negras de la ciudad de México durante los últimos 30 años (Jiménez *et al.*, 2004).

3.1.4 Efectos en la salud por el consumo de agua infiltrada a los acuíferos en el Valle de Tula

Las aguas residuales que se disponen en el Valle de Tula, son tanto de tipo doméstico como industrial, por lo que se presentan desechos sólidos con altas concentraciones de organismos fecales, materia orgánica y compuestos de nitrógeno, así como la presencia de algunas sustancias tóxicas. La infiltración de estas aguas residuales afecta no sólo la calidad del suelo en cuanto a contenido de metales pesados, u otras sustancias tóxicas, sino que también pueden provocar la alteración de la calidad del acuífero (Siebe y Cifuentes, 1995; CNA-BGS, 1998; Gallegos *et al.*, 1999).

Estudios epidemiológicos han demostrado que existen riesgos a la salud debido al riego con agua residual, incluyendo infecciones intestinales por helmintos (i.e. Ascariasis) a los consumidores de los cultivos y a los agricultores, posible transmisión de infecciones bacterianas como cólera y tifoidea a los consumidores de los cultivos, y un bajo nivel de transmisión de gastroenteritis viral (Shuval, 1986).

Se han hecho diversos estudios respecto a los efectos del empleo del agua residual para riego en la salud de la población del Valle de Tula, sin embargo la mayoría de estos trabajos aluden al riesgo implícito por el contacto directo de la población con el agua residual, más no debido al consumo de agua para uso y consumo humano. De acuerdo con los resultados obtenidos por la BGS (1998) el tiempo de supervivencia de los coliformes debajo de la superficie del suelo es suficientemente largo para permitir que éstos representen un peligro al acuífero y por lo tanto al suministro de agua potable. En dicho estudio se demostró que los coliformes migran con la infiltración del agua residual de los canales del sistema de distribución y a través de los campos irrigados. Así mismo, se encontró evidencia de que el movimiento de estos microorganismos ocurre en los periodos de mayor carga hidráulica.

También se ha determinado la presencia de bacterias coliformes fecales (Aguilar, 2006; CNA-BGS *et al.*, 1998; Gallegos *et al.*, 1999; Jiménez *et al.*, 1997; Sotomayor *et al.*, 1998) y *E. coli* (Downs *et al.*, 2000) en algunas fuentes de abastecimiento en la zona del Valle de Tula, aunque en densidades mucho menores a las del agua residual antes de su infiltración, se exceden los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad (NOM-127-SSA1-1994, modificación 2000) situación que representa un riesgo a la salud de la población.

4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 *Agua potable en México*

Las Guías para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud, definen el agua potable como aquella “adecuada para consumo humano y para todo uso doméstico habitual, incluida la higiene personal” (OMS, 1994). La definición de agua potable es un concepto legal que consiste en especificar una lista de compuestos y asociarlos con un nivel tolerable (Jiménez, 2001). En México, la definición está basada en la modificación (2000) de la NOM-127-SSA1-1994, en donde se presenta la selección de microorganismos, sustancias o elementos que deben ser limitadas.

En el agua potable destinada al consumo, preparación de alimentos, bebidas e higiene personal, no deben estar presentes organismos patógenos ni oportunistas. Los requisitos establecidos en la norma vigente en México para controlar la calidad del agua para uso y consumo humano (modificación 2000, NOM-127-SSA1-1994) indican tanto de coliformes totales como de los fecales por 100 mL de muestra analizada.

En el caso de México, en el primer trimestre del 2008 se reportaron más de un millón de casos de enfermedades infecciosas intestinales relacionadas con el agua como agente transmisor de dichas enfermedades (SS, 2008). La Tabla 4.1 presenta los datos registrados de enfermedades infecciosas del aparato digestivo para el año 2008 en México.

Tabla 4.1 Casos por entidad federativa de enfermedades infecciosas y parasitarias del aparato digestivo, durante el primer trimestre del 2008 en México

Enfermedad	Número de casos reportados el primer trimestre de 2008
Enfermedades infecciosas intestinales	1,141,741
Shigelosis	2,631
Fiebre tifoidea	10,182
Paratifoidea y otras salmonelosis	25,353
Infección intestinal debida a virus y otros organismos, y las mal definidas	954,742
Intoxicación alimentaria bacteriana	7,701
Amebiasis intestinal	114,333
Giardiasis	5,697
Otras infecciones intestinales debidas a protozoarios	21,162
Teniasis	102
Ascariasis	25,893
Enterobiasis	4,255
Otras helmintiasis	71,358
Total	2,385,150

FUENTE: Secretaría de Salud, 2008.

4.2 Organismos patógenos en el agua

Los organismos causantes de enfermedades (patógenos) transmitidos por medio del consumo de agua, generalmente son de origen fecal (Ashbolt *et al.*, 2001; Hunter *et al.*, 2002).

La Organización Mundial de la salud (WHO por sus siglas en inglés, 2003a) estima que aproximadamente 1.1 billones de personas en el mundo consumen agua de calidad poco confiable (Kindhauser, 2003) y que la mayoría de las enfermedades diarreicas en el mundo (88%) se atribuyen al consumo de agua de mala calidad y a la falta de higiene (WHO, 2003a).

Los principales y más conocidos patógenos involucrados en enfermedades debido al consumo de agua son virus, bacterias, hongos, protozoos y parásitos intestinales que son de preocupación por su capacidad para transmitir enfermedades a la población en un tiempo relativamente corto. La Tabla 4.2 muestra un resumen de los organismos involucrados en enfermedades relacionadas con el consumo de agua.

Todos estos agentes infecciosos son transmitidos por la ruta fecal-oral, en la cual el agua juega un rol intermedio. La Tabla 4.3 presenta los grupos de enfermedades relacionadas por diferentes vías mediante el consumo de agua.

Tabla 4.2 Enfermedades relacionadas con el suministro de agua

Grupo	Enfermedades
Enfermedades transmitidas por agua, son aquellas dispersadas por medio del agua, en las que ésta actúa como agente de transporte para los patógenos infecciosos. Dependen de la desinfección	Cólera, tifoidea, hepatitis infecciosa, giardiasis, gastroenteritis.
Enfermedades relacionadas con el agua, aquellas que son transmitidas por vectores e insectos que viven cerca del agua. El agua estancada provee un lugar para el desarrollo de vectores transmisores de enfermedades como mosquitos, moscas e insectos.	Fiebre amarilla, dengue, encefalitis, malaria, filiarisis, enfermedad del sueño, oncocerquiasis.
Enfermedades causadas por agentes infecciosos transmitidos por contacto o ingestión del agua. En este caso el agua es parte esencial del ciclo de vida de los agentes infecciosos.	Esquistosomiasis, dracunculosis, filariosis, helmintiasis
Enfermedades causadas por la falta de una cantidad de agua adecuada para la limpieza personal. Algunas también dependen de una falta de higiene.	Sarna, tracoma, lepra, conjuntivitis, salmonelosis, ascariasis, disentería, fiebre paratifoidea.

Fuente: White *et al.*, 1992

En este apartado se presentan los diferentes grupos biológicos que pueden encontrarse en el agua y que son de interés para este trabajo de investigación. Así, se presentan las características de cada grupo y algunos de los resultados de casos de estudio acerca de su remoción e inactivación y los factores que influyen en dichos procesos.

Tabla 4.3 Agentes potenciales infecciosos presentes en el agua residual doméstica (Metcalf y Eddy, 2003)

Organismo	Enfermedad	Síntomas
<p>Bacteria:</p> <p><i>Campylobacter jejuni</i> <i>Escherichia coli</i> <i>Legionella pneumophila</i> <i>Leprosppisa spp.</i> <i>Salmonella</i> <i>Salmonella typhi</i> <i>Shigella</i> <i>Vibrio cholerae</i> <i>Yersinia enterocolitica</i></p>	<p>Gastroenteritis Gastroenteritis Legionelosis Leptospirosis Salmonelosis Fiebre tifoidea Sigelosis Cólera Yersiniosis</p>	<p>Diarrea Diarrea Malestar, fiebre, dolor de cabeza Ictericia, fiebre Fiebre, diarrea, ulceración Disentería bacilar Diarrea, deshidratación Diarrea</p>
<p>Protozoos:</p> <p><i>Acanthamoeba castellani</i> <i>Balantidium coli</i> <i>Cryptosporidium parvum</i> <i>Cyclospora cayetanensis</i> <i>Entamoeba histolytica</i> <i>Giardia lamblia</i></p>	<p>Menígeoencefalitis Balantidiasis Criptosporidiosis Clyclosporasis Amibiasis Giardiasis</p>	<p>Diarrea, disentería Diarrea Diarrea, calambre estomacal, nauseas y vómito Diarrea con sangrado, abscesos Diarrea, nauseas, indigestión</p>
<p>Helmintos:</p> <p><i>Ascaris lumbricoides</i> <i>Enterobius vermicularis</i> <i>Fasciola hepática</i> <i>Hymenolepis nana</i> <i>Taenia saginata</i> <i>T. solium</i> <i>Trichuris trichiura</i></p>	<p>Ascariasis Enterobiasis Fascioliasis Hymenolepiasis Taeniasis Taeniasis Trichuriasis</p>	<p>Infestación por ascáride Lombriz intestinal Solitaria Solitaria Solitaria Triquina</p>
<p>Virus:</p> <p>Adenovirus (31 tipos) Enterovirus Parvovirus (2 tipos) Rotavirus Norovirus</p>	<p>Enfermedades respiratorias Gastroenteritis, ataques, etc. Gastroenteritis Gastroenteritis Gastroenteritis</p>	<p>Ictericia, fiebre, vómito</p>

4.2.1 Virus

Los virus no se consideran partículas vivas, ya que no son capaces por sí mismos de sustituir sus partes o llevar a cabo el metabolismo. Sólo pueden reproducirse cuando están asociados con una célula viva, cuando transmiten la información genética que contienen y su réplica se produce en la célula infectada (Rittmann y McCarty, 2001). Su tamaño varía entre 0.02 a 0.08 μm (Metcalf & Eddy, 2003; Yates y Yates, 1993).

Existen más de 100 tipos diferentes de virus entéricos que son excretados por los humanos, capaces de producir infecciones o enfermedades. Los virus entéricos se multiplican en el tracto intestinal y son desechados en la materia fecal de las personas infectadas, los virus pueden llegar a un nuevo huésped humano por ingestión o inhalación. Desde el punto de vista de salud, los virus entéricos más importantes son los enterovirus (poliovirus, virus del tipo Norwalk, virus de la hepatitis A) (Feachem *et al.*, 1983). Los virus representan un riesgo importante para la salud debido a su baja dosis infectiva, su resistencia al ambiente y a los procesos de desinfección (mayor que la de las bacterias), y a que su detección y cuantificación no pueden hacerse mediante técnicas de laboratorio convencionales (Asano y Levine, 1996; Bitton, 1999; Jiménez, 2003). También se ha demostrado, que entre los organismos patógenos, los virus entéricos tienen el mayor potencial para moverse a profundidad en ambientes subterráneos, penetrar acuitados, y llegar a acuíferos confinados (Borchardt *et al.*, 2007).

Yates y Gerba (1998) hicieron una revisión de varios estudios en los que se examina el destino de los virus a través del suelo; dichos estudios indicaron que existe una reducción significativa en la cantidad de virus contenida en el agua residual que se hace pasar a través del suelo y que tal remoción está controlada principalmente por la clase del suelo, el tipo de virus y el grado de saturación del suelo. Los datos publicados por Gerba (1998) indican que los virus pueden viajar al menos 67 m de manera vertical y 408 m de manera lateral en el suelo, y aún así, continúan siendo infecciosos. También se ha detectado la presencia de virus entéricos en suelos y aguas subterráneas, en sitios que fueron irrigados con agua residual proveniente del tratamiento secundario y clorada (Goyal *et al.*, 1984). Respecto a la migración horizontal de estos organismos, varía entre los 3 y 400m, mientras que el desplazamiento vertical varía de 0.5 a 30 m, dependiendo de las

condiciones del suelo. Sin embargo, estudios recientes muestran que el total de la densidad de virus disminuye exponencialmente a razón de la distancia que viaja a través del suelo (Kenst *et al.*, 2008).

Se han hecho diversos estudios respecto al brote de enfermedades causadas por la contaminación de aguas subterráneas con virus entéricos. Dichos trabajos se han enfocado particularmente en el estudio de los pozos de agua de suministro (Beller *et al.*, 1997; Scandura y Sobsey, 1997; DeBorde *et al.*, 1998; DeSerres *et al.*, 1999; Jean, 2000; Borchardt *et al.*, 2003; Borchardt *et al.*, 2007). La contaminación puede ser resultado de la elusión de los virus de una zona no saturada (aireada) hacia el acuífero, probablemente después de una fuerte lluvia. Varios estudios sugieren que la detección de virus en el agua, está relacionada con la lluvia y su infiltración (Jean 2000; Miossec *et al.*, 2000; Cronin *et al.*, 2003; Taylor *et al.*, 2004).

4.2.2 Bacterias

Las bacterias son organismos muy pequeños, llegan a medir de 0.2-10µm (Yates y Yates, 1993). Son organismos procariontes unicelulares, cuyo citoplasma está compuesto por una suspensión coloidal de proteínas, carbohidratos y otros compuestos orgánicos complejos (Madigan *et al.*, 2002). Tienen gran importancia en cuestiones ambientales, debido a su capacidad de transformar gran variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos en productos inocuos que pueden ser reintegrados a los ciclos biogeoquímicos (Rittmann y McCarty, 2001). Sin embargo, no todas las funciones de las bacterias son benéficas para el ser humano. Algunas serotipos se han identificado como los agentes causantes de enfermedades, principalmente de tipo gastrointestinal que incluso pueden provocar la muerte en humanos (Bruneau *et al.*, 2004).

Muchos tipos de bacterias se encuentran en el tracto intestinal humano y en consecuencia en las heces fecales. Las bacterias patógenas llegan al agua residual por medio de las heces de los individuos infectados. Los principales microorganismos patógenos involucrados en enfermedades relacionadas con el agua son: *E. coli*, *Salmonella* y *Shigella* spp., *Campylobacter jejuni*, y *Aeromonas hydrophila*, entre otras (Macler y Merkle, 2002). Por su tamaño, estos microorganismos son retenidos en el suelo con

facilidad. Algunos estudios sugieren que sólo se requieren 8 cm para separar las bacterias del agua durante su infiltración, sin embargo, han sido detectadas también en longitudes mucho mayores (Feachem *et al.*, 1983; Yavuz-Corapcioglu y Haridas, 1985).

Gerba *et al.* (1975) determinaron que la sobrevivencia de las bacterias en el suelo se ve afectada por el contenido de humedad, la temperatura, la materia orgánica y el antagonismo con la microflora endémica. Determinaron también que en la mayoría de los casos, la sobrevivencia de bacterias patógenas en el suelo es de 2 a 3 meses, y observaron que el movimiento de bacterias coliformes a través del suelo variaba de 1 a 450 m. Varios autores sugieren que la migración podría permitir la contaminación de las aguas subterráneas, generando enfermedades asociadas a dichos microorganismos (Craun, 1985; Yates y Yates, 1988; Yavuz-Corapcioglu y Haridas, 1985).

4.2.3 Protozoos

Los protozoos son eucariotas unicelulares heterótrofos que pueden buscar e ingerir sus alimentos. Estos organismos sirven como “limpiadores” de los efluentes de agua residual, ya que son capaces de consumir bacterias y partículas de material orgánico (Metcalf y Eddy, 2003; Rittmann y McCarty, 2001). A estos organismos les falta una verdadera pared celular y su tamaño varía de 2-60 μm (Madigan *et al.*, 2000; Yates y Yates, 1993).

Los principales protozoos patógenos que se han transmitido por medio del agua subterránea son *Cryptosporidium parvum* y *Giardia lamblia* (Macler y Merkle, 2000). Estos organismos afectan principalmente a individuos con un sistema inmunológico vulnerable, como los niños pequeños, ancianos, personas con síndrome de inmunodeficiencia adquirida e individuos sujetos a tratamientos contra el cáncer (Metcalf & Eddy, 2003). Pueden desarrollarse como trofozoitos o quistes. Los protozoos no se reproducen en el ambiente, sin embargo, son capaces de sobrevivir y permanecer activos por semanas, meses o incluso años, dependiendo de las condiciones ambientales (Bausum *et al.*, 1983). Se ha observado que el oocito de *Cryptosporidium parvum* y el quiste de *Giardia lamblia* son las formas más resistentes. Incluso se ha demostrado que *Cryptosporidium* y *Microsporidia* son resistentes a la cloración (Brusseu *et al.*, 2005).

Diversos estudios han determinado la presencia de protozoos, siendo *Giardia* el más significativo, en diferentes cultivos (papa, zanahoria, cilantro, lechugas) irrigados con agua de reúso (Amahmid *et al.*, 1999; Srikanth y Naik, 2004).

4.2.4 Helmintos

El término "helminto" se utiliza para describir a una variedad de gusanos, que generalmente parasitan el intestino del ser humano. Los helmintos o gusanos son animales eucariontes pluricelulares, invertebrados de cuerpo alargado con simetría bilateral y órganos definidos, sin extremidades, con reproducción sexuada durante el estadio adulto y con un tamaño variable que oscila entre décimas de milímetro a varios metros. Evolutivamente se sitúan en los niveles inferiores del reino animal (Feachem *et al.*, 1983). Mundialmente, los helmintos son uno de los principales agentes causantes de enfermedades humanas. Se estima que el número de infecciones humanas causadas por helmintos se encuentra en el orden de 4.5 billones (Roberts y Janovy, 1996). Las tres principales infecciones de helmintos transmitidas por medio del suelo son ascariasis, tricuriasis y anquilostomiasis (Bethony *et al.*, 2006).

De manera general estos organismos no se transmiten por la ingestión de agua, debido a su fácil sedimentación y remoción con un tratamiento primario o en lagunas de almacenamiento. Sin embargo, en países en vías de desarrollo, estos parásitos tienen una alta incidencia (Jiménez y Chávez, 1999), con lo que se considera que es posible que se encuentren en el agua de reúso para fines agrícolas. Existen varios tipos de helmintos, pero el que se reporta con mayor frecuencia es el de *Ascaris* (Jiménez, 2003). En años recientes el incremento del uso del agua residual para irrigación ha aumentado el riesgo potencial de transmisión de enfermedades causadas por nemátodos intestinales tales como *A. lumbricoides* y *T. trichiura*, debido principalmente al prolongado tiempo de supervivencia de los huevos de estos parásitos en el ambiente (Ghiglietti *et al.*, 1995), ya que en condiciones óptimas éstos pueden sobrevivir durante años en el suelo (Feachem *et al.*, 1983).

4.3 Indicadores microbiológicos de la calidad del agua

El aislamiento e identificación de organismos patógenos en el agua presenta un alto grado de dificultad, debido a que se encuentran en un número muy reducido y presentan una gran diversidad. Por lo tanto, en la práctica se emplean microorganismos que son mucho más numerosos, fácilmente identificables y de costo accesible como indicadores de la presencia de organismos patógenos. A pesar de que hoy en día existen nuevos métodos moleculares – aunque costosos- para la identificación de patógenos en muestras de agua, los expertos concuerdan en que el empleo de indicadores de dichos organismos asegura una mejor determinación de la calidad del agua (Ford y Colwell, 1996; Rose y Grimes, 2001).

Para predecir la presencia de patógenos en el agua, se emplea un grupo de microorganismos, generalmente llamados indicadores de contaminación fecal (como coliformes, enterococos, colifagos, esporas de *Clostridium*; Medema *et al.*, 2003). Las Guías de Calidad para Aguas de Consumo Humano de la OMS mencionan tres tipos de indicadores microbiológicos: los coliformes termotolerantes, coliformes totales y como organismo indicador de mayor precisión para detectar la contaminación fecal a *E. coli*, aunque en realidad son buenos indicadores sólo de bacterias. Las características generales de los microorganismos indicadores son las siguientes (Murray, 1999):

- Deben ser un constituyente normal de la flora intestinal de individuos sanos.
- Están presentes, de forma exclusiva, en las heces de animales homeotermos.
- Están presentes cuando los microorganismos patógenos intestinales lo están
- Se presentan en número elevado, facilitando su aislamiento e identificación.
- Deben ser incapaces de reproducirse fuera del intestino de los animales homeotermos.
- Su tiempo de supervivencia debe ser igual o superior al de las bacterias patógenas
- Deben ser fáciles de aislar y cuantificar.
- No deben ser patógenos.

En las siguientes secciones se presentan las características de los organismos indicadores de patógenos en el agua.

4.3.1 Bacteriófagos

Los virus de bacterias son un grupo de virus que infectan células bacterianas. También llamados virus bacterianos, bacteriófagos o fagos, éstos son utilizados como indicadores de la presencia de virus patógenos, ya que comparten características similares, *i.e.* tamaño, forma, morfología y puntos isoeléctricos (Tabla 4.4) (Metcalf *et al.*, 1995; Armon y Kott, 1996).

Tabla 4.4 Características de virus y posibles fagos surrogados¹ (Collins *et al.*, 2006)

	Virus/fago	Tamaño (nm)	Simetría	Punto isoeléctrico	Material genético
Fago	MS2	26	Icosaédrico	3.5-3.9	ss-RNA
	PRD1	62	Icosaédrico	4.2	ds-DNA
	φX174	25-27	Icosaédrico	6.6	ss-DNA
Virus	Adenovirus	80-110	Icosaédrico	N/A	ds-DNA
	Astrovirus	27-30	Poliedro	N/A	ss-RNA
	Coxsackievirus	28-30	Icosaédrico	4.8	ss-RNA
	ECHOvirus	28-30	Icosaédrico	5.0-6.4	ss-RNA
	Apthovirus	27-30	Icosaédrico	N/A	ss-RNA
	Norovirus	35-39	Icosaédrico	5	ss-RNA
	Poliovirus	28-30	Icosaédrico	4.5-6.5	ss-RNA
Rotavirus	80	Icosaédrico	3.9	ds-DNA	

¹ Surrogado es el término utilizado para hacer referencia a una medida indirecta.

La mayoría de los virus que se han estudiado en detalle infectan bacterias del grupo entérico, tal como *Escherichia coli* y *Salmonella typhimurium*. Sin embargo, se conocen virus que infectan a diversos procariontes tanto *Bacteria* como *Archaea*. Los bacteriófagos tienen pocas probabilidades de reproducirse en el ambiente, debido a los diversos factores limitantes (*i.e.* bajas temperaturas en el acuífero), además necesitan una célula huésped viable para su duplicación. Los métodos para el aislamiento y cuantificación de los bacteriófagos (*i.e.* doble capa de agar) son más sencillos y baratos que aquellos para la determinación de virus entéricos (Collins *et al.*, 2006).

Los colifagos son virus que infectan a las subespecies de *Escherichia coli*. Se encuentran en cantidades relativamente grandes en el agua residual, su fuente de origen son las heces humanas y de animales.

Entre otros, los bacteriófagos somáticos (Hilton y Stotzky, 1973; IAWPRC Study Group on Health Related Water Microbiology, 1991), los específicos F-RNA (Havelaar y Hogeboom 1984; IAWPRC Study Group on Health Related Water Microbiology, 1991) y aquellos que infectan *Bacteroides fragilis* (Tartera y Jofre, 1987; IAWPRC Study Group on Health Related Water Microbiology, 1991), han sido propuestos como potenciales indicadores de virus y/o microorganismos fecales persistentes.

Los dos principales grupos que han sido utilizados en estudios de supervivencia y de trazadores de surrogados para los patógenos virales son los somáticos y los macho específico F-RNA (Tabla 4.5).

Los colifagos somáticos se adhieren a la pared celular del huésped. La variedad denominada MS (macho específico, por sus siglas en inglés *male specific*), cuenta con algunos fagos (también llamados F+ ya que pueden transmitir un fragmento de ADN a otra bacteria receptora F-) que son de la misma forma y tamaño que los enterovirus más pequeños, éstos infectan a las células a través del pili (F-pili) producido por algunas bacterias durante su ciclo de crecimiento (Metcalf y Eddy, 2003; Collins *et al.*, 2006).

La Tabla 4.6 presenta las ventajas y desventajas como indicadores de contaminación fecal de los colifagos somáticos y macho específico.

Tabla 4.5 Agrupamiento y características de los bacteriófagos (IAWPRC, 1991; Havelaar et al., 1986)

Tipo de Fago	Miembros de la familia	Huésped	Material genético	Tipo de Cola	Tamaño (nm)	Forma	Fago
Somático	Myoviridae	<i>E. coli</i> , otras Enterobacterias	ds-DNA linear	Larga, contráctil	95X65	Capa proteica cúbica	T2, T4, T6
	Siphoviridae	<i>E. coli</i> , otras Enterobacterias	ds-DNA linear	Largo, no-contráctil	54	Capa proteica cúbica	T5, λ
	Podoviridae	<i>E. coli</i> , otras Enterobacterias	ds-DNA linear	Corto, no-contráctil	47	Capa proteica cúbica	T7, T3
	Tectiviridae	<i>E. coli</i> , otras Enterobacterias	ds-DNA linear	--	62	Capa proteica cúbica	PRD1
	Microviridae	<i>E. coli</i> , otras Enterobacterias	ss-DNA circular	Sin cola	30	Capa proteica cúbica	ϕ X174
MS F-RNA	Leviviridae	<i>E. coli</i> , Salmonella	ss-RNA linear	Sin cola	20-30	Capa proteica cúbica	MS2, Q β
	Inoviridae	<i>E. coli</i> , Salmonella	ss-DNA circular	Sin cola	810x6	Forma filamentosa o de varilla	SJ2, fd, M13

Tabla 4.6 Ventajas y desventajas de los colifagos somáticos y MS F-RNA como indicadores de contaminación fecal.

Tipo de fago	Ventajas	Desventajas
Somático	Existen métodos estandarizados disponibles que permiten la detección rápida de los colifagos somáticos. Estos fagos se encuentran presentes en grandes cantidades en aguas residuales (Grabow, 1996). Son capaces de sobrevivir en circunstancias ambientales en las que los indicadores bacterianos no sobrevivirían (Leclerc <i>et al.</i> , 2000). Son más resistentes a la cloración y por lo tanto pueden ser buenos indicadores en sistemas clorados también (LeChevallier <i>et al.</i> , 2006).	No hay una relación directa entre el número de fagos y virus en las heces humanas (USEPA, 2000b). Algunos virus entéricos pueden ser detectados en la ausencia de colifagos (Stevens <i>et al.</i> , 2001). No todos los individuos infectados liberan colifagos somáticos (DeBorde, 1998).
MS F-RNA	Existen métodos estandarizados disponibles para su detección; su rango de huéspedes es más limitado y específico en comparación con los fagos somáticos. Son resistentes y tienden a sobrevivir más tiempo en comparación con los indicadores bacterianos; su comportamiento es muy similar al de los virus entéricos. (Havelaar <i>et al.</i> , 1993). Tienen una mejor correlación con la presencia de patógenos en las heces humanas (USEPA, 2000b; Havelaar <i>et al.</i> , 1993).	Algunos virus entéricos pueden ser detectados en la ausencia de colifagos (Stevens <i>et al.</i> , 2001). Pocos individuos infectados liberan este tipo de fago. La cantidad de estos fagos liberada en el ambiente es mucho menor en comparación con los fagos somáticos. Leclerc <i>et al.</i> (2000) reportó que sólo el 3% de los humanos tenían estos fagos en sus <i>E.coli</i> . Este tipo de fago puede no ser específico de <i>E.coli</i> y puede replicarse en <i>Enterobacteriaceae</i> (Leclerc <i>et al.</i> , 2000).

4.3.2 Indicadores bacterianos

4.3.2.1 Grupo coliformes

El grupo de bacterias coliformes se usa como indicador de contaminación en el agua porque se encuentran en gran número en el tracto intestinal de humanos y animales. Los coliformes se definen microbiológicamente como bacterias en forma de varilla, no esporuladas, Gram negativas, aerobias o anaerobias facultativas que fermentan la lactosa con producción de gas cuando se incuban a 35°C durante 48 horas (Metcalf & Eddy, 2003; Murray, 1999).

El grupo coliformes incluye una gran variedad de microorganismos, siendo la mayoría del grupo de las bacterias entéricas. En la Tabla 4.7 se presenta un listado de los microorganismos que han sido propuestos como indicadores de contaminación fecal.

Tabla 4.7 Organismos específicos que han sido empleados como indicadores de contaminación fecal

Organismo indicador	Características
Coliformes totales	Gram negativas, fermentan lactosa con producción de gas a 35±0.5°C. Incluye cuatro géneros: <i>Escherichia</i> , <i>Citrobacter</i> , <i>Enterobacter</i> y <i>Klebsiella</i> .
Coliformes fecales	Se estableció este grupo basado en su habilidad de producir gas a una temperatura de incubación elevada (44.5 ± 0.2 °C por 24 h). Su principal representante es <i>E.coli</i> .
<i>Klebsiella</i>	Este tipo de termotolerantes también está incluido en el grupo de coliformes fecales. Es cultivado a 35±0.5°C por 24 h.
<i>E. coli</i>	Este grupo de bacterias no se reproducen ni crecen en el ambiente, por lo tanto se considera que esta especie es la más representativa de contaminación fecal y de la presencia de organismos patógenos.
<i>Bacteroides</i>	Son organismos anaerobios, han sido propuestos como indicadores humanos específicos.
<i>Enterococos</i>	Los enterococos (<i>S. faecalis</i> y <i>S. faecium</i>), son cadenas de enterococos fecales y son los miembros más específicos.
<i>Clostridium perfringens</i>	Es una bacteria anaerobia persistente formadora de esporas. Este microorganismo es indicador en procesos de desinfección o bien en donde ha tenido lugar una contaminación en el pasado.
<i>P. aeruginosa</i> y <i>A. hydrophila</i>	Estos organismos pueden estar presentes en el agua residual doméstica en grandes cantidades. Ambos se pueden considerar organismos acuáticos.

Fuente: Metcalf y Eddy, 2003

4.3.2.2 *Escherichia coli*

E. coli es una bacteria anaerobia facultativa, Gram negativa, de forma redonda de 2.0-6.0µm x 1.1-1.5 µm (Bergey *et al.*, 1984), que se encuentra taxonómicamente definida como miembro de la familia *Enterobacteriaceae*. Del grupo de coliformes termotolerantes, solamente *E. coli* es considerada como un organismo específico de origen fecal (Medema *et al.*, 2003).

La mayoría de los miembros de las especies de *E. coli* no son considerados organismos perjudiciales, sin embargo, algunas otras cadenas de estos organismos son responsables de enfermedades. En general, existen tres síndromes que pueden resultar de la infección con patotipos: enfermedad entérica/diarreica, infecciones en vías urinarias y meningitis (Kaper *et al.*, 2004). Las cadenas patógenas de estos microorganismos se han categorizado en seis grupos, con base en sus características serológicas y virulentas (Kaper *et al.*, 2004; AWWA, 1999). El más conocido patógeno de *E. coli* es el serotipo O157:H7 del grupo enterohemorrágico *E. coli* (Foppen y Schijven, 2006).

4.3.2.3 Esporas de *Clostridium*

Clostridium es un género de bacterias anaerobias, bacilos Gram positivas, parásitas y saprófitas algunas de ellas, que esporulan y carecen de movilidad. Generalmente se encuentran en el suelo, agua, aire y en el tracto intestinal de animales (Gerhardt y Marquis, 1989). *Clostridium perfringens* es un buen indicador de virus y quistes. La prueba del conteo de esporas de esta bacteria puede dar un mayor margen de seguridad en la evaluación. Payment y Franco (1993) propusieron el uso de las esporas de *Clostridium* como surrogados para virus y parásitos en las pruebas de agua de consumo humano. Así mismo, se ha reportado que *Clostridium perfringens* puede ser un buen indicador par de la presencia de organismos patógenos de origen fecal en las aguas superficiales (Sorensen *et al.*, 1989; Payment y Franco, 1993; Hijnen *et al.*, 2000; Schijven *et al.*, 2003; Araujo *et al.*, 2004).

4.3.2.4 Recuento en placa de bacterias heterótrofas

El recuento en placa de bacterias heterótrofas permite detectar una amplia variedad de microorganismos, principalmente bacterias que son indicadoras de la calidad microbiológica del agua (LeChevallier y McFeters, 1985). Se ha comprobado que el conteo de bacterias heterótrofas es uno de los indicadores más confiables y sensibles del tratamiento o del fracaso de la desinfección. Entre las bacterias heterótrofas se encuentran las oportunistas patógenas que pueden estar presentes en el agua de consumo, algunos ejemplos son *Aeromonas hydrophila*, *Pleisiomonas*, *shigelloides* y *Pseudomonas aeruginosa* (Metcalf y Eddy, 2003).

4.4 Supervivencia y transporte de patógenos en el agua subterránea

La persistencia y el transporte de los microorganismos en la capa inferior del suelo son de suma importancia para la salud pública. La mitad de las enfermedades relacionadas con el consumo de agua son causadas por la contaminación del agua subterránea (Craun, 1985). En esta sección se presentan los principales mecanismos de transporte de los microorganismos a través del suelo, hasta llegar a los sistemas de acuíferos, así como los factores que influyen en su supervivencia en el medio.

La transmisión de organismos indicadores y patógenos de la superficie a los acuíferos subyacentes está controlada por una variedad de factores, los cuales incluyen contenido de humedad, pH, tipo de suelo, contenido de materia orgánica y condiciones hidráulicas. La importancia de estos factores se ha revisado a detalle (Gerba y Bitton, 1984; Yates y Yates, 1988; Santamaría y Toranzos, 2003). El destino de los organismos patógenos en el suelo está determinado por su supervivencia y su retención en sus partículas, lo cual a su vez depende de los siguientes factores (Bitton y Gerba, 1984):

- **Clima.** Este factor es determinante tanto en la temperatura como en la precipitación pluvial. Se ha observado que los microorganismos presentan un mayor periodo de supervivencia a temperaturas inferiores; a 4°C pueden sobrevivir por meses o incluso años. La precipitación pluvial moviliza los microorganismos que previamente se encontraban retenidos en el suelo y promueve su transporte al acuífero. Diversos casos

de estudio han demostrado que la mayor contaminación de agua ocurre después de periodos extremos de lluvia (Hamouri *et al.*, 1996).

- **Naturaleza del suelo.** Las propiedades del suelo tienen gran influencia en su humedad, capacidad de carga, pH y materia orgánica, características que determinan la supervivencia de los microorganismos en el suelo. El tiempo de retención de los microorganismos se encuentra en función de la capacidad de intercambio catiónico, el tamaño de poros y el contenido de arcilla.

- **Tipo de microorganismos.** La supervivencia está determinada con base en el tipo de microorganismo del que se trate, ya que las diferentes especies son susceptibles a diversas características del medio.

La Tabla 4.8 presenta los tiempos aproximados de supervivencia de los microorganismos en agua.

Tabla 4.8 Tiempos de supervivencia de los microorganismos en agua (Metcalf & Eddy, 2003)

Organismo	Tiempo de supervivencia (días)		
	Agua residual y limpia	Cultivos	Suelo
Bacterias			
Coliformes fecales	<30	<15	<50
<i>Salmonella</i> spp	<30	<15	<50
<i>Shigella</i>	<10	<5	<50
<i>Vibrio cholerae</i>	<10	<2	<50
Protozoos			
<i>E. histolytica</i>	<15	<2	<10
Helmintos			
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Varios meses	<30	Varios meses
Virus			
Enterovirus	<50	<15	<20

La mayor remoción de contaminantes provenientes del agua residual, incluyendo organismos patógenos, ocurre en los primeros 2 metros de la zona vadosa (Gallegos *et al.*, 1999; Santamaría y Toranzos, 2003). En relación con los mecanismos que influyen en el transporte y eliminación de virus y bacterias aplicados al suelo, Ho *et al.* (1991), encontraron que los principales mecanismos de remoción son:

- *Infiltración.* Este es el mecanismo más limitante en el transporte de microorganismos a través del suelo.
- *Adsorción.* Éste fenómeno juega un papel más importante en suelos con alto contenido arcilloso.
- *Dispersión.* Este mecanismo ocurre cuando el organismo no interactúa con el suelo y continúa su recorrido con el agua y se transporta por diferentes vías a través del suelo.
- *Decaimiento.* Se refiere a la muerte o inactivación de los microorganismos, debido a condiciones ambientales adversas.

La acción de los mecanismos mencionados anteriormente en los diferentes tipos de organismos (bacterias, virus y parásitos), puede variar dependiendo del tipo de sistema en que se encuentren (agua o suelo). Los factores que influyen en la eliminación de organismos en el suelo se pueden clasificar en físicos, químicos y biológicos.

4.4.1 Movimiento a través del suelo y supervivencia de los virus

Se considera que los virus son capaces de viajar a través de las fisuras y las fracturas propias del suelo (Bitton y Gerba, 1984). La supervivencia de los virus se ve beneficiada cuando ocurre la adsorción de éstos a partículas orgánicas o de suelo, situaciones en las cuales se encuentran protegidos de las condiciones ambientales (Gerba *et al.*, 1975; Feachem *et al.*, 1983; Hoff y Akin, 1986; McGechan y Lewis, 2002; Zhao *et al.*, 2008). La Tabla 4.9 presenta los principales factores que influyen en la supervivencia de los virus en el suelo.

Tabla 4.9 Factores que influyen la supervivencia de los virus y bacterias en el suelo

Factor	Descripción
Temperatura	Es probablemente, el factor más perjudicial para la supervivencia de los organismos. Existen algunos virus termoresistentes a temperaturas extremas en el suelo. En el caso de las bacterias existe mayor supervivencia a bajas temperaturas, favoreciendo su supervivencia en temporadas de invierno.
Desección	Es un factor perjudicial para los microorganismos. La reducción de virus y bacterias se incrementa en los suelos secos.
Luz solar	En la superficie el tiempo de supervivencia de los microorganismos es menor, debido a la irradiación de luz ultravioleta o por la desecación del medio.
pH del suelo	La carga neta de los virus dependerá del pH de la solución del suelo. La supervivencia puede verse afectada por los mecanismos de adsorción que se presenten en función del pH. En el caso de las bacterias, presentan un menor tiempo de supervivencia en suelos ácidos (3-5) que en suelos alcalinos. En condiciones neutras se favorece el crecimiento y la supervivencia.
Cationes	La presencia de cationes incrementa la tasa de adsorción, lo cual favorece la supervivencia de los microorganismos.
Textura del suelo	Los suelos arcillosos y con contenido de sustancias húmicas retienen en mayor medida la humedad, hecho que impacta a los virus sujetos a la desecación. Las arcillas favorecen la adsorción de microorganismos a las partículas del suelo, lo cual reduce sus tasas de decaimiento. Las arcillas protegen las células bacterianas, y posiblemente a las partículas virales, ya que crean una barrera contra sus depredadores.
Materia orgánica	La presencia de suficientes cantidades de materia orgánica favorece la supervivencia y un posible recrecimiento de las bacterias.
Otros microorganismos	Las bacterias entéricas no pueden competir con la microflora endémica, el tiempo de supervivencia es mayor en suelos estériles

Adaptado de Bitton y Gerba, 1984; Yates y Yates 1993; Blanc y Nasser, 1996; Yeager y O'Brien, 1979.

El principal mecanismo que regula el transporte de los virus en el suelo es la adsorción. La Tabla 4.10 presenta los factores que influyen el movimiento de los virus hacia el agua subterránea.

Tabla 4.10 Factores que influyen en el movimiento de los virus y bacterias hacia el agua subterránea

Factor	Descripción
Tipo de suelo	La retención de los virus y bacterias es más efectiva en suelos de textura fina. A su vez, la presencia de óxidos de hierro en el suelo incrementa la capacidad de adsorción. Suelos de texturas finas evitan el movimiento de los microorganismos hacia el agua subterránea, mientras que los suelos gruesos (arenosos) promueven su movimiento.
pH	La adsorción de los microorganismos al suelo tiende a incrementar en pH ácidos, esto afecta directamente a su supervivencia.
Condiciones de saturación	El movimiento de los microorganismos en el suelo depende del estado de saturación del suelo; generalmente los microorganismos se mueven rápido en condiciones de saturación, pero solo por algunos centímetros
Cationes	La adsorción se ve favorecida por la presencia de cationes (reducen las fuerzas repulsivas entre los virus y las partículas del suelo).
Orgánicos solubles	Generalmente compiten con los virus por los sitios de adsorción.
Tipo de microorganismo	La adsorción varía en función al tipo de virus y su cadena (debido a sus diferentes puntos isoelectrónicos) o de bacteria.
Tasa de flujo	Entre mayor sea la tasa flujo a través del suelo, menor será la adsorción de los virus al suelo, aumentando su densidad en el agua subterránea.

Adaptado de: Abu-Ashour *et al.*, 1994; Gerba y Bitton, 1984; Yates y Yates, 1993

4.4.2 Movimiento a través del suelo y supervivencia de las bacterias

Algunas bacterias pueden producir esporas o quistes que son extremadamente resistentes a las condiciones ambientales. Otras bacterias pueden generar estadios de latencia, donde la actividad metabólica disminuye y el tamaño celular se reduce con la finalidad de sobrevivir en condiciones precarias (Roszak y Colwell, 1987). Los principales mecanismos de remoción de bacterias en el suelo son la adsorción y la filtración (Gerba y Bitton, 1984). Los factores involucrados en la supervivencia de las bacterias en el suelo se presentan en la Tabla 4.9, los factores de influencia para su transporte se presentan en la Tabla 4.10.

4.4.3 Movimiento a través del suelo y supervivencia de los protozoos

Existen pocos estudios sobre la supervivencia y el transporte de los protozoos a través del suelo. Sin embargo, se sabe que pueden sobrevivir en ambientes húmedos (Goosen y Shayya, 2000), aunque sus quistes generalmente no son capaces de sobrevivir por más de 10 días en el suelo. Los quistes de *Giardia* y *Entamoeba* son susceptibles a la desecación y al congelamiento (Feachem *et al.*, 1983). Los quistes son de tamaño microscópico y de gravedad específica baja, lo cual facilita su diseminación en los cuerpos de agua (Gajadhar y Allen, 2004).

En condiciones ambientales adecuadas los quistes pueden sobrevivir por largos periodos de tiempo. A 20°C los quistes de *Giardia* pueden sobrevivir por 24 días, mientras que los de *Cryptosporidium* pueden permanecer viables por más de 6 meses (Gajadhar y Allen, 2004).

Factores que tienen un efecto adverso para la supervivencia de los quistes son las temperaturas extremas, la desecación y la irradiación. Así mismo el número de quistes se reduce drásticamente cuando hay una humedad relativa baja.

4.4.4 Movimiento a través del suelo y supervivencia de los huevos de helmintos

La supervivencia de los huevos de helmintos en el suelo varía ampliamente, sin embargo, se sabe que son capaces por sobrevivir por meses en ciertas condiciones de humedad y temperatura en el suelo (Goosen y Shayya, 2000). Los huevos de helmintos más resistentes, como lo son *Ascaris*, *Trichuris* y *Taenia*, pueden sobrevivir de 9-12 meses (Larsen y Roepstorff, 1999; Sanguinetti *et al.*, 2005), aunque su exposición al medio ambiente puede reducir su viabilidad (Shuval y Fattal, 2003). Los huevos de *Ascaris* son los representantes más resistentes, capaces de sobrevivir incluso por años en condiciones favorables. Los huevos de *Hymenolepis nana* son susceptibles a la desecación y a las altas temperaturas, y generalmente no son capaces de sobrevivir por más de diez días en el ambiente (Feachem *et al.*, 1983).

Los principales factores que tiene influencia en la tasa de decaimiento de los huevos de helmintos son la temperatura, la desecación y la los rayos UV (Koné *et al.*, 2007). Las

temperaturas cercanas al punto de congelación y las superiores a 45°C tienen gran influencia en el decaimiento de los huevecillos (Feachem *et al.*, 1983).

4.5 Recarga artificial de acuíferos con agua residual

La recarga de los acuíferos se lleva a cabo, por supuesto, en forma natural, que consiste en la infiltración de la precipitación pluvial, en la infiltración de las aguas superficiales (ríos y embalses naturales, así como artificiales) y por el flujo subterráneo de formaciones adyacentes. Sin embargo, también existe una recarga llamada artificial, la cual Custodio (1986) define como "un conjunto de técnicas que permiten aumentar la disponibilidad de agua subterránea, con la calidad apropiada a los usos a los que se destina, mediante una intervención consciente, directa o indirecta, en el ciclo natural del agua". La recarga artificial generalmente consiste en la infiltración de aguas residuales (con o sin tratamiento) a los acuíferos, por medio de técnicas como la sobreirrigación agrícola, inundación, modificación de corrientes, entre otras (Iturbe y Silva, 1992).

La infiltración de aguas residuales es a menudo un componente importante de la recarga total en acuíferos ubicados en torno a zonas urbanas (Figura 4.1), especialmente en los climas más áridos. Dicha infiltración incidental es a menudo el "reúso" local más significativo de aguas residuales urbanas en términos del volumen, pero rara vez se planea y casi nunca se reconoce como tal. Las ventajas de este tipo de recargas radica en que son pocas o nulas las pérdidas por evaporación, no se requiere de estructuras especiales, ni de gran capacidad de almacenamiento y son menos vulnerables a la contaminación y a las sequías (Foster y Chilton, 2004; Foster *et al.*, 2002-2006).

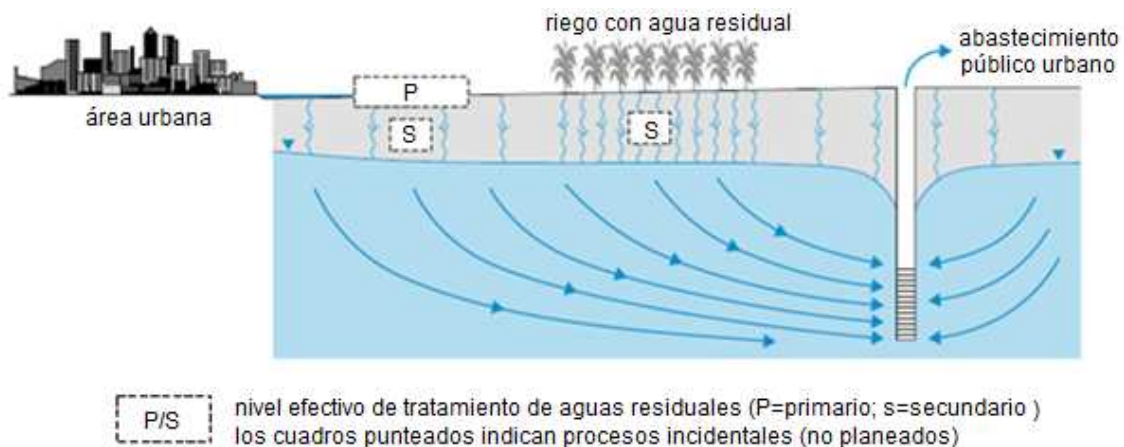


Figura 4.1 Esquema general de generación, tratamiento y reúso de aguas residuales y su infiltración al acuífero: situación típica sin planificación ni control (Foster *et al.*, 2002-2006).

En los países en vías de desarrollo las prácticas comunes de manejo y reúso de aguas residuales generalmente no son planeadas ni controladas, situación que genera altas tasas de infiltración a los acuíferos subyacentes. Muchos sistemas de alcantarillado descargan a los cursos de agua sin tratamiento alguno o con tratamiento parcial y con poca dilución en el estiaje, por lo que los caudales de aguas residuales disponibles para el riego son en realidad aguas negras. Dicho fenómeno tiene la ventaja de mejorar la calidad de las aguas residuales urbanas y de almacenarlas para uso futuro, pero también puede contaminar los acuíferos que se utilicen para el abastecimiento de agua potable.

El uso de agua residual para la irrigación tiene implícitos problemas de contaminación, a menos que se lleve a cabo con un manejo adecuado. Existe un riesgo potencial de salud pública al utilizar el agua de acuíferos recargados artificialmente por irrigación, ya que existe la posibilidad de que el agua subterránea se contamine (Gallegos *et al.*, 1999).

Los principales contaminantes potenciales que pueden infiltrarse a los acuíferos incluyen compuestos químicos orgánicos e inorgánicos, metales pesados y patógenos (Gallegos *et al.*, 1999; Ronen *et al.*, 1987; Toze, 2006). Sin embargo, el efecto en la calidad del agua subterránea puede variar (Foster *et al.*, 1997, 2002) de acuerdo con lo siguiente:

- La vulnerabilidad del acuífero a la contaminación.
- La calidad original del agua subterránea (antes de la recarga), así como su uso potencial.
- La calidad del agua residual de recarga, su nivel de tratamiento y grado de dilución.
- El flujo de infiltración de aguas residuales en relación con el flujo dentro del acuífero.
- La forma en que se maneje y aplique el agua residual al suelo.

En algunas condiciones hidrogeológicas, particularmente en aquellas con acuíferos superficiales o con fracturas, existe una penetración significativa de virus y bacterias a los acuíferos. Sin embargo, de manera general, la atenuación en la zona vadosa (de 2-5 m de profundidad) es muy efectiva para la eliminación de patógenos, simulando un tratamiento terciario (Foster y Chilton, 2004).

5 HIPÓTESIS

Dada la presencia de contaminantes biológicos en el agua residual de la ciudad de México que se usa para riego agrícola del Valle de Tula y que por esa misma razón se infiltra en el acuífero local, es posible detectar estos contaminantes, en pozos y manantiales empleados como fuentes de abastecimiento. La inspección sanitaria y el análisis biológico de dichas fuentes permitirán establecer un panorama global de su calidad biológica.

6 OBJETIVOS

6.1 *Objetivo general*

Evaluar la presencia de contaminantes biológicos en fuentes de abastecimiento de agua del Valle de Tula que se encuentren dentro de zonas de irrigación con agua residual.

6.2 *Objetivos particulares*

- Determinar en qué tipos de fuentes de abastecimiento del Valle de Tula se presenta contaminación biológica y de que magnitud.
- Determinar los criterios de influencia para la presencia de organismos patógenos en las fuentes de abastecimiento de agua, como son manantiales, pozos y norias, en la región.
- Relacionar el tipo y contenido de organismos patógenos presentes en el agua empleada para riego con los encontrados en las fuentes de suministro cercanas.
- Proponer medidas de protección.

7 ALCANCES

- La calidad del agua de suministro se evaluó con base en el estudio de siete parámetros biológicos: bacteriófagos somáticos, coliformes fecales, *E. coli*, Enterococos, esporas de *Clostridium*, *Giardia* spp. y huevos de helmintos.
- El estudio se limitó al muestreo de tres zonas dentro del Valle de Tula, ubicadas en tres municipios asociadas con un tipo de agua residual de riego en términos de su calidad.
- Cubrir dos campañas de muestreos, uno para la época de estiaje y otro para la de lluvia del ciclo 2008.

8 METODOLOGÍA

Con el fin de obtener un panorama general de la calidad biológica de las fuentes de suministro de agua del Valle de Tula, se llevó a cabo un plan de muestreo en el que se abarcaron tres zonas de irrigación ubicadas en tres municipios. El desarrollo experimental se llevó a cabo en cinco diferentes etapas, la primera consistió en definir los sitios de muestreo y los organismos por identificar. En la segunda etapa, se realizó una inspección sanitaria de cada una de las fuentes de abastecimiento. En la tercera etapa, se llevó a cabo el muestreo en los quince puntos de estudio que se eligieron. En la cuarta, se realizó la identificación y cuantificación de los organismos en el agua. Finalmente, en la quinta etapa, se determinó el riesgo sanitario para cada punto de muestreo.

En este apartado se describen las cinco etapas que se siguieron en la metodología, para hacer la evaluación diagnóstica de la calidad biológica del agua de suministro a la población del Valle de Tula. En la Figura 8.1 se presenta el esquema general de los pasos que se siguieron en la metodología.

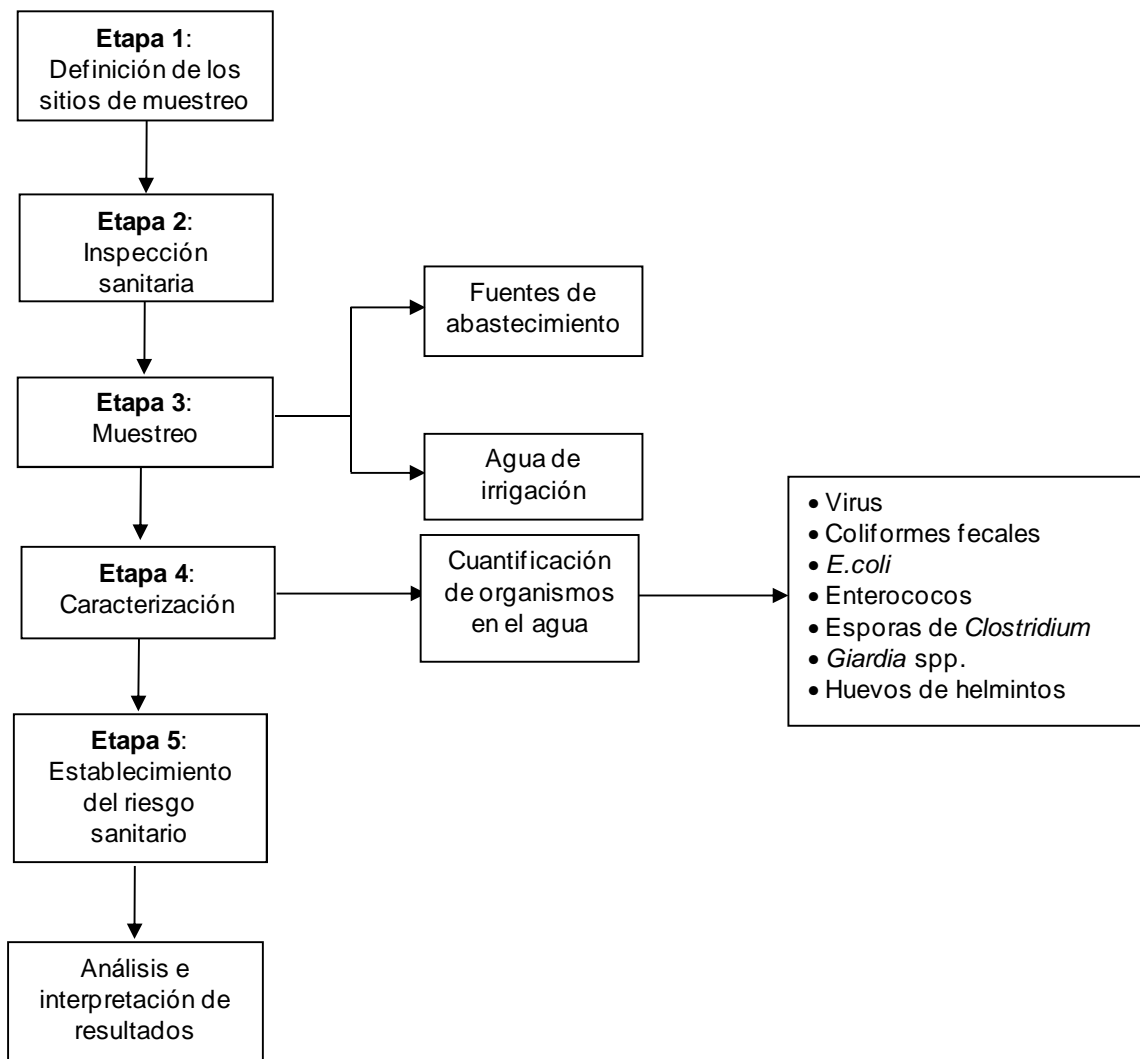


Figura 8.1 Esquema de la metodología del proyecto

8.1 Etapa 1: Definición de los sitios de muestreo y organismos a identificar

En este apartado se presentan los criterios empleados para seleccionar los puntos de muestreo y los organismos de interés para evaluar la calidad biológica de las fuentes de suministro del Valle de Tula.

8.1.1 Definición de los sitios de muestreo

Con el fin de obtener datos para contar con un panorama general de la calidad biológica de las fuentes de suministro del Valle de Tula se seleccionaron tres zonas de muestreo, las cuales cuentan con diferentes calidades de agua de riego. Además, se consideró que en cada una de ellas estuvieran presentes las fuentes de abastecimiento de agua para la población (norias, pozos y manantiales).

Así, dentro de cada zona se planeó muestrear cinco fuentes de abastecimiento: una noria, un manantial y tres pozos, con lo cual se tuvo un total de 15 puntos de muestreo.

8.1.1.1 Diseño del muestreo

Se planteó un diseño aleatorio, cuyas variables independientes fueron el periodo de irrigación y la calidad de agua de riego; en tanto, como la variable respuesta fue la densidad de patógenos (u organismos indicadores de patógenos) en el agua de suministro. Se planeó muestrear durante un ciclo anual, con la finalidad de considerar tanto la época de lluvia como la de estiaje. Por lo tanto, se consideró un diseño experimental factorial 3x2 (tres factores correspondientes a la calidad de agua de irrigación y dos factores de temporalidad), lo que arrojó un total de 6 series de experimentación que contemplaban el muestreo de agua de riego y de las fuentes de suministro. Además, en cada punto se tomaron 3 submuestras. Así, de los 18 puntos de muestreo (considerando las fuentes de irrigación) de las 3 zonas del Valle de Tula, se obtuvo un total de 108 muestras por analizar.

La Tabla 8.1 presenta el diseño del muestreo de acuerdo a los criterios de definición de los sitios.

Tabla 8.1 Diseño del muestreo

Punto de muestreo	Calidad de agua de irrigación	Número de muestras
Zona 1		
ARC-1	Agua residual cruda	3
P1-1		3
P2-1		3
P3-1		3
M-1		3
N-1		3
Zona 2		
ARM-2	Agua residual mezclada con agua de lluvia	3
P1-2		3
P2-2		3
P3-2		3
M-2		3
N-2		3
Zona 3		
ARM-3	Agua residual mezclada	3
P1-3		3
P3-2		3
P3-3		3
M-3		3
N-3		3
Total de muestras		54
Total de muestras durante el ciclo anual 2008		108

8.1.1.2 Ubicación de los puntos de muestreo

Como se estableció en la definición de los puntos de muestreo, se seleccionaron tres zonas de muestreo. Para cada zona se eligieron cinco fuentes de abastecimiento y un punto más que representara el agua de irrigación en la zona. La Tabla 8.2 presenta los puntos de muestreo seleccionados para cada zona y la Figura 8.2 muestra su localización.

Tabla 8.2 Puntos de muestreo seleccionados

Punto de muestreo	Clave	Localización
Zona 1- Atitalaquia		
Agua residual cruda	ARC-1	Canal principal El Salto Tlamaco
Pozo 1	P1-1	Tezoquipa
Pozo 2	P2-1	Principal la Cantera
Pozo 3	P3-1	El Tablón
Manantial	M-1	Rancho El Olimpo (las albercas)
Noria	N-1	Fam. González López
Zona 2 - Tlahuelilpan		
Agua residual mezclada	ARM-2	Canal Principal Requena
Pozo 1	P1-2	Pozo Sn. Primitivo
Pozo 2	P2-2	Pozo 11, CFE
Pozo 3	P3-2	Pozo Miravalle
Pozo 4*	P4-2	Pozo 5 de mayo
Manantial	M-2	Cerro Colorado
Zona 3 - Actopan		
Agua residual mezclada	ARM-3	Boxtha
Pozo 1	P1-3	Bothi-Baji 1
Pozo 2	P3-2	San Isidro
Pozo 3	P3-3	CIC 126
Manantial	M-3	El Dren
Noria	N-3	Pozo grande

*En esta zona no existen norias, por tal motivo se decidió tomar otro pozo adicional como punto de muestreo.

Como ya se ha mencionado, las tres fuentes de abastecimiento de esta región consisten en manantiales, pozos y norias. Los manantiales son cuerpos de agua brotantes que han surgido debido a la recarga excesiva del acuífero con las aguas residuales. Los pozos y las norias cuentan con la infraestructura apropiada para fuentes de suministro de agua (con excepción de la Noria de la Familia González López, la cual es operada de forma manual y tiene una infraestructura más rudimental). La principal diferencia entre los pozos y las norias es la profundidad a la que éstos se encuentran, los pozos se encuentran en profundidades entre 80 – 120m; mientras que las norias son cuerpos más superficiales, entre 7 – 12m.

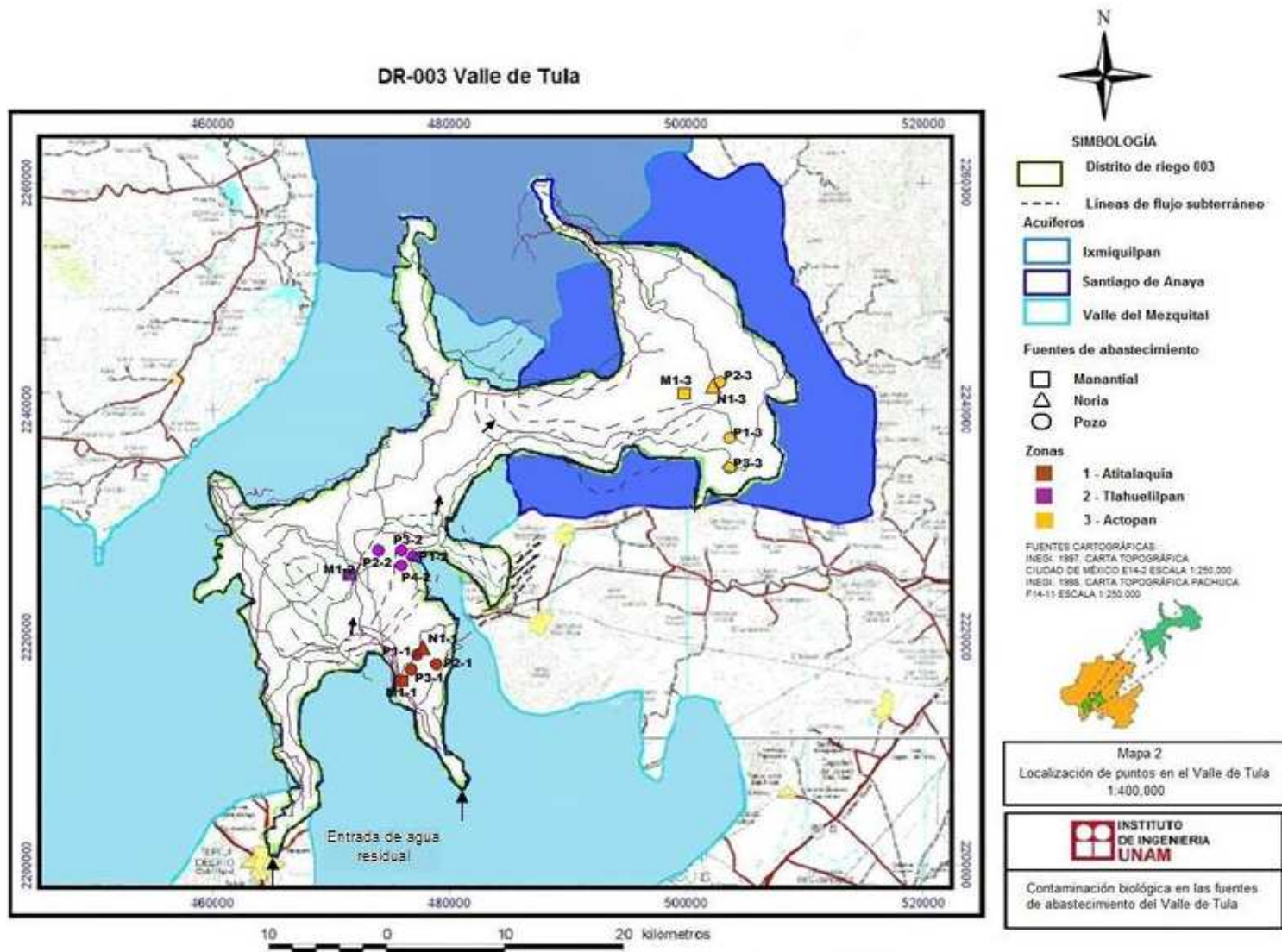


Figura 8.2 Localización de los puntos de muestreo

8.1.2 Parámetros biológicos

De la revisión de la literatura sobre los organismos patógenos presentes en el agua, se seleccionaron para este trabajo de investigación aquellos cuya presencia en el agua de consumo humano pudieran representar un riesgo de salud a la población. Así, se eligió a un organismo por cada grupo de patógenos. En el caso de bacterias y virus, se determinó la evaluación de organismos indicadores. En la Tabla 8.3 se presentan los organismos de estudio y las referencias en la literatura respecto al uso de dichos organismos como indicadores de contaminación biológica en aguas subterráneas.

Tabla 8.3 Parámetros biológicos a determinar

Grupo de patógenos	Organismo seleccionado
Bacteriófagos	Somáticos
Bacterias	Coliformes fecales <i>Escherichia coli</i> Enterococos Esporas de <i>Clostridium</i>
Protozoos	<i>Giardia</i> spp.
Helmintos	Huevos de helmintos

El uso de bacteriófagos somáticos como indicadores se ha empleado extensivamente debido a su abundancia en las aguas residuales (Grabow, 1996) y a su capacidad de sobrevivir en circunstancias ambientales en las que otros indicadores bacterianos no lo harían (Leclerc *et al.*, 2000); así mismo, estos microorganismos son más resistentes a la cloración y por lo tanto pueden ser buenos indicadores en sistemas clorados también (LeChevallier *et al.*, 2006). Además, hoy en día existen métodos estandarizados disponibles que permiten su rápida detección. Este grupo de organismos también se ha empleado exitosamente como indicador en pozos y fuentes de agua subterráneas (Lucena *et al.*, 2006; Locas *et al.*, 2008).

Dentro del grupo de las bacterias, los coliformes fecales son el indicador más común de contaminación fecal y el que se encuentra regulado por la normatividad mexicana. Estos microorganismos están presentes en el tracto gastrointestinal del hombre y de los animales de sangre caliente, además permanecen mayor tiempo en el agua que los organismos patógenos y tienen un comportamiento similar (Metcalf y Eddy, 2003). *E. coli* fue seleccionada como indicador debido a que está considerada como un organismo específico de origen fecal (Medema *et al.*, 2003). Los enterococos son un grupo bacteriano que por su abundancia y frecuencia en las heces fecales humanas y de animales, representan un buen indicador de contaminación fecal en el agua, incluso en algunas condiciones ambientales, mejores indicadores que *E.coli* (Celico *et al.*, 2004). La gran mayoría de organismos *Clostridium* son productores de esporas, tienen una mayor resistencia a las condiciones ambientales y son capaces de permanecer en el ambiente más tiempo que los coliformes fecales y los enterococos. Las esporas de *Clostridium* pueden ser detectadas incluso a largas distancias del sitio de contaminación, por lo que sirven como indicadores de contaminación fecal antigua o remota (Sartory *et al.*, 1998; Desmarais *et al.*, 2002). El uso de estos indicadores bacterianos también se ha realizado para el estudio de aguas subterráneas (Lucena *et al.*, 2006; Locas *et al.*, 2008).

Giardia spp. es uno de los protozoarios más comúnmente encontrados en el agua residual, proveniente de las heces fecales (Solarte *et al.*, 2006). Este organismo también se ha utilizado como indicador de contaminación en aguas subterráneas (Chin y Qi, 2000; Fong *et al.*, 2007). Los huevos de helmintos se han seleccionado como indicadores de parásitos debido a su persistencia en el ambiente y porque es el requerido por la normatividad.

8.2 Etapa 2: Inspección sanitaria

En lo referente a suministro de agua, las inspecciones sanitarias se utilizan para complementar los análisis microbiológicos del agua, con la finalidad de determinar el riesgo de contaminación biológica (Smith y Husary, 2000).

Una inspección sanitaria bien conducida permitirá identificar fuentes de riesgo biológico, los datos de la calidad biológica del agua confirmarán los riesgos existentes, y la interpretación de ambos permitirá estimar el riesgo de contaminación biológica (Smith y Husary, 2000; WHO, 2000). La inspección sanitaria generalmente consiste en la aplicación de un cuestionario acerca de las fuentes o actividades potenciales de contaminación en el área de estudio. El cuestionario contiene una lista de circunstancias y/o actividades que pueden provocar la descarga de contaminantes al acuífero. Se han hecho algunos tipos de formatos para reportar las inspecciones sanitarias, algunos de ellos se han publicado en Lloyd y Helmer (1991) y WHO (1997). Los formatos de inspección sanitaria son fáciles y rápidos de aplicar, sirven como un registro sobre las posibles causas de contaminación del agua (Smith y Husary, 2000).

Existen pocos estudios que han considerado la sinergia de las interacciones entre las inspecciones sanitarias y los resultados de los análisis microbiológicos (Lloyd y Bartram, 1991; Sotomayor *et al.*, 1998; Reid *et al.*, 2001; Howard *et al.*, 2003; Giannoulis *et al.*, 2005) para establecer el riesgo de contaminación biológica. La WHO (2005) hizo público un documento titulado *Water Safety Plans*, en el cual se plantea la base sobre la que se debe trabajar para establecer el riesgo de contaminación de una fuente de abastecimiento. Este documento incluye una guía detallada sobre cómo realizar la descripción de una fuente de suministro de agua, los principales parámetros a considerar y una serie de formatos para llevar a cabo la inspección sanitaria, de acuerdo al tipo de fuente de abastecimiento en cuestión. Los pasos que se siguieron para realizar la inspección sanitaria fueron los siguientes:

- **Recopilación de información.** Se realizó una revisión de los datos y reportes existentes en el área. Los mapas topográficos e hidrológicos de la zona fueron herramientas útiles para localizar los puntos de muestreo y las posibles condiciones que pudieran afectar la calidad del agua.
- **Visita al sitio.** El propósito de la visita *on site* es identificar y evaluar todas las posibles fuentes de contaminación biológica que pudieran afectar a las fuentes de suministro. En este punto se llevó a cabo la aplicación de los formatos de

inspección sanitaria, los cuales permiten tener un registro de las condiciones del sitio.

La manera de evaluar cada fuente de suministro es por medio de una puntuación que se asigna de acuerdo con la información obtenida al aplicar los formatos aplicados. Cada respuesta afirmativa corresponde a un punto. La puntuación puede asociarse arbitrariamente con diferentes niveles de riesgo. La Tabla 8.4 presenta la asociación de puntos con niveles de riesgo que se utilizó para este trabajo de investigación.

Tabla 8.4 Puntuación de la inspección sanitaria y nivel de riesgo asociado

Puntuación de la inspección sanitaria	Riesgo*
0-2	Bajo
3-6	Intermedio
7-10	Alto
11-13	Muy Alto

*El término riesgo es utilizado para indicar un peligro potencial a la salud humana debido a una fuente de suministro de agua.

En las Figuras 8.3, 8.4 y 8.5 se presentan los formatos que se modificaron de la literatura consultada (Cook y Lloyd, 1989; WHO, 1997; Sotomayor *et al.*, 1998; WHO, 2005) para la inspección en pozos, manantiales y norias, respectivamente.

Formato de Inspección Sanitaria para Pozos dentro de una zona rural de riego con agua residual		
I. Tipo de fuente Pozo profundo con mecanismo de bombeo		
Zona de suministro:		
Localización:		
Identificación:		
Temporalidad:		
¿Se tomó muestra? _____		
II. Información específica del diagnóstico		
	RIESGO	
	SI	NO
1. ¿Hay alguna letrina a una distancia de 15-20 m del pozo? ¿La letrina se encuentra a una mayor altitud?		
2. ¿El pozo se encuentra dentro del área de riego?		
3. ¿Hay alguna zona de riego a una distancia menor o igual de 30m?		
4. ¿Hay alguna otra fuente de contaminación a una distancia de 10 m del pozo (desechos fecales, basura, agua superficial, agua estancada, algún tipo de drenaje)?		
5. ¿El pozo se encuentra dentro de un área de pastoreo o de ganadería?		
6. ¿El agua de riego presenta algún tipo de contaminante?		
7. ¿El agua de riego se somete a algún tipo de tratamiento antes de ser irrigada?		
8. ¿Hay algún pozo abierto a menos de 100 m del pozo?		
9. ¿Hay algún canal de drenaje en mal estado (está roto facilitando el estancamiento o necesita limpieza)?		
10. ¿El cerco perimétrico está dañado de tal manera que permite el ingreso de animales o personas no autorizadas?		
11. ¿El piso alrededor del pozo tiene alguna fractura o rajadura que pudiera permitir el ingreso de agua?		
12. ¿El sello del pozo permite el ingreso de agua al pozo?		
13. ¿El registro de cloración muestra alguna interrupción en el dosificador? (Si no hay registro de cloración, anotar SI).		
<i>Puntuación total de riesgos</i>	/13	
Puntaje del riesgo de contaminación: Muy alto= 11-13; Alto= 7-10; Intermedio= 3-6; Bajo= 0-2 Cada "SI" equivale a 1 punto.		
III. Resultados y Recomendaciones		

Figura 8.3 Formato de inspección sanitaria para pozos.

Nota: Con letras cursivas se indican las modificaciones realizadas al formato de Lloyd para atender las necesidades de este trabajo.

Formato de Inspección Sanitaria para Manantiales en zonas rurales de riego con agua residual		
I. Tipo de fuente Manantial		
<ul style="list-style-type: none"> - Zona de suministro: - Localización: - Identificación: - Fecha de visita: - ¿Se tomó muestra? _____ 		
II. Información específica del diagnóstico		
	RIESGO	
	SI	NO
1. <i>¿El manantial se encuentra dentro del área de riego?</i>		
2. <i>¿Hay alguna zona de riego a una distancia menor o igual a 30m?</i>		
3. <i>¿Hay alguna otra fuente de contaminación en un radio de 10 m del manantial o ubicada aguas arriba de éste (desechos fecales, basura, agua superficial, agua estancada, algún tipo de drenaje)?</i>		
4. <i>¿El agua de riego presenta algún tipo de contaminante?</i>		
5. <i>¿El manantial se encuentra dentro de una zona de pastoreo o de ganadería?</i>		
6. <i>¿Existe alguna letrina en un radio de 30 m?</i>		
7. <i>¿El manantial carece de protección de obra de albañilería, pared de concreto o caja de captación (expuesto a la contaminación superficial)?</i>		
8. <i>¿La obra de albañilería presenta defectos en la protección del manantial?</i>		
9. <i>Si hay una caja de captación, ¿está contaminada por sedimentos o desechos de animales? ¿su cubierta no cumple con los requisitos de sanidad?</i>		
10. <i>¿La gente que colecta agua del manantial tiene contacto con la fuente? ¿se introduce en ella?</i>		
11. <i>El área alrededor del manantial, ¿se encuentra sin cercar o es insegura?</i>		
12. <i>¿Pueden acceder los animales a menos de 10 m de la fuente?</i>		
13. <i>¿El registro de cloración muestra alguna interrupción en el dosificador? (Si no hay registro de cloración, anotar SI).</i>		
<i>Puntuación total de riesgos</i>	/13	
Puntaje del riesgo de contaminación: Muy alto= 11-13; Alto= 10-7; Intermedio= 3-6; Bajo= 0-2 Cada "SI" equivale a 1 punto.		
III. Resultados y Recomendaciones		

Figura 8.4 Formato de inspección sanitaria para manantiales

Nota: Con letras cursivas se indican las modificaciones realizadas al formato de Lloyd para atender las necesidades de este trabajo.

Formato de Inspección Sanitaria para Norias en zonas rurales de riego con agua residual		
I. Tipo de fuente Noria		
<ul style="list-style-type: none"> - Zona de suministro: - Localización: - Identificación: - Fecha de visita: - ¿Se tomó muestra? _____ 		
II. Información específica del diagnóstico		
	RIESGO	
	SI	NO
1. <i>¿La noria se encuentra dentro del área de riego?</i>		
2. <i>¿Hay alguna zona de riego en un radio de 30m?</i>		
3. ¿Hay alguna otra fuente de contaminación en un radio de 10 m de la noria o ubicada aguas arriba de éste (desechos fecales, basura, agua superficial, agua estancada)?		
4. <i>¿El agua de riego presenta algún tipo de contaminante?</i>		
5. <i>¿La noria se encuentra dentro de un área de pastoreo o de ganadería?</i>		
6. ¿Existe alguna letrina en un radio de 10 m? ¿Se encuentra a una mayor altitud?		
7. ¿El canal de drenaje esta roto, fracturado o necesita limpieza?		
8. ¿El área carece de un cercado? Si lo tiene, ¿el cercado es defectuoso o inapropiado?		
9. ¿El radio del concreto alrededor de la noria es menor a 1m?		
10. ¿Existen fracturas en el piso de concreto?		
10. ¿Existen otras fuentes de contaminación (letrinas, riego con aguas negras, canales de distribución con aguas negras) en un radio de 10 m de la noria?		
11. ¿La cubierta de la noria no cumple los requerimientos de sanidad?		
12. ¿Hay agua anegada alrededor de la noria?		
13. ¿El registro de cloración muestra alguna interrupción en el dosificador? (Si no hay registro de cloración, anotar SI).		
Puntuación total de riesgos	/13	
Puntaje del riesgo de contaminación: Muy alto= 11-13; Alto= 7-10; Intermedio= -3; Bajo= 0-2 Cada "SI" equivale a 1 punto.		
III. Resultados y Recomendaciones		

Figura 8.5 Formato de inspección sanitaria para norias.

Nota: Con letras cursivas se indican las modificaciones realizadas al formato de Lloyd para atender las necesidades de este trabajo.

8.3 Etapa 3: Muestreo

En cada zona se tomaron tres submuestras para cada punto de muestreo. El muestreo se realizó durante tres semanas consecutivas por cada época del año (lluvia y estiaje). El tiempo de muestreo fue de un día para la recolección de todas las muestras de los puntos de una zona, mientras que el resto de los días de la semana se emplearon para la realización de los análisis biológicos. Las muestras de agua de abastecimiento fueron tomadas antes de su cloración. La toma de muestra se realizó de la siguiente manera:

- Para bacterias, bacteriófagos y *Giardia* spp., se siguió lo establecido en la norma NOM-014-SSA1-1993 referente al muestreo en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados. Se utilizaron envases de 2 L esterilizados y bolsas plásticas de muestreo para bacterias que contienen pastillas de tiosulfato de sodio (Figura 8.6). Las muestras fueron conservadas a 4°C durante su transporte y almacenamiento.
- Para los huevos de helmintos, se siguió lo establecido en la norma NMX-AA-113-SCFI-1999. Se emplearon envases de 5 L para la recolección de las muestras (Figura 8.6), lavados con hipoclorito de sodio al 10% (NaClO). Éstos también fueron conservados a 4°C.



Figura 8.6 Envases utilizados para recolección de muestras

Las figuras 8.7, 8.8 y 8.9 muestran los puntos de muestreo para cada zona de estudio

Muestreo – Zona 1 - Atitalaquia



P1-1 Pozo Tezoquipa



P2-1 Pozo Principal la Cantera



P3-1 Pozo el Tablón



M1- Manantial Rancho el Olimpo (las albercas)



N1- Noria Fam. González

Figura 8.7 Puntos de muestreo Zona 1 - Atitalaquia

Muestreo – Zona 2 - Tlahuelilpan



P1-2 Pozo San Primitivo



P2-2 Pozo 11 CFE



P3-2 Pozo Miravalle



P4-2 Pozo 5 de mayo



M2- Manantial Cerro Colorado

Figura 8.8 Puntos de muestreo Zona 2 - Tlahuelilpan

Muestreo -Zona 3 - Actopan



P1-3 Pozo Bothi-Baji 1



P2-3 Pozo San Isidro



P3-3 Pozo CIC 126



N3- Noria de Pozo Grande



M3- Manantial el Dren

Figura 8.9 Puntos de muestreo Zona 3 - Actopan

8.4 Etapa 4: Caracterización del agua

8.4.1 Caracterización en campo

En campo se determinaron los siguientes parámetros:

- Conductividad
- pH
- Temperatura
- Turbiedad

La determinación se hizo con un equipo Hach modelo sensION156.

8.4.2 Caracterización biológica

El aspecto determinante de este trabajo de investigación es el análisis de la calidad biológica del agua, a fin de determinar los organismos patógenos a los que puede estar expuesta la población. La Tabla 8.5 presenta las técnicas analíticas que se emplearon para la determinación de los parámetros biológicos empleados.

Tabla 8.5 Técnicas de cuantificación de los parámetros biológicos por determinar

Parámetros	Técnica
Bacterias Coliformes fecales	Método de filtración por membrana 9222D APHA, 2005
<i>E. coli</i>	Método de filtración por membrana NMX-AA-102-SCFI-2006
Enterococos	Método de filtración por membrana 1106.1 EPA (2002)
Esporas de <i>Clostridium</i>	Método de NMP y confirmatorio de filtración por membrana (HPA, 2004)
Bacteriofagos Somáticos	Método de la doble capa 9224B APHA, 2005 ISO 10705-2:2000
Protozoos <i>Giardia spp.</i>	Método 9711B APHA, 2005
Huevos de helmintos	NMX-AA-113-SCFI-1999

Cabe mencionar que dichas técnicas fueron seleccionadas debido a su confiabilidad y nivel de certidumbre. La técnica de filtración por membrana proporciona recuentos directos, es incluso más precisa (se obtienen resultados más reproducibles) que la prueba del número más probable, es rápida y fácil de realizar y, además, se pueden analizar mayores volúmenes de muestras con bajas densidades de organismos (Vargas, 2000). Dicha técnica ha sido empleada exitosamente para la determinación de Enterococos (Catalao y Borrego, 1995; Borst y Selvakumar, 2003) y esporas de *Clostridium* (Hijnen, *et al.*, 2000; Araujo *et al.*, 2004). La aplicación del método de la doble capa para bacteriófagos se reporta en varios artículos (Adams, 1959; Rubio *et al.*, 2004; Lucena *et al.*, 2003; Mazari-Hiriart *et al.*, 1997; Paz-y-Miño *et al.*, 2003). La determinación de huevos de helmintos es la señalada por la normatividad mexicana (NMX-AA-113-SCFI-1999).

8.5 Etapa 5: Establecimiento del riesgo

Para propósitos del análisis de riesgo, se utilizan de manera conjunta los resultados obtenidos de la caracterización biológica del agua y de la inspección sanitaria. La sinergia de ambos métodos permite establecer la prioridad de las medidas de acción que deben tomarse. La Tabla 8.6 presenta los criterios de selección de indicadores de contaminación biológica a ser incluidos en el establecimiento del riesgo.

De acuerdo a los criterios de selección se determinó que tanto las esporas de *Clostridium* como los bacteriófagos no serían incluidos para el establecimiento del riesgo de este estudio. Las esporas de *Clostridium* proporcionan información acerca de eventos de contaminación ocasional o intermitente. Su elevada persistencia en el ambiente puede provocar una estimación errónea del nivel de riesgo asociado. Con respecto a los bacteriófagos, estos no son propiamente indicadores de contaminación fecal, estos organismos son indicadores potenciales de virus entéricos debido a la similitud de sus características. Sin embargo, no hay una aproximación registrada en la literatura que indique la correlación de la presencia de los bacteriófagos con la de los virus entéricos. Aunque el establecimiento del riesgo para las fuentes de abastecimiento de agua analizadas en este estudio no incluirá a las esporas de *Clostridium* ni a los bacteriófagos, si se registra la presencia de dichos organismos se señalará su posible significado.

Tabla 8.6 Criterios de selección de indicadores de contaminación biológica para el establecimiento del riesgo

Indicador	Sobrevivencia en el ambiente^a	Resistencia a la cloración^b	Capacidad infectiva relativa^{b,c}	Uso en inspecciones sanitarias^d
Coliformes fecales	Moderada	Baja	Baja	Adecuado
<i>E. coli</i>	Moderada	Baja	Baja	Adecuado
Enterococos	Moderada-Alta	Media	Baja	Alternativa sugerida
Esporas de <i>Clostridium</i>	Muy alta	Alta	Baja	No recomendado
Bacteriófagos somáticos	Alta	Media-Alta	--	Alternativa sugerida
<i>Giardia</i> spp.	Alta	Alta	Alta	Alternativa sugerida
Huevos de helmintos	Alta	Alta	Alta	Alternativa sugerida

a. Metcalf and Eddy, 2003; WHO, 2008

b. WHO, 2008

c. Por su naturaleza, a los organismos indicadores no se les atribuye una dosis infectiva, sin embargo es posible hacer una estimación de la densidad de patógenos de acuerdo a la presencia de indicadores (Payment *et al.*, 2000). Por lo tanto, la capacidad infectiva relativa está asociada a la capacidad infecciosa de los organismos patógenos correspondientes. Una infectividad baja corresponde a la presencia de organismos en el orden $>10^4$, media 10^2-10^4 , alta $1-10^2$.

d. Payment *et al.*, 2003

Una vez definidos los indicadores a utilizar para el establecimiento del riesgo se procede a determinar la categorización del riesgo, de acuerdo al orden de incremento de la magnitud de contaminación que cada indicador representa. La Tabla 8.7 presenta la clasificación del riesgo debido a la contaminación biológica, de acuerdo a lo establecido por la WHO (2006).

Tabla 8.6 Clasificación del riesgo debido a la contaminación biológica

Nivel de riesgo	Categoría y código de color	Coliformes fecales ^a	<i>E. coli</i> ^b	Enterococos ^a	<i>Giardia</i> spp. ^c	Huevos de helmintos ^d
En conformidad a los estándares internacionales	A (azul)	ND ^e	ND	ND	ND	ND
Riesgo bajo	B (verde)	1 - 20	1 - 10	1 - 20	1 - 5	1 - 3
Riesgo intermedio	C (amarillo)	20 - 2,000	10 - 100	20 - 1,000	5 - 10	3 - 6
Riesgo alto	D (café)	2,000 - 20,000	100 - 1,000	1,000 - 10,000	10 - 20	6 - 10
Riesgo muy alto	E (rojo)	>20,000	>1,000	>10,000	>20	>10

- a. EEC, 1975
- b. WHO, 1997
- c. Basado en la dosis infectiva de *Giardia* spp. >20 quistes/L (Crook, 1998; Feachem *et al.*, 1983)
- d. Basado en la dosis infectiva de Huevos de helmintos 1-10 HH/L (Crook, 1998; Feachem *et al.*, 1983)
- e. ND – No detectado

De manera general, el nivel de riesgo debido a la contaminación biológica está asociado a un nivel de tratamiento. En este caso un riesgo bajo (B) requiere de un tratamiento físico sencillo y desinfección, un riesgo intermedio (C) de un tratamiento físico normal y desinfección, el riesgo alto (D) implica un tratamiento físico intensivo y desinfección. Por su parte, un riesgo muy alto (E) implica que el tipo de agua considerada no es adecuada para uso y/o consumo humano (EEC, 1975).

La Figura 8.10 muestra un esquema con el cual se pueden establecer las medidas de acción a tomar, de acuerdo al conteo biológico y al nivel de riesgo obtenido en la inspección sanitaria.

		Puntaje de la Inspección Sanitaria									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Clasificación biológica	E										
	D										
	C										
	B										
	A										
		Sin acción	Riesgo bajo: prioridad de acción baja			Riesgo intermedio - alto: prioridad de acción alta			Riesgo muy alto: acción urgente		

Figura 8.10 Esquema de asignación de nivel de remediación por medio del análisis de riesgo (WHO, 2008)

La mayoría de las veces se puede asociar un puntaje de inspección sanitaria alto con una alta presencia de contaminación biológica; sin embargo, en algunas ocasiones sólo se presenta un nivel alto de riesgo en la inspección sanitaria, aun así, deberá realizarse una medida de acción.

9 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de las fuentes de abastecimiento del Valle de Tula.

9.1 Inspección sanitaria

Descripción de las fuentes de abastecimiento

De acuerdo con lo establecido por la WHO (2005) el primer paso para establecer la calidad de una fuente de abastecimiento de agua potable es realizar su inspección. En la Tabla 9.1 se presentan las descripciones para cada fuente de suministro analizada en el Valle de Tula (en el Anexo B se presenta la información general de cada fuente de suministro).

Tabla 9.1 Descripciones de los puntos de muestreo

Punto de muestreo	Descripción
Zona 1 – Atitalaquia	
P1-1 Tezoquipa	El objetivo del pozo Tezoquipa es suministrar agua para consumo a la población de la comunidad de este mismo nombre con aproximadamente 3,500 habitantes. Este pozo es operado por la propia comunidad. El pozo está ubicado dentro del acuífero Valle del Mezquital. El agua es tratada para su desinfección con gas cloro.
P2-1 Principal la Cantera	Este pozo lleva agua a cinco colonias de Atitalaquia, abasteciendo a aproximadamente 5,000 personas. Se encuentra dentro del acuífero Valle del Mezquital. El agua es tratada para su desinfección con gas cloro.
P3-1 El Tablón	Este pozo suministra agua a la población de las colonias el Tablón y Nápoles, y es manejado por la comunidad. Abastece a cerca de 3,500 habitantes. La desinfección del agua se lleva a cabo por medio de gas cloro. Este pozo también se encuentra ubicado dentro de la zona del acuífero del Valle del Mezquital.
M-1 Rancho el Olimpo	El manantial del Rancho el Olimpo se utiliza para diversos usos, siendo el principal el recreativo. No abastece a una población específica y no es utilizada como agua para consumo humano. El manantial se encuentra dentro de la zona del Valle del Mezquital.
N-1 Fam. Glz. López	Esta noria pertenece a un particular. El nivel freático puede observarse a aproximadamente 7 metros de profundidad. A partir del funcionamiento del pozo Tezoquipa (aproximadamente 10 años), el agua de esta noria sólo se utiliza para usos secundarios (no para consumo humano).

Zona 2 – Tlahuelilpan	
P1-2 San Primitivo	Este pozo abastece agua a la población de San Primitivo, Tlahuelilpan, de aproximadamente 3,000 habitantes y funciona de manera alternada. Los terrenos aledaños son regados con agua negra proveniente de Tequizquiac. El agua es desinfectada con gas cloro, sin embargo, en ocasión, la bomba dosificadora no funcionaba. Este pozo corresponde al acuífero del Valle del Mezquital.
P2-2 Pozo 11 del sistema 2 de CFE	Una parte del agua que se extrae de este pozo es enviada a CFE, y una menor proporción se suministra como agua potable a la colonia Cuauhtémoc de Tlahuelilpan, con aproximadamente 3,500 habitantes. La desinfección del agua es con gas cloro. Este pozo pertenece al acuífero del Valle del Mezquital.
P3-2 Miravalle	Estos dos pozos se utilizan para abastecer a aproximadamente 10,000 habitantes de la población de Tlahuelilpan. Los terrenos aledaños son regados con agua negra proveniente de Tequizquiac. El agua es desinfectada con gas cloro, aunque en algunas ocasiones, las bombas dosificadoras no estaban en funcionamiento.
P4-2 Pozo 5 de Mayo	
M-2 Cerro Colorado	El agua del manantial es utilizada para abastecer a siete municipios de Hidalgo. El excedente del agua que no es suministrada a dichos municipios, es utilizada por las personas de la región para diversos usos, como bañarse, lavar ropa, enjuagar las cosechas, etc. El agua que se suministra a los municipios es desinfectada con gas cloro pero a la excedente no se le aplica ningún tipo de desinfección. Este manantial surgió por la recarga artificial del acuífero del Valle del Mezquital en 1963. Los terrenos aledaños tienen una antigüedad de 100 años de riego con agua residual cruda y mezclada.
Zona 3 – Actopan	
P 1-3 Bothi Baji 1	Este pozo suministra agua a la población de Actopan, Bothi Baji, El Palomo y la Loma, abasteciendo a aproximadamente 30,000 habitantes. Corresponde al acuífero Actopan Santiago de Anaya. El tratamiento de desinfección se lleva a cabo con gas cloro.
P2-3 San Isidro	El pozo San Isidro suministra agua potable a aproximadamente 20,000 habitantes, del centro de Actopan y las colonias Benito Juárez y Cañada Chica Aviación. La desinfección se lleva a cabo con gas cloro, cuya bomba dosificadora en ocasiones no funciona. Hay una zona de riego a aproximadamente 400 m del sitio. El pozo se encuentra ubicado dentro del acuífero Actopan Santiago de Anaya.
P3-3 CIC 126	Este pozo se utiliza para el riego de 85 hectáreas de la zona de Chimilpa, El Arenal y Actopan. Se encuentra dentro del acuífero Actopan Santiago de Anaya.
N-3 Noria de Pozo Grande	La noria abastece a aproximadamente 10,000 habitantes, distribuidos en tres poblaciones: Actopan parque Urbano, Boxtha y Daxtha. El nivel freático se encuentra aproximadamente a 12 m de profundidad. La noria se encuentra dentro de una zona de riego y existe un canal de riego a 150 m de distancia. La desinfección se lleva a cabo por medio de gas cloro. Pertenece al acuífero Actopan Santiago de Anaya.
M-3 El Dren	Este manantial surgió para coleccionar el agua de inundación de los terrenos de cultivo. Recibe aguas residuales de riego y domésticas. No tiene algún tipo de uso.

9.1.1 Resultados de los cuestionarios

A partir de los cuestionarios de inspección sanitaria se pudo observar que hay una diferencia considerable entre los diferentes tipos de fuentes de suministro. Por sus características de construcción, mantenimiento y profundidad (80-120m), los pozos son los que presentan un menor riesgo de contaminación (bajo), con excepción de aquellos que se encuentran dentro de zonas de riego, los cuales alcanzan un riesgo intermedio. En general, se puede decir que el agua de los pozos proviene del acuífero. Se trata de aguas subterráneas, las cuales sufren diversos procesos de depuración al pasar a través del suelo (*Soil Aquifer Treatment*). Los manantiales y las norias son los que resultan más afectados, debido a que corresponden a aguas superficiales (7-12m de profundidad en caso de norias), que brotan de manera natural. Lo anterior, supone una mayor vulnerabilidad, ya que están más expuestas a los contaminantes presentes en las aguas de riego. Estas fuentes de abastecimiento presentan valores de riesgo de intermedios a altos, generalmente se encuentran a la intemperie y tienen contacto con la población. En el Anexo A se presentan los cuestionarios correspondientes a cada punto de muestreo. La Tabla 9.2 presenta un resumen del nivel de riesgo obtenido a partir de los cuestionarios aplicados.

Tabla 9.2 Nivel de riesgo para cada punto de muestreo

Punto de muestreo	Riesgo
Zona 1 – Atitalaquia	
P1-1 Tezoquipa	Bajo
P2-1 Principal la Cantera	Bajo
P3-1 El Tablón	Bajo
M-1 Rancho el Olimpo (las albercas)	Intermedio
N-1 Fam. González López	Alto
Zona 2 – Tlahuelilpan	
P1-2 San Primitivo	Intermedio
P2-2 Pozo 11 del sistema 2 de CFE	Intermedio
P3-2 Miravalle	Intermedio
P4-2 Pozo 5 de Mayo	Intermedio
M-2 Cerro Colorado	Alto
Zona 3 – Actopan	
P 1-3 Bothi Baji 1	Intermedio
P2-3 San Isidro	Intermedio
P3-3 CIC 126	Intermedio
N-3 Noria de Pozo Grande	Intermedio
M-3 El Dren	Muy alto

9.2 Caracterización en campo

Como se mencionó anteriormente, para cada punto de muestreo se determinaron el pH, temperatura, conductividad, los sólidos disueltos y la turbiedad, en campo. Las tablas 9.3 y 9.4 presentan las medias de los valores para cada punto de muestreo con su desviación estándar, para las épocas de estiaje y lluvia respectivamente.

Tabla 9.3 Resultados de la caracterización de campo, época de estiaje

Punto de muestreo	pH	Temperatura	Conductividad	Turbiedad
		°C	S/cm	UNT
Zona 1 – Atitalaquia				
ARC1	7.22 ± 0.09	25.2 ± 0.31	2.97 ± 0.03	120.85 ± 3.04
P1-1	7.35 ± 0.15	20.3 ± 0.35	2.38 ± 0.01	0.02 ± 0.03
P2-1	7.07 ± 0.01	25.9 ± 0.40	2.39 ± 0.01	0.21 ± 0.11
P3-1	7.17 ± 0.33	20.1 ± 0.72	4.19 ± 0.03	0.04 ± 0.01
M-1	7.11 ± 0.05	24.8 ± 0.81	4.46 ± 0.01	0.01 ± 0.0
N-1	7.10 ± 0.05	21.8 ± 0.06	4.61 ± 0.01	0.22 ± 0.02
Zona 2 – Tlahuelilpan				
ARM2	7.61 ± 0.01	19.2 ± 0.26	1.48 ± 20.3	193 ± 14.8
P1-2	7.06 ± 0.0	21.4 ± 0.69	3.62 ± 0.04	0.02 ± 0.01
P2-2	7.17 ± 0.0	20.3 ± 0.44	3.13 ± 0.03	0.08 ± 0.03
P3-2	7.02 ± 0.02	25.2 ± 0.1	3.56 ± 0.0	0.08 ± 0.02
M-2	7.24 ± 0.02	22.2 ± 0.64	3.32 ± 0.03	0.28 ± 0.02
P4-2	7.71 ± 0.01	19.2 ± 0.29	3.61 ± 0.04	0.11 ± 0.02
Zona 3 – Actopan				
ARM3	7.17 ± 0.02	21.5 ± 0.69	2.77 ± 0.01	21.8 ± 8.93
P1-3	7.17 ± 0.0	23.3 ± 0.06	2.8 ± 0.02	0.03 ± 0.01
P2-3	7.83 ± 0.02	25 ± 1.01	3.42 ± 0.03	0.07 ± 0.01
P3-3	7.52 ± 0.33	22.7 ± 0.26	4.15 ± 0.05	0.05 ± 0.01
M-3	7.18 ± 0.03	20.4 ± 0.35	4.7 ± 0.05	<0.01
N-3	7.84 ± 0.02	23.4 ± 0.92	2.7 ± 0.03	0.03 ± 0.01

Tabla 9.4 Resultados de la caracterización de campo, época de lluvia

Punto de muestreo	pH	Temperatura	Conductividad	Turbiedad
		°C	S/cm	UNT
Zona 1 – Atitalaquia				
ARM1	7.26 ± 0.03	20.57 ± 0.42	2.25 ± 0.05	15.47 ± 1.7
P1-1	7.25 ± 0.06	20.47 ± 0.15	2.20 ± 0.01	<0.01
P2-1	7.09 ± 0.05	25.07 ± 0.49	1.26 ± 0.01	0.5 ± 0.01
P3-1	7.06 ± 0.07	21.03 ± 0.31	2.20 ± 0.03	0.57 ± 0.06
M-1	7.24 ± 0.13	20.7 ± 0.1	2.36 ± 0.09	0.47 ± 0.06
N-1	7.19 ± 0.06	19.23 ± 0.06	2.25 ± 0.14	0.63 ± 0.06
Zona 2 – Tlahuelilpan				
ARM2	7.37 ± 0.05	22.9 ± 0.44	0.73 ± 0.01	20.37 ± 0.81
P1-2	6.86 ± 0.04	20.5 ± 0.44	2.02 ± 0.01	0.57 ± 0.12
P2-2	6.90 ± 0.09	20.17 ± 0.21	1.65 ± 0.01	0.57 ± 0.23
P3-2	6.92 ± 0.02	23.5 ± 0.3	1.91 ± 0.01	0.97 ± 0.06
M-2	7.08 ± 0.05	20.1 ± 0.1	1.74 ± 0.01	1 ± 0.01
P4-2	7.08 ± 0.03	23.17 ± 0.64	1.99 ± 0.01	0.67 ± 0.2
Zona 3 – Actopan				
ARM3	6.97 ± 0.01	24.6 ± 0.36	1.47 ± 0.05	0.73 ± 0.06
P1-3	7.16 ± 0.05	25.33 ± 0.06	1.55 ± 0.01	0.67 ± 0.06
P2-3	6.88 ± 0.09	24.07 ± 0.06	1.85 ± 0.01	0.77 ± 0.06
P3-3	7.19 ± 0.06	24.2 ± 0.06	2.27 ± 0.02	1.17 ± 0.15
M-3	6.46 ± 0.03	20.2 ± 0.1	2.17 ± 0.02	0.73 ± 0.15
N-3	6.79 ± 0.08	20.9 ± 0.1	2.50 ± 0.01	1 ± 0.1

De los resultados obtenidos se observa que el pH se mantiene relativamente estable en todos los puntos de muestreo, en un rango entre 6.4-7.8 unidades, con los valores más bajos en la época de lluvia. Prácticamente todos los puntos de muestreo se encuentran dentro de lo establecido en la normatividad mexicana, que señala un rango de 6.5-8.5 unidades de pH (SSA, 2001). La temperatura se mantuvo en un rango de 19-26°C. Por su parte, la turbiedad, indicador de la calidad del agua respecto al contenido de materia coloidal y suspendida, se mantiene para todos los puntos de muestreo por debajo de las 5 UNT señaladas en la normatividad (SSA, 2001). La conductividad se utiliza como un sustituto para la estimación de los sólidos disueltos; este parámetro también es utilizado para indicar la salinidad del agua. Todos los puntos presentaron conductividades

relativamente altas, con intervalos de 1-4 S/cm. Por su parte, los resultados de las aguas residuales corresponden a valores típicos de aguas residuales domésticas.

9.3 Caracterización biológica

Una vez que se obtuvieron las densidades de organismos en cada muestra analizada, se procedió al ordenamiento y tratamiento estadístico de la información para su presentación por medio de tablas y representaciones gráficas con objeto de analizar la información. De acuerdo con la literatura consultada, el factor temporalidad influye en los resultados obtenidos, es por eso que en los siguientes apartados se presentan por separado los resultados correspondientes a la época de estiaje y de lluvia del ciclo anual 2008. Para cada temporada se realizó el análisis del agua residual que se utiliza para riego de cada zona, así como de cada fuente de abastecimiento. Los resultados reportados de bacterias y bacteriófagos se presentan con su correspondiente media geométrica y su intervalo de confianza al 95%, de acuerdo a lo establecido por la WHO (2000). Por su parte, los resultados de *Giardia* spp. y huevos de helmintos se presentan con sus medias aritméticas y sus respectivos intervalos de confianza al 95%. Con respecto a la información en las gráficas, los resultados de bacterias y bacteriófagos se presentan con la correspondiente transformación logarítmica (en unidades logarítmicas). Los resultados de los conteos directos para cada indicador, sus transformaciones y sus respectivas desviaciones estándar se presentan en el anexo C.

9.3.1 Época de estiaje

El muestreo de la época de estiaje se realizó entre los meses de marzo y abril del 2008.

Agua residual

La Tabla 9.5 muestra los resultados obtenidos de la cuantificación de organismos en las muestras de agua residual empleada para riego en época de estiaje. La Figura 9.1 presenta la gráfica de resultados de coliformes fecales, *E. coli*, Enterococos, esporas de *Clostridium* y bacteriófagos, cabe señalar que estos datos se presentan en unidades logarítmicas. Las Figuras 9.2 y 9.3 presentan los resultados del conteo de *Giardia* spp. y Huevos de Helmintos, respectivamente.

Tabla 9.5 Calidad biológica del agua de irrigación, época de estiaje

Punto	Coliformes (UFC/100mL)			<i>E. coli</i> (UFC/100mL)			Enterococos (UFC/100mL)		
	Media geométrica	IC 95%		Media geométrica	IC 95%		Media geométrica	IC 95%	
ARC-1	1.41E+07	3.14E+06	6.33E+07	3.51E+05	1.56E+05	7.90E+05	3.00E+05	3.00E+05	3.00E+05
ARM-2	7.35E+06	6.00E+06	9.00E+06	2.22E+05	9.13E+03	5.38E+06	7.22E+05	5.92E+05	8.79E+05
ARM-3	2.25E+05	1.47E+04	3.46E+06	2.34E+04	7.80E+03	7.01E+04	4.02E+05	7.48E+04	2.16E+06

Punto	<i>E. Clostridium</i> (UFC/100mL)			Bacteriófagos (UFP/100mL)		
	Media geométrica	IC 95%		Media geométrica	IC 95%	
ARC-1	4.15E+00	8.87E-01	2.99E+01	3.67E+03	2.44E+03	5.51E+03
ARM-2	1.42E+03	4.53E+02	4.48E+03	2.97E+02	1.95E+02	4.55E+02
ARM-3	2.87E+05	1.21E+05	6.85E+05	5.59E+03	3.34E+03	9.35E+03

Punto	Media	<i>Giardia</i> (Quistes/L)		Media	Huevos de helmintos (HH/L)	
		IC 95%			IC 95%	
ARC-1	1133	847	1420	16	11	22
ARM-2	797	345	1248	22	20	24
ARM-3	1033	890	1177	18	15	21

ARC 1: Agua residual cruda – Zona 1

IC 95% - Intervalo de confianza al 95%

ARM 2: Agua residual mezclada – Zona 2

ARM 3: Agua residual mezclada – Zona 3

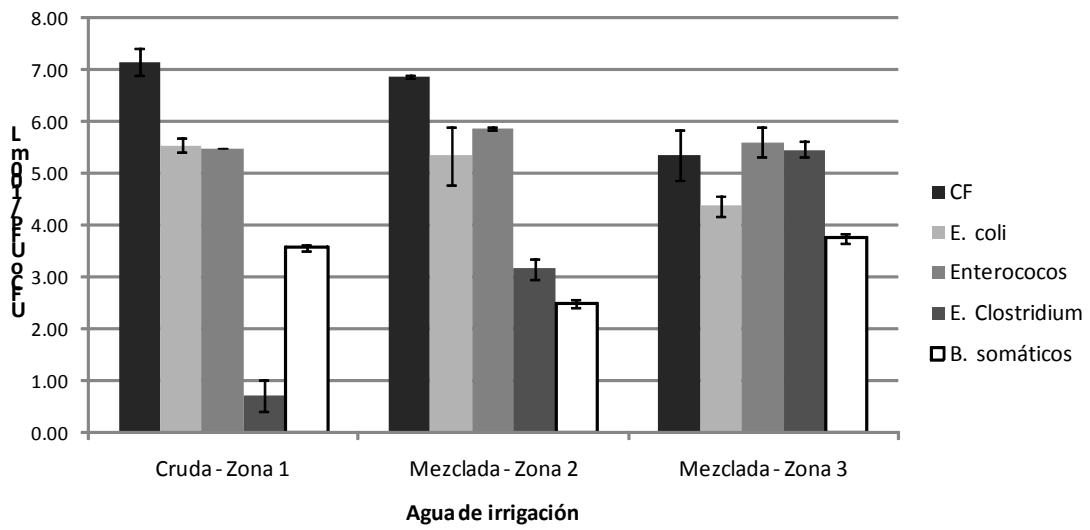


Figura 9.1 Resultados de bacterias y bacteriófagos en el agua de riego, época de estiaje[†]

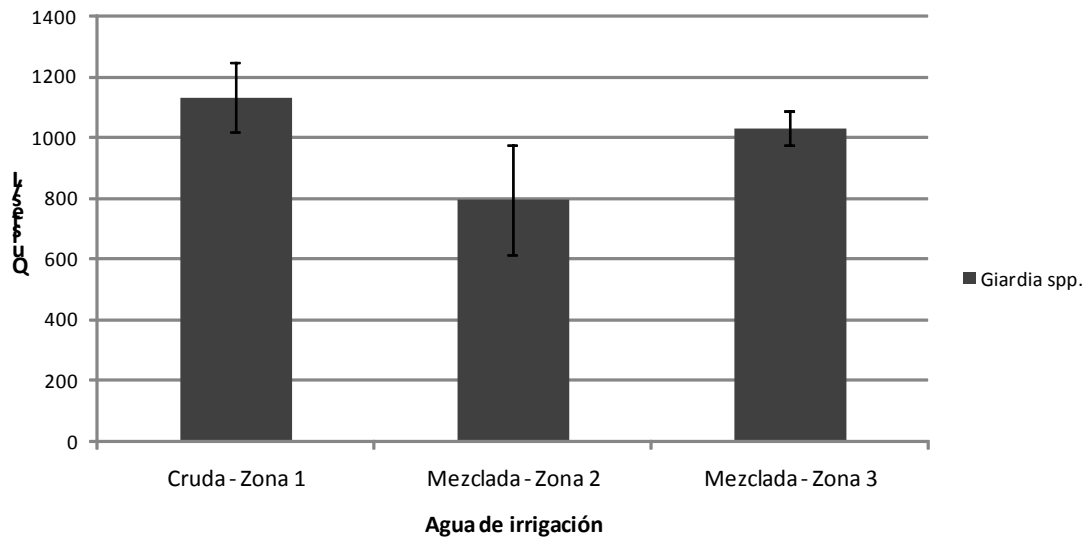


Figura 9.2 Resultados de *Giardia* spp. en aguas de irrigación, época de estiaje

[†] Los resultados se presentan en escala logarítmica

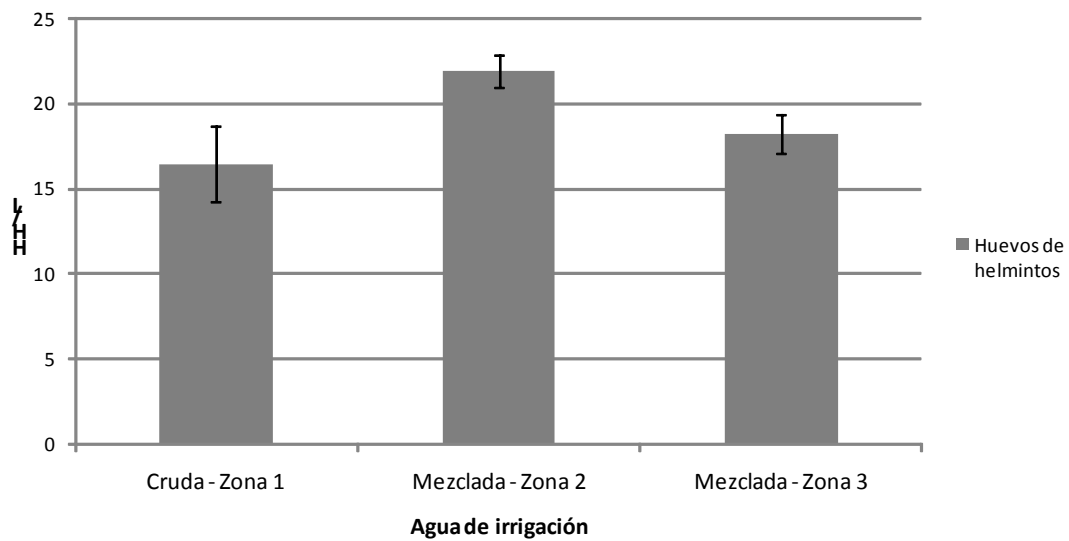


Figura 9.3 Resultados de huevos de helmintos en aguas de irrigación

De la información anterior, se observa que no hay una diferencia significativa en la composición de los diferentes tipos de agua residual que se emplean para la irrigación de las zonas del Valle del Mezquital. Todas las aguas de irrigación presentan coliformes fecales ($10^5 - 10^7$ UFC/100mL), *E.coli* ($10^4 - 10^5$ UFC/100mL), Enterococos (10^5 UFC/100mL), esporas de *Clostridium* ($10 - 10^5$ UFC/100mL), B. somáticos ($10^2 - 10^3$ UFP/100mL), *Giardia* (790-1300 quistes/L) y Huevos de helmintos (16-22 HH/L).

Fuentes de abastecimiento

En este apartado se presentan los resultados obtenidos del análisis de las fuentes de abastecimiento en las tres zonas del Valle de Tula. Cabe mencionar que el tratamiento de los resultados fue el mismo que para el agua residual, es decir, se aplicó una transformación logarítmica a los conteos obtenidos.

En la Tabla 9.6 y 9.7, y en las figuras 9.4, 9.5 y 9.6 se presentan los resultados obtenidos para la época de estiaje en las tres zonas de estudio dentro del Valle de Tula.

Tabla 9.6 Calidad biológica de las fuentes de abastecimiento, época de estiaje

Punto	Coliformes(UFC/100mL)			E.coli (UFC/100mL)			Enterococos (UFC/100mL)			E. Clostridium (UFC/100mL)			Bacteriofagos (UFP/100mL)		
	Media geométrica	IC 95%		Media geométrica	IC 95%		Media geométrica	IC 95%		Media geométrica	IC 95%		Media geométrica	IC 95%	
ZONA 1 - ATITALAQUIA															
Pozo 1	23.1	15.9	36.4	0.8	0.5	7.2	ND			0.4	0.3	7.0	ND		
Pozo 2	0.4	0.3	7.0	ND			ND			ND			ND		
Pozo 3	ND			ND			ND			ND			ND		
Manantial	110.7	38.8	321.3	20.6	16.4	28.4	27.6	17.0	48.2	ND			37.1	27.5	52.8
Noria	204.5	133.0	317.6	55.4	42.3	75.2	78.9	57.1	111.6	28.8	12.8	69.0	73.5	62.7	88.6
ZONA 2 - TLAHUELILPAN															
Pozo 1	ND			ND			ND			ND			8.8	5.2	18.3
Pozo 2	ND			ND			ND			ND			ND		
Pozo 3	ND			ND			ND			ND			ND		
Manantial	66.6	60.5	75.6	13.4	5.0	41.5	2.3	0.8	13.1	ND			24.1	17.0	37.1
Pozo 4	ND			ND			ND			ND			ND		
ZONA 3 - ACTOPAN															
Pozo 1	0.7	0.2	17.2	1.3	0.2	21.6	ND			ND			ND		
Pozo 2	0.4	0.3	7.0	ND			ND			ND			ND		
Pozo 3	8.2	5.1	16.6	ND			1.8	0.2	31.1	ND			ND		
Manantial	369.8	65.4	2101.5	23.8	11.4	53.9	ND			ND			39.3	37.5	43.3
Noria	40.3	17.8	95.8	6.1	1.1	46.9	ND			ND			71.0	53.6	96.6

ND – No detectado

IC 95% - Intervalo de confianza al 95%

Tabla 9.7 Calidad biológica de las fuentes de abastecimiento, época de estiaje

Punto	Media	Giardia (Quistes/L)		Media	Huevos de helmintos (HH/L)	
		IC 95%			IC 95%	
ZONA 1 - ATITALAQUIA						
Pozo 1	ND			ND		
Pozo 2	ND			ND		
Pozo 3	ND			ND		
Manantial	4	1	8	ND		
Noria	19	9	29	1	0	2
ZONA 2 - TLAHUELILPAN						
Pozo 1	ND			ND		
Pozo 2	ND			ND		
Pozo 3	ND			ND		
Manantial	ND			ND		
Pozo 4	ND			ND		
ZONA 3 - ACTOPAN						
Pozo 1	ND			0.07	0	0.35
Pozo 2	ND			ND		
Pozo 3	ND			ND		
Manantial	ND			ND		
Noria	ND			ND		

ND – No detectado

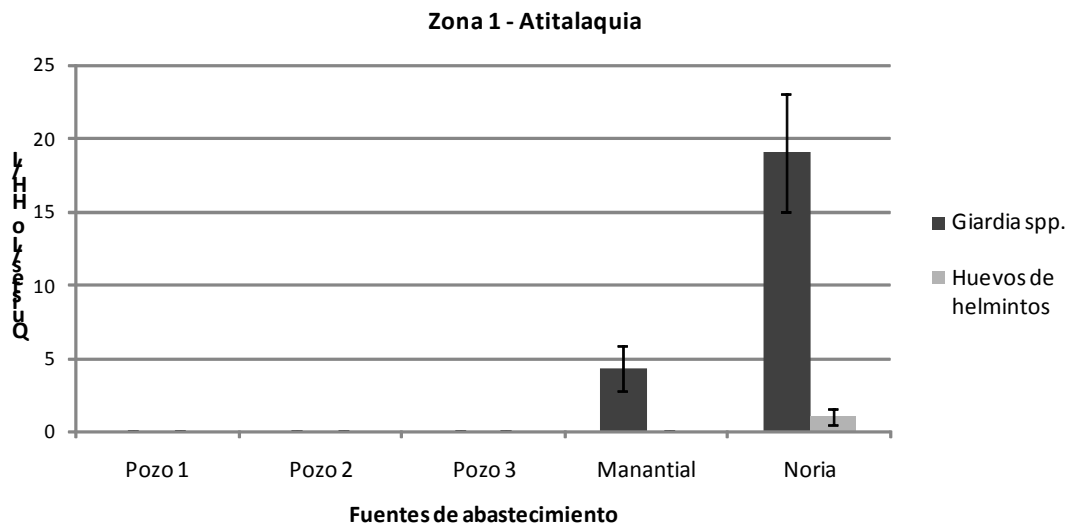
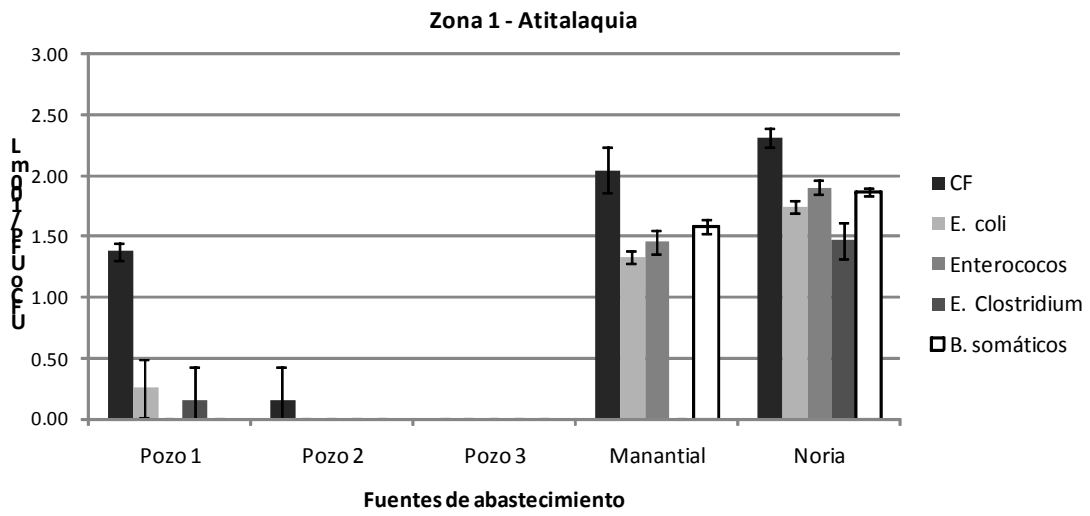


Figura 9.4 Calidad de las fuentes de abastecimiento en la Zona 1, época de estiaje[‡]

[‡] Los resultados de bacterias y bacteriófagos se presentan en escala logarítmica

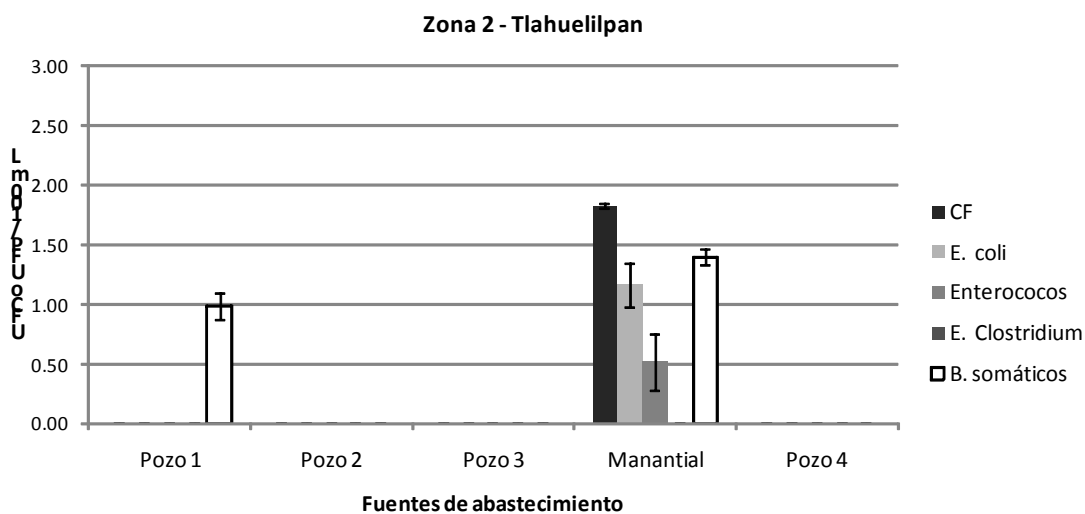


Figura 9.5 Calidad de las fuentes de abastecimiento en la Zona 2, época de estiaje

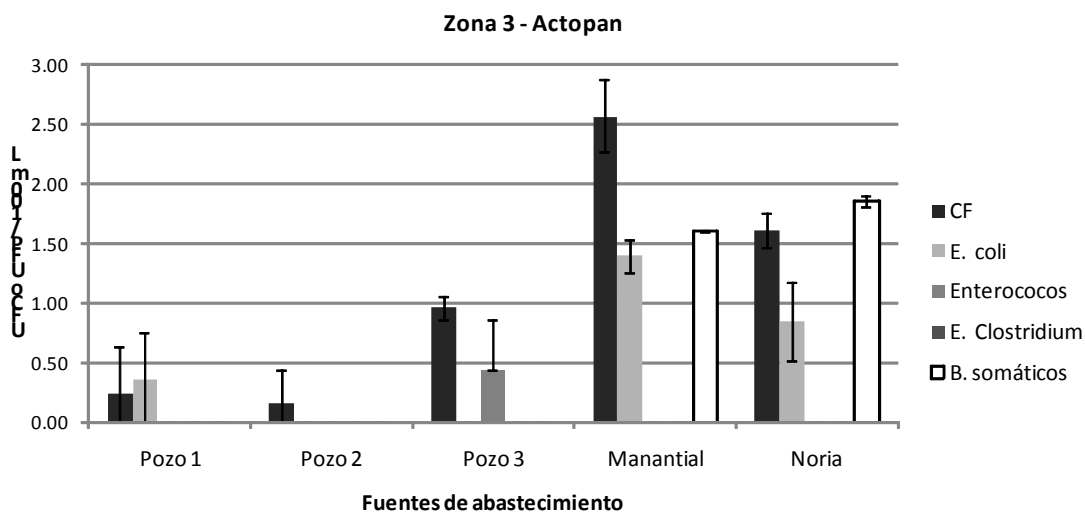


Figura 9.6 Calidad de las fuentes de abastecimiento en la Zona 3, época de estiaje[§]

[§] Los resultados se presentan en escala logarítmica

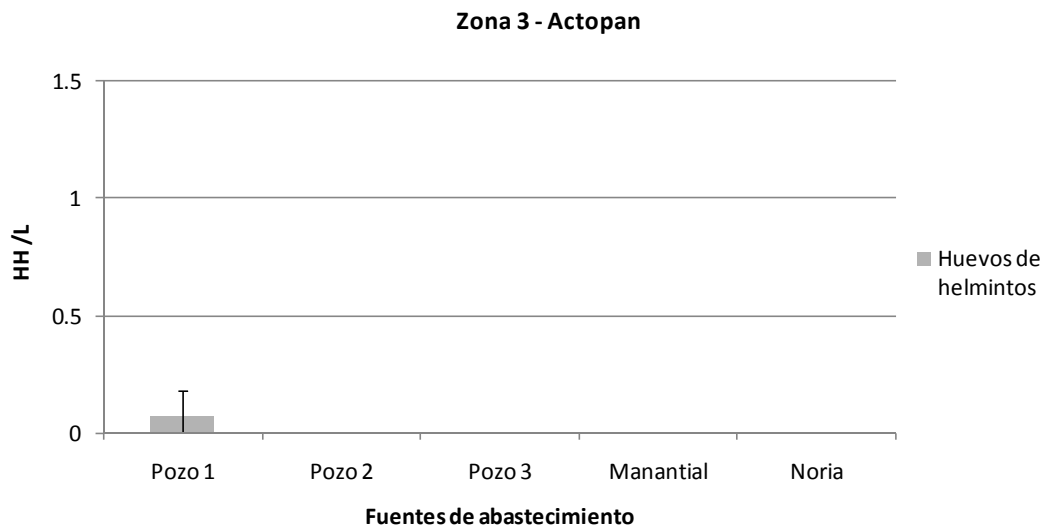


Figura 9.6. Continuación - Calidad de las fuentes de abastecimiento en la Zona 3, época de estiaje

De las figuras 9.4, 9.5 y 9.6 se determina que el 80% del total de las fuentes de abastecimiento muestreadas en época de estiaje, presentan evidencia de contaminación biológica. Se observa que todas las fuentes de suministro correspondientes a norias y manantiales siempre registran presencia de los parámetros biológicos determinados (excepto huevos de helmintos), principalmente de coliformes fecales. Así mismo, se encontró que las fuentes de suministro más contaminadas son las norias, las cuales tienen mayor presencia de bacterias y bacteriófagos. En cuanto a los pozos, sólo algunos de ellos mostraron evidencia de contaminación biológica, siendo el principal parámetro encontrado los coliformes fecales. En la Figura 9.7 se presenta una gráfica del porcentaje de pozos que presentan coliformes fecales y sus respectivas densidades.

Todos los puntos de muestreo de la Zona 1 (a excepción del pozo 3) muestran indicios de contaminación biológica, siendo el indicador de mayor ocurrencia los coliformes fecales (1-24 UFC/100mL para los pozos, 111-205 UFC/100mL para el manantial y la noria). Cabe señalar que tanto el manantial como la noria presentaron bacteriófagos somáticos (37-74 UFP/100mL), lo que sugiere la presencia de virus entéricos; así mismo, en estos puntos de muestreo se detectaron quistes de *Giardia* (4-19 quistes/L). Por su parte los huevos de helmintos sólo se presentaron en la noria (1 HH/L).

De los cinco puntos de muestreo de la Zona 2, solamente en el manantial (Cerro Colorado) se determinó la presencia de organismos indicadores de contaminación (67 UFC/100L de coliformes fecales, 14 UFC/100mL de *E. coli*, 2UFC/100mL de enterococos y 24 UFP/100mL de B. somáticos). Cabe mencionar que la presencia de bacteriófagos somáticos en el Pozo 1 (Sn. Primitivo) y el manantial, hace referencia a la posible presencia de virus entéricos en dichos puntos de muestreo.

En todos los puntos de la Zona 3 se observó la presencia de indicadores de contaminación principalmente bacteriana. El rango de presencia de coliformes fecales para los tres pozos fue de 1-8 UFC/100mL, cabe señalar que este fue el único parámetro encontrado en los pozos, a excepción del Pozo 1 en el que se observó la presencia de huevos de helmintos (0.2 HH/L). Tanto el manantial como la noria contenían coliformes fecales (42-373 UFC/100mL), *E. coli* (7-25 UFC/100mL) y B. somáticos (39-71 UFP/100mL).

Porcentaje de pozos que presentan CF en época de estiaje

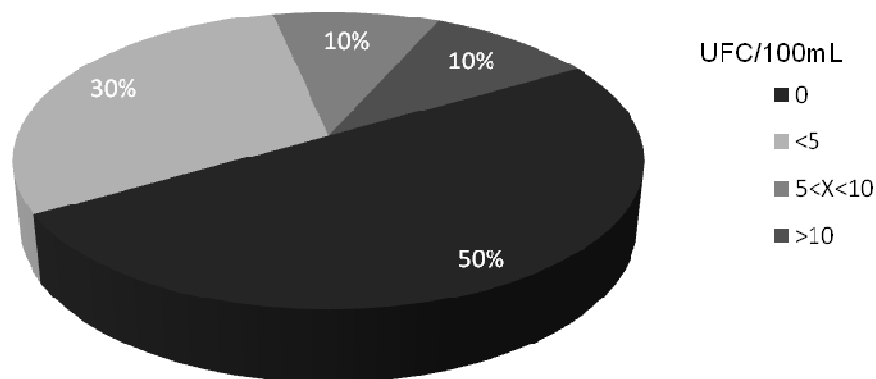


Figura 9.7 Porcentaje de pozos que presentan CF en época de estiaje

De la figura 9.7 se observa que la mitad de los pozos muestreados en la época de estiaje se encuentran fuera de lo establecido por la normatividad NOM-127-SSA1-2000 (ausencia de coliformes fecales por 100 mL).

9.3.2 Época de lluvia

El muestreo de la época de lluvia se realizó durante los meses de junio y julio de 2008.

Agua residual

En la Tabla 9.8 se presentan los resultados obtenidos de la cuantificación de organismos en las muestras de agua residual de riego para la época de lluvia. La Figura 9.8 presenta la gráfica de resultados de coliformes fecales, *E. coli*, Enterococos, esporas de *Clostridium* y bacteriófagos, cabe señalar que estos datos se presentan en unidades logarítmicas. Las figuras 9.9 y 9.10 presentan los resultados del conteo de *Giardia* spp. y huevos de helmintos, respectivamente.

Tabla 9.8 Calidad biológica del agua de irrigación, época de lluvia

Punto	Coliformes (UFC/100mL)			<i>E. coli</i> (UFC/100mL)			Enterococos (UFC/100mL)		
	Media geométrica	IC 95%		Media geométrica	IC 95%		Media geométrica	IC 95%	
ARC-1	1.03E+07	8.80E+06	1.20E+07	5.57E+05	2.28E+05	1.36E+06	7.12E+04	2.36E+04	2.15E+05
ARM-2	2.60E+06	1.63E+06	4.16E+06	2.50E+06	1.55E+06	4.05E+06	9.12E+04	5.67E+04	1.47E+05
ARM-3	3.70E+05	4.48E+04	3.05E+06	2.06E+02	1.39E+01	3.06E+03	5.08E+01	3.35E+01	8.00E+01

Punto	<i>E. Clostridium</i> (UFC/100mL)			Bacteriófagos (UFP/100mL)		
	Media geométrica	IC 95%		Media geométrica	IC 95%	
ARC-1	4.14E+05	3.03E+05	5.68E+05	2.32E+03	6.68E+02	8.06E+03
ARM-2	1.15E+04	6.32E+03	2.11E+04	7.20E+04	6.96E+04	7.45E+04
ARM-3	2.31E+01	1.52E+01	3.82E+01	4.28E+03	1.83E+03	9.97E+03

Punto	Media	<i>Giardia</i> (Quistes/L)		Media	Huevos de helmintos (HH/L)	
		IC 95%			IC 95%	
ARC-1	55667	1712	109622	20	18	22
ARM-2	2000	490	3510	14	11	17
ARM-3	6167	64	12270	16	12	20

ARC 1: Agua residual cruda – Zona 1

ARM 2: Agua residual mezclada – Zona 2

ARM 3: Agua residual mezclada – Zona 3

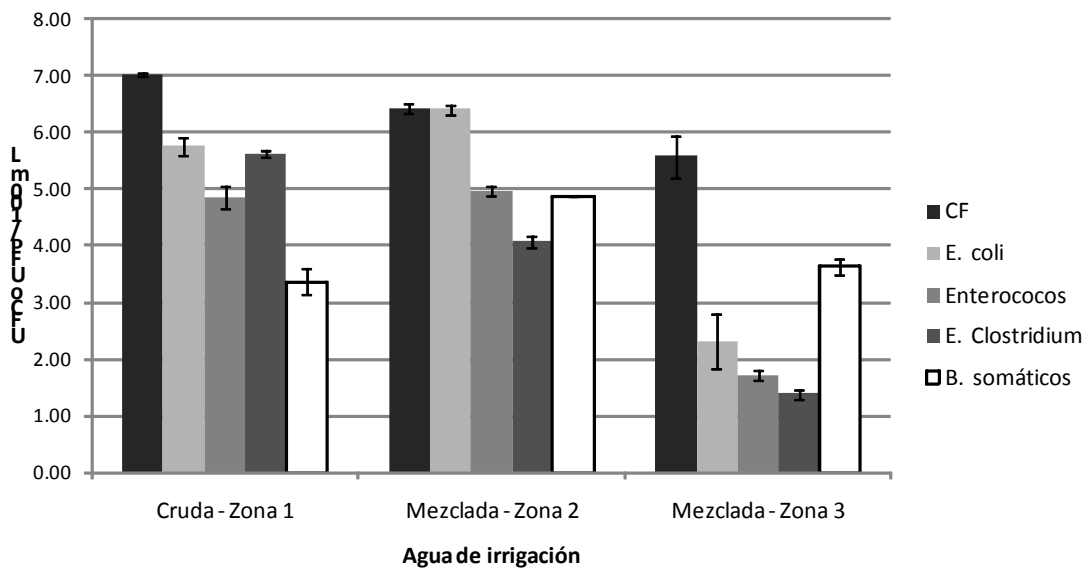


Figura 9.8 Resultados de bacterias y bacteriófagos en el agua de riego, época de lluvia **

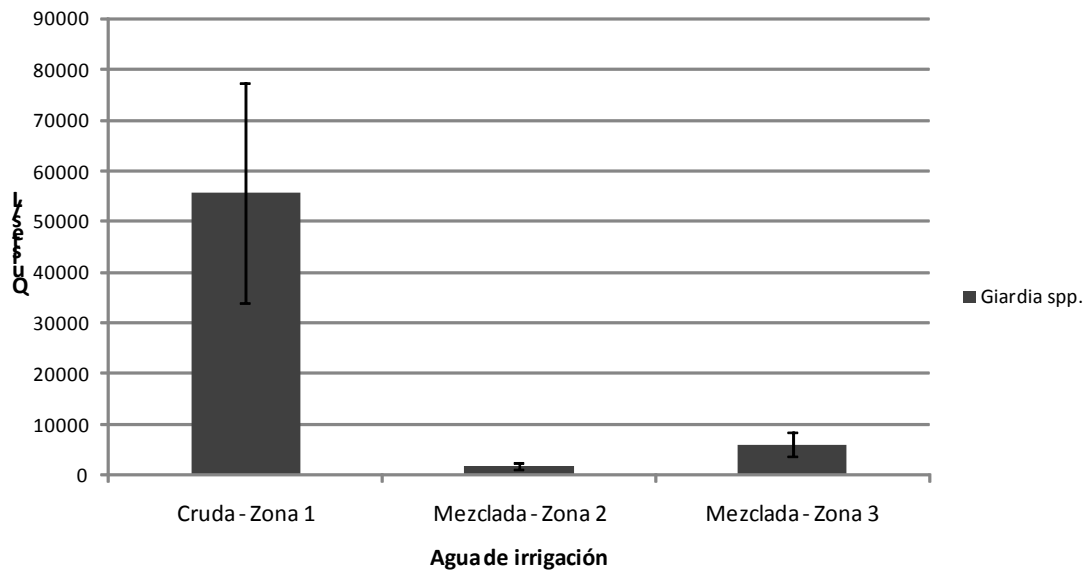


Figura 9.9 Resultados de *Giardia* spp. en aguas de irrigación, época de lluvia

** Los resultados se presentan en escala logarítmica

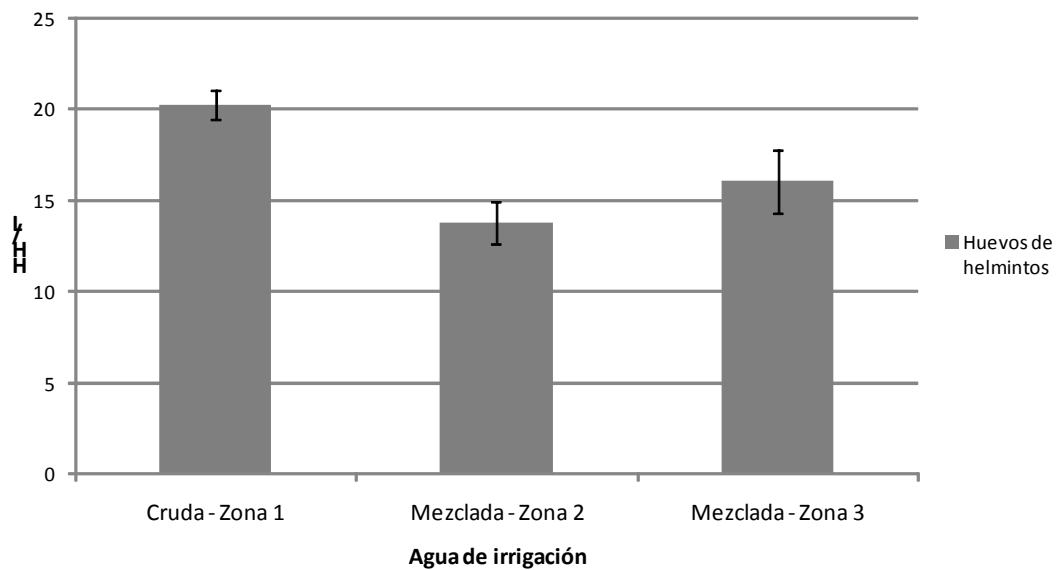


Figura 9.10 Resultados de HH en aguas de irrigación, época de lluvia

De las gráficas anteriores se puede apreciar que no hay una diferencia significativa en la calidad de agua de irrigación en las diferentes zonas de estudio. Todos los parámetros biológicos analizados se encontraron en las aguas de irrigación: coliformes fecales ($10^5 - 10^7$ UFC/100mL), *E. coli* ($10^2 - 10^6$ UFC/100mL), enterococos ($10^1 - 10^4$ UFC/100mL), esporas de *Clostridium* ($10^1 - 10^5$ UFC/100mL), B. somáticos ($10^3 - 10^4$ UFP/100mL), *Giardia* ($10^3 - 10^4$ quistes/L) y huevos de helmintos (14-20 HH/L).

Fuentes de abastecimiento

En este apartado se presentan los resultados obtenidos del análisis de las fuentes de abastecimiento en las tres zonas del Valle de Tula. Cabe mencionar que el tratamiento de los resultados fue el mismo que para el agua residual, es decir, se aplicó una transformación logarítmica a los conteos obtenidos.

En las Tablas 9.9 y 9.10, y en las Figuras 9.11, 9.12 y 9.13 se presentan los resultados obtenidos para la época de estiaje en las tres zonas de estudio dentro del Valle de Tula.

Tabla 9.9 Calidad biológica de las fuentes de abastecimiento, época de lluvia

Punto	Coliformes(UFC/100mL)			<i>E. coli</i> (UFC/100mL)			Enterococos (UFC/100mL)			<i>E. Clostridium</i> (UFC/100mL)			Bacteriófagos (UFP/100mL)		
	Media geométrica	IC 95%		Media geométrica	IC 95%		Media geométrica	IC 95%		Media geométrica	IC 95%		Media geométrica	IC 95%	
ZONA 1 – ATITALAQUIA															
Pozo 1	1.3	0.4	14.1	ND			ND			ND			ND		
Pozo 2	5.0	2.2	16.4	1.9	0.2	38.2	1.0	0.4	11.2	3.5	3.4	6.0	ND		
Pozo 3	0.4	0.3	7.0	0.4	0.3	7.0	ND			ND			ND		
Manantial	19.6	17.1	24.8	17.6	13.2	26.1	0.3	0.5	3.4	3.5	3.4	6.0	ND		
Noria	787.8	461.5	1348.2	134.3	57.8	316.9	75.5	61.8	94.6	414.5	303.7	568.5	106.2	92.3	124.5
ZONA 2 – TLAHUELILPAN															
Pozo 1	11.2	2.6	57.9	6.3	1.0	50.9	0.9	0.1	31.1	3.5	3.4	6.0	4.9	3.9	9.0
Pozo 2	6.0	3.0	16.7	ND			ND			3.5	3.4	6.0	7.3	2.0	33.9
Pozo 3	1.5	0.9	6.8	ND			0.3	0.5	3.4	0.7	0.2	14.8	0.4	0.3	7.0
Manantial	21.8	14.7	35.2	19.4	12.6	33.0	11.5	7.5	20.8	3.5	3.4	6.0	20.8	14.7	32.5
Pozo 4	1.0	0.4	11.2	ND			ND			ND			ND		
ZONA 3 – ACTOPAN															
Pozo 1	ND			ND			ND			ND			ND		
Pozo 2	ND			ND			ND			ND			ND		
Pozo 3	5.3	0.5	79.5	3.6	0.2	137.7	ND			ND			ND		
Manantial	67.8	28.8	163.9	35.0	15.1	85.7	14.3	8.1	28.9	0.4	0.3	7.0	ND		
Noria	130.1	51.9	331.0	106.6	93.9	123.1	15.2	6.1	42.6	40.0	28.6	58.9	91.2	76.9	110.5

ND – No detectado

Tabla 9.10 Calidad biológica de las fuentes de abastecimiento, época de lluvia

Punto	Media geométrica	Giardia (Quistes/L)		Media geométrica	Huevos de helmintos (HH/L)	
		IC 95%			IC 95%	
ZONA 1 - ATITALAQUIA						
Pozo 1		ND			ND	
Pozo 2		ND			ND	
Pozo 3		ND			ND	
Manantial		ND			ND	
Noria	600	289	911		ND	
ZONA 2 - TLAHUELILPAN						
Pozo 1		ND			ND	
Pozo 2		ND			ND	
Pozo 3		ND			ND	
Manantial		ND			ND	
Pozo 4		ND			ND	
ZONA 3 - ACTOPAN						
Pozo 1		ND			ND	
Pozo 2		ND			ND	
Pozo 3		ND			ND	
Manantial		ND			ND	
Noria	13	6	21		ND	

ND – No detectado

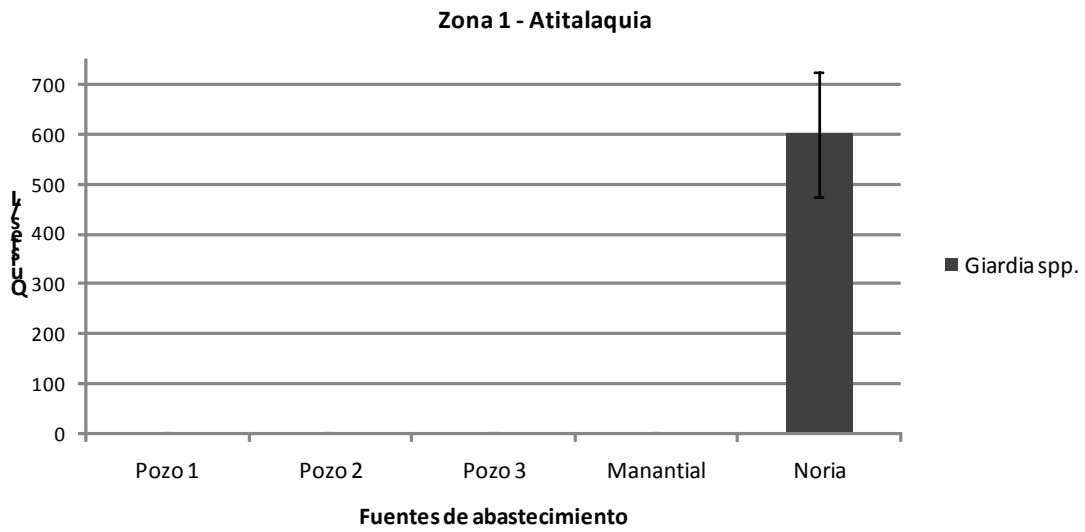
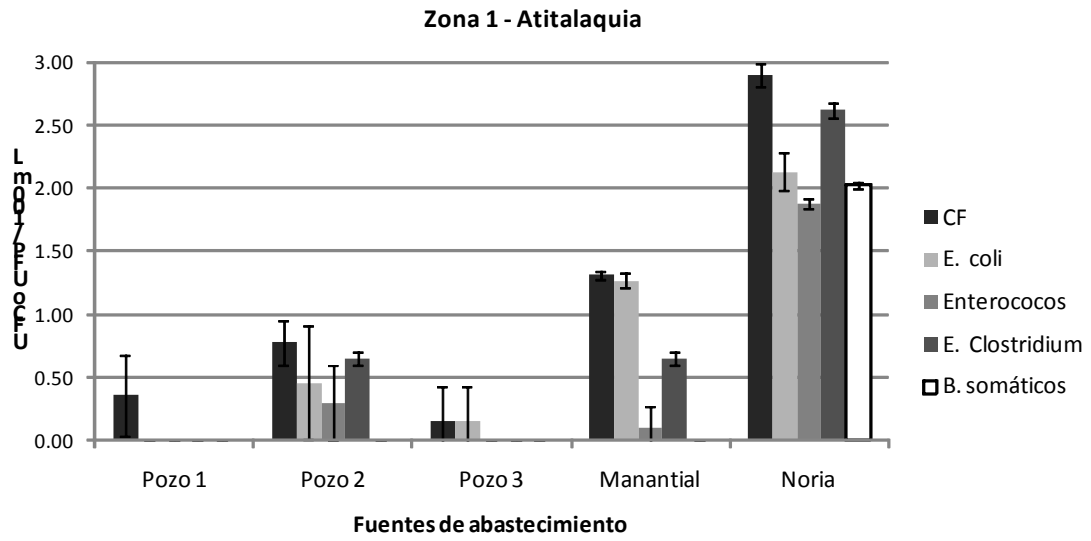


Figura 9.11 Calidad de las fuentes de abastecimiento en la Zona 1, época de lluvia.

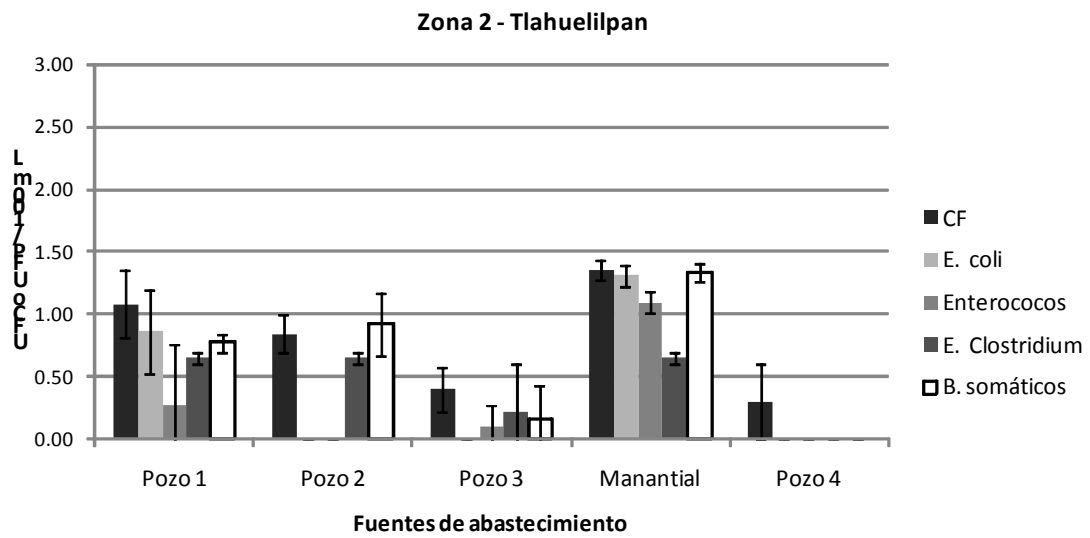


Figura 9.12 Calidad de las fuentes de abastecimiento en la Zona 2, época de lluvia

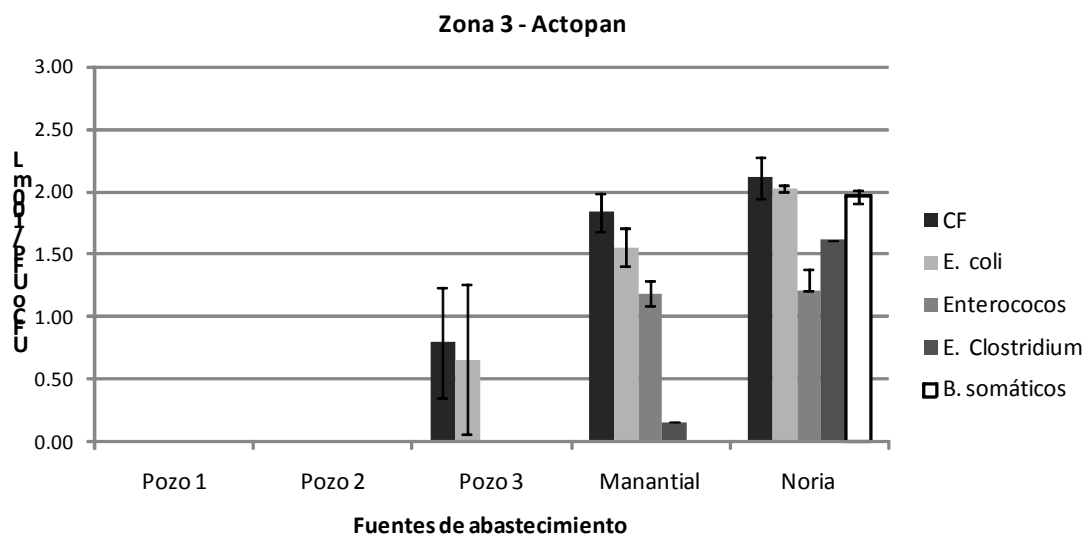


Figura 9.13 Calidad de las fuentes de abastecimiento en la Zona 3, época de lluvia

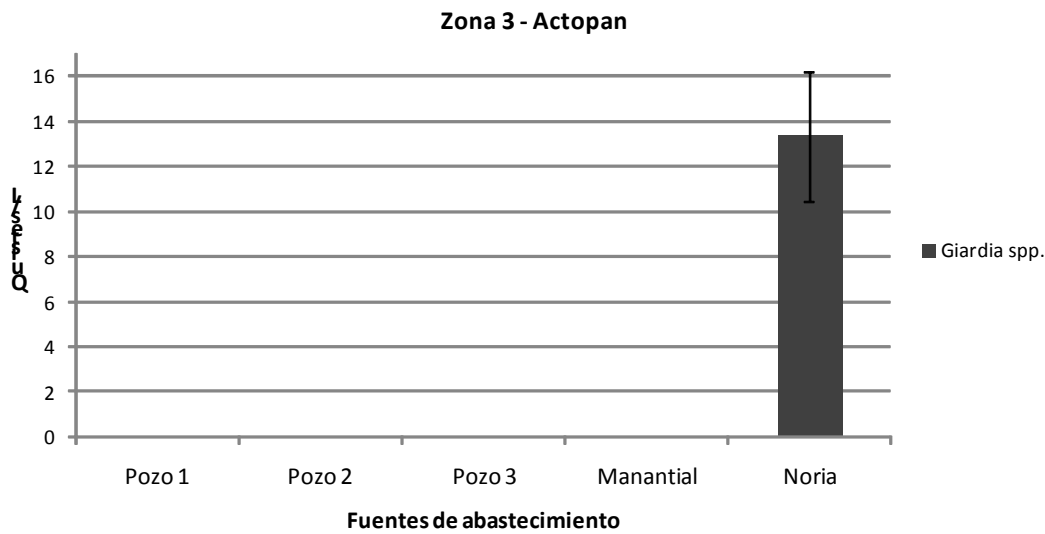


Figura 9.13 Continuación - Calidad de las fuentes de abastecimiento en las tres zonas del Valle de Tula, época de lluvia

De los resultados presentados se puede determinar que el 86% del total de las fuentes de abastecimiento muestreadas en época de lluvia muestran evidencia de contaminación biológica. Al igual que en la época de estiaje, los manantiales y las norias siempre registran la presencia de todos los parámetros biológicos determinados (con excepción de HH y *Giardia* spp.). Se observa también, que las fuentes de suministro más contaminadas son las norias, las cuales tienen mayor presencia de bacterias, bacteriófagos y *Giardia* spp. En cuanto a los pozos, sólo algunos de ellos mostraron evidencia de contaminación biológica, siendo el principal parámetro encontrado los coliformes fecales. En la Figura 9.14 se presenta una gráfica del porcentaje de pozos que presentan coliformes fecales y sus respectivas densidades.

Todos los puntos de muestreo de la Zona 1 muestran indicios de contaminación biológica, siendo el indicador de mayor ocurrencia los coliformes fecales (1-5 UFC/100mL para los pozos, 20-800 UFC/100mL para el manantial y la noria). Cabe mencionar que solamente se observaron B. somáticos (106 UFP/100mL) y *Giardia* (600 quistes/L) en la noria.

En la Zona 2 todos los puntos de muestreo presentaron indicadores de bacterias y bacteriófagos somáticos. Cabe señalar que ningún punto presentó *Giardia* o huevos de

helminthos. El rango de coliformes fecales en los pozos varió de 2-11 UFC/100mL, 1-7 UFP/100mL de B. somáticos, 1-4 UFC/100mL de esporas de *Clostridium*. *E. coli* sólo se presentó en el pozo 1 de esta zona (6 UFC/100mL). El manantial Cerro Colorado también presentó *E. coli* (19 UFC/100mL), coliformes fecales (22 UFC/100mL), enterococos (12 UFC/100mL), esporas de *Clostridium* (3.5 UFC/100mL) y B. somáticos (21 UFP/100mL).

En cuanto a la Zona 3, sólo el pozo 3 presentó indicadores de contaminación biológica en el agua de suministro (coliformes fecales 5 UFC/100mL, 3.6 UFC/100mL de *E. coli*). Tanto el manantial como la noria mostraron la presencia de coliformes fecales (68-130 UFC/100mL), *E. coli* (35-106 UFC/100mL), enterococos (14-15 UFC/100mL), esporas de *Clostridium* (0.5-40 UFC/100mL). Por su parte, la noria también presentó bacteriófagos (91 UFP/100mL) y *Giardia* (13 quistes/L).

Porcentaje de pozos que presentan CF en época de lluvia

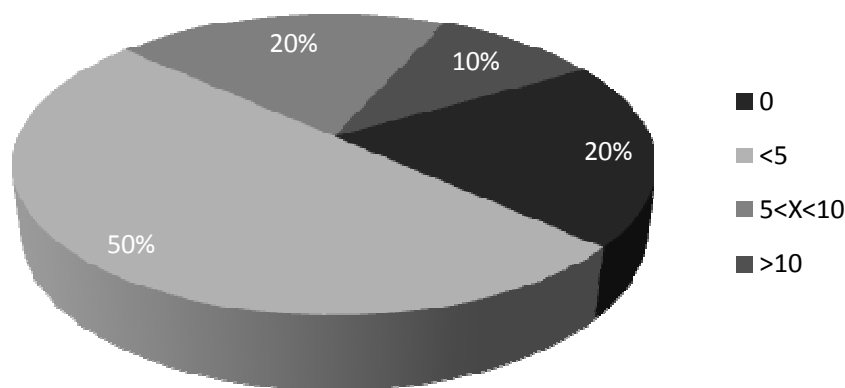


Figura 9.14 Porcentaje de pozos que presentan CF en época de lluvia

De los resultados anteriores, se determina que el 80% de los pozos tienen presencia de coliformes fecales, con lo cual se encuentran fuera de lo establecido por la modificación 2000, NOM-127-SSA1-1994 (ausencia de coliformes fecales por 100 mL).

9.3.3 Diferencias entre temporalidad, zonas y tipo de fuente

De los resultados anteriores se aprecia que hay una variación en la presencia de organismos indicadores con respecto a la temporalidad, la zona y el tipo de fuente. Para hacer un análisis global del efecto de estos tres factores, se tomó como referencia la presencia de coliformes fecales, debido a que es el indicador más utilizado en la literatura, el más reconocido y que además está considerado dentro de la normatividad mexicana. Para dicho análisis, se utilizó el logaritmo del conteo de UFC/100mL de coliformes fecales de todos los puntos de muestreo, y se empleó el método de comparación múltiple de medias de diferencias mínimas significativas (LS Means) T de Student (resultados detallados se presentan en el anexo D). La Figura 9.15 presenta los resultados (en unidades logarítmicas) arrojados por JMP (software estadístico).

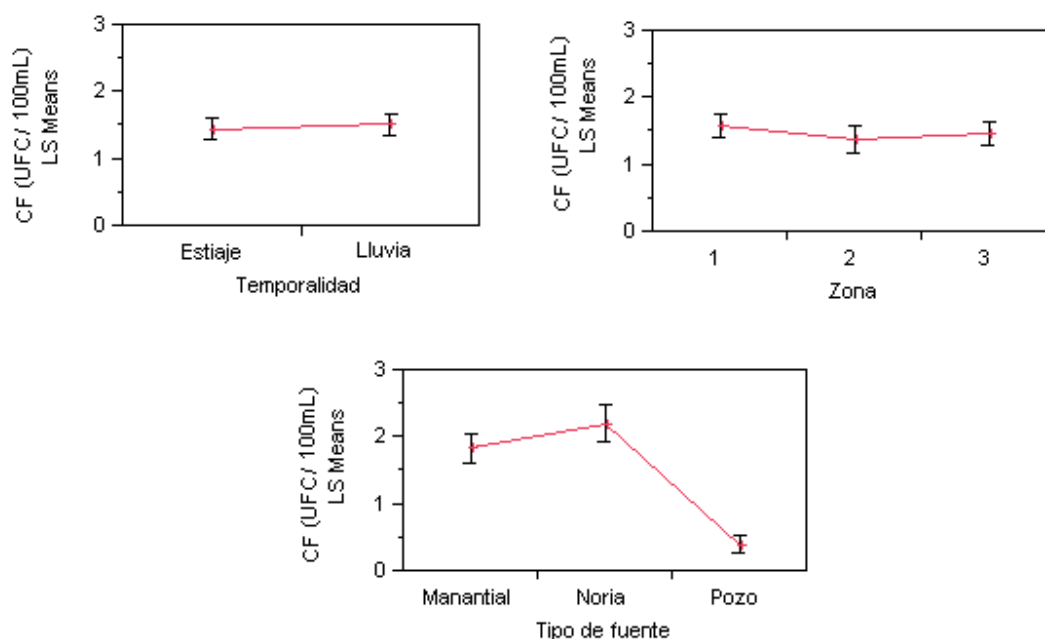


Figura 9.15 Resultados de los efectos de temporalidad, zona y tipo de fuente con respecto a la presencia de CF en los puntos de muestreo

Los resultados muestran que, en general, durante la época de lluvias hay una presencia relativamente mayor de organismos indicadores de contaminación fecal. Sin embargo, no hay una diferencia significativa debida a la temporalidad (Pvalue=0.5, en promedio 1.5 UFC/100mL en lluvia, 1.4 UFC/100mL en estiaje). Se puede argumentar que para aquellos casos en que hay mayor presencia de organismos indicadores en la época de lluvias se debe a que las condiciones climáticas son de suma importancia en la migración

de bacterias fecales a través de la superficie (principalmente en áreas áridas y semi-áridas, como lo es el Valle de Tula). Se observa que en dos de las zonas de estudio del Valle de Tula (Atitalaquia y Tlahuelilpan), en la época de lluvias hay un mayor transporte de bacterias fecales a través del suelo, con densidades detectables de coliformes fecales, *E. coli*, enterococos, esporas de *Clostridium* y bacteriófagos mayores que en la época de estiaje. Los mecanismos por medio de los cuales ocurre dicho fenómeno no son claros, sin embargo, es probable que lo que ocurra es que haya un incremento en la tasa de infiltración, lo que provoca una disminución en la concentración de iones, y favorezca la supervivencia de las bacterias como resultado de un mayor contenido de humedad (Gerba y Bitton, 1984).

Con respecto al efecto del tipo de zona, el análisis de Student demuestra que tampoco hay diferencias significativas ($P_{\text{value}}=0.27$, Zona 1 -1.57 UFC/100mL, Zona 2 – 1.46 UFC/100mL, Zona 3 – 1.37 UFC/100mL; cabe señalar que dichos promedios son considerando todos los puntos de muestreo por zona). Las zonas 1 y 2 (Atitalaquia y Tlahuelilpan) se encuentran dentro del acuífero Valle del Mezquital, dentro del cual las profundidades de los niveles estáticos permanecen variables de 10 a 55 m. Notablemente en la zona de Mangas-Tlahuelilpan los niveles se encuentran a pocos metros de profundidad o hay manantiales brotantes, debido a la alta recarga por irrigación. La zona 3 se encuentra dentro del acuífero Actopan-Santiago de Anaya, específicamente en la región de Actopan. Dicha región presenta los niveles más elevados dentro del subsistema, debido a que es una zona adyacente al Valle del Mezquital y que por estar topográficamente en un nivel más bajo, recibe una gran cantidad de agua subterránea, lo que da lugar a la formación de manantiales y pozos brotantes en el Municipio de San Salvador.

Por su parte, el análisis de Student señaló que sí hay una diferencia significativa con respecto al tipo de fuente de suministro ($P_{\text{value}}<0.0001$). Se encontró que las norias son los puntos más contaminados (2.18 UFC/100mL), seguido por los manantiales (1.82 UFC/mL) y los pozos (0.39 UFC/mL). Estos resultados son congruentes con los niveles de riesgo que se estimaron en base a las condiciones físicas y de mantenimiento de cada fuente de suministro (inspección sanitaria).

9.4 Establecimiento del riesgo

Las figuras 9.16, 9.17, 9.18, 9.19 y 9.20 muestran el nivel de riesgo y la prioridad de las acciones a tomar para cada fuente de abastecimiento, de acuerdo con la combinación de los resultados del nivel de riesgo en la inspección sanitaria y al conteo de organismos indicadores (media geométrica para las bacterias, y media aritmética para *Giardia* y huevos de helmintos) para cada temporada de muestreo. Un resumen de los resultados se presenta en la Tabla 9.11.

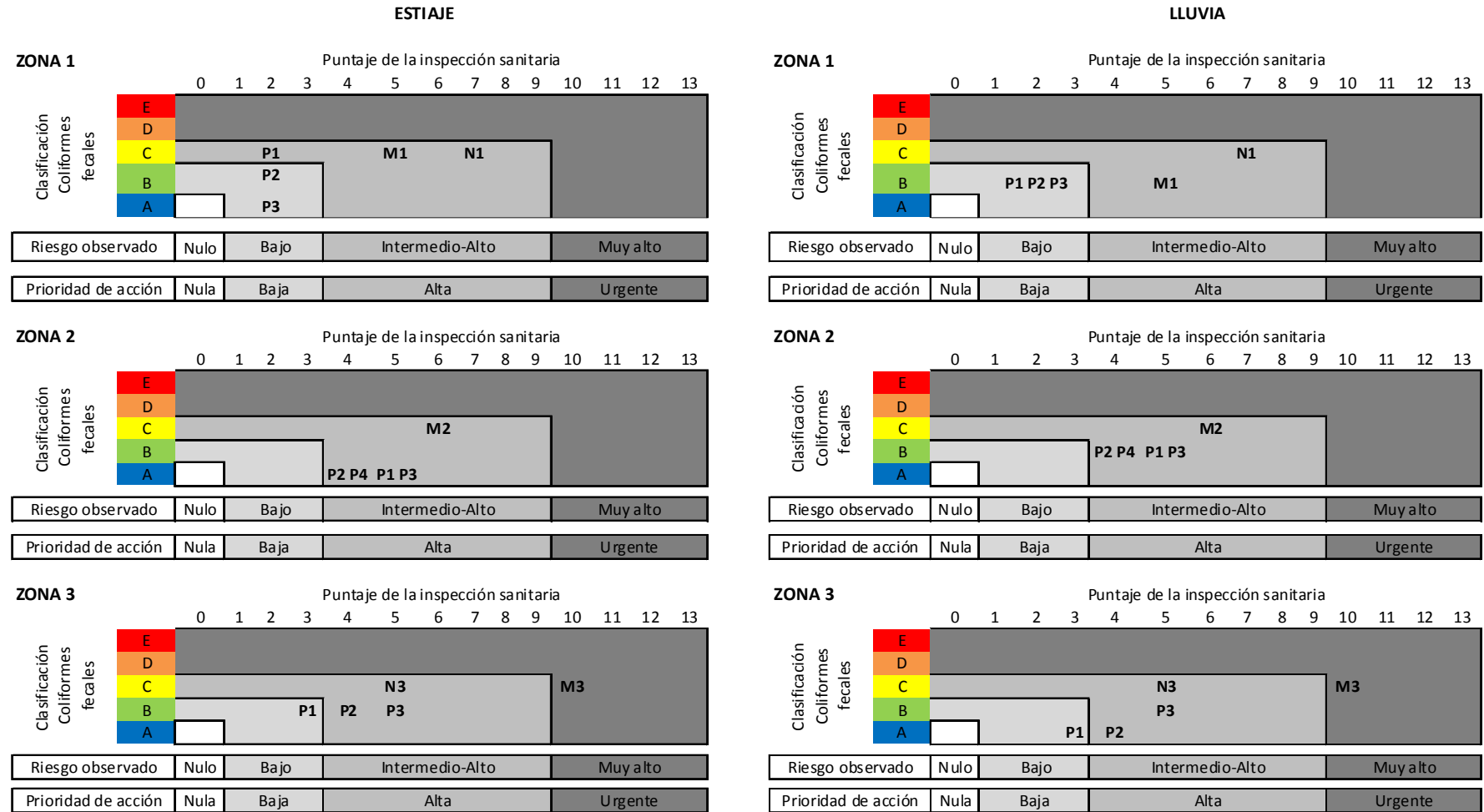
De los resultados obtenidos, se puede observar que de manera general para la Zona 1- Atitalaquia los pozos de suministro (P1-Tezoquipa, P2-La Cantera y P3-El Tablón) tienen un nivel de riesgo bajo y por lo tanto no requieren de una acción inmediata. Aunque estos pozos no se encuentran dentro de las áreas de irrigación, su cercanía a éstas representa un riesgo a futuro. El manantial y la noria (M1-Rancho el Olimpo y la noria N1- Familia González López) presentan un riesgo intermedio-alto, con lo que se requiere una prioridad de acción alta. La noria por su parte representa un riesgo muy alto, debido a la elevada presencia de *E. coli* y *Giardia*, lo que implica una prioridad de acción urgente. En el caso del manantial y la noria se necesitan implementar medidas para evitar que el agua residual se infiltre en estas fuentes de suministro de agua. Aunque estas fuentes de abastecimiento no se utilizan de manera directa para el abastecimiento de la población, la gente si tiene contacto ocasionalmente con ellas, por lo tanto, es importante que se hagan obras civiles que mejoren la protección en el caso del manantial, y para la noria sería recomendable que se cerrara, ya que los habitantes pueden tener acceso a mejores fuentes de suministro de agua.

Por su parte, todas las fuentes de abastecimiento de la Zona 2 – Tlahuelilpan presentan un riesgo de intermedio a alto, lo cual se debe principalmente a dos razones: la primera es que todos los puntos muestreados en esta región se encuentran dentro de las zonas de riego, por lo cual están más expuestas a la infiltración de las aguas residuales; y la segunda razón es que en todos los puntos existe un problema con la dosificación de cloro al agua. Para esta zona en particular, se requiere de una prioridad de acción alta. Se requieren tomar medidas para asegurar el funcionamiento continuo y eficiente de la cloración del agua.

La Zona 3 – Actopan tiene diferencias en los niveles de riesgo establecidos. Solamente un pozo (P1-Bothi-Baji) presenta un nivel bajo de riesgo, no requiere una acción inmediata. Dos de los pozos de la zona (P2-San Isidro y P3-CIC 126) tienen un nivel intermedio-alto, lo cual implica una prioridad de acción alta. El pozo CIC 126 sólo es de riego, por lo tanto la única medida necesaria será con respecto a la protección de las personas que tienen contacto con esta fuente de agua. El manantial (M3-El Dren) de esta zona no se utiliza como fuente de abastecimiento, sin embargo, se puede apreciar que si hay una gran influencia en los cuerpos de agua que se forman debido al riego con aguas negras; este punto representa un riesgo muy alto. La noria (N3-Pozo Grande) que abastece a la población, presenta un nivel de riesgo intermedio-alto en general, sin embargo, la elevada presencia de *E. coli* y *Giardia* significan un riesgo muy alto en la época de lluvia. La noria se encuentra en un lugar dentro de la zona de riego, así mismo, presenta problemas con la dosificación de cloro, esto implica medidas de acción urgentes.

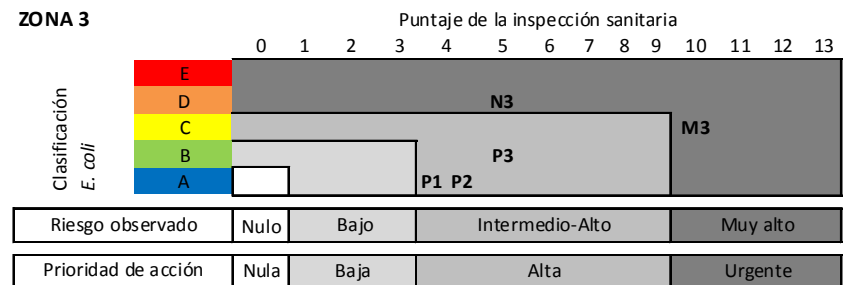
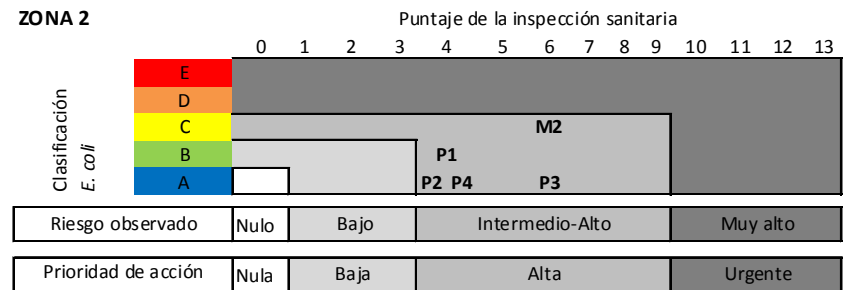
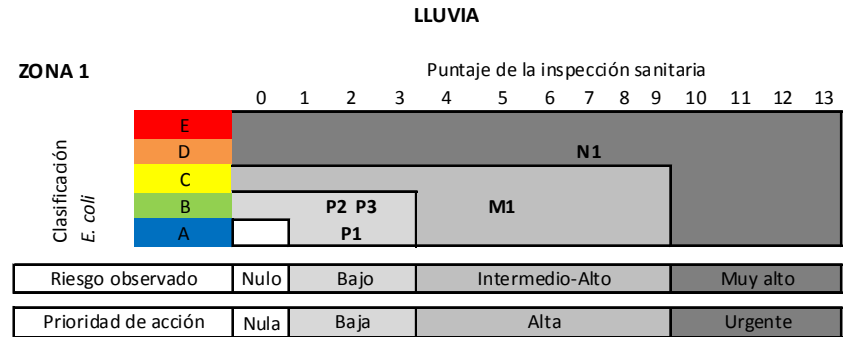
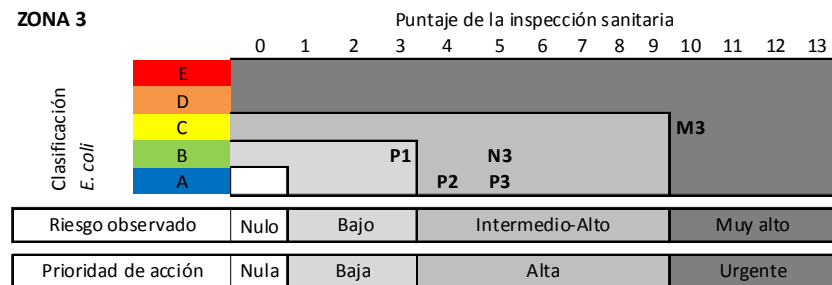
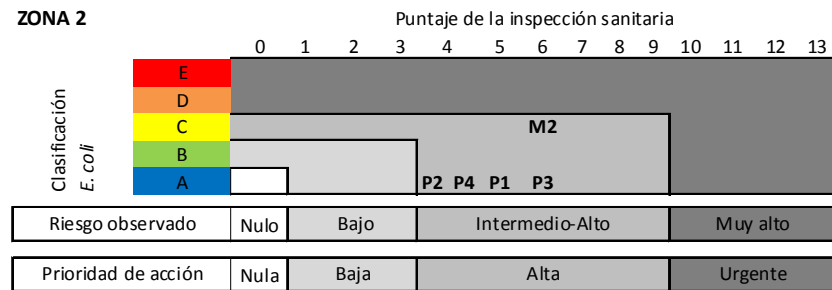
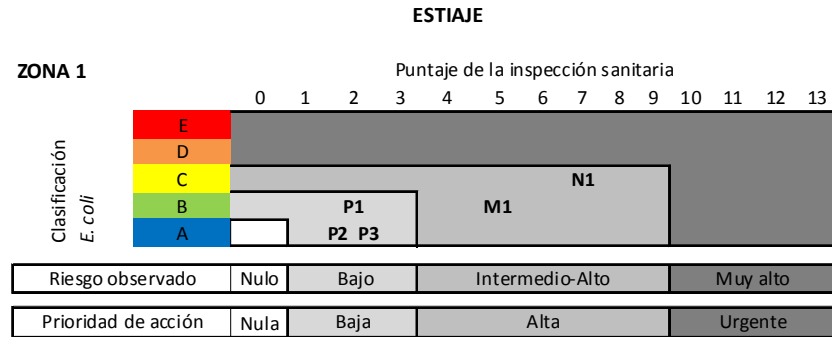
En general, el establecimiento de riesgo para cada punto muestreado es similar aunque se hayan utilizado diferentes organismos indicadores para hacer el análisis. Tal situación sugiere que los distintos indicadores reflejan de manera adecuada la magnitud de contaminación fecal. De manera general, se encontró que en las tres zonas del Valle de Tula, el 20-26% de los puntos muestreados (considerado la época de lluvia y estiaje) tienen un nivel de riesgo bajo, el 53-73% un nivel intermedio-alto y el 6-20% muy alto.

Figura 9.16 Riesgo sanitario de las fuentes de abastecimiento – Coliformes fecales



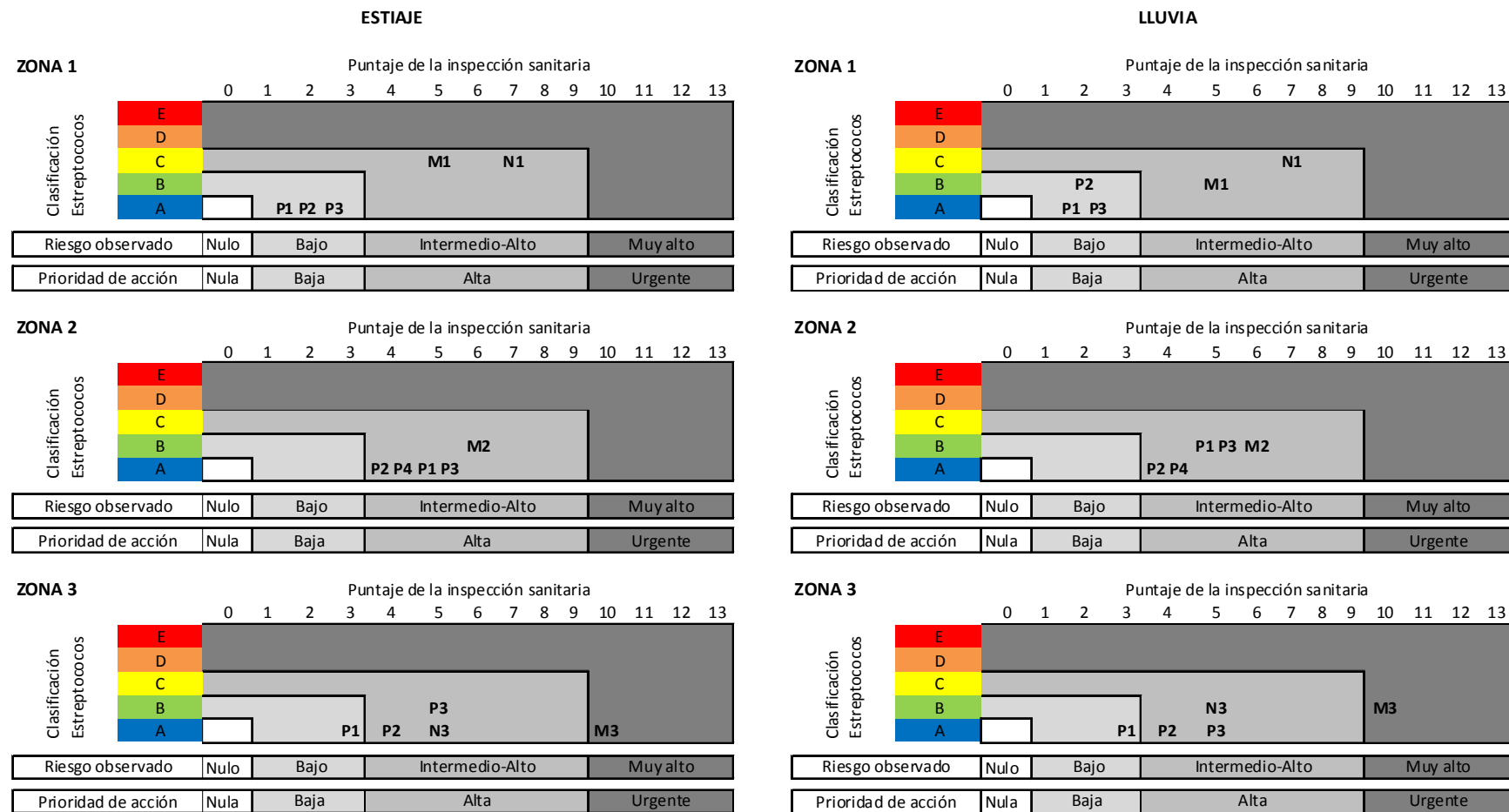
P1 - Pozo 1 P3 – Pozo 3 M1 – Manantial Zona 1 M3 – Manantial Zona 3 N3 – Noria Zona 3
 P2 - Pozo 2 P4 – Pozo 4 M2 – Manantial Zona 2 N1 – Noria Zona 1

Figura 9.17 Riesgo sanitario de las fuentes de abastecimiento – E. coli



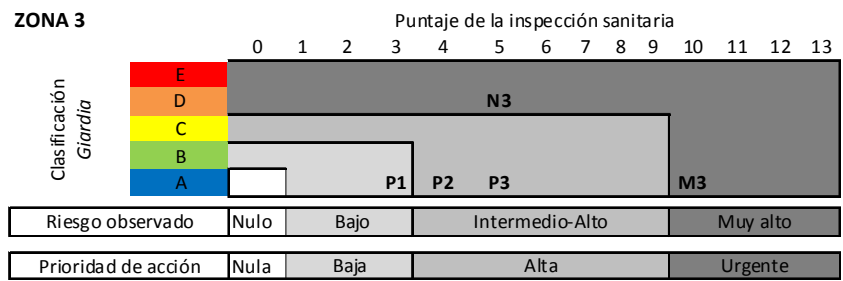
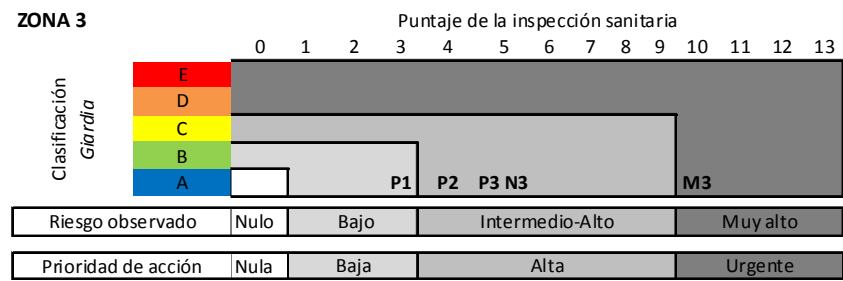
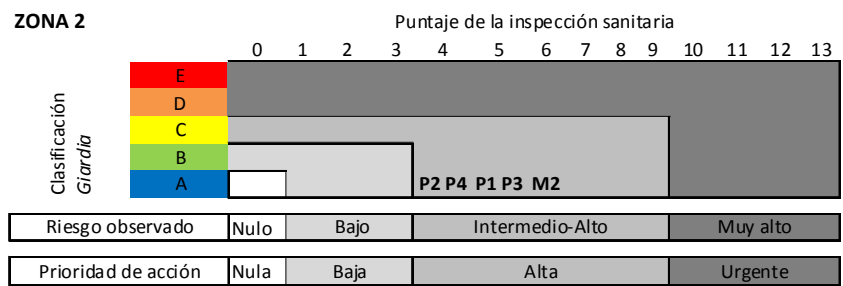
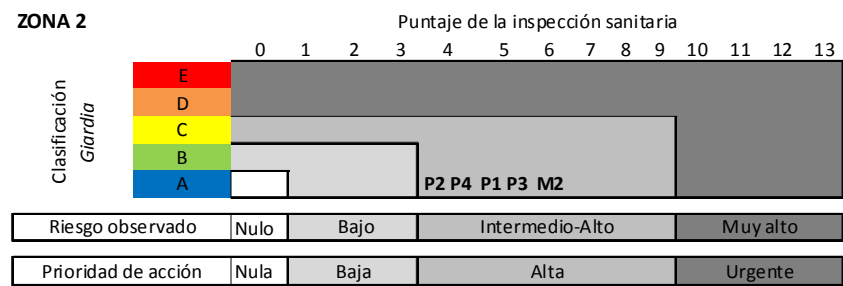
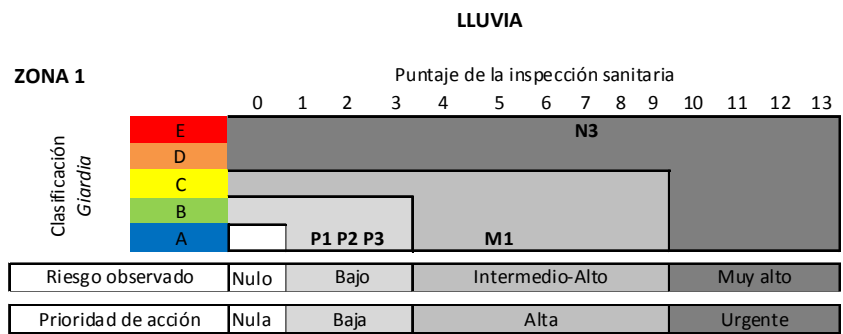
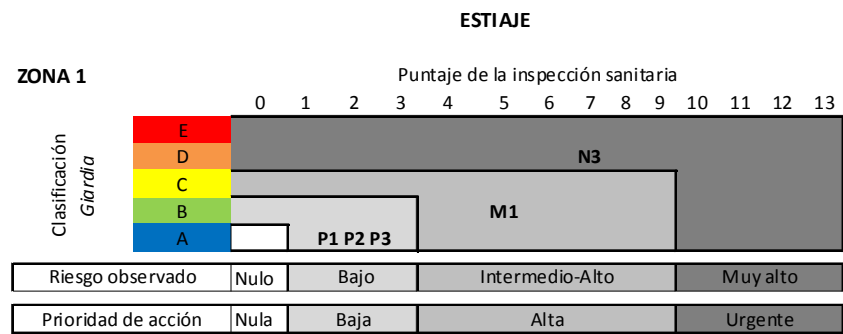
P1 - Pozo 1 P3 – Pozo 3 M1 – Manantial Zona 1 M3 – Manantial Zona 3 N3 – Noria Zona 3
 P2 - Pozo 2 P4 – Pozo 4 M2 – Manantial Zona 2 N1 – Noria Zona 1

Figura 9.18 Riesgo sanitario de las fuentes de abastecimiento – Enterococos



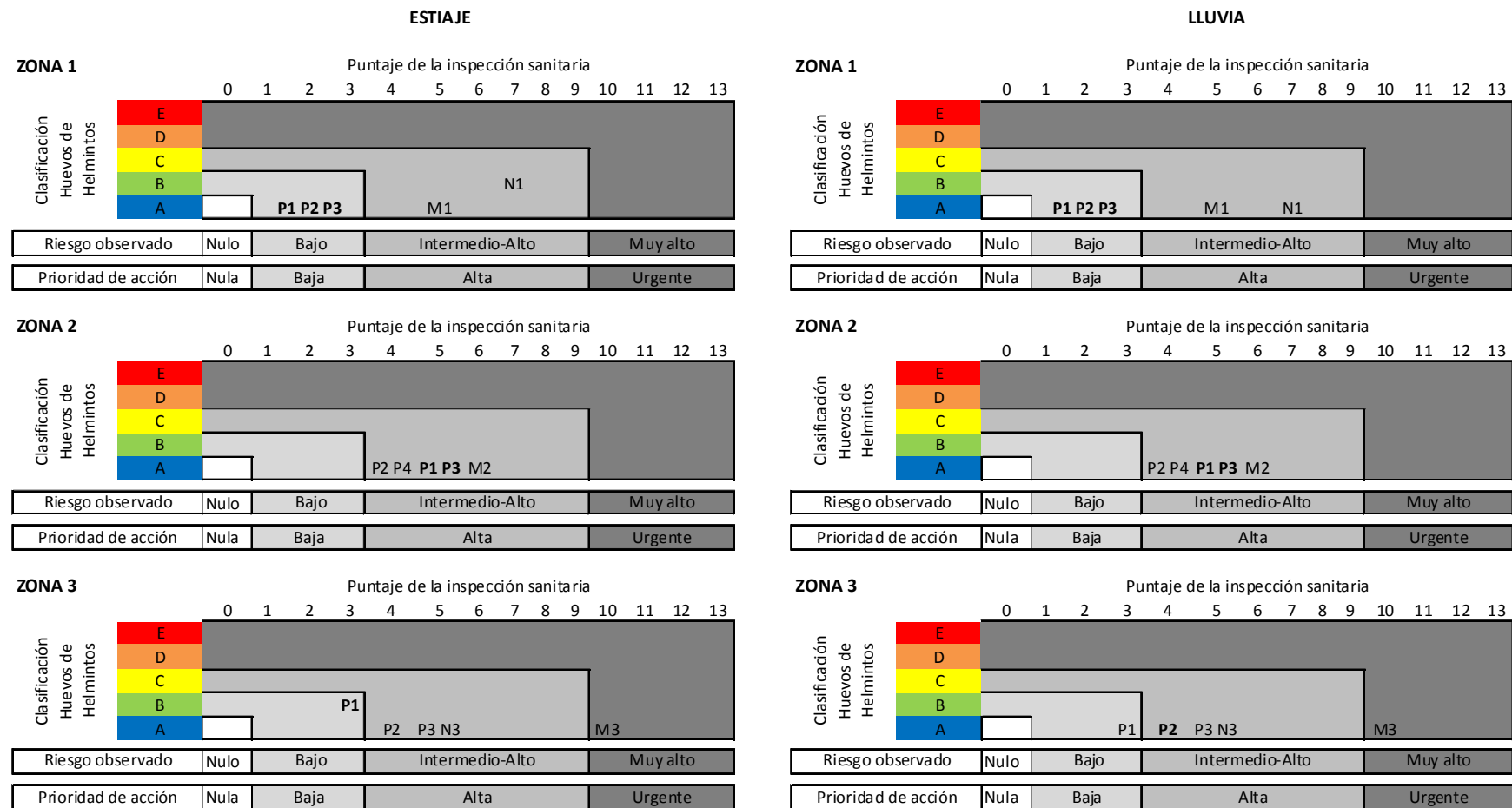
P1 - Pozo 1 P3 – Pozo 3 M1 – Manantial Zona 1 M3 – Manantial Zona 3 N3 – Noria Zona 3
 P2 - Pozo 2 P4 – Pozo 4 M2 – Manantial Zona 2 N1 – Noria Zona 1

Figura 9.19 Riego sanitario de las fuentes de abastecimiento – *Giardia* spp.



P1 - Pozo 1 P3 – Pozo 3 M1 – Manantial Zona 1 M3 – Manantial Zona 3 N3 – Noria Zona 3
 P2 - Pozo 2 P4 – Pozo 4 M2 – Manantial Zona 2 N1 – Noria Zona 1

Figura 9.20 Riesgo sanitario de las fuentes de abastecimiento – Huevos de helmintos



P1 - Pozo 1 P3 – Pozo 3 M1 – Manantial Zona 1 M3 – Manantial Zona 3 N3 – Noria Zona 3
 P2 - Pozo 2 P4 – Pozo 4 M2 – Manantial Zona 2 N1 – Noria Zona 1

Tabla 9.11 Resumen de resultados – Riesgo sanitario de las fuentes sanitarias

Punto de muestreo		Coliformes fecales		<i>E. coli</i>		Enterococos		<i>Giardia</i> spp.		Huevos de helmintos	
		Riesgo	Prioridad de acción	Riesgo	Prioridad de acción	Riesgo	Prioridad de acción	Riesgo	Prioridad de acción	Riesgo	Prioridad de acción
Zona 1 – Atitalaquia											
P1-1	Tezoquipa	Bajo/ Intermedio-Alto	Baja-Alta	Bajo	Baja	Bajo	Baja	Bajo	Baja	Bajo	Baja
P2-1	Principal la Cantera	Bajo	Baja	Bajo	Baja	Bajo	Baja	Bajo	Baja	Bajo	Baja
P3-1	El Tablón	Bajo	Baja	Bajo	Baja	Bajo	Baja	Bajo	Baja	Bajo	Baja
M1	Rancho el Olimpo	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta
N1	Fam. Glz. López	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto/ Muy alto	Alta- Urgente	Intermedio-Alto	Alta	Muy alto	Urgente	Intermedio-Alto	Alta
Zona 2 – Tlahuelilpan											
P1-2	San Primitivo	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta
P2-2	Pozo 11 CFE	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta
P3-2	Miravalle	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta
P4-2	Pozo 5 de Mayo	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta
M2	Cerro Colorado	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta
Zona 3 - Actopan											
P1-3	Bothi Baji 1	Bajo	Baja	Bajo	Baja	Bajo	Baja	Bajo	Baja	Bajo	Baja
P2-3	San Isidro	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta
P3-3	CIC 126	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto	Alta
M3	El Dren	Muy alto	Urgente	Muy alto	Urgente	Muy alto	Urgente	Muy alto	Urgente	Muy alto	Urgente
N3	Noria Pozo Grande	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto/ Muy alto	Alta- Urgente	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio-Alto/ Muy alto	Alta- Urgente	Intermedio-Alto	Alta

10 CONCLUSIONES

Se evaluó la presencia de contaminantes biológicos en las fuentes de abastecimiento (manantiales, pozos y norias) de tres regiones del Valle de Tula: Atitalaquia, Tlahuelilpan y Actopan. En todos los puntos de muestreo se detectó la presencia de por lo menos algún indicador de contaminación fecal (principalmente coliformes fecales), lo cual implica una situación de riesgo potencial para la salud de la población. Los resultados demuestran que en efecto hay un problema de contaminación biológica en el agua subterránea que alimenta a todos los puntos de muestreo analizados en este trabajo de investigación, lo cual está directamente relacionado con la infiltración de las aguas residuales que se utilizan para la irrigación de los campos de cultivo de esta región.

Los manantiales y norias siempre presentaron todos los indicadores bacterianos, así como colifagos somáticos. En el caso de *Giardia*, ésta siempre fue detectada en todas las norias y en uno de los manantiales (Rancho el Olimpo, Atitalaquia). Así mismo, la presencia de huevos de helmintos solo se encontró en las norias.

En el caso de los pozos solamente en algunos casos, se encontraron indicadores bacterianos y colifagos somáticos, siendo el principal índice detectado los coliformes fecales. Se determinó que más del 80% de los pozos en la época de lluvia presentan densidades de coliformes fecales superiores a las establecidas a la normatividad, mientras que durante el estiaje dicho porcentaje se redujo al 50%.

Se determinó también que no hay una diferencia significativa en la densidad de coliformes fecales en las fuentes de suministro debido a un efecto de temporalidad o zona de ubicación. El principal efecto se debe al tipo de fuente de abastecimiento, siendo las norias los puntos con mayor presencia de organismos indicadores de contaminación biológica.

En este trabajo de investigación se realizó una evaluación de riesgo de las fuentes de abastecimiento de agua en la región del Valle de Tula, con base en los resultados biológicos y de inspección sanitaria. Hoy en día los avances en la microbiología hacen indispensable el redefinir el paradigma de confiar única y/o exclusivamente en los indicadores biológicos tradicionales en cuestiones de calidad de agua, por tal motivo para el análisis de riesgo de este estudio se incluyeron tanto los tradicionales coliformes fecales, como otros organismos indicadores que pueden ser más representativos y/o específicos de la contaminación biológica (*E. coli*, enterococos, *Giardia* spp. y huevos de helmintos).

En cuanto a los resultados del análisis de riesgo, se determinó que los manantiales y las norias son los puntos con un mayor nivel de riesgo, y que requieren de una acción urgente. Con respecto a los pozos, se encontró que en general tienen un nivel de riesgo bajo cuando no se encuentran ubicados dentro de las zonas riego. Sin embargo, aquellos pozos dentro de las áreas de riego tienen un nivel de riesgo intermedio-alto, por lo que requieren una prioridad de acción alta.

Con respecto a las medidas de acción, estas dependen de las condiciones particulares de cada punto de muestreo evaluadas en la inspección sanitaria. De manera general, se propone dar un mantenimiento continuo y riguroso al sistema de cloración en todas las fuentes de abastecimiento, ya que es la principal medida contra la acción de organismos patógenos presentes en el agua. Por otra parte es importante proteger físicamente aquellos puntos que carecen de una infraestructura adecuada (como lo son manantiales), con la finalidad de evitar el contacto directo de las personas con estas fuentes potenciales de riesgo. Así mismo, deberá regularse el uso indiscriminado de las altas laminas de riego empleadas, lo cual favorecerá a la disminución de la tasa de recarga del acuífero, y por lo consiguiente la disminución en el transporte de organismos patógenos a las fuentes de abastecimiento.

11 RECOMENDACIONES

Con la finalidad de establecer una conclusión más determinante respecto a la calidad biológica del agua de las fuentes de abastecimiento del Valle de Tula es importante continuar con el estudio de un mayor número de fuentes de suministro en la zona.

Con respecto a las medidas de acción que deben tomarse con referencia al nivel de riesgo establecido en cada punto de muestreo, se presentan las siguientes propuestas:

- Dar mantenimiento constante a la dosificación de cloro. Uno de los problemas más recurrentes en las fuentes de suministro (principalmente pozos) fue la falla o suspensión de las bombas dosificadoras de cloro. Es evidente que hay presencia de contaminación bacteriana en las fuentes de suministro, por lo que la desinfección es indispensable para aminorar el riesgo potencial de transmisión de dichos organismos a la población.
- Proteger las fuentes de suministro para que no se siga deteriorando su calidad. En este estudio se observó que efectivamente hay una transmisión de organismos indicadores de patógenos provenientes de las aguas residuales que se utilizan para la irrigación, hacia los cuerpos de agua que se utilizan como fuente de suministro a la población. Por lo tanto, se debe considerar como necesario el tratamiento del agua residual antes de su empleo en riego, así como un mejor control en el uso de láminas de riego.
- Impedir el contacto directo de la gente con fuentes de abastecimiento antes de su desinfección. Principalmente en el caso del manantial Cerro Colorado, se observó que la gente está en contacto directo con los excedentes de agua que no se envían a los siete municipios que abastece este manantial. Dicha fuente presentó elevados índices de organismos indicadores de contaminación fecal, por lo cual representa un riesgo potencial para aquellas personas que están en contacto con esta fuente.

Finalmente, se propone continuar con el estudio de los procesos de atenuación natural en el agua y en el suelo de los organismos patógenos, con la finalidad de comprender su comportamiento, distribución y destino final en el ambiente. Así mismo, es necesario continuar con estudios geohidrológicos en la zona, a fin de tener un mayor conocimiento acerca del flujo subterráneo de los acuíferos, ya que esto determina la distribución y presencia de los organismos patógenos en las fuentes de suministro.

12 REFERENCIAS

- Abu-Ashour, J., Joy, D.M., Lee, H., Whiteley, H.R. (1994). Transport of microorganisms through soil. *Water Air Soil Pollut* 75:141– 158
- Adams, M. (1959) *Bacteriophages*. Nueva York (NY). Interscience Pub.
- Aguilar, A. (2006). Determinación del tipo óptimo de membrana para potabilizar el agua del acuífero de Tula. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. UNAM.
- Amahmid, O., Asmama, S., Bouhoum, K. (1999). The effect of waste water reuse in irrigation on the contamination level of food crops by *Giardia* cysts and *Ascaris* eggs. *Int. Journal of Food Microbiology*. 49(1-2), 19-26.
- APHA (2005). Enumeración de coliformes fecales. Método estandarizado de filtro de membrana. APHA. AWW. WEF. 9222D. 21th ed. 2005.
- Araujo M., Sueiro R., Gómez M., Garrido, M. (2004). Enumeration of *Clostridium perfringens* spores in groundwater samples: comparison of six culture media. *Journal of Microbiological Methods* 57, 175– 180.
- Armon R. y Kott Y., 1996. Bacteriophages as indicators of pollution. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 26 (4), 299–335.
- Asano T. y Levine A. D. (1996) Water reclamation, recycling and reuse: past, present, and future. *Water Sci. Technol.*, 33(10-11), 1-14.
- Ashbolt, N.J., Grabow, W.O.K., Snozzi, M. (2001). Indicators of microbial water quality. In: Fewtrell, L., Bartram, J. (Eds.), *Water Quality: Guidelines, Standards and Health. Risk assessment and management for water-related infectious disease*. IWA Publishing, London (Chapter 13), pp. 289–315.
- Ashbolt, N. (2004). Microbial contamination of drinking water and disease outcomes in developing regions. *Toxicology* 198, 229–238.
- AWWA (1999). *Waterborne Pathogens*. American Water Works Association Manual of Water Supply Practices AWWA M48. ISBN 1-58321-022-9.
- Bausum H. T., Schaub S. A., Bates R. E., McKim H. L., Sehumacher P. W., and Brockett B. E.. (1983) Microbiological aerosols from a field source wastewater irrigation system. *J. Water Pollution Control Federation*, 55(1), 65–75.

Beller M., Ellis A., Lee S., Drebot M., Jenkerson S., Funk E., Sobsey m., Simmons O. (1997). Outbreak of viral gastroenteritis due to a contaminated well: international consequences. *J Am Med Assoc* 278, 563-568.

Bergey, D.H., Holt, J.G., Krieg, N.R. (1984). *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. Williams & Wilkins, Baltimore, USA. ISBN 0-683-04108-8

Bethony J., Brooker S., Albonico M., Geiger S., Loukas A., Diemert D., Hotez P. (2006). Soil-transmitted helminth infections: ascariasis, trichuriasis, and hookworm. *Seminars*. Vol. 367 Issue 9521, p1521-1532

Bitton G. (1999) *Wastewater microbiology*. 2a. edición, Wiley, New York.

Blanc, R., Nasser, A., (1996). Effect of effluent quality and temperature on the persistence of viruses in soil. *Water Science and Technology* 33, 237–242.

Blumenthal U., Mara D., Ayres R., Cifuentes E., Peasey A., Scott R., Lee D. y Riuz-Palacio. G. (1996). Evaluation of the WHO Nematode Egg. Guidelines for restricted and unrestricted irrigation. *Wat. Sci. Tech.* 33 (10-11), 277-283.

Borchardt, M.A., Bertz, P.D., Spencer, S.K. and Battigelli, D.A. (2003) Incidence of enteric viruses in groundwater from household wells in Wisconsin. *Appl Environ Microbiol* 69, 1172–1180.

Borchardt M., Bradbury K., Gotkowitz M., Cherry J., Parker B. (2007). Human Enteric Viruses in Groundwater from a Confined Bedrock Aquifer. *Environ. Sci. Technol.* 41, 6606-6612

Borst M., Selvakumar A. (2003). Particle-associated microorganisms in stormwater runoff. *Water Research* 37, 215–223

Bouwer H. e Idelovitch E. (1987). Quality requirements for irrigation with sewage water. *J. Irrig. & Drainage Eng.* 113: 516-535.

Bruneau A, Rodrigue H, Ismael J, Dion R, Allard R. (2004). Outbreak of *E. coli* O157:H7 associated with bathing at a public beach in the Montreal-Centre region. *Can Commun Dis Rep* 30:133–136.

Brusseu M., Oleen J., Santamaria J., Cheng L., Orosz-Coghlan P., Chetochine A., Blandford W., Rykwalder P., Gerba C. (2005). Transport of microsporidium *Encephalitozoon intestinales* spores in sandy porous media. *Wat. Research* 39, 3636-3642.

Catalao L., Borrego J. (1995) Evaluation of media for the enumeration of faecal streptococci from natural water samples. *Journal of Microbiological Methods* 23, 183-203

Celico F., Varcamonti M., Guida M., Nalcerio G. (2004). Influence of precipitation and soil on transport of fecal enterococci in fractured limestone aquifers. *Applied & Environmental Microbiology*. 70: 5, 2843-2847.

Chin D.A., Qi X. (2000). Groundwater under direct influence of surface water. *Journal of Environmental Engineering*. 126, 501-508.

Cifuentes, E., Blumenthal, U., Ruíz-Palacios, G., Bennet, S., Peasey, A. (1994). Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual: El Valle del Mezquital, México. *Salud Pública, Méx.*, 36, 3-9.

CNA (1993). Datos básicos del Distrito de Riego 03- Tula y 100 Alfajayucan, Edo. de Hidalgo, Pachuca, Hgo. Comisión Nacional del Agua.

CNA (2005). Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola, Informe Estadístico, México, D.F., p 27, 80, 91, 105, 116.

CNAa (2002). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle del Mezquital, estado de Hidalgo. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica.

http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/DR_1310.pdf

Fecha de consulta: 27 mayo 2008.

CNAb (2002). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Ixmiquilpan, estado de Hidalgo. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica.

http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/DR_1312.pdf

Fecha de consulta: 27 mayo 2008.

CNAc (2002). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Actopan-Santiago de Anaya, estado de Hidalgo. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica.

http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/DR_1313.pdf

Fecha de consulta: 27 mayo 2008.

CNA-SEMARNAT. (2004). Estadísticas del Agua en México. Un producto del sistema Unificado de Información Básica del Agua (SUIBA) 142 pp. México

Comisión Nacional del Agua, Servicio Británico de Relevamiento Geológico, Escuela de Higiene y Medicina Tropical de Londres, Universidad de Birmingham (1998). Impacto del reúso de aguas servidas en las aguas subterráneas del Valle del Mezquital, estado de Hidalgo, México. Informe Final, noviembre 1988. Informe Técnico BGS, WC/98/42.

CONAGUA (2006). Manejo de las Aguas Residuales para el Combate a la Pobreza en las Grandes Ciudades: El caso de la Ciudad de México. IV Foro Mundial del Agua. http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/salud_ambiente/File/grandes%20Ciudades.pdf

Fecha de consulta 14/08/07

CONAGUA-SEMARNAT (2007). Estadísticas del Agua en México. Un producto del sistema Unificado de Información Básica del Agua (SUIBA) 263 pp. México.

Collins K., Cronin A., Rueedi J., Pedley S., Joyce E., Humble P., Tellam J. (2006). Fate and transport of bacteriophage in UK aquifers as sorrogates for pathogenic viruses. *Engineering Geology* 85(2006), 33-38.

Cook, J.M. y Lloyd, B. Field (1989), *Techniques in groundwater quality investigations*. Natural Environmental Research Council. England British Geological Survey, U.K.

Craun GF (1985). A summary of waterborne illness transmitted through contaminated groundwater. *J Environ Health*; 48:122–7.

Cronin, A.A., Taylor, R.G., Powell, K.L., Barrett, M.H., Trowsdale, S.A. and Lerner, D.N. (2003) Temporal variations in the depth-specific hydrochemistry and sewer-related microbiology of an urban sandstone aquifer, Nottingham, United Kingdom. *Hydrogeol J* 11, 205–216.

Crook J. (1998). Chapter 7 Water Reclamation and Reuse Criteria. En T. Asano (ed.) *Wastewater Reclamation and reuse*, Technomic Publishing Co., Ltd. Lancaster, PA.

Curds, C.R. y Hawkes, H. A. (1978). *Ecological aspects of used-water treatment: Volume 1- The organisms and their ecology*. Academic Press Inc. Londres.

Custodio, E. (1986). Recarga artificial de acuíferos. *Boletín de informaciones y estudios* nº 45. MOPU. 134 págs.

DeBorde, C., Woessner, W.W., Lauerman, B. and Ball, P.N. (1998) Virus occurrence and transport in a school septic system and unconfined aquifer. *Ground Water* 36, 825–834.

DeSerres, G., Cromeans, T.L., Levesque, B., Brassard, N., Barthe, C., Dionne, M., Prud'homme, H., Paradis, D. (1999) Molecular confirmation of hepatitis A virus from well water: epidemiology and public health implications. *J Infect Dis* 179, 37–43.

Desmarais, T.R., Solo-Gabriele, H.M., Palmer, C.J., 2002. Influence of soil on fecal indicator organisms in a tidally influenced subtropical environment. *Appl. Environ. Microbiol.* 68, 1165–1172.

Downs T., Cifuentes E., Ruth E., Suffet I. (2000). Effectiveness of natural treatment in a wastewater irrigation District of the Mexico City region: a synoptic field survey. *Water Environment Research*, 72(1), pp. 4-21.

EEC (1975). Council of the European Communities Directive of 16 June 1975 concerning the quality required of surface water intended for the abstraction of drinking water in the Member States (75/440/EEC).

EPA (2002). Method 1106.1: Enterococci in Water by Membrane Filtration Using membrane-Enterococcus-Esculin Iron Agar (mE-EIA).

Feachem, R.G., Bradley, D.J., Garelick, H., Mara, D.D. (1983). *Sanitation and Disease: Health aspects of excreta and wastewater management*. John Wiley & Sons. Washington, EUA.

Fong T.T., Mansfield L.S., Wilson D., Schwab D., Molloy S., Rose J. (2007). Massive Microbiological Groundwater Contamination Associated with a Waterborne Outbreak in Lake Erie, South Bass Island, Ohio. *Environmental Health Perspectives*, 115(6): 856-863.

Foppen J. W. y Schijven J. F. (2006). Evaluation of data from the literature on the transport and survival of *Escherichia coli* and thermotolerant coliforms in aquifers under saturated conditions. *Water research*, 40, 401-426.

Ford T. y Colwell R. (1996) *A Global Decline in Microbiological Safety of Water: A Call for Action*. Washington, DC, USA: American Academy of Microbiology.

Foster S., Lawrence AR, Morris BL (1997) *Groundwater in urban development : assessing management needs and formulating policy strategies*. World Bank Technical Paper 390

Foster S., Hirata RA, Gomes D, D'Elia M, Paris M (2002) *Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities and environme*

Foster, S. (2001). Groundwater recharge with urban wastewater reconciling resource recovery and pollution concerns in developing nations. Ponencia presentada en Experts meeting on Health Risks in Aquifer Recharge by Reclaimed Water, 9-10 noviembre 2001, en Budapest, Hungría.

Foster S. y Chilton P. (2004). Downstream of downtown: urban wastewater as groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*. 12:115-120.

Foster S., Garduño H., Tuinhof A., Kemper K., Nanni M. (2002-2006). Recarga del Agua subterránea con aguas residuales urbanas: evaluación y manejo de los riesgos y beneficios. *Gestión Sustentable del agua subterránea – Conceptos y Herramientas*. Serie de notas informativas. Nota 12. Banco Mundial.

Fecha de consulta: 27/05/08

http://siteresources.worldbank.org/INTWRD/903930-1112347717990/21210611/GWMATEBN12_sp.pdf

Gajadhar A.A. y Allen J.R. (2004). Factors contributing to the public health and economic importance of waterborne zoonotic parasites. *Veterinary parasitology* 126: 3-14.

Gallegos E., Warren A., Robles E., Campoy E., Calderon A., Sainz M., Bonilla P., Escolero O. (1999). The effects of wastewater irrigation on groundwater quality in Mexico. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 40, No. 2, pp. 45-52.

Gerba, C.P. (1998) Applied and theoretical aspects of virus adsorption to surfaces. *Adv Appl Microbiol* 30, 133–168.

Gerba C., Bitton G. (1984). Microbial pollutants: their survival and transport pattern to groundwater. In: *Groundwater Pollution Microbiology*, G. Bitton y Gerba C. (eds), Wiley & Sons, NY, pp. 65-88.

Gerba, C.P., Wallis, C. and Melnick, J.L., (1975). Fate of wastewater bacteria and viruses in soil. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, **101**, 157-174. (abs.)

Gerhardt, P. y Marquis, R. E. (1989). Spore thermoresistance mechanisms. En: I. Smith, R. A. Slepecky, & P. Setlow, *Regulation of prokaryotic development* pp. 43_63.. Washington, DC: American Society for Microbiology.

Ghiglietti R., Rossi P., Ramsan M., Colombi A. (1995) Viability of *Ascaris suum*, *Ascaris lumbricoides* and *Trichuris muris* eggs to alkaline pH and different temperatures. *Parasitología* 37: 229-232.

Giannoulis N., Maipa V., Konstantinou I., Albanis T., Dimoliatis I. (2005). Microbiological risk assessment of Agios Georgios source supplies in Northwestern Greece based on faecal coliforms determination and sanitary inspection survey. *Chemosphere* 58, 1269-1276.

Goosen M. F.A., Shayya W. H. (2000). *Water Management, Purification and Conservation in Arid Climates. Volume 3, Water Conservation.* Inc NetLibrary.

Goyal, S., Keswick, B. y Gerba, C. (1984). Viruses in groundwater beneath sewage irrigated cropland. *Water Res.*, 18: 299-302.

Grabow, W. (1996). Waterborne Disease: Update on Water Quality Assessment and Control. *Water SA* 22:193.

Havelaar, A.H., Furuse, K., Hogeboom, W.M., (1986). Bacteriophages and indicator bacteria in human and animal feces. *Journal of Applied Bacteriology* 60 (3), 255–262.

Havelaar A.H. y Hogeboom, W.H. (1984). A method for the enumeration of male specific bacteriophages in sewage polluted waters. *Journal of Applied Bacteriology* 56, 439–447.

Havelaar, A.H., M. van Olphen, Y.C. Drost. (1993). F-specific RNA bacteriophages are adequate model organisms for enteric viruses in fresh water. *Appl Environ Microbiol* 59: 2956-62

Health Protection Agency (2004). *Enumeration of Clostridium perfringens by membrane filtration*. National Standard Method W 5 Issue 3.

http://www.hpa-standardmethods.org.uk/pdf_sops.asp

Hijnen W. A., Van Veenendaal D.A., Van Der Speld W. M., Visser A., Hoogenboezem W., Van Der Kooij (2000). Enumeration of faecal indicator bacteria in large water volumen using on site membrane filtration to assess water treatment efficiency. *Wat. Res.* Vol. 34, No. 5, pp. 1659-1665.

Hilton, M.C. y Stotzky, C. (1973) Use of coliphages as indicators of water pollution. *Canadian Journal of Microbiology* 19, 747–751.

Ho, G., Gibbs, A. y Mathew, K. (1991). Bacteria and virus removal from secondary effluent in sand and red mud columns. *Water Science and Technology*. 23, 261-270.

Hoff, J.C. and Akin, E.W. (1986). Microbial resistance to disinfectants: mechanisms and significance. *Environmental Health Perspectives*, **69**, 7-13.

Howard, G., Pedley, S., Baret, M., Nalubega, M., Johal, K. (2003). Risk factors contributing to microbiological contamination of shallow ground water in Kampala, Uganda. *Water Res.* 37, 3421–3429.

Hunter, P.R., Waite, M., Ronchi, E. (2002). *Drinking Water and Infectious Disease: Establishing the Links*. IWA Publishing, London.

Hurst C., Gerba C., Cech I. (1980). Effects of environmental variables and soil characteristics on virus survival in soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 40:1067–1079.

IAWPRC study group on health related water microbiology, (1991). Bacteriophages as model viruses in water quality control. *Water Research* 25 (5), 529–545.

INEGI (2005). Cuadernos estadísticos Municipales de Hidalgo. Edición 2005.

<http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/cem05/estatal/hgo/index.htm>

Fecha de consulta: 20 junio 2008

ISO 10705-2:2000. Water quality-Detection and enumeration of bacteriophages – Part 2: Enumeration of somatic coliphages.

Iturbe R. y Silva A. (1992). Agua subterránea y contaminación. Series del Instituto de Ingeniería. No. 539. UNAM.

Jean, J.-S. (2000) Reply to comments by P. Gale and others on "Outbreak of enteroviruses and groundwater contamination in Taiwan: concept of biomedical hydrogeology (Jean 1999)". Hydrogeol J 8, 350–353.

Jiménez B. (2001). La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. Limusa. México.

Jiménez B. (2003). Health risks in aquifer recharge with recycled water Chapter 3. En: State of the art report health risk in aquifer recharge using reclaimed water. Aertgeerts R.

Jiménez B. y Chávez A. (1997). Treatment of Mexico City Wastewater for irrigation purposes. Env. Tech., 18, pp. 721-730, Reino Unido.

Jiménez B., López N. y Sotomayor C. (1997). Estudio de la calidad y suministro del agua para consumo doméstico en el Valle del Mezquital. Informe final. Instituto de Ingeniería, UNAM. Proyecto 5322 elaborado para la Comisión Nacional del Agua. Febrero 1997.

Jiménez B. y Chávez A. (1999) Tratamiento Primario Avanzado. Serie Azul del Instituto de Ingeniería, 618:94.

Jiménez B, Chávez A, Cruickshank C, Pérez R, Jiménez R (1999). Estudio de la factibilidad del empleo del agua del acuífero del valle del Mezquital para suministro del Valle de México. Instituto de Ingeniería de la UNAM, Informe final. México, Proyecto 8393.

Jiménez B., Siebe C. y Cifuentes E. (2004). Capítulo El reúso intencional y no intencional del agua en el Valle de Tula. En: El agua en México vista desde la Academia. Jiménez y Marín Editores. Academia Mexicana de Ciencias. México. 33-55 pp.

Jiménez, B., Chávez, A., Silva, V. (2002). Riego agrícola con agua residual y sus implicaciones en la salud: Caso práctico. XVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. <http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/mexico26/ii-053.pdf>

Fecha de consulta 15/08/07

Kaper, J.B., Nataro, J.P., Mobley, H.L.T. (2004). Pathogenic *Escherichia coli*. Nature Rev. Microbiol. 2, 123–140.

Kenst A., Perfect E., Wilhelm S. W., Zhuang J., McCarthy J. F., McKay L. D. (2008). Virus Transport during Infiltration of a Wetting Front into Initially Unsaturated Sand Columns. Environ. Sci. Technol. 42, 1102–1108.

Kindhauser, M.K. (2003). Global defence against the infectious disease threat. Communicable Diseases 2002. World Health Organization, Geneva.

Koné D., Cofie O., Zurbrügg C., Gallizzi K., Moser D., Drescher S., Strauss M. (2007). Helminth eggs inactivation efficiency by faecal sludge dewatering and co-composting in tropical climates. *Water Research* 41:4397-4402.

Larsen, M.N., Roepstorff, A., 1999. Seasonal variation in development and survival of *Ascaris suum* and *Trichuris suis* eggs on pastures. *Parasitology* 119, 209–220.

LeChevallier M. W. y McFeters G.A. (1985). Interactions between heterotrophic plate count bacteria and coliform organisms. *Applied and Environmental Microbiology*. 49:5. 1338-1341.

Leclerc, H., S. Edberg, V. Pierzo, and J.M. Delattre. (2000). Bacteriophages as Indicators of Enteric Viruses and Public Health Risk in Groundwaters. *Journal of Applied Microbiology* 88: 5–21.

Lloyd B. y Helmer R. (1991). Surveillance of Drinking Water Quality in Rural Areas. Longman Scientific & Technical Books, England. (Published for WHO y UNEP).

Lloyd B. y Bartram J. (1991). Surveillance solutions to microbiological problems in water quality control in developing countries. *Water. Sci. Technol.* 24, 61-75.

Locas A., Barthe C., Margolin A.B., Pierre P. (2008). Groundwater microbiological quality in Canada drinking water municipal wells. *Canadian Journal of Microbiology* 54: 6, p472-478.

Lucena F., Méndez X., Morón A., Calderón E., Campos C., Guerrero A., Cárdenas M., Gantzer C., Shwartzbrood L., Skrabber S. y Jofre J.. (2003). Occurrence and densities of bacteriophages proposed as indicators and bacterial indicators in river waters from Europe and South America. *Journal of Applied Microbiology* 2003, 94, 808–815

Lucena F., Ribas F., Duran A.E., Skrabber S., Gantzer C., Campos C., Morón A., Calderón E., Jofre J. (2006). Occurrence of bacterial indicators and bacteriophages infecting enteric bacteria in groundwater in different geographical areas. *Journal of Applied Microbiology* 101: 96–102

Macler, B. A. y Merkle, J. C. (2002). Current knowledge on groundwater microbial pathogens and their control. *Hydrogeol. J.* 8, 29-40.

Madigan, M. T., Martinko, J. M., Parker, J. (2000). *Biology of Microorganisms*, 9th ed., prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Mazari-Hiriarte, M., Velázquez E., Torres Beristain, B., Ruiz de Esparza, R. (1997). Calidad del agua subterránea en la zona sur de la ciudad de México con base en microorganismos. Congreso XI FEMISCA.

McGechan, M.B., y D.R. Lewis. (2002). Transport of particulate and colloid-sorbed contaminants through soil. Part 1: General principles. *Biosys. Eng.* 83:255–273

Medema, G.J., Payment, P., Dufour, A., Robertson, W., Waite, M., Hunter, P., Kirby, R., Andersson, Y. (2003). Safe drinking water: an ongoing challenge. In: Dufour *et al.* (Eds.), *Assessing Microbial Safety of Drinking Water: Improving Approaches and Methods*, World Health Organization, 2003. ISBN 92 4 154630.

Metcalf & Eddy (2003). *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. McGraw Hill, 4a ed., EUA

Miossec, L., Le Guyader, F., Haugarreau, L. y Pommepeuy, M. (2000) Magnitude of rainfall on viral contamination of the marine environment during gastroenteritis epidemics in human coastal population. *Rev Epidemiol Sante Publique* 48(Suppl 2), 2562–2571.

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

Murray P. (1999). *Manual of Clinical Microbiology*. 7a ed. American Society for Microbiology. Washington, DC.

NMX-AA-102-SCFI-2006. Calidad del agua – detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* Presuntiva – Método de filtración en membrana.

NMX-AA-113-SCFI-1999. Análisis de agua – Determinación de huevos de helminto – Método de prueba.

NOM-014-SSA1-1993. Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados.

Organización Mundial de la Salud (1994). *Guías para la calidad del agua potable*. Tercera edición. Vol. 1. Recomendaciones.

http://www.who.int/water_sanitation_health/dwg/gdwq3sp.pdf

Fecha de consulta 13/08/07

Payment P., Berte A., Prevost M., Ménard B., Barbeau B. (2000). Occurrence of pathogenic microorganisms in the Saint-Lawrence river (Canada) and comparison of health risks for populations using it as their source of drinking water. *Canadian Journal of Microbiology* 46, 565-576.

Payment, P. y Franco, E. (1993). *Clostridium perfringens* and somatic coliphages as indicators of the efficiency of drinking water treatment for viruses and protozoan cysts. *Appl. Environ. Microbiol.* 59, 2418–2424.

Payment P., Waite M., Dufour A. (2003). Chapter 2: Introducing parameters for the assessment of drinking water quality. En: Assessing microbial safety of drinking water. Improving approaches and methods. IWA, OECD, WHO.

Paz-y-Miño, M., Barzola, C., Lazcano, C., Ponce, M., León, J. (2003). Colifagos como indicadores de contaminación fecal y de remoción bacteriana en la potabilización del agua. Rev. peru. biol. 10(2): 133 -144.

Reid D., Lamb A., Lilly A., McGaw B., Gauld J., Cooper D., McLaren C. (2001). Improvements to source protection for private water supplies in Scotland, UK. Water Policy 3, 273-281.

Rittmann, B.E. y McCarty, P.L. (2001). Biotecnología del medio ambiente: principios y aplicaciones. McGraw Hill/Interamericana de España. Madrid, España.

Roberts, L. S. y Janovy, J. J. (1996). Foundations of Parasitology, 5th ed., WCB, Wm. C. Brown Publishers, Dubuque, IA.

Ronen D, Magaritz M, Almon E, Amiel AJ (1987). Anthropogenic anoxification (eutrophication) of the water-table region of a deep phreatic aquifer. Water Resour Res 13:1554–1560

Rose, J.B. y Grimes, D.J. (2001). Reevaluation of Microbial Water Quality: Powerful New Tools for Detection and Risk Assessment. Washington, DC, USA: American Academy of Microbiology.

Roszak, D.B. y Colwell, R.R. (1987). Survival strategies of bacteria in the natural environment. Microbiological Reviews, **51**, 365-379.

Rubio C., W., Vidales C., J.A., Martínez R., C., Mesa A., P., Chaidez Q., C. (2004). Detección de microorganismos indicadores de contaminación fecal en el dren Cedritos. Congreso XIV FEMISCA.

Sanguinetti, G.S., Tortul, C., Garcia, M.C., Ferrer, V., Montangero, A., Strauss, M., (2005). Investigating helminth eggs and *Salmonella* sp in stabilization ponds treating septage. Water Sci. Technol. 51 (12), 239–247.

Santamaría J. y Toranzos G.A. (2003). Enteric pathogens and soil: a short review. Int. Microbiol. 6:5-9.

Sartory DP, Field M, Curbishley SM, Pritchard AM.(1998), Evaluation of two media for the membrane filtration enumeration of *Clostridium perfringens* from water. Lett Appl Microbiol. 27:323–7.

Scandura, J.E. and Sobsey, M.D. (1997) Viral and bacteria contamination of groundwater from on-site sewage treatment systems. Water Sci Technol 35, 141–146.

Schijven J.F., de Bruin H.A., Hassanizadeh S.M., de Roda Husman A. M. (2003). Bacteriophages and Clostridium spores as indicator organisms for removal of pathogens by passage through saturated dune sand. *Water Research* 37, 2186–2194

Secretaría de Salud (2008). Boletín Epidemiológico. Editado por el Sistema Nacional de Información para la Vigilancia Epidemiológica de la Secretaría de Salud. Edición trimestral, Núm. 14, Vol. 25, Semana 14 del 30 de marzo al 5 de abril de 2008.

Shuval, H. (1986). Wastewater irrigation in developing countries: health effects and technical solutions. Technical Paper 51, World Bank, Washington Dc.

Shuval H. y Fattal B. (2003). Chapter 15: Control of pathogenic microorganisms in wastewater recycling and reuse in agriculture. En: *The Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. Academic Press. 819pp.

Siebe, C. (1994). Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el Distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo”. *Revista Internacional de Contaminación ambiental*, 10, pp. 15-21.

Siebe, C. (1998). Nutrient inputs to soils and their uptake by alfalfa through long-term irrigation with untreated sewage effluent in Mexico. *Soil Use and Management*, 13, 1- 5

Siebe C. y Cifuentes E. (1995). Environmental impact of wastewater irrigation in central Mexico: an overview. *International Journal of Environmental Health* 5, pp.161-173, 1995.

Silva V. (2008). Evaluación de contaminantes emergentes en fuentes de abastecimiento del Valle de Tula. Tesis Maestría en Ing. Ambiental. UNAM.

Smith M. y Husary S. (2000). Sanitary investigations as a sanitation monitoring tool. 26th WDC Conference. *Water, Sanitation and Hygiene: Challenges of the Millennium*. Bangladesh.

Solarte Y., Peña M., Madera C. (2006). Transmisión de protozoarios patógenos a través del agua para consumo humano. *Colombia Medica*. 37: 74-80.

Sorensen, D.L., Eberi, S.G., Dicksa, R.A. (1989). Clostridium perfringens as a point source indicator in non-point polluted streams. *Water Res.* 23: 191–197.

Sotomayor G.C., López A.N., Jiménez C.B. (1998). Suministro confiable de agua para consumo humano en el Distrito de Riego 03. Instituto de Ingeniería, UNAM

Srikanth, R. y Naik, D. (2004). Health effects of wastewater reuse for agriculture in the suburbs of Asmara City, Eritrea. *Int. J. Occup. Environ. Health*. 10: 284-288.

Stevens, M., N. Ashbolt, and D. Cunliffe. (2001). Microbial Indicators of Water Quality: An NHMRC Discussion Paper. National Health and Medical Research Council. Canberra, Australia.

Tartera, C. y Jofre, J. (1987). Bacteriophages active against *Bacteroides fragilis* in sewage polluted waters. *Applied and Environmental Microbiology* 53, 1632–1637.

Taylor, R., Cronin, A., Pedley, S., Barker, J. and Atkinson, T. (2004) The implication of groundwater velocity variations on microbial transport and wellhead protection-review of field evidence. *FEMS Microbiol Ecol* 49, 17–26.

USEPA. (2000b). Microbial pollution indicators for watershed management: a critical review. EPA Project CP997435-01.

Vargas G., C. (2000). Curso sobre métodos bacteriológicos para el análisis de Agua Potable. OPS/CEPIS <http://www.bvsde.paho.org/bvsala/e/fulltext/curso/curso.pdf>

Fecha de consulta : 17/12/07

White, G.F., Bradley, D.J., White, A.U. (1992). Drawers of water domestic water use in East Africa. University of Chicago Press, Chicago, IL.

WHO (1997). Guidelines for drinking-water quality. Volume 3: Surveillance and control of community supplies. World Health Organization, Geneva, Switzerland.

WHO (2000). Monitoring Bathing Waters - A Practical Guide to the Design and Implementation of Assessments and Monitoring Programmes. Chapter 8: Sanitary inspection and microbiological water quality. World Health Organization, Geneva, Switzerland.

WHO 2003a. Quantifying selected major risks to health. The World Health Report 2002. World Health Organization, Geneva (Chapter 4).

WHO (2005). Water Safety Plans. Managing drinking-water quality from catchment to consumer. Geneva.

WHO (2008). Guidelines for Drinking-water Quality. 3rd edition. Volume 1 – recommendations. Geneva.

Yates M. y Gerba C. (1998). Microbial considerations in wastewater reclamation and reuse. En: Asano T, editor. Wastewater reclamation and reuse. Lancaster, PA: Technomic Publisher. p. 437–88

Yates M. y Yates S. (1988). Modeling microbial fate in the subsurface environment. *Crit Rev Environ Control*. 17:307–44.

Yates M. y Yates S. (1993). Pathogens. En: *Regional Ground-Water Quality*. US Geological Survey. EUA.

Yavuz-Corapcioglu M. y Haridas A. (1985) Microbial transport in soils and groundwater: a numerical model. *Advances in Water Resources*, 8(4), 188-200.

Yeager JG, O'Brien RT (1979) Enterovirus inactivation in soil. *Appl Environ Microbiol* 694–701

Zhao B., Zhang H., Zhang J., Jin Y. (2008). Virus adsorption and inactivation in soil as influenced by autochthonous microorganisms and water content. *Soil Biology & Biochemistry* 40, 649-659.

ANEXO - A
INSPECCIÓN SANITARIA

INSPECCIÓN ZONA 1

ATITALAQUIA

ZONA 1 - ATITALAQUIA

P1-1 TEZOQUIPA

Formato de Inspección Sanitaria para Pozos dentro de una zona rural de riego con agua residual		
I. Tipo de fuente Pozo profundo con mecanismo de bombeo		
Zona de suministro: Comunidad Tezoquipa Localización: Calle Juan de Dios Pesa, Centro de Salud Tezoquipa, Atitalaquia Identificación: P1-1 Temporalidad: Estiaje (E)/Lluvia (L) ¿Se tomó muestra? <u>si</u> CF/100mL 1.67 (L) – 23(E) <i>E.coli</i> (UFC/100mL) ND(LI) 0.66(E) .		
II. Información específica del diagnóstico		
	RIESGO	
	SI	NO
1. ¿Hay alguna letrina a una distancia de 15-20 m del pozo? ¿La letrina se encuentra a una mayor altitud?		X
2. ¿El pozo se encuentra dentro del área de riego?		X
3. ¿Hay alguna zona de riego a una distancia menor o igual de 30m?	X	
4. ¿Hay alguna otra fuente de contaminación a una distancia de 10 m del pozo (desechos fecales, basura, agua superficial, agua estancada)?		X
5. ¿El pozo se encuentra dentro de un área de pastoreo o de ganadería?		X
6. ¿El agua de riego presenta algún tipo de contaminante?	X	
7. ¿El agua de riego se somete a algún tipo de tratamiento antes de ser irrigada?		X
8. ¿Hay algún pozo abierto a menos de 100 m del pozo?		X
9. ¿Hay algún canal de drenaje en mal estado (está roto facilitando el estancamiento o necesita limpieza)?		X
10. ¿El cerco perimétrico está dañado de tal manera que permite el ingreso de animales o personas no autorizadas?		X
11. ¿El piso alrededor del pozo tiene alguna fractura o rajadura que pudiera permitir el ingreso de agua?		X
12. ¿El sello del pozo permite el ingreso de agua al pozo?		X
13. ¿El registro de cloración muestra alguna interrupción en el dosificador? (Si no hay registro de cloración, anotar SI).		X
	Puntuación total de riesgos	
	2/13	
Puntaje del riesgo de contaminación: Muy alto= 10-13; Alto= 7-9; Intermedio= 4-6; Bajo= 0-3 Cada "SI" equivale a 1 punto.	Bajo	
III. Resultados y Recomendaciones		
Este pozo tiene un riesgo bajo a pesar de tener zonas aledañas de irrigación.		

ZONA 1 – ATITALAQUIA

P2-1 PRINCIPAL LA CANTERA

Formato de Inspección Sanitaria para Pozos dentro de una zona rural de riego con agua residual		
I. Tipo de fuente Pozo profundo con mecanismo de bombeo		
Zona de suministro: Centro de Atitalaquia Localización: Atitalaquia Identificación: P2-1 Temporalidad: Estiaje/Lluvia ¿Se tomó muestra? <u>si</u> CF/100mL <u>5.33(LI)</u> <u>0.33(estiaje)</u> <u>E.coli</u> <u>3(LI)</u> <u>ND (E)</u>		
II. Información específica del diagnóstico		
	RIESGO	
	SI	NO
1. ¿Hay alguna letrina a una distancia de 15-20 m del pozo? ¿La letrina se encuentra a una mayor altitud?		X
2. ¿El pozo se encuentra dentro del área de riego?		X
3. ¿Hay alguna zona de riego a una distancia menor o igual de 30m?	X	
4. ¿Hay alguna otra fuente de contaminación a una distancia de 10 m del pozo (desechos fecales, basura, agua superficial, agua estancada)?		X
5. ¿El pozo se encuentra dentro de un área de pastoreo o de ganadería?		X
6. ¿El agua de riego presenta algún tipo de contaminante?	X	
7. ¿El agua de riego se somete a algún tipo de tratamiento antes de ser irrigada?		X
8. ¿Hay algún pozo abierto a menos de 100 m del pozo?		X
9. ¿Hay algún canal de drenaje en mal estado (está roto facilitando el estancamiento o necesita limpieza)?		X
10. ¿El cerco perimétrico está dañado de tal manera que permite el ingreso de animales o personas no autorizadas?		X
11. ¿El piso alrededor del pozo tiene alguna fractura o rajadura que pudiera permitir el ingreso de agua?		X
12. ¿El sello del pozo permite el ingreso de agua al pozo?		X
13. ¿El registro de cloración muestra alguna interrupción en el dosificador? (Si no hay registro de cloración, anotar SI).		X
Puntuación total de riesgos	2/13	
Puntaje del riesgo de contaminación: Muy alto= 10-13; Alto= 7-9; Intermedio= 4-6; Bajo= 0-3 Cada "SI" equivale a 1 punto.	Bajo	
III. Resultados y Recomendaciones		
Este pozo tiene un riesgo bajo a pesar de tener zonas aledañas de irrigación.		

ZONA 1 – ATITALAQUIA

P3-1 EL TABLÓN

Formato de Inspección Sanitaria para Pozos dentro de una zona rural de riego con agua residual		
I. Tipo de fuente Pozo profundo con mecanismo de bombeo		
Zona de suministro: Centro de Atitalaquia		
Localización: Av. Acapulco, esq. Insurgentes, El Tablón, Atitalaquia		
Identificación: P3-1		
Temporalidad: Estiaje/Lluvia		
¿Se tomó muestra? <u>si</u> CF/100mL <u>0.33(LI) ND(E)</u> <i>E.coli</i> <u>0.33(LI) ND(E)</u>		
II. Información específica del diagnóstico		
	RIESGO	
	SI	NO
1. ¿Hay alguna letrina a una distancia de 15-20 m del pozo? ¿La letrina se encuentra a una mayor altitud?		X
2. ¿El pozo se encuentra dentro del área de riego?		X
3. ¿Hay alguna zona de riego a una distancia menor o igual de 30m?	X	
4. ¿Hay alguna otra fuente de contaminación a una distancia de 10 m del pozo (desechos fecales, basura, agua superficial, agua estancada)?		X
5. ¿El pozo se encuentra dentro de un área de pastoreo o de ganadería?		X
6. ¿El agua de riego presenta algún tipo de contaminante?	X	
7. ¿El agua de riego se somete a algún tipo de tratamiento antes de ser irrigada?		X
8. ¿Hay algún pozo abierto a menos de 100 m del pozo?		X
9. ¿Hay algún canal de drenaje en mal estado (está roto facilitando el estancamiento o necesita limpieza)?		X
10. ¿El cerco perimétrico está dañado de tal manera que permite el ingreso de animales o personas no autorizadas?		X
11. ¿El piso alrededor del pozo tiene alguna fractura o rajadura que pudiera permitir el ingreso de agua?		X
12. ¿El sello del pozo permite el ingreso de agua al pozo?		X
13. ¿El registro de cloración muestra alguna interrupción en el dosificador? (Si no hay registro de cloración, anotar SI).		X
	Puntuación total de riesgos	
	2/13	
Puntaje del riesgo de contaminación: Muy alto= 10-13; Alto= 7-9; Intermedio= 4-6; Bajo= 0-3 Cada "SI" equivale a 1 punto.	Bajo	
III. Resultados y Recomendaciones		
Este pozo tiene un riesgo bajo a pesar de tener zonas aledañas de irrigación.		

ZONA 1- ATITALAQUIA

M-1 RANCHO EL OLIMPO (LAS ALBERCAS)

Formato de Inspección Sanitaria para Manantiales en zonas rurales de riego con agua residual		
I. Tipo de fuente Manantial		
Zona de suministro: no es una población específica, uso recreativo		
Localización: El Tablón, Atitalaquia		
Identificación: M-1		
Temporalidad: Estiaje/Lluvia		
¿Se tomó muestra? <u>si</u> CF/100mL <u>19.7(LI) 118(E)</u> <i>E.coli</i> <u>17.7(LI) 20.7(E)</u>		
II. Información específica del diagnóstico		
	RIESGO	
	SI	NO
1. ¿El manantial se encuentra dentro del área de riego?		X
2. ¿Hay alguna zona de riego a una distancia menor o igual a 30m?	X	
3. ¿Hay alguna otra fuente de contaminación en un radio de 10 m del manantial o ubicada aguas arriba de éste (desechos fecales, basura, agua superficial, agua estancada)?		X
4. ¿El agua de riego presenta algún tipo de contaminante?	X	
5. ¿El manantial se encuentra dentro de una zona de pastoreo o de ganadería?		X
6. ¿Existe alguna letrina en un radio de 30 m?		X
7. ¿El manantial carece de protección de obra de albañilería, pared de concreto o caja de captación (expuesto a la contaminación superficial)?		X
8. ¿La obra de albañilería presenta defectos en la protección del manantial?		X
9. Si hay una caja de captación, ¿está contaminada por sedimentos o desechos de animales? ¿su cubierta no cumple con los requisitos de sanidad?		X
10. ¿La gente que colecta agua del manantial tiene contacto con la fuente? ¿se introduce en ella?	X	
11. El área alrededor del manantial, ¿se encuentra sin cercar o es insegura?	X	
12. ¿Pueden acceder los animales a menos de 10 m de la fuente?		X
13. ¿El registro de cloración muestra alguna interrupción en el dosificador? (Si no hay registro de cloración, anotar SI).	X	
	Puntuación total de riesgos	5/13
Puntaje del riesgo de contaminación: Muy alto= 10-13; Alto= 7-9; Intermedio= 4-6; Bajo= 0-3 Cada "SI" equivale a 1 punto.	Intermedio	
III. Resultados y Recomendaciones		
Este manantial tiene un riesgo intermedio, debido principalmente al contacto directo con la gente y a la falta de cloración del agua.		

ZONA 1 – ATITALAQUIA

N-1 FAM. GONÁLEZ LÓPEZ

Formato de Inspección Sanitaria para Norias en zonas rurales de riego con agua residual		
I. Tipo de fuente Noria		
Zona de suministro: Tezoquipa		
Localización: Calle Juan de Dios Pesa no.123, Tezoquipa		
Identificación: N-1		
Temporalidad: Estiaje (E)/Lluvia (LI)		
¿Se tomó muestra? si <u> </u> CF/100mL <u>800(LI) 207(E)</u> <i>E.coli</i> <u>140(LI) 55.7(E)</u>		
II. Información específica del diagnóstico		
	RIESGO	
	SI	NO
1. ¿La noria se encuentra dentro del área de riego?		X
2. ¿Hay alguna zona de riego en un radio de 30m?	X	
3. ¿Hay alguna otra fuente de contaminación en un radio de 10 m de la noria o ubicada aguas arriba de éste (desechos fecales, basura, agua superficial, agua estancada)?	X	
4. ¿El agua de riego presenta algún tipo de contaminante?	X	
5. ¿Existe alguna letrina en un radio de 10 m? ¿Se encuentra a una mayor altitud?		X
6. ¿El canal de drenaje esta roto, fracturado o necesita limpieza?		X
7. ¿El área carece de un cercado? Si lo tiene, ¿el cercado es defectuoso o inapropiado?	X	
8. ¿El radio del concreto alrededor de la noria es menor a 1m?	X	
9. ¿Existen fracturas en el piso de concreto?		X
10. ¿Existen otras fuentes de contaminación (letrinas, riego con aguas negras, canales de distribución con aguas negras) en un radio de 10 m de la noria?		X
11. ¿La cubierta de la noria no cumple los requerimientos de sanidad?	X	
12. ¿Hay agua anegada alrededor de la noria?		X
13. ¿El registro de cloración muestra alguna interrupción en el dosificador? (Si no hay registro de cloración, anotar SI).	X	
Puntuación total de riesgos	7/13	
Puntaje del riesgo de contaminación: Muy alto= 10-13; Alto= 7-9; Intermedio= 4-6; Bajo= 0-3 Cada "SI" equivale a 1 punto.	Alto	
III. Resultados y Recomendaciones		
Esta noria representa un riesgo alto, prácticamente está recibiendo todo el exceso de agua que se infiltra y no tiene una construcción adecuada. Aunque no se utiliza para consumo humano, si se emplea en usos secundarios, lo cual implica un contacto con las personas. Recomendaciones clausurar el uso de la noria. La gente ahora cuenta con el pozo Tezoquipa por lo que no es indispensable continuar con su funcionamiento.		

INSPECCIÓN ZONA 2
TLAHUELILPAN

ZONA 2 – TLAHUELILPAN-TEZONTEPEC

P1-2 POZO SAN PRIMITIVO

Formato de Inspección Sanitaria para Pozos dentro de una zona rural de riego con agua residual		
I. Tipo de fuente Pozo profundo con mecanismo de bombeo		
Zona de suministro: Tlahuelilpan Localización: Camino viejo a Muntepec, Tlahuelilpan Identificación: P1-2 Temporalidad: Estiaje (E)/ Lluvia (LI) ¿Se tomó muestra? <u>si</u> CF/100mL <u>11.7(LI) ND(E)</u> <u>E.coli 7.67(LI) ND(E)</u>		
II. Información específica del diagnóstico		
	RIESGO	
1. ¿Hay alguna letrina a una distancia de 15-20 m del pozo? ¿La letrina se encuentra a una mayor altitud?	SI	NO
2. ¿El pozo se encuentra dentro del área de riego?	X	
3. ¿Hay alguna zona de riego a una distancia menor o igual de 30m?	X	
4. ¿Hay alguna otra fuente de contaminación a una distancia de 10 m del pozo (desechos fecales, basura, agua superficial, agua estancada)?		X
5. ¿El pozo se encuentra dentro de un área de pastoreo o de ganadería?		X
6. ¿El agua de riego presenta algún tipo de contaminante?	X	
7. ¿El agua de riego se somete a algún tipo de tratamiento antes de ser irrigada?	X	
8. ¿Hay algún pozo abierto a menos de 100 m del pozo?		X
9. ¿Hay algún canal de drenaje en mal estado (está roto facilitando el estancamiento o necesita limpieza)?		X
10. ¿El cerco perimétrico está dañado de tal manera que permite el ingreso de animales o personas no autorizadas?		X
11. ¿El piso alrededor del pozo tiene alguna fractura o rajadura que pudiera permitir el ingreso de agua?		X
12. ¿El sello del pozo permite el ingreso de agua al pozo?		X
13. ¿El registro de cloración muestra alguna interrupción en el dosificador? (Si no hay registro de cloración, anotar SI).	X	
Puntuación total de riesgos	5/12	
Puntaje del riesgo de contaminación: Muy alto= 10-13; Alto= 7-9; Intermedio= 4-6; Bajo= 0-3 Cada "SI" equivale a 1 punto.	Intermedio	
III. Resultados y Recomendaciones		
Este pozo tiene un nivel de riesgo intermedio. Se encuentra dentro de la zona de irrigación y el funcionamiento de la cloración con frecuencia no es el adecuado. Recomendaciones mantenimiento continuo a las bombas dosificadoras de cloro.		

ZONA 2 – TLAHUELILPAN

P2-2 POZO 11, CFE

Formato de Inspección Sanitaria para Pozos dentro de una zona rural de riego con agua residual		
I. Tipo de fuente Pozo profundo con mecanismo de bombeo		
Zona de suministro: CFE, colonia Cuauhtémoc Localización: Col. Cuauhtémoc, Tlahuelilpan Identificación: P2-2 Temporalidad: Estiaje (E) / Lluvia (LI) ¿Se tomó muestra? si <u>CF/100mL 6.33(LI) ND(E) E.coli ND(LI) ND(E)</u>		
II. Información específica del diagnóstico		
	RIESGO	
	SI	NO
1. ¿Hay alguna letrina a una distancia de 15-20 m del pozo? ¿La letrina se encuentra a una mayor altitud?		X
2. ¿El pozo se encuentra dentro del área de riego?	X	
3. ¿Hay alguna zona de riego a una distancia menor o igual de 30m?	X	
4. ¿Hay alguna otra fuente de contaminación a una distancia de 10 m del pozo (desechos fecales, basura, agua superficial, agua estancada)?		X
5. ¿El pozo se encuentra dentro de un área de pastoreo o de ganadería?		X
6. ¿El agua de riego presenta algún tipo de contaminante?	X	
7. ¿El agua de riego se somete a algún tipo de tratamiento antes de ser irrigada?	X	
8. ¿Hay algún pozo abierto a menos de 100 m del pozo?		X
9. ¿Hay algún canal de drenaje en mal estado (está roto facilitando el estancamiento o necesita limpieza)?		X
10. ¿El cerco perimétrico está dañado de tal manera que permite el ingreso de animales o personas no autorizadas?		X
11. ¿El piso alrededor del pozo tiene alguna fractura o rajadura que pudiera permitir el ingreso de agua?		X
12. ¿El sello del pozo permite el ingreso de agua al pozo?		X
13. ¿El registro de cloración muestra alguna interrupción en el dosificador? (Si no hay registro de cloración, anotar SI).		X
Puntuación total de riesgos	4/13	
Puntaje del riesgo de contaminación: Muy alto= 10-13; Alto= 7-9; Intermedio= 4-6; Bajo= 0-3 Cada "SI" equivale a 1 punto.	Intermedio	
III. Resultados y Recomendaciones		
Este pozo tiene un nivel de riesgo intermedio, debido a que se encuentra dentro de la zona de riesgo.		

ZONA 2 – TLAHUELILPAN

P3-2 POZO MIRAVALLE

Formato de Inspección Sanitaria para Pozos dentro de una zona rural de riego con agua residual		
I. Tipo de fuente Pozo profundo con mecanismo de bombeo		
Zona de suministro: Tlahuelilpan Localización: Carretera Tlahuelilpan-Juandho Identificación: P3-2 Temporalidad: Estiaje (E)/ Lluvia (LI) ¿Se tomó muestra? <u>si</u> CF/100mL <u>1.67(LI) ND(E)</u> <i>E.coli</i> <u>ND(LI) ND(E)</u>		
II. Información específica del diagnóstico		
	RIESGO	
	SI	NO
1. ¿Hay alguna letrina a una distancia de 15-20 m del pozo? ¿La letrina se encuentra a una mayor altitud?		X
2. ¿El pozo se encuentra dentro del área de riego?	X	
3. ¿Hay alguna zona de riego a una distancia menor o igual de 30m?	X	
4. ¿Hay alguna otra fuente de contaminación a una distancia de 10 m del pozo (desechos fecales, basura, agua superficial, agua estancada)?		X
5. ¿El pozo se encuentra dentro de un área de pastoreo o de ganadería?	X	
6. ¿El agua de riego presenta algún tipo de contaminante?	X	
7. ¿El agua de riego se somete a algún tipo de tratamiento antes de ser irrigada?		X
8. ¿Hay algún pozo abierto a menos de 100 m del pozo?		X
9. ¿Hay algún canal de drenaje en mal estado (está roto facilitando el estancamiento o necesita limpieza)?		X
10. ¿El cerco perimétrico está dañado de tal manera que permite el ingreso de animales o personas no autorizadas?		X
11. ¿El piso alrededor del pozo tiene alguna fractura o rajadura que pudiera permitir el ingreso de agua?		X
12. ¿El sello del pozo permite el ingreso de agua al pozo?		X
13. ¿El registro de cloración muestra alguna interrupción en el dosificador? (Si no hay registro de cloración, anotar SI).	X	
Puntuación total de riesgos	5/12	
Puntaje del riesgo de contaminación: Muy alto= 10-13; Alto= 7-9; Intermedio= 4-6; Bajo= 0-3 Cada "SI" equivale a 1 punto.	Intermedio	
III. Resultados y Recomendaciones Este pozo tiene un nivel de riesgo intermedio. Se encuentra dentro de la zona de irrigación y el funcionamiento de la cloración con frecuencia no es el adecuado. Recomendaciones mantenimiento continuo a las bombas dosificadoras de cloro		

ZONA 2- TLAHUELILPAN

M-2 CERRO COLORADO

Formato de Inspección Sanitaria para Manantiales en zonas rurales de riego con agua residual	
I. Tipo de fuente Manantial	
Zona de suministro: Siete municipios, personas que utilizan el excedente	
Localización:	
Identificación: M-1	
Temporalidad: Estiaje (E)/ Lluvia (LI)	
¿Se tomó muestra? si <u>CF/100mL 22(LI) 66.7(E) E.coli/100mL 19.7(LI) 14.3(E)</u>	
II. Información específica del diagnóstico	
	RIESGO
	SI NO
1. ¿El manantial se encuentra dentro del área de riego?	X
2. ¿Hay alguna zona de riego a una distancia menor o igual a 30m?	X
3. ¿Hay alguna otra fuente de contaminación en un radio de 10 m del manantial o ubicada aguas arriba de éste (desechos fecales, basura, agua superficial, agua estancada)?	X
4. ¿El agua de riego presenta algún tipo de contaminante?	X
5. ¿El manantial se encuentra dentro de una zona de pastoreo o de ganadería?	X
6. ¿Existe alguna letrina en un radio de 30 m?	X
7. ¿El manantial carece de protección de obra de albañilería, pared de concreto o caja de captación (expuesto a la contaminación superficial)?	X
8. ¿La obra de albañilería presenta defectos en la protección del manantial?	X
9. Si hay una caja de captación, ¿está contaminada por sedimentos o desechos de animales? ¿su cubierta no cumple con los requisitos de sanidad?	X
10. ¿La gente que colecta agua del manantial tiene contacto con la fuente? ¿se introduce en ella?	X
11. El área alrededor del manantial, ¿se encuentra sin cercar o es insegura?	X
12. ¿Pueden acceder los animales a menos de 10 m de la fuente?	X
13. ¿El registro de cloración muestra alguna interrupción en el dosificador? (Si no hay registro de cloración, anotar SI).	X
Puntuación total de riesgos	6/13
Puntaje del riesgo de contaminación: Muy alto= 10-13; Alto= 7-9; Intermedio= 4-6; Bajo= 0-3 Cada "SI" equivale a 1 punto.	Alto
III. Resultados y Recomendaciones	
El manantial representa un riesgo alto, principalmente para aquellas personas que utilizan el agua de este sitio directamente. Recomendación evitar el contacto directo de las personas con el agua.	

ZONA 2 – TLAHUELILPAN

P4-2 POZO 5 DE MAYO

Formato de Inspección Sanitaria para Pozos dentro de una zona rural de riego con agua residual		
I. Tipo de fuente Pozo profundo con mecanismo de bombeo		
Zona de suministro: Tlahuelilpan		
Localización: Carretera Calle 5 de mayo, rumbo a Muntepec		
Identificación: P3-2		
Temporalidad: Estiaje (E)/ Lluvia (LI)		
¿Se tomó muestra? <u>si</u> CF/100mL <u>1.33</u> (LI) ND(E) <i>E.coli</i> /100mL <u>ND</u> (LI) ND(E)		
II. Información específica del diagnóstico		
	RIESGO	
	SI	NO
1. ¿Hay alguna letrina a una distancia de 15-20 m del pozo? ¿La letrina se encuentra a una mayor altitud?		X
2. ¿El pozo se encuentra dentro del área de riego?	X	
3. ¿Hay alguna zona de riego a una distancia menor o igual de 30m?	X	
4. ¿Hay alguna otra fuente de contaminación a una distancia de 10 m del pozo (desechos fecales, basura, agua superficial, agua estancada)?		X
5. ¿El pozo se encuentra dentro de un área de pastoreo o de ganadería?	X	
6. ¿El agua de riego presenta algún tipo de contaminante?	X	
7. ¿El agua de riego se somete a algún tipo de tratamiento antes de ser irrigada?		X
8. ¿Hay algún pozo abierto a menos de 100 m del pozo?		X
9. ¿Hay algún canal de drenaje en mal estado (está roto facilitando el estancamiento o necesita limpieza)?		X
10. ¿El cerco perimétrico está dañado de tal manera que permite el ingreso de animales o personas no autorizadas?		X
11. ¿El piso alrededor del pozo tiene alguna fractura o rajadura que pudiera permitir el ingreso de agua?		X
12. ¿El sello del pozo permite el ingreso de agua al pozo?		X
13. ¿El registro de cloración muestra alguna interrupción en el dosificador? (Si no hay registro de cloración, anotar SI).		
Puntuación total de riesgos	4/13	
Puntaje del riesgo de contaminación: Muy alto= 10-13; Alto= 7-9; Intermedio= 4-6; Bajo= 0-3 Cada "SI" equivale a 1 punto.	Intermedio	
III. Resultados y Recomendaciones		
Este pozo tiene un riesgo intermedio debido a que se encuentra dentro del área de irrigación.		

INSPECCIÓN ZONA 3

ACTOPAN

ZONA 3 - ACTOPAN

P1-3 BOTHI BAJI

Formato de Inspección Sanitaria para Pozos dentro de una zona rural de riego con agua residual		
I. Tipo de fuente Pozo profundo con mecanismo de bombeo		
Zona de suministro: BothiBaji, El Palomo y La Loma		
Localización: Bothi Baji		
Identificación:P1-3		
Temporalidad: Estiaje (E) / Lluvia (LI)		
¿Se tomó muestra? <u>si</u> CF/100mL_ND (LI) 1.33(E) E.coli/100mL_ND(LI) 2(E)		
II. Información específica del diagnóstico		
	RIESGO	
	SI	NO
1. ¿Hay alguna letrina a una distancia de 15-20 m del pozo? ¿La letrina se encuentra a una mayor altitud?		X
2. ¿El pozo se encuentra dentro del área de riego?		X
3. ¿Hay alguna zona de riego a una distancia menor o igual de 30m?	X	
4. ¿Hay alguna otra fuente de contaminación a una distancia de 10 m del pozo (desechos fecales, basura, agua superficial, agua estancada)?		X
5. ¿El pozo se encuentra dentro de un área de pastoreo o de ganadería?	X	
6. ¿El agua de riego presenta algún tipo de contaminante?	X	
7. ¿El agua de riego se somete a algún tipo de tratamiento antes de ser irrigada?		X
8. ¿Hay algún pozo abierto a menos de 100 m del pozo?		X
9. ¿Hay algún canal de drenaje en mal estado (está roto facilitando el estancamiento o necesita limpieza)?		X
10. ¿El cerco perimétrico está dañado de tal manera que permite el ingreso de animales o personas no autorizadas?		X
11. ¿El piso alrededor del pozo tiene alguna fractura o rajadura que pudiera permitir el ingreso de agua?		X
12. ¿El sello del pozo permite el ingreso de agua al pozo?		X
13. ¿El registro de cloración muestra alguna interrupción en el dosificador? (Si no hay registro de cloración, anotar SI).		X
Puntuación total de riesgos	3/13	
Puntaje del riesgo de contaminación: Muy alto= 10-13; Alto= 7-9; Intermedio= 4-6; Bajo= 0-3 Cada "SI" equivale a 1 punto.	Bajo	
III. Resultados y Recomendaciones		
Este pozo tiene un riesgo bajo, el cual esta relacionado con la cercanía de las zonas de irrigación.		

ZONA 3 – ACTOPAN

P2-3 SAN ISIDRO

Formato de Inspección Sanitaria para Pozos dentro de una zona rural de riego con agua residual		
I. Tipo de fuente Pozo profundo con mecanismo de bombeo		
Zona de suministro: Actopan, colonias Benito Juárez y Cañada Chica Aviación		
Localización: Actopan		
Identificación: P2-3		
Temporalidad: Estiaje (E) / Lluvia (LI)		
¿Se tomó muestra? si <u> </u> CF/100mL ND(LI) 0.66(E) <i>E.coli</i> /100mL ND(LI) ND(E)		
II. Información específica del diagnóstico		
	RIESGO	
	SI	NO
1. ¿Hay alguna letrina a una distancia de 15-20 m del pozo? ¿La letrina se encuentra a una mayor altitud?		X
2. ¿El pozo se encuentra dentro del área de riego?		X
3. ¿Hay alguna zona de riego a una distancia menor o igual de 30m?	X	
4. ¿Hay alguna otra fuente de contaminación a una distancia de 10 m del pozo (desechos fecales, basura, agua superficial, agua estancada)?		X
5. ¿El pozo se encuentra dentro de un área de pastoreo o de ganadería?		X
6. ¿El agua de riego presenta algún tipo de contaminante?	X	
7. ¿El agua de riego carece de algún tipo de tratamiento antes de ser irrigada?	X	
8. ¿Hay algún pozo abierto a menos de 100 m del pozo?		X
9. ¿Hay algún canal de drenaje en mal estado (está roto facilitando el estancamiento o necesita limpieza)?		X
10. ¿El cerco perimétrico está dañado de tal manera que permite el ingreso de animales o personas no autorizadas?		X
11. ¿El piso alrededor del pozo tiene alguna fractura o rajadura que pudiera permitir el ingreso de agua?		X
12. ¿El sello del pozo permite el ingreso de agua al pozo?		X
13. ¿El registro de cloración muestra alguna interrupción en el dosificador? (Si no hay registro de cloración, anotar SI).	X	
Puntuación total de riesgos	4/13	
Puntaje del riesgo de contaminación: Muy alto= 10-13; Alto= 7-9; Intermedio= 4-6; Bajo= 0-3 Cada "SI" equivale a 1 punto.	Intermedio	
III. Resultados y Recomendaciones		
Este pozo tiene un riesgo intermedio, el cual esta relacionado con la cercanía de las zonas de irrigación. Además, durante las visitas a este sitio se confirmó el mal funcionamiento de la dosificación del cloro. Recomendación, mantenimiento continuo para mantener una cloración constante.		

ZONA 3 – ACTOPAN

P3-3 CIC 126

Formato de Inspección Sanitaria para Pozos dentro de una zona rural de riego con agua residual		
I. Tipo de fuente Pozo profundo con mecanismo de bombeo utilizado para riego		
Zona de suministro: 85 hectáreas de la zona de Chimilpa, El Arenal y Actopan		
Localización: Chimilpa, El Arenal, Actopan		
Identificación: P3-3		
Temporalidad: Estiaje (E) / Lluvia (LI)		
¿Se tomó muestra? <u>si</u> CF/100mL <u>ND(LI) 8.33(E)</u> E.coli/100mL <u>ND(LI) ND(E)</u>		
II. Información específica del diagnóstico		
	RIESGO	
	SI	NO
1. ¿Hay alguna letrina a una distancia de 15-20 m del pozo? ¿La letrina se encuentra a una mayor altitud?		X
2. ¿El pozo se encuentra dentro del área de riego?	X	
3. ¿Hay alguna zona de riego a una distancia menor o igual de 30m?	X	
4. ¿Hay alguna otra fuente de contaminación a una distancia de 10 m del pozo (desechos fecales, basura, agua superficial, agua estancada)?		X
5. ¿El pozo se encuentra dentro de un área de pastoreo o de ganadería?		X
6. ¿El agua de riego presenta algún tipo de contaminante?	X	
7. ¿El agua de riego carece de algún tipo de tratamiento antes de ser irrigada?	X	
8. ¿Hay algún pozo abierto a menos de 100 m del pozo?		X
9. ¿Hay algún canal de drenaje en mal estado (está roto facilitando el estancamiento o necesita limpieza)?		X
10. ¿El cerco perimétrico está dañado de tal manera que permite el ingreso de animales o personas no autorizadas?		X
11. ¿El piso alrededor del pozo tiene alguna fractura o rajadura que pudiera permitir el ingreso de agua?		X
12. ¿El sello del pozo permite el ingreso de agua al pozo?		X
13. ¿El registro de cloración muestra alguna interrupción en el dosificador? (Si no hay registro de cloración, anotar SI).	X	
Puntuación total de riesgos	5/13	
Puntaje del riesgo de contaminación: Muy alto= 10-13; Alto= 7-9; Intermedio= 4-6; Bajo= 0-3 Cada "SI" equivale a 1 punto.	Intermedio	
III. Resultados y Recomendaciones		
Este pozo tiene un riesgo intermedio, el cual esta relacionado con la cercanía de las zonas de irrigación. Además, durante las visitas a este sitio se confirmó el mal funcionamiento de la dosificación del cloro. Sin embargo, este pozo solamente se utiliza para riego, por lo tanto no se considera necesario realizar alguna acción.		

ZONA 3- ACTOPAN

M3- EL DREN

Formato de Inspección Sanitaria para Manantiales en zonas rurales de riego con agua residual		
I. Tipo de fuente Manantial		
Zona de suministro: sólo sirve como recolector de las aguas que emergen debido al exceso de irrigación Localización: El Boxtha, Actopan Identificación: M-3 Temporalidad: Estiaje (E) / Lluvia (LI) ¿Se tomó muestra? si <u>CF/100mL 7(LI) 373(E) E.coli/100mL 6.3(LI) 24.7(E)</u>		
II. Información específica del diagnóstico		
	RIESGO	
	SI	NO
1. ¿El manantial se encuentra dentro del área de riego?	X	
2. ¿Hay alguna zona de riego a una distancia menor o igual a 30m?	X	
3. ¿Hay alguna otra fuente de contaminación en un radio de 10 m del manantial o ubicada aguas arriba de éste (desechos fecales, basura, agua superficial, agua estancada)?	X	
4. ¿El agua de riego presenta algún tipo de contaminante?	X	
5. ¿El manantial se encuentra dentro de una zona de pastoreo o de ganadería?		X
6. ¿Existe alguna letrina en un radio de 30 m?		X
7. ¿El manantial carece de protección de obra de albañilería, pared de concreto o caja de captación (expuesto a la contaminación superficial)?	X	
8. ¿La obra de albañilería presenta defectos en la protección del manantial?	X	
9. Si hay una caja de captación, ¿está contaminada por sedimentos o desechos de animales? ¿su cubierta no cumple con los requisitos de sanidad? (En caso de no tener ponga SI)	X	
10. ¿La gente que colecta agua del manantial tiene contacto con la fuente? ¿se introduce en ella?		X
11. El área alrededor del manantial, ¿se encuentra sin cercar o es insegura?	X	
12. ¿Pueden acceder los animales a menos de 10 m de la fuente?	X	
13. ¿El registro de cloración muestra alguna interrupción en el dosificador? (Si no hay registro de cloración, anotar SI).	X	
Puntuación total de riesgos	10 /13	
Puntaje del riesgo de contaminación: Muy alto= 10-13; Alto= 7-9; Intermedio= 4-6; Bajo= 0-3 Cada "SI" equivale a 1 punto.	Muy alto	
III. Resultados y Recomendaciones		
Este sitio tiene un riesgo muy alto, sin embargo la gente no tiene contacto directo con él.		

ZONA 3 – ACTOPAN

N-3 POZO GRANDE

Formato de Inspección Sanitaria para Norias en zonas rurales		de riego con agua residual
I. Tipo de fuente Noria		
Zona de suministro: Actopan parque Urbano, Boxtha y Daxtha		
Localización: Carretera Actopan-Tula km 1, enfrente de las oficinas de CNA		
Identificación: N-3		
Temporalidad: Estiaje (E) / Lluvia (LI)		
¿Se tomó muestra? si ___ CF/100mL <u>70.7(LI) 42(E)</u> E.coli/100mL <u>36.3(LI) 7.33(E)</u>		
II. Información específica del diagnóstico		
	RIESGO	
	SI	NO
1. ¿La noria se encuentra dentro del área de riego?	X	
2. ¿Hay alguna zona de riego en un radio de 30m?	X	
3. ¿Hay alguna otra fuente de contaminación en un radio de 10 m de la noria o ubicada aguas arriba de éste (desechos fecales, basura, agua superficial, agua estancada)?		X
4. ¿El agua de riego presenta algún tipo de contaminante?	X	
5. ¿Existe alguna letrina en un radio de 10 m? ¿Se encuentra a una mayor altitud?		X
6. ¿El canal de drenaje esta roto, fracturado o necesita limpieza?		X
7. ¿El área carece de un cercado? Si lo tiene, ¿el cercado es defectuoso o inapropiado?	X	
8. ¿El radio del concreto alrededor de la noria es menor a 1m?		X
9. ¿Existen fracturas en el piso de concreto?		X
10. ¿Existen otras fuentes de contaminación (letrinas, riego con aguas negras, canales de distribución con aguas negras) en un radio de 10 m de la noria?		X
11. ¿La cubierta de la noria no cumple los requerimientos de sanidad?		X
12. ¿Hay agua anegada alrededor de la noria?		X
13. ¿El registro de cloración muestra alguna interrupción en el dosificador? (Si no hay registro de cloración, anotar SI).	X	
Puntuación total de riesgos	5 /12	
Puntaje del riesgo de contaminación: Muy alto= 10-13; Alto= 7-9; Intermedio= 4-6; Bajo= 0-3 Cada "SI" equivale a 1 punto.	Intermedio	
III. Resultados y Recomendaciones		
Este pozo tiene un riesgo intermedio, el cual esta relacionado con la cercanía de las zonas de irrigación. Además, durante las visitas a este sitio se confirmó el mal funcionamiento de la dosificación del cloro. Recomendación, mantenimiento continuo para mantener una cloración constante.		

ANEXO - B
INFORMACIÓN GENERAL DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

Puntos de muestreo Zona 1 - Atitalaquia

Punto de muestreo	Q [l/s]	Información general							
		Identificación	Localización	Ubicación (GPS)		Uso	Población abastecida	Habitantes	Observaciones
P1-1	8	(Centro de salud) Tezoquipa	Calle Juan de Dios Pesa, Tezoquipa	0478272	2217755	AU	Tezoquipa, Atitalaquia	3,500	----
P2-1	16	Principal "La Cantera"	Tablón	0480024	2217198	AU	Atitalaquia	5,000	Abastece a las colonias: Colonia los Angeles, Col. Del Río, Fracc. Texcali, Col. El Tablón y Col. Centro de Atitalaquia
P 3-1	27	Tablón	Av. Acapulco esq. Insurgentes, Tablón	0477598	2216639	AU	Tablón y Napoles, Atitalaquia	3,500	600 tomas , 5 hab/ toma
N-1	Nivel freático 7 m (aprox.)	Fam. Glz - López	Calle Juan de Dios Pesa no.123, Tezoquipa. (enfrente del pozo 1)	0478272	2217755	AU	---	---	----
M-1	--	Rancho El Olimpo (Las albercas)	Tablón	0476800	2215721	RC	otros usos	---	----

AU : Abastecimiento Urbano

R : Riego

RC: Recreativo

Puntos de muestreo Zona 2 - Tlahuelilpan

Punto de muestreo	Q [l/s]	Información general							
		Identificación	Localización	Ubicación (GPS)		Uso	Población abastecida	Habitantes	Observaciones
P1-2	25	Pozo San Primitivo	Camino viejo a Muntepec	0477569	2225684	AU	Tlahuelilpan - San Primitivo	3000	Este pozo funciona de manera alternada. Los terrenos aledaños son regados con agua negra proveniente de Tequizquiac.
P2-2	30	Pozo No. 11 del sistema 2 de CFE	Col. Cuauhtémoc, Tlahuelilpan	0474746	2226493	ID/AU	Tlahuelilpan - Col. Cuauhtémoc	3,500	Una parte del agua del pozo es para CFE y la otra para la Colonia Cuauhtémoc de Tlahuelilpan.
P3-2	25	Pozo Miravalle	Carretera Tlahuelilpan - Juandho	0476730	2226766	AU	Tlahuelilpan	10000	Los terrenos aledaños son regados con agua negra proveniente de Tequizquiac.
P4-2	25	Pozo 5 de mayo	Calle 5 de mayo, rumbo a Muntepec	0476873	2225710	AU	Tlahuelilpan	---	----
Manantial	--	Cerro Colorado	Carretera Tlahuelilpan-Tezontepec de Aldama	0472626	2224623	AU	7 municipios		El afloramiento surgió en 1963. Terrenos de riego de 100 años de antigüedad. A partir del afloramiento el riego se hace con la mezcla de AR y agua del manantial.

AU : Abastecimiento Urbano

R : Riego

RC: Recreativo

Puntos de muestreo Zona 3 - Actopan

Punto de muestreo	Q [l/s]	Información general							
		Identificación	Localización	Ubicación (GPS)		Uso	Población abastecida	Habitantes	Observaciones
P 1-3	25	Bathi - Baji 1	Bathi - Baji	0506272	2236917	AU	Actopan	30,000	Además de Actopan abastece a: Bothi Baji, El Palomo y La Loma
P2-3	30	San Isidro	Col. Benito Juárez	0504769	2241553	AU	Centro de Actopan	30000	Además de Actopan abastece a las colonias Benito Juárez y Cañada Chica Aviación.
P3-3	67	CIC 126	Chimilpa, El Arenal, Actopan	0506204	2234269	R	85 hectáreas	---	Profundidad: 127 m, ademe 14"
Noria	110	Noria de Pozo Grande	Carretera Actopan-Tula km 1, enfrente de las of de CNA	0504444	2240648	AU	---	---	---
Bomba 1	25					AU	Boxtha	3,085	Comunidad única
Bomba 2	15					AU	Daxtha	2,895	Comunidad única
Bomba 3	18					AU	Parque Urbano	4,075	Comunidad única
Manantial	---	El Dren	El Boxtha, Actopan	0501784	2240500	--	---	---	Surgió para coleccionar el agua de inundación de los terrenos de cultivo. Recibe aguas residuales de riego y domesticas. Es el punto donde nace el manantial 1.

AU : Abastecimiento Urbano

R : Riego

RC: Recreativo

ANEXO - C
RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN BIOLÓGICA DEL AGUA

Conteos de bacterias y bacteriofagos

Debido a la naturaleza de los datos en general se debe realizar una transformación logarítmica de los conteos obtenidos, con la finalidad de generar una distribución más simétrica. La estadística descriptiva más apropiada para tratar resultados microbiológicos (APHA/AWWA/WPCF, 1995) es la media geométrica (igual a la mediana en el caso de una distribución normal), con sus respectivas medidas de dispersión: la desviación estándar de los logaritmos de los valores y el intervalo de confianza al 95 por ciento de la media geométrica.

Media geométrica

La media geométrica esta definida como el antilogaritmo de la media aritmética de los logaritmos de las densidades individuales de cada organismo determinado. Dicho estadístico se obtiene de la siguiente manera:

$$\log \bar{x} = \frac{(\log x)}{n}$$

$$\bar{x} = \text{antilog} (\log \bar{x})$$

donde:

x= observación i

n= número de réplicas de cada observación (3)

En caso de haber valores <1 UFC/100mL se debe sumar 1 a cada conteo obtenido al hacer la transformación logarítmica, a fin de obtener valores validos (ya que el logaritmo de cero no existe). Una vez obtenida la media geométrica, se deberá restar lo sumado a cada conteo.

Estimadores de dispersión

La desviación estándar se obtiene a partir de los logaritmos de los conteos. Se calcula utilizando la siguiente formula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \log x^2 - (\sum \log x)^2 / n}{(n - 1)}}$$

donde:

σ = desviación estándar de los logaritmos

x= observación i

n= número de réplicas de cada observación (3)

El intervalo de confianza al 95% se define de la siguiente manera:

$$m \pm (t_{0.025, n-1} * S_e)$$

donde:

m= media aritmética de los logaritmos

$t_{0.025, n-1} = 4.3$, valor obtenido de tablas estadísticas de la T de Student para $\alpha=0.025$ y n-1 grados de libertad (2)

Se= error estándar, el cual se calcula como σ/\sqrt{n}

Cabe mencionar que dicho tratamiento estadístico sólo se realizó para bacterias y bacteriófagos. Los resultados de *Giardia* spp. y huevos de helmintos se presentan con sus medias aritméticas y sus respectivos intervalos de confianza de acuerdo a la desviación estándar de la media aritmética.

ÉPOCA DE ESTIAJE

ZONA 1 – ATITALAQUIA

Conteos directos

Punto	Coliformes fecales	E.coli	Enterococos	Esporas de Clostridium	Bacteriófagos	Giardia	Huevos de helmintos
	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFP/mL	quistes/L	HH/L
ARC-1	7.30E+06	3.60E+05	3.00E+05	1.50E+00	4.40E+03	1.20E+03	15
	2.40E+07	2.50E+05	3.00E+05	4.30E+00	3.50E+03	1.00E+03	19
	1.60E+07	4.80E+05	3.00E+05	9.30E+00	3.20E+03	1.20E+03	15.4
Pozo 1	20	1	ND	2	ND	ND	ND
	22	2	ND	ND	ND	ND	ND
	28	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Manantial	80	18	22	ND	33	6	ND
	94	22	34	ND	36	4	ND
	180	22	28	ND	43	3	ND
Noria	190	54	89	24	78	23	0.60
	180	63	68	23	68	19	1.60
	250	50	81	43	75	15	0.80

Transformación logarítmica *

Punto	Coliformes fecales	<i>E. coli</i>	Enterococos	Esporas de <i>Clostridium</i>	Bacteriófagos	<i>Giardia</i>	Huevos de helmintos
	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFP/mL	quistes/L	HH/L
ARC-1	6.86	5.56	5.48	0.40	3.64	1.20E+03	15
	7.38	5.40	5.48	0.72	3.54	1.00E+03	19
	7.20	5.68	5.48	1.01	3.51	1.20E+03	15.4
Pozo 1	1.32	0.30	ND	0.48	ND	ND	ND
	1.36	0.48	ND	ND	ND	ND	ND
	1.46	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	0.48	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Manantial	1.91	1.28	1.36	ND	1.53	6	ND
	1.98	1.36	1.54	ND	1.57	4	ND
	2.26	1.36	1.46	ND	1.64	3	ND
Noria	2.28	1.74	1.95	1.40	1.90	23	0.60
	2.26	1.81	1.84	1.38	1.84	19	1.60
	2.40	1.71	1.91	1.64	1.88	15	0.80

Medias aritméticas de los logaritmos y desviaciones logarítmicas estándar

Punto	CF	σ	<i>E. coli</i>	σ	Enterococos	σ	Esporas <i>Clostridium</i>	σ	B. Somáticos	σ	<i>Giardia</i>	σ	HH	σ
ARC-1	7.15	0.26	5.55	0.14	5.48	0.31	0.71	0.31	3.56	0.07	1130	115.4	16.5	2.20
Pozo 1	1.38	0.07	0.26	0.24	ND	ND	0.16	0.28	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 2	0.16	0.28	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Manantial	2.05	0.18	1.33	0.05	1.46	0.09	ND	ND	1.58	0.06	4.33	1.53	ND	ND
Noria	2.31	0.08	1.75	0.05	1.90	0.06	1.47	0.15	1.87	0.03	19	4	1	0.53

* Para realizar la transformación logarítmica se le añadió 1 a todos los conteos de bacterias y bacteriófagos.

Las medias geométricas y sus respectivos intervalos de confianza se presentan en la sección de resultados. Cabe señalar que a todos los resultados de las medias geométricas se les sustrajo una unidad, de acuerdo al tratamiento estadístico.

ÉPOCA DE ESTIAJE

ZONA 2 – TLAHUELILPAN

Conteos directos

Punto	Coliformes fecales	E.coli	Enterococos	Esporas de Clostridium	Bacteriófagos	Giardia	Huevos de helmintos
	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFP/mL	quistes/L	HH/L
ARM - 2	8.00E+06	7.80E+04	7.00E+05	1.20E+03	2.80E+02	6.50E+02	21.2
	6.80E+06	1.50E+05	7.90E+05	2.40E+03	3.60E+02	7.40E+02	21.6
	7.30E+06	9.30E+05	6.80E+05	1.00E+03	2.60E+02	1.00E+03	23
Pozo 1	ND	ND	ND	ND	7	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	8	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	12	ND	ND
Pozo 2	ND	ND	ND	ND	0	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	0	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	0	ND	ND
Pozo 3	ND	ND	ND	ND	0	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	0	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	0	ND	ND
Manantial	66	12	5	ND	26	ND	ND
	70	9	2	ND	20	ND	ND
	64	22	1	ND	27	ND	ND
Pozo 4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Transformación logarítmica *

Punto	Coliformes fecales	E.coli	Enterococos	Esporas de Clostridium	Bacteriófagos	Giardia	Huevos de helmintos
	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFP/mL	quistes/L	HH/L
ARM - 2	6.90	4.89	5.85	3.08	2.45	650	21.20
	6.83	5.18	5.90	3.38	2.56	740	21.60
	6.86	5.97	5.83	3.00	2.42	1000	23
Pozo 1	ND	ND	ND	ND	0.90	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	0.95	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	1.11	ND	ND
Pozo 2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Manantial	1.83	1.11	0.78	ND	1.43	ND	ND
	1.85	1.00	0.48	ND	1.32	ND	ND
	1.81	1.36	0.30	ND	1.45	ND	ND
Pozo 4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Medias aritméticas de los logaritmos y desviaciones logarítmicas estándar

Punto	CF	σ	<i>E. coli</i>	σ	Enterococos	σ	Esporas <i>Clostridium</i>	σ	B. Somáticos	σ	Giardia	σ	HH	σ
ARM - 2	6.87	0.04	5.35	0.56	5.86	0.20	3.15	0.20	2.47	0.07	796.67	181.7	21.93	0.95
Pozo 1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.99	0.11	ND	ND	ND	ND
Pozo 2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Manantial	1.83	0.02	1.16	0.18	0.52	0.24	ND	ND	1.40	0.07	ND	ND	ND	ND
Pozo 4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

* Para realizar la transformación logarítmica se le añadió 1 a todos los conteos de bacterias y bacteriófagos.

Las medias geométricas y sus respectivos intervalos de confianza se presentan en la sección de resultados. Cabe señalar que a todos los resultados de las medias geométricas se les sustrajo una unidad, de acuerdo al tratamiento estadístico.

ÉPOCA DE ESTIAJE

ZONA 3 - ACTOPAN

Conteos directos

Punto	Coliformes fecales	E.coli	Enterococos	Esporas de Clostridium	Bacteriófagos	Giardia	Huevos de helmintos
	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFP/mL	quistes/L	HH/L
ARM - 2	8.00E+05	2.10E+04	7.10E+05	4.30E+05	6.30E+03	1.00E+03	18.6
	1.10E+05	1.60E+04	1.90E+05	2.30E+05	4.40E+03	1.10E+03	19.2
	1.30E+05	3.80E+04	4.80E+05	2.40E+05	6.30E+03	1.00E+03	17
Pozo 1	ND	1	ND	ND	ND	ND	0.2
	4	5	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 3	10	ND	2	ND	ND	ND	ND
	6	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	9	ND	6	ND	ND	ND	ND
Manantial	220	34	ND	ND	38	ND	ND
	820	22	ND	ND	40	ND	ND
	280	18	ND	ND	40	ND	ND
Pozo 4	60	2	ND	ND	78	ND	ND
	32	12	ND	ND	74	ND	ND
	34	8	ND	ND	62	ND	ND

Transformación logarítmica *

Punto	Coliformes fecales	E.coli	Enterococos	Esporas de Clostridium	Bacteriófagos	Giardia	Huevos de helmintos
	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFP/mL	quistes/L	HH/L
ARM - 3	5.90	4.32	5.85	5.63	3.80	1000	18.60
	5.04	4.20	5.28	5.36	3.64	1100	19.20
	5.11	4.58	5.68	5.38	3.80	1000	17.00
Pozo 1	ND	0.30	ND	ND	ND	ND	0.20
	0.70	0.78	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	0.48	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 3	1.04	ND	0.48	ND	ND	ND	ND
	0.85	ND	0	ND	ND	ND	ND
	1	ND	0.85	ND	ND	ND	ND
Manantial	2.34	1.54	ND	ND	1.59	ND	ND
	2.91	1.36	ND	ND	1.61	ND	ND
	2.45	1.28	ND	ND	1.61	ND	ND
Noria	1.79	0.48	ND	ND	1.90	ND	ND
	1.52	1.11	ND	ND	1.88	ND	ND
	1.54	0.95	ND	ND	1.80	ND	ND

Medias aritméticas de los logaritmos y desviaciones logarítmicas estándar

Punto	CF	σ	<i>E. coli</i>	σ	Enterococos	σ	Esporas <i>Clostridium</i>	σ	B. Somáticos	σ	Giardia	σ	HH	σ
ARM - 2	5.35	0.48	4.37	0.19	5.60	0.15	5.46	0.15	3.75	0.09	1033	57.7	18.3	1.14
Pozo 1	0.23	0.40	0.36	0.39	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.07	0.12
Pozo 2	0.16	0.28	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 3	0.96	0.10	ND	ND	0.44	0.42	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Manantial	2.57	0.30	1.39	0.14	ND	ND	ND	ND	1.61	0.01	ND	ND	ND	ND
Pozo 4	1.62	0.15	0.85	0.33	ND	ND	ND	ND	1.86	0.05	ND	ND	ND	ND

* Para realizar la transformación logarítmica se le añadió 1 a todos los conteos de bacterias y bacteriófagos.

Las medias geométricas y sus respectivos intervalos de confianza se presentan en la sección de resultados. Cabe señalar que a todos los resultados de las medias geométricas se les sustrajo una unidad, de acuerdo al tratamiento estadístico.

ÉPOCA DE LLUVIA

ZONA 1 - ATITALAQUIA

Conteos directos

Punto	Coliformes fecales	<i>E. coli</i>	Enterococos	Esporas de <i>Clostridium</i>	Bacteriófagos	<i>Giardia</i>	Huevos de helmintos
	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFP/mL	Quistes/L	HH/L
ARC-1	1.10E+07	7.30E+05	8.40E+04	4.60E+05	1.30E+03	3.10E+04	19.8
	1.00E+07	6.40E+05	1.00E+05	4.30E+05	3.10E+03	6.40E+04	21.2
	9.80E+06	3.70E+05	4.30E+04	3.60E+05	3.10E+03	7.20E+04	19.8
Pozo 1	3	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 2	5	2	1	4	ND	ND	ND
	8	7	3	3	ND	ND	ND
	3	ND	ND	3.6	ND	ND	ND
Pozo 3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	2	2	0	ND	ND	ND	ND
Manantial	21	20	1	4	ND	ND	ND
	18	18	ND	3.6	ND	ND	ND
	20	15	ND	3	ND	ND	ND
Noria	8.00E+02	1.10E+02	83	4.60E+02	1.10E+02	5.90E+02	ND
	6.30E+02	2.00E+02	70	4.30E+02	1.10E+02	4.80E+02	ND
	9.70E+02	1.10E+02	74	3.60E+02	99	7.30E+02	ND

Transformación logarítmica *

Punto	Coliformes fecales	<i>E.coli</i>	Enterococos	Esporas de <i>Clostridium</i>	Bacteriófagos	<i>Giardia</i>	Huevos de helmintos
	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFP/mL	quistes/L	HH/L
ARC - 1	7.04	5.86	4.92	5.66	3.11	31000	19.80
	7.00	5.81	5.00	5.63	3.49	64000	21.20
	6.99	5.57	4.63	5.56	3.49	72000	19.80
Pozo 1	0.60	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	0.48	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 2	0.78	0.48	0.30	0.70	ND	ND	ND
	0.95	0.90	0.60	0.60	ND	ND	ND
	0.60	ND	ND	0.66	ND	ND	ND
Pozo 3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	0.48	0.48	ND	ND	ND	ND	ND
Manantial	1.34	1.32	0.30	0.70	ND	ND	ND
	1.28	1.28	ND	0.66	ND	ND	ND
	1.32	1.20	ND	0.60	ND	ND	ND
Noria	2.90	2.05	1.92	2.66	2.05	590.00	ND
	2.80	2.30	1.85	2.63	2.05	480.00	ND
	1.54	0.95	0	0	1.80	ND	ND

Medias aritméticas de los logaritmos y desviaciones logarítmicas estándar

Punto	CF	σ	<i>E. coli</i>	σ	Enterococos	σ	Esporas <i>Clostridium</i>	σ	B. Somáticos	σ	Giardia	σ	HH	σ
ARC - 1	7.01	0.03	5.75	0.16	4.85	0.05	5.62	0.05	3.37	0.22	55666	21733	20.3	0.81
Pozo 1	0.36	0.32	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 2	0.78	0.18	0.46	0.45	0.30	0.30	0.65	0.05	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 3	0.16	0.28	0.16	0.28	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Manantial	1.31	0.03	1.27	0.06	0.10	0.17	0.65	0.05	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Noria	2.90	0.09	2.13	0.15	1.88	0.04	2.62	0.05	2.03	0.03	600	125.3	ND	ND

* Para realizar la transformación logarítmica se le añadió 1 a todos los conteos de bacterias y bacteriófagos.

Las medias geométricas y sus respectivos intervalos de confianza se presentan en la sección de resultados. Cabe señalar que a todos los resultados de las medias geométricas se les sustrajo una unidad, de acuerdo al tratamiento estadístico.

ÉPOCA DE LLUVIA

ZONA 2 - TLAHUELILPAN

Conteos directos

Punto	Coliformes fecales	E.coli	Enterococos	Esporas de Clostridium	Bacteriófagos	Giardia	Huevos de helmintos
	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFP/mL	Quistes/L	HH/L
ARM-2	2.80E+06	2.80E+06	9.20E+04	9.30E+03	7.20E+04	1.30E+03	15
	2.10E+06	2.00E+06	7.50E+04	1.10E+04	7.10E+04	2.30E+03	13.6
	3.00E+06	2.80E+06	1.10E+05	1.50E+04	7.30E+04	2.40E+03	12.8
Pozo 1	14	9	ND	3	5	ND	ND
	5	2	6	3.6	6	ND	ND
	19	12	0	4	4	ND	ND
Pozo 2	4	ND	ND	3.6	5	ND	ND
	9	ND	ND	4	15	ND	ND
	6	ND	ND	3	5	ND	ND
Pozo 3	1	ND	1	3.6	2	ND	ND
	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	3	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Manantial	22	19	9	3	20	ND	ND
	18	16	12	4	25	ND	ND
	26	24	14	3.6	18	ND	ND
Pozo 4	3	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Transformación logarítmica *

Punto	Coliformes fecales	E.coli	Enterococos	Esporas de Clostridium	Bacteriófagos	Giardia	Huevos de helmintos
	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFP/mL	quistes/L	HH/L
ARM-2	6.45	6.45	4.96	3.97	4.86	1300	15
	6.32	6.30	4.88	4.04	4.85	2300	13.60
	6.48	6.45	5.04	4.18	4.86	2400	12.80
Pozo 1	1.18	1.00	ND	0.60	0.78	ND	ND
	0.78	0.48	0.85	0.66	0.85	ND	ND
	1.30	1.11	ND	0.70	0.70	ND	ND
Pozo 2	0.70	ND	ND	0.66	0.78	ND	ND
	1.00	ND	ND	0.70	1.20	ND	ND
	0.85	ND	ND	0.60	0.78	ND	ND
Pozo 3	0.30	ND	0.30	0.66	0.48	ND	ND
	0.30	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	0.60	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Manantial	1.36	1.30	1.00	0.60	1.32	ND	ND
	1.28	1.23	1.11	0.70	1.41	ND	ND
	1.43	1.40	1.18	0.66	1.28	ND	ND
Pozo 4	0.60	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	0.30	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Medias aritméticas de los logaritmos y desviaciones logarítmicas estándar

Punto	CF	σ	<i>E. coli</i>	σ	Enterococos	σ	Esporas <i>Clostridium</i>	σ	B. Somáticos	σ	Giardia	σ	HH	σ
ARM - 2	6.42	0.08	6.40	0.08	4.96	0.11	4.06	0.11	4.86	0.01	2000	608.3	13.8	1.11
Pozo 1	1.09	0.27	0.86	0.34	0.28	0.49	0.65	0.05	0.77	0.07	ND	ND	ND	ND
Pozo 2	0.85	0.15	ND	ND	ND	ND	0.65	0.05	0.92	0.25	ND	ND	ND	ND
Pozo 3	0.40	0.17	0.00	0.00	0.10	0.17	0.22	0.38	0.16	0.28	ND	ND	ND	ND
Manantial	1.36	0.08	1.31	0.08	1.10	0.09	0.65	0.05	1.34	0.07	ND	ND	ND	ND
Pozo 4	0.30	0.30	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

* Para realizar la transformación logarítmica se le añadió 1 a todos los conteos de bacterias y bacteriófagos.

Las medias geométricas y sus respectivos intervalos de confianza se presentan en la sección de resultados. Cabe señalar que a todos los resultados de las medias geométricas se les sustrajo una unidad, de acuerdo al tratamiento estadístico.

ÉPOCA DE LLUVIA

ZONA 3 - ACTOPAN

Conteos directos

Punto	Coliformes fecales	E.coli	Enterococos	Esporas de Clostridium	Bacteriófagos	Giardia	Huevos de helmintos
	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFP/100mL	Quistes/L	HH/L
ARM-3	6.80E+05	7.20E+02	6.20E+01	1.90E+01	2.90E+03	4.60E+03	14.8
	1.40E+05	1.20E+02	4.80E+01	2.80E+01	4.90E+03	9.00E+03	15.4
	5.30E+05	1.00E+02	4.40E+01	2.30E+01	5.50E+03	4.90E+03	18
Pozo 1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 3	8	6	ND	ND	ND	ND	ND
	13	13	ND	ND	ND	ND	ND
	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Manantial	99	43	19	2	ND	ND	ND
	49	43	14	ND	ND	ND	ND
	64	23	11	ND	ND	ND	ND
Noria	2.00E+02	1.10E+02	10	47	97	10	ND
	1.00E+02	1.00E+02	15	39	93	15	ND
	1.10E+02	1.10E+02	23	35	84	15	ND

Transformación logarítmica *

Punto	Coliformes fecales	E.coli	Enterococos	Esporas de Clostridium	Bacteriófagos	Giardia	Huevos de helmintos
	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFC/100mL	UFP/100mL	quistes/L	HH/L
ARM-3	5.83	2.86	1.80	1.30	3.46	4600	14.80
	5.15	2.08	1.69	1.46	3.69	9000	15.40
	5.72	2.00	1.65	1.38	3.74	4900	18.00
Pozo 1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 3	0.95	0.85	ND	ND	ND	ND	ND
	1.15	1.15	ND	ND	ND	ND	ND
	0.30	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Manantial	2.00	1.64	1.30	0.48	ND	ND	ND
	1.70	1.64	1.18	ND	ND	ND	ND
	1.81	1.38	1.08	ND	ND	ND	ND
Noria	2.30	2.05	1.04	1.68	1.99	10	ND
	2.00	2.00	1.20	1.60	1.97	15	ND
	2.05	2.05	1.38	1.56	1.93	15	ND

Medias aritméticas de los logaritmos y desviaciones logarítmicas estándar

Punto	CF	σ	<i>E. coli</i>	σ	Enterococos	σ	Esporas <i>Clostridium</i>	σ	B. Somáticos	σ	Giardia	σ	HH	σ
ARM – 3	5.57	0.37	2.32	0.47	1.71	0.08	1.38	0.08	3.63	0.15	6166.7	2458.3	16.1	1.70
Pozo 1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pozo 3	0.80	0.44	0.66	0.59	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Manantial	1.84	0.15	1.56	0.15	1.19	0.11	0.16	0.28	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Noria	2.12	0.16	2.03	0.02	1.21	0.17	1.61	0.06	1.96	0.03	13.33	2.89	ND	ND

* Para realizar la transformación logarítmica se le añadió 1 a todos los conteos de bacterias y bacteriófagos.

Las medias geométricas y sus respectivos intervalos de confianza se presentan en la sección de resultados. Cabe señalar que a todos los resultados de las medias geométricas se les sustrajo una unidad, de acuerdo al tratamiento estadístico.

ANEXO - D
RESULTADOS DE LA PRUEBA DE LSD - T DE STUDENT

Las pruebas múltiples de medias son útiles para comparar varios promedios de diferentes tratamientos. En este caso de estudio se utilizó la prueba T de Student de diferencias mínimas, el cual permite determinar si existe un efecto en la densidad de coliformes fecales (UFC/100 mL) debido a la temporalidad, la zona, y el tipo de fuente de suministro evaluada.

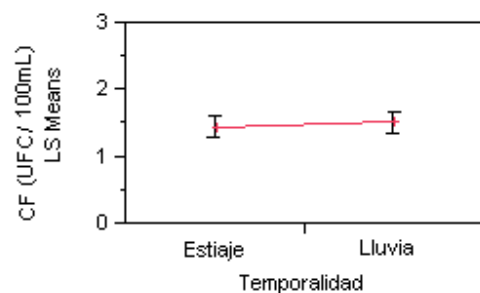
El análisis se realizó por medio del uso del paquete JMP 7. Los datos que se utilizaron se presentan a continuación:

Variable respuesta	Factor		
	Temporalidad	Tipo de fuente	Zona
Log CF (UFC/100mL)			
1.32	estiaje	Pozo	1
1.36	estiaje	Pozo	1
1.46	estiaje	Pozo	1
0	estiaje	Pozo	1
0	estiaje	Pozo	1
0.48	estiaje	Pozo	1
0	estiaje	Pozo	1
0	estiaje	Pozo	1
0	estiaje	Pozo	1
1.91	estiaje	Manantial	1
1.98	estiaje	Manantial	1
2.26	estiaje	Manantial	1
2.28	estiaje	Noria	1
2.26	estiaje	Noria	1
2.40	estiaje	Noria	1
0.60	lluvia	Pozo	1
0.48	lluvia	Pozo	1
0.00	lluvia	Pozo	1
0.78	lluvia	Pozo	1
0.95	lluvia	Pozo	1
0.60	lluvia	Pozo	1
0.00	lluvia	Pozo	1
0.00	lluvia	Pozo	1
0.48	lluvia	Pozo	1
1.34	lluvia	Manantial	1
1.28	lluvia	Manantial	1
1.32	lluvia	Manantial	1
2.90	lluvia	Noria	1
2.80	lluvia	Noria	1
2.99	lluvia	Noria	1

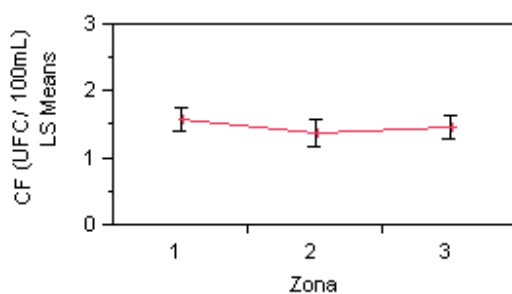
Variable respuesta	Factor		
	Temporalidad	Tipo de fuente	Zona
CF (UFC/100mL)			
0	estiaje	Pozo	2
0	estiaje	Pozo	2
0	estiaje	Pozo	2
0	estiaje	Pozo	2
0	estiaje	Pozo	2
0	estiaje	Pozo	2
0	estiaje	Pozo	2
0	estiaje	Pozo	2
0	estiaje	Pozo	2
0	estiaje	Pozo	2
1.83	estiaje	Manantial	2
1.85	estiaje	Manantial	2
1.81	estiaje	Manantial	2
0	estiaje	Pozo	2
0	estiaje	Pozo	2
0	estiaje	Pozo	2
1.18	lluvia	Pozo	2
0.78	lluvia	Pozo	2
1.30	lluvia	Pozo	2
0.70	lluvia	Pozo	2
1	lluvia	Pozo	2
0.85	lluvia	Pozo	2
0.30	lluvia	Pozo	2
0.30	lluvia	Pozo	2
0.60	lluvia	Pozo	2
1.36	lluvia	Manantial	2
1.28	lluvia	Manantial	2
1.43	lluvia	Manantial	2
0.60	lluvia	Pozo	2
0	lluvia	Pozo	2
0.30	lluvia	Pozo	2

Variable respuesta	Factor		
	Temporalidad	Tipo de fuente	Zona
CF (UFC/100mL)			
0	estiaje	Pozo	3
0.70	estiaje	Pozo	3
0	estiaje	Pozo	3
0	estiaje	Pozo	3
0.48	estiaje	Pozo	3
0	estiaje	Pozo	3
1.04	estiaje	Pozo	3
0.85	estiaje	Pozo	3
1	estiaje	Pozo	3
2.34	estiaje	Manantial	3
2.91	estiaje	Manantial	3
2.45	estiaje	Manantial	3
1.79	estiaje	Noria	3
1.52	estiaje	Noria	3
1.54	estiaje	Noria	3
0	lluvia	Pozo	3
0	lluvia	Pozo	3
0	lluvia	Pozo	3
0	lluvia	Pozo	3
0	lluvia	Pozo	3
0.95	lluvia	Pozo	3
1.15	lluvia	Pozo	3
0.30	lluvia	Pozo	3
2	lluvia	Manantial	3
1.70	lluvia	Manantial	3
1.81	lluvia	Manantial	3
2.30	lluvia	Noria	3
2.00	lluvia	Noria	3
2.05	lluvia	Noria	3

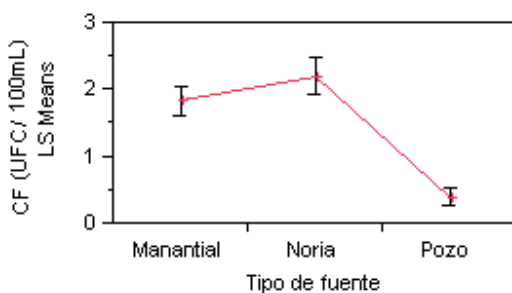
Los resultados arrojados son los siguientes:



$\alpha=0.05$ $t=1.98861$
Temporalidad
Least
Level **Sq Mean**
 Lluvia A 1.5011750
 Estiaje A 1.4354943
 Pvalue = 0.5



$\alpha=0.05$ $t=1.98861$
Zona **Least**
Level **Sq Mean**
 1 A 1.5719663
 3 A 1.4604092
 2 A 1.3726283
 Pvalue = 0.27



$\alpha=0.05$ $t=1.98861$
Tipo de fuente **Least**
Level **Sq Mean**
 Noria A 2.1879818
 Manantial B 1.8260389
 Pozo C 0.3909832
 Pvalue < 0.001

Los niveles que no están conectados por la misma letra (A, B o C) son significativamente diferentes.