



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS VERACRUZ

POSTGRADO EN AGROECOSISTEMAS TROPICALES

**CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y SUPERFICIAL POR
COLIFORMES EN EL AGROECOSISTEMA CON CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum
officinarum* L.) DEL MÓDULO DE RIEGO I-1 LA ANTIGUA, VER. MÉXICO**

JUAN VALENTE MEGCHÚN GARCÍA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

TEPETATES, MANLIO FABIO ALTAMIRANO, VERACRUZ

2013

La presente tesis, titulada: **Contaminación del agua subterránea y superficial por coliformes en el agroecosistemas con caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Ver. México**, realizada por el alumno: **Juan Valente Megchún García**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
AGROECOSISTEMAS TROPICALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. CESÁREO LANDEROS SÁNCHEZ

ASESORA:



DRA. MARÍA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHÁVEZ

ASESOR:



DR. JUAN PABLO MARTÍNEZ DÁVILA

ASESORA:



DRA. ALEJANDRA SOTO ESTRADA

ASESOR:



DR. IOURII NIKOLSKII GAVRILOV

Tepetates, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, 20 de noviembre de 2013

CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y SUPERFICIAL POR COLIFORMES EN EL AGROECOSISTEMA CON CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum* L.) DEL MÓDULO DE RIEGO I-1 LA ANTIGUA, VER. MÉXICO

Juan Valente Megchún García, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2013

La contaminación del agua es un fenómeno de interés mundial, originado, entre otras causas, por actividades antrópicas. Las bacterias coliformes deterioran la calidad del agua y afectan la salud pública. La contaminación del agua superficial y subterránea por coliformes totales y *Escherichia coli* se origina, en general, por fuentes puntuales derivadas de asentamientos humanos, como los ubicados en el Módulo de Riego I-1 La Antigua, Ver. Por tanto, el objetivo de este estudio fue valorar el nivel de contaminación del agua subterránea y superficial por coliformes totales y la presencia de *Escherichia coli*, e identificar las fuentes puntuales de contaminación en el agroecosistema con caña de azúcar del Módulo de Riego I-1 La Antigua. Se hicieron recorridos de campo para localizar los sitios de muestreo: norias, pozos profundos, canales de riego y corrientes naturales e identificar las fuentes puntuales de contaminación. La prueba de Colisure (Colilert) se utilizó para la identificación de los coliformes totales y la presencia de *E. coli*. Los resultados de los coliformes totales muestran diferencias al comparar el agua subterránea, con valores de 198.6 NMP/100 ml, y el agua superficial, con valores de 52 419.2 NMP/100 ml ($p < 0.01$). En agua de riego se observaron valores de 76 501.1 NMP/100 ml; en corrientes naturales los valores fueron de 28 337.3 NMP/100 ml ($p < 0.05$). La mayor concentración de *E. coli* se encontró en el municipio de La Antigua tanto en aguas subterráneas como superficiales. La principal fuente de contaminación son las descargas de los drenajes y fosas sépticas. Los valores obtenidos de coliformes totales superan los límites permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Estos resultados indican que existe contaminación bacteriológica por coliformes totales y *E. coli*, lo que representa un riesgo importante a la salud pública.

Palabras clave: contaminación microbiológica del agua, *Saccharum officinarum*, bacterias entéricas.

SURFACE AND GROUNDWATER CONTAMINACION BY COLIFORMS IN A
SUGARCANE (*Saccharum officinarum* L.) AGROECOSYSTEM IN IRRIGATION
MODULE I-1, LA ANTIGUA, VERACRUZ, MEXICO

Juan Valente Megchún García, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2013

Water contamination and pollution are phenomena of global concern that result from human activities. Coliform bacteria reduce water quality and negatively affect public health and the welfare of other living things. Contamination of surface and groundwater by coliforms and *Escherichia coli* in particular, originates from point-sources draining human settlements, such as those in Irrigation Module I-1 La Antigua, Irrigation District 035, La Antigua, Veracruz. The objective of this study was to assess the contamination level of surface and groundwater for total coliforms and *Escherichia coli*, as well as to identify point-sources of water contamination/pollution by these bacteria in the sugarcane agroecosystem of Irrigation Module I-1, in La Antigua. Sampling sites were identified, including waterwheels, deep wells, irrigation canals and natural streams. Colisure® and Colilert® tests were used to assess total coliforms and *E. coli*. Total coliform results show differences when comparing groundwater (198.6 NMP/100 ml) and surface water (52 419.2 NMP/100 ml) ($p < 0.01$). Values for irrigation water were 76 501.1 NMP/100 ml compared to natural streams whose values were 28 337.3 NMP/100 ml ($p < 0.05$). The highest concentrations of *E. coli* were found in the surface and groundwaters from the urban areas of La Antigua. The primary sources of contamination/pollution are the discharges from drains and septic tanks. The values of total coliforms exceeded permissible limits established by Norma Mexicana NOM-127-SSA1-1994. These results indicate that contamination/pollution by total coliforms and *E. coli* represent significant public health risks.

Keywords: aquatic microbiological contamination, *Saccharum officinarum*, enteric bacteria.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis de Maestría en Ciencias:

A Jehová, Jesús de Nazaret y al Espíritu Santo, por ser la fuerza de mí ser y la motivación principal dentro de esta etapa de mí vida, que me deja como enseñanza, que la sabiduría proviene de Dios a través de su misericordia. ¡Gracias! Jesucristo por ser mí fiel amigo en los momentos buenos y malos, y por ayudar a concluir mis estudios.

No temas, porque yo estoy contigo; no desmayes, porque yo soy tu Dios que te esfuerzo; siempre te ayudaré, siempre te sustentaré con la diestra de mí justicia.

(Isaías 41:10).

A mis padres (Valente Megchún Jiménez y Guadalupe García Cruz), familiares, hermanos en Cristo Jesús y amistades, por ser un vínculo muy importante en mí vida y motivarme a seguir adelante a pesar de las circunstancias difíciles que se presentaron en el trayecto de la maestría. Por tal motivo ofrezco este escrito como un obsequio de gratitud a su valioso apoyo, y como un instrumento que va recordar los lazos de amistad que nos unirán por generaciones. Agradezco su fidelidad, confianza, sinceridad, templanza y sobre todo su amor. *En esto consiste el amor: no en que nosotros hayamos amado a Dios, sino en que él nos amó a nosotros, y envió a su Hijo en propiciación por nuestros pecados* (1 Juan 2: 10).

Comparto este esfuerzo con Yulma Lisbeth Megchún García, Eulises Megchún García, María Guadalupe Megchún García, Rita Palacios Aguilar, Flor García Cruz, Nery García Cruz, Rita Aguilar Fabián, Abieser Escobar Hernández, Edith Escobar Linarez y a toda la familia Megchún-Jiménez, García-Cruz y Palacios-Morales.

Porque Jehová da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia

(Proverbios 2: 6).

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo financiero para desarrollar este proyecto de investigación.

Al Colegio de Postgraduados Campus Veracruz por el apoyo financiero proporcionado (LPI2 “Agroecosistemas Sustentables” y LPI8 “Impacto y Mitigación del Cambio Climático”).

Al Consejo Particular integrado por el Dr. Cesáreo Landeros Sánchez, Dra. María del Refugio Castañeda Chávez, Dr. Juan Pablo Martínez Ávila, Dra. Alejandra Soto Estrada y Dr. Iouri Nikolskii Gavrilov por haber contribuido en mi formación profesional y por la oportunidad que me otorgaron de brindarme su amistad, dedicación y consejos.

Al Dr. Eliseo García Pérez y a todos los integrantes de la Subdirección de Educación del COLPOS-Ver., por el apoyo en las gestiones vinculadas con este departamento.

A la maestra Gloria del Carmen Peraza Rejón, agradezco su apoyo y consejos otorgados.

A la Dra. Fabio Lango Reynoso y al Instituto Tecnológico de Boca del Río (ITBOCA), Ver., por los apoyos financiero, técnico y facilidades de uso de laboratorios proporcionados para los análisis de muestras de agua.

Al personal del Módulo de Riego I-1 La Antigua (COANALAG), Veracruz por su valioso apoyo en la realización de las actividades vinculadas con el proyecto de investigación.

Agradezco al grupo de profesores investigadores, que integran el **Postgrado en Agroecosistemas Tropicales**, por la paciencia, dedicación y entrega en cada uno de los cursos otorgados que aportaron a mi aprendizaje. ¡Gracias!

CONTENIDO	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	4
2.1. El agroecosistema.....	4
2.2. Modelo conceptual no cibernético de contaminación bacteriológica por coliformes totales y <i>Escherichia coli</i> en el Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.....	6
2.2.1. Diseño del modelo conceptual no cibernético.....	8
2.3. Agroecosistema caña de azúcar.....	10
2.4. Contaminación del agua.....	11
2.5. Normas Oficiales Mexicanas.....	13
2.6. Fuentes puntuales de contaminación.....	13
2.6.1. Fosas sépticas.....	15
2.6.2. Drenaje y descargas de aguas negras.....	16
2.7. Agua subterránea y superficial en el agroecosistema.....	17
2.8. Microorganismos patógenos contaminantes del agua subterránea y superficial.....	20
2.9. Estudios recientes de <i>Escherichia coli</i> y su impacto en la salud pública.....	23
3. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	26
4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	29
5. HIPÓTESIS	30
5.1. Hipótesis general.....	30
5.2. Hipótesis particulares.....	30
6. OBJETIVOS	31
6.1. Objetivo general.....	31
6.2. Objetivos particulares.....	31

7. MATERIALES Y MÉTODOS	32
7.1. Caracterización de la zona de estudio.....	32
7.2. Métodos.....	33
7.2.1. Operacionalización de las hipótesis.....	33
7.2.2. Fase de diagnóstico de la zona de estudio.....	33
7.2.3. Muestreo de agua subterránea y superficial en el Módulo de Riego I-1 La Antigua.....	37
7.2.4. Análisis bacteriológico de coliformes totales y <i>E. coli</i> en agua subterránea y superficial.....	37
7.2.5. Análisis estadístico.....	37
 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	 38
8.1. Concentración de coliformes totales (NMP/100 ml) en aguas subterráneas y superficiales.....	38
8.2. Concentración de coliformes totales (NMP/100 ml) en los puntos de muestreo.....	43
8.3. Presencia de <i>E. coli</i> en aguas subterráneas y superficiales, y en los puntos de muestreo.....	48
8.4. Fuentes puntuales de contaminación bacteriológica de coliformes totales y <i>E. coli</i> en el agroecosistema con caña de azúcar.....	54
 9. CONCLUSIONES	 59
10. LITERATURA CITADA	60

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Microorganismos indicadores de la calidad de agua.....	21
Cuadro 2. Operacionalización de la hipótesis de estudio sobre la contaminación y las fuentes puntuales de contaminación bacteriológica por coliformes totales y <i>Escherichia coli</i>	34
Cuadro 3. Puntos de muestreo de agua subterránea del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.....	35
Cuadro 4. Puntos de muestreo de agua superficial del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.....	36
Cuadro 5. Características de los puntos de muestreo de agua subterránea y superficial del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.....	36
Cuadro 6. Concentraciones medias de coliformes totales en agua de los canales de riego, del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.	41
Cuadro 7. <i>Escherichia coli</i> en agua de pozos profundos, norias, corrientes naturales y canales de riego en los municipios del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.....	52
Cuadro 8. Fuentes puntuales de contaminación en los municipios de La Antigua, Paso de Ovejas y Úrsulo Galván.....	56
Cuadro 9. Fuentes puntuales de contaminación en pozos profundos, norias, corrientes naturales y canales de riego del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.....	57

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Modelo conceptual no cibernético de estudio de contaminación bacteriológica por coliformes totales y <i>E. coli</i> en el agroecosistema con caña de azúcar del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.....	8
Figura 2. Esquema estructural de la bacteria <i>Escherichia coli</i>	24
Figura 3. Esquema de la contaminación por coliformes totales y <i>E. coli</i> del agua subterránea y superficial.....	28
Figura 4. Puntos de muestreo: norias, pozos profundos, canales de riego y corrientes naturales del Módulo de Riego I-1 La Antigua, perteneciente al Distrito de Riego 035 La Antigua, Veracruz.....	32
Figura 5. Puntos de muestreo de agua de Pozos (P), Norias (N), Corrientes naturales (Cn) y Canales de riego (Cr) del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.....	34
Figura 6. Concentración de coliformes totales en agua superficial y subterránea en el agroecosistema con caña de azúcar del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.....	39
Figura 7. Concentración de coliformes totales en las diferentes fuentes de abastecimiento de agua del agroecosistema con caña de azúcar....	40
Figura 8. Concentración de coliforme totales por municipio, ubicados en el Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.....	42
Figura 9. Concentración de coliformes totales por localidades, ubicadas en el Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.....	43
Figura 10. Concentración de coliformes totales por punto de muestreo en agua subterránea de pozos profundos.....	44
Figura 11. Concentración de coliformes totales en norias como puntos de muestreo	45
Figura 12. Concentración de coliformes totales por punto de muestreo en corrientes naturales. RA= Río La Antigua, RA. P= Río La Antigua Puente Salmoral, RC= Río Chico, RT. Des.= Descarga Río Tolome.....	46

Figura 13. Concentración de coliformes totales en los puntos de muestreo en canales de riego del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.....	48
Figura 14. Presencia de <i>Escherichia coli</i> en los 32 puntos de muestreo del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz. R1, R2, R3=repeticiones.....	49
Figura 15. Presencia de <i>Escherichia coli</i> en agua subterránea y superficial del Modulo de Riego I-1, La Antigua, Veracruz.....	50
Figura 16. Presencia de <i>Escherichia coli</i> en el agua subterránea y superficial de la zona urbana y rural del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.....	51
Figura 17. Presencia de <i>Escherichia coli</i> en pozos profundos, norias, corrientes naturales y canales de riego del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.....	52
Figura 18. Presencia de <i>Escherichia coli</i> en agua del agroecosistema con caña de azúcar, en los municipios del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.....	53
Figura 19. Fuentes puntuales de contaminación bacteriológica. Drenaje urbano (DU), fosas sépticas (FS) y descargas de aguas negras en el Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.....	55
Figura 20. Fuentes puntuales de contaminación permanentes, localizadas en el Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.....	56

1. INTRODUCCIÓN

Las fuentes de contaminación que ocurren cerca o en las franjas costeras y en el mar deberían ocupar hoy en día uno de los temas de mayor interés en la agenda ambiental, como lo es el fenómeno del cambio climático (Muñoz y Stancich, 2005). Los impactos de la contaminación como la alteración y destrucción de hábitats, los efectos en la salud humana, la disminución de las poblaciones de organismos acuáticos y otros recursos vivos; así como cambios en el flujo de sedimentos, son aspectos vinculados a las fuentes puntuales y no puntuales de contaminación, causados por procesos naturales atmosféricos y terrestres, y actividades antropogénicas que tienen lugar sobre el planeta tierra. Las actividades antropogénicas causan, en gran medida, la contaminación química y biológica del agua subterránea. De esta manera, los microorganismos patógenos son capaces de causar daños a la salud humana. Actualmente, uno de los indicadores utilizados para definir la calidad de agua destinada al consumo humano, de acuerdo a los estándares de la NMX-AA-42-1987, es la presencia de bacterias coliformes. El consumo de agua contaminada con coliformes totales aumenta el riesgo en seres humanos de contraer enfermedades entéricas. Sin embargo, se ha observado que no existe una relación simple entre el nivel de bacterias coliformes en el agua y otro tipo de microorganismos patógenos en ella, y el riesgo de enfermedades. Dentro de las bacterias coliformes totales se pueden distinguir dos clases, que son: los coliformes fecales, provenientes del tracto intestinal de animales de sangre caliente, los cuales pueden ser indicadores de riesgo de afecciones en humanos y el grupo de coliformes totales que son residentes naturales en agua y suelo. Una de las principales bacterias indicadoras de coliformes totales y fecales es *Escherichia coli*; esta bacteria es posiblemente el organismo con más información genética, bioquímica y fisiológica, por lo que es importante conocer su epidemiología para evitar posibles riesgos a la salud humana (Ramírez *et al.*, 2005). Los agroecosistemas son ambientes ecológicos que sufren un proceso de conversión, de ecosistemas a agroecosistemas. Los agroecosistemas también son utilizados para impulsar el desarrollo social a través de áreas productivas intensivas y para el establecimiento de áreas urbanas y rurales (Moreno *et al.*, 2002; Del Ángel *et al.*, 2011; Galaviz *et al.*, 2012). Sin embargo, la intensificación de las actividades en zonas rurales

y urbanas que tienen lugar en la superficie de la tierra, será mayor al compararlas con las actividades que se llevan a cabo en los agroecosistemas y las características del ambiente donde se encuentran los sistemas acuáticos, como las características climáticas, geomorfológicas, edáficas y de uso de la tierra de las cuencas, siendo el escurrimiento superficial y subterráneo uno de los ejes que permite articular entre sí a todas estas variables (Chagas *et al.*, 2006). En particular, llama la atención las áreas sembradas con caña de azúcar localizadas en los Municipios de La Antigua, donde se desarrolla una actividad agrícola importante e intensa relacionada con dicho cultivo. Se estima que actualmente en el estado de Veracruz existe una superficie sembrada de caña de azúcar de 273, 006 hectáreas (SIAP, 2010). En el municipio La Antigua se realizan actividades agropecuarias, donde la principal fuente de abastecimiento de agua para los cultivos y consumo humano proviene de los cuerpos de agua superficiales y de la extracción de agua subterránea de las norias y pozos. Estas fuentes importantes de agua son contaminadas biológicamente por descargas de aguas negras en los ríos, letrinas y fosas sépticas de las casas habitación, rastros, establos ganaderos, entre otros. También es importante mencionar que las condiciones de precipitación que existen en el lugar de estudio, provocan una cantidad de escurrimientos que contienen cierta concentración de organismos, que el aguade lluvia o de riego transporta hacia los mantos acuíferos, corrientes naturales de agua y cuerpos de agua que desembocan en las playas.

Existen estudios sobre la contaminación química y microbiológica en el cultivo de caña de azúcar y su efecto en la calidad del agua del acuífero somero en los Ingenios La Gloria y El Modelo del estado de Veracruz (Landeros *et al.*, 2000). Al respecto, en los muestreos realizados en aguas freáticas de 19 norias, se encontró la presencia de nitrógeno (N-NO₃) rebasando considerablemente los parámetros de calidad de agua para el uso humano señalados por Malleville y Chambolle (1990) y los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua para Uso Potable, según el Diario Oficial de la Federación (1986). Por tal razón, es importante realizar estudios sobre la contaminación por coliformes totales y su impacto en la calidad de agua, en la salud pública y en la salud de los seres vivos en general.

Los sitios donde se acumula estiércol, como son corrales de engorda y las zonas de abrevadero animal son una de las fuentes puntuales de contaminación por coliformes más importantes (Hunter *et al.*, 2000). Se ha reportado que la diarrea es una de las principales causas de mortalidad en México, con 4 millones de casos en 1996. Sin embargo, en el Golfo de México, entre 1995 y 1998, ocurrió un número elevado de casos de cólera causado por la presencia de *Vibrio spp.*, en agua. Esta bacteria no está dentro de la clasificación de organismos coliformes totales y fecales, pero su presencia está íntimamente relacionada con aquella de coliformes en agua superficial y subterránea (Rodríguez y Espejel, 2001). La Secretaria de Comercio y Fomento Industrial, a través de la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-42-1987, señaló que la contaminación fecal es un factor importante en la determinación de la calidad de un cuerpo de agua. Las heces contienen una variedad de microorganismos, tales como los organismos patógenos, los cuales son un riesgo para la salud pública al estar en contacto con el ser humano.

Por tanto, la presente investigación se llevó a cabo con el propósito de valorar el grado de contaminación del agua subterránea y superficial por coliformes totales y la presencia de *E. coli*, así como la identificación de las fuentes puntuales de contaminación del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz, lugar donde se desarrolla una importante actividad agrícola en el cultivo de caña de azúcar.

2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1. El agroecosistema

El concepto de agroecosistema se deriva de las palabras agro-eco y sistemas. El agro se refiere a las actividades agrícolas, pecuarias, forestales, acuícolas y agroindustriales que se realizan en la tierra o campo, con el fin de producir un bien o servicio. El vocablo eco se refiere al ecosistema y tiene el propósito de dar origen al agro cuando es manejado y transformado por el ser humano. El sistema se representa como la actividad productiva que es influenciado por elementos, factores y el hombre que en su conjunto hacen funcionar el sistema (Moreno, 2010). La primera ley de la termodinámica define al “sistema” como una porción de materia o el contenido material de cualquier recinto que quiera considerarse y, a su vez, el sistema está limitado por las paredes o superficies que lo rodean (Lleó, 2001). Al hablar de sistema, nos referimos a la “teoría de sistemas” que está íntimamente vinculada a la cibernética o a la teoría del control y la comunicación (Galaviz *et al.*, 2012). Un sistema es la interrelación de un conjunto de diversos elementos; cuando los elementos del sistema no se relacionan entre sí se considera que no hay sistema. Los sistemas pueden ser físicos, biológicos, económicos, etc. Los sistemas pueden ser cibernéticos o no cibernéticos, esto considera a la cibernética como la ciencia que analiza racionalmente lo que significa gobernar. Esta función puede ser desempeñada por máquinas siempre que éstas sean capaces de captar información del estado de un sistema y de proporcionar órdenes, en función de la información recibida que determine la evolución del sistema. Los sistemas reales se describen como pares de entrada y salida, esto es, el sistema reacciona ante una entrada o estímulo que se manifiesta en una serie de salidas. Los sistemas se dividen en dos grupos, los determinísticos y probabilísticos, los primeros pueden predecir con toda certeza, mientras que en el segundo grupo se basa en la incertidumbre (Arias, 1976). En un sistema se considera que la modificación de uno de sus elementos afecta la totalidad de éste, tal es el caso del sistema social donde la transformación e información potencian la concienciación y participación de todos, y la colectividad de cada uno de los miembros que lo conforman para la satisfacción de necesidades (Parra, 1981). En un sistema hay diferentes movimientos

de entradas, salidas y retroalimentación, pero no son estos quienes definen al sistema, sino las relaciones complejas y las acciones que se producen dentro del mismo, y es a través de la conceptualización de la realidad donde un fenómeno puede ser estudiado y analizado (Farrand y Mendoza, 2005).

Estudiar un agroecosistema resulta muy complejo. Para su estudio se puede considerar como un modelo conceptual, así como la unidad óptima para su estudio y transformación. Es influenciado por los factores culturales, políticos y biológicos que se encuentran en constante dinámica en el tiempo y espacio (Galaviz *et al.*, 2012). El concepto de agroecosistema, se presenta como una opción para su manejo eficiente en lo económico, social y ambiental. Por tanto, el agroecosistema (AST) es un modelo conceptual de la actividad agrícola en su nivel mínimo de control cibernético humano. Se considera la unidad óptima para el estudio de la agricultura y para su propia transformación; está integrado a un sistema agrícola y rural regional, a través de cadenas de producción-consumo, con interferencias de política y cultura de instituciones públicas y privadas. El AST es un sistema contingente abierto y construido a partir de la modificación social de un sistema natural; posee procesos dinámicos de retroalimentación y control, regulados y autorregulados, como respuesta a variaciones internas y de su entorno. La dimensión espacial, biodiversidad y objetivos del Agroecosistema dependen del tipo de controlador que lo regula, de los recursos que éste maneja y de sus interrelaciones con el entorno complejo (Martínez *et al.*, 2011; Del Ángel *et al.*, 2011; Galaviz *et al.*, 2012). Es pertinente señalar que en este estudio el enfoque de agroecosistema empleado fue el estructural funcionalista, esto es, no se consideró la participación del controlador, ya que se estudió solamente uno de los procesos que ocurren en el agroecosistema, es decir, la contaminación bacteriológica. También se resalta que el agroecosistema con caña de azúcar bajo estudio, lo representa la zona cañera del Módulo de Riego I-1 La Antigua, en la que se encuentran los puntos de muestro de agua incluidos en esta investigación; la superficie que abarca dicha zona cañera es de 13 793 ha.

Sin duda la intervención humana ha jugado un papel importante en la transformación de los ecosistemas para la producción de bienes y servicios. Altieri (1999), el

agroecosistema tiene el propósito de aumentar la proporción de energía solar captada, a través de las comunidades de plantas encargadas de absorberla y dejarla disponible para cubrir las necesidades de alimentación de los seres humanos. Aun así son los mismos actores humanos, quienes han simplificado la estructura del ambiente sobre vastas áreas, reemplazando la diversidad de la naturaleza en sistemas de cultivos y animales domésticos; pero a pesar de que los agroecosistemas modernos han demostrado estar capacitados para mantener una población creciente, existe una prueba considerable de que el equilibrio ecológico en estos sistemas artificiales es frágil. Debido a que los ecosistemas por naturaleza proveen de una inmensa variedad de servicios, dentro de los más apreciados y amenazados es el mantenimiento de la calidad del agua. En respuesta a esta situación alrededor del mundo, se han desarrollado mecanismos innovadores tendientes a proveer agua de calidad mediante la conservación y rehabilitación de cuencas hidrográficas (Cordero, 2008). Éstas, han sido modificadas para el desarrollo de diversas actividades, como lo son: la agrícola, pecuaria, acuícola y forestal para la producción de bienes y servicios que demanda la sociedad hoy en día.

Si bien es cierto que los agroecosistemas proporcionan un conjunto de bienes y servicios para la sociedad, es importante aclarar que para el estudio de cualquier fenómeno que ocurra dentro de él, se requiere considerar a la sociedad como el principal orquestador y consumidor de los productos de los agroecosistemas, debido a que los agroecosistemas y la sociedad están íntimamente relacionados.

2.2. Modelo conceptual no cibernético de contaminación bacteriológica por coliformes totales y *Escherichia coli* en el Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz

El modelo conceptual del agroecosistema donde ocurre la contaminación bacteriológica por coliformes totales y la presencia de *E. coli* del Módulo de Riego I-1 La Antigua, se muestra en la Figura 1. Éste incluye el ecosistema donde se encuentra el agua subterránea y superficial, como uno de los principales recursos que los pobladores de los municipios La Antigua, Manlio Fabio Altamirano, Paso de Ovejas, Puente Nacional y Úrsulo Galván, utilizan para sus diferentes actividades agrícolas, pecuarias, consumo

humano y recreacionales. El Módulo de Riego I-1 La Antigua está asentado en la región administrativa X Golfo Centro y cuenta con una superficie de 13 793 ha, el cual proporciona agua subterránea, para el servicio de la sociedad, mediante pozos profundos, norias y agua superficial mediante canales de riego y corrientes naturales. La institución que ejerce una función normativa para la obtención y administración de este recurso es la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), institución encargada de administrar el agua de los pozos profundos, aquí estudiados, que se encuentran en las zonas urbanas y rurales. El volumen de agua que se extrae de estas fuentes se utiliza, en su mayoría, para el uso doméstico-urbano y, en menor proporción, para la agricultura.

Con respecto al agua superficial, el río La Antigua es uno de los más importantes cuya agua beneficia a los productores de caña de azúcar (*Saccharum officinarum L.*), hortalizas y frutales tropicales que forman parte del Módulo de Riego I-1 La Antigua. Este Módulo de Riego ejerce una función normativa y es responsable de proporcionar y administrar el agua a los usuarios de caña de azúcar y otros cultivos. Existen afluentes, como el río Chico y Tolome, que son tributarios del río La Antigua y contribuyen al desarrollo de la ganadería, agricultura y pesca.

Los usuarios ubicados en el área de estudio, tienen norias en sus predios y viviendas, para abastecerse de agua para el uso doméstico y actividades vinculadas con la agricultura. El Ingenio El Modelo participa dentro de este Módulo de Riego I-1 La Antigua con la industrialización de la caña de azúcar.

Los usuarios y sus familias del Módulo de Riego I-1 La Antigua se localizan en los municipios de La Antigua, Manlio Fabio Altamirano, Paso de ovejas, Puente Nacional y Úrsulo Galván. Las principales fuentes puntuales de contaminación bacteriológica, como las descargas de aguas negras y desechos de nosocomios, se originan de estos municipios. Tales descargas y desechos son vertidos a las corrientes naturales de agua superficial y a los principales canales de riego que se encuentran ubicados en la zona urbana y rural. De esta manera, el agua que se utiliza para las parcelas de caña de azúcar se contamina, los canales de riego y corrientes naturales la transportan hacia diferentes lugares. Lo anterior resulta, eventualmente, en la contaminación del agua

subterránea. En la zonas rural y urbana se encuentran localizadas las fuentes puntuales de contaminación, tales como las fosas sépticas, letrinas, establos de ganado, rastros y las fuentes no puntuales de contaminación bacteriológica.

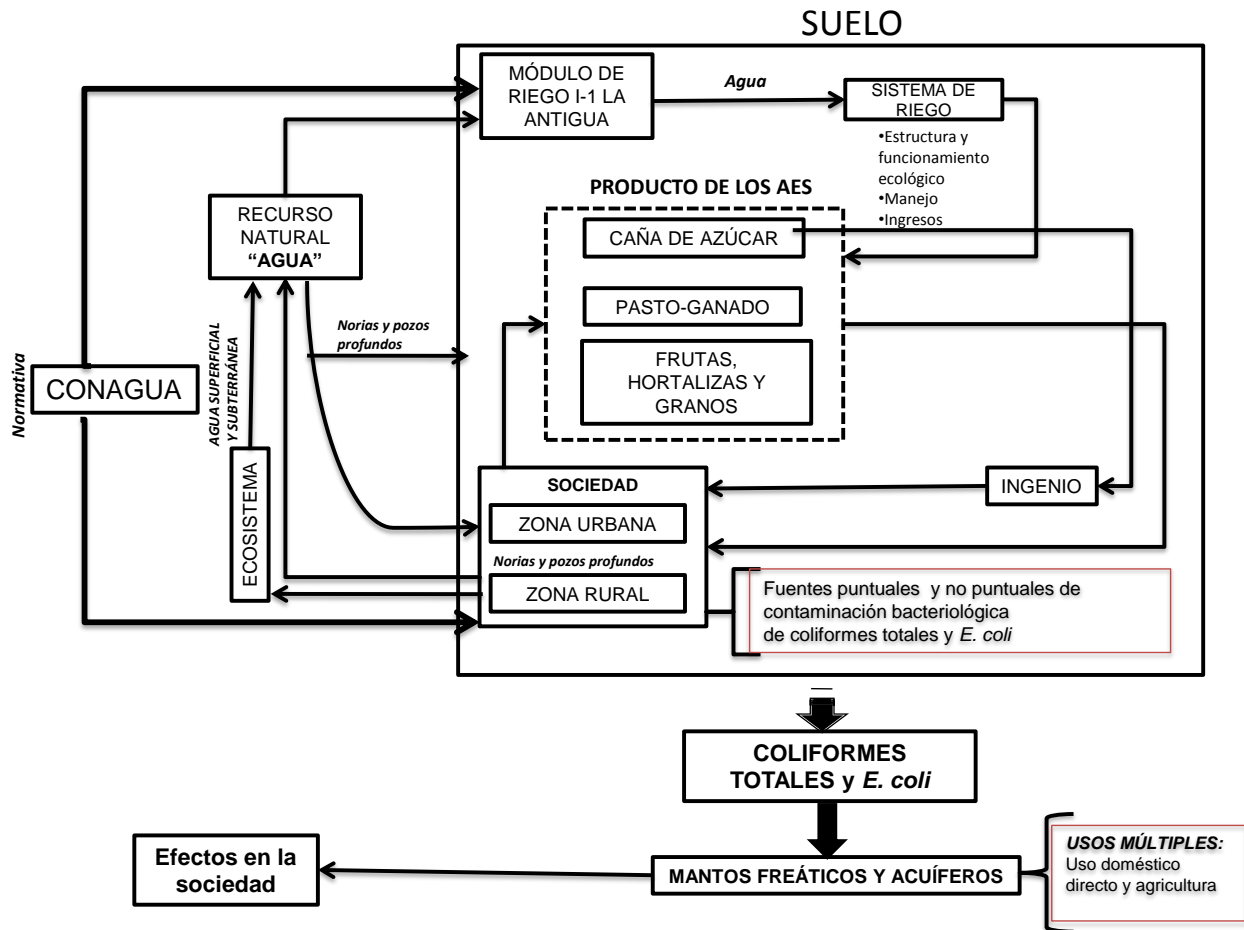


Figura 1. Modelo conceptual no cibernético de estudio de contaminación bacteriológica por coliformes totales y *E. coli* en el agroecosistema con caña de azúcar del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.

2.2.1. Diseño del modelo conceptual no cibernético

El diseño del modelo conceptual no cibernético del agroecosistema con caña de azúcar del Módulo de Riego I-1 La Antigua (Figura 1), se realizó con base en el enfoque de agroecosistemas, partiendo de que el objeto de estudio es un conjunto de partes interdependientes, con estructura y función diferentes del ambiente donde están

insertados, y les permite establecer relaciones entre los elementos del sistema (Galaviz *et al.*, 2012). Este modelo conceptual se sustenta en el enfoque estructural-funcionalista y no considera al controlador dentro del agroecosistema, se fundamenta en el entendimiento del fenómeno de contaminación bacteriológica reportado en investigaciones relacionadas con la contaminación del agua subterránea y superficial por coliformes totales y *E. coli*, y su impacto en la salud humana (Wong y Barrera, 1996). Además, tiene como soporte la hipótesis de trabajo de este estudio, cuyo enunciado es: El nivel de contaminación microbiológica por coliformes totales y *Escherichia coli* en el agua subterránea y superficial del agroecosistema con caña de azúcar del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz, es función de las fuentes puntuales de contaminación existentes en el área de estudio. Un factor importante que influye en la contaminación bacteriológica son las condiciones climáticas. *Escherichia coli* puede sobrevivir en el agua subterránea debido a su capacidad de multiresistencia (Juárez *et al.*, 2003).

Esto refuerza la teoría de migración de coliformes totales a través del perfil del suelo, ya que estas bacterias son altamente adsorbibles por el suelo. El riesgo de contaminación bacteriológica de las aguas subterráneas es mayor, cuando el nivel del acuífero está más cerca a la superficie del terreno (Ferguson *et al.*, 2003 y Guber *et al.*, 2005). Existe evidencia científica desde 1996 a la fecha, de la presencia de coliformes totales y *E. coli* en agua de los sistemas lagunares (agua dulce) y de los recursos pesqueros (agua salada) para consumo humano, de Veracruz (Lango *et al.*, 2012). En el diseño de este modelo conceptual se consideraron también las características del Módulo de Riego I-1 La Antigua. Por lo tanto, se prevé la presencia de altas concentraciones de bacterias coliformes en pozos profundos y norias en la zona bajo estudio. Tal situación es muy probable que pueda ocurrir en otros estados de la república. Las fuentes puntuales de contaminación bacteriológica, como son las fosas sépticas, letrinas y descargas de aguas negras en las principales corrientes naturales y canales de riego son la causa principal de la contaminación por coliformes totales y *E. coli* del agua subterránea y superficial. El impacto de *E. coli* en la salud humana es evidente debido a que puede causar enfermedades entéricas como Síndrome Urémico Hemolítico (Pérez y Rodríguez, 2009); colitis hemorrágica y cuadro de disentería.

Además, puede ser la responsable de la muerte en niños de 1 a 8 años de edad por diarrea o en adultos por la enfermedad conocida como diarrea del viajero (Landeros *et al.*, 2012).

En este análisis realizado en el Módulo de Riego I-1 La Antigua de acuerdo a este modelo conceptual, la contaminación del agua subterránea y superficial por coliformes totales y *Escherichia coli* es evidentemente el resultado de actividades antropogénicas. Esto es, las descargas de fuentes de contaminación puntuales y no puntuales pueden estar causando, por la falta de tratamiento de aguas residuales, concentraciones bacteriológicas, cuyos niveles pueden superar los límites permisibles establecidos en las Normas Mexicanas. Tal situación puede estar ocurriendo en una cantidad importante de municipios del país.

2.3. Agroecosistema caña de azúcar

El agroecosistema con caña de azúcar, se caracteriza en la actualidad por poseer un fuerte potencial económico en México. El uso de la caña de azúcar es muy amplio, desde la elaboración de azúcar, alcohol, bioetanol y otros subproductos de menor importancia, en muchos países de América Latina y Asia, contribuye a la generación de empleos y es una de las principales fuentes de ingresos (Moreno, 2010). En nuestro país se cultiva esta gramínea en 15 estados como Campeche, Chiapas, Colima, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas y Veracruz, en un área de 812 000 ha. En estos Estados, cincuenta y siete ingenios azucareros tienen un impacto económico directo en 2.2 millones de personas, con una producción económica de 3 000 millones de dólares anuales, de los cuales el 57 % está distribuido entre 164 000 productores de caña de azúcar (Armida *et al.*, 2011). Se considera que el estado de Veracruz ocupa el primer lugar en producción de caña de azúcar (Pérez y Ortiz, 2002). La actual superficie cañera en la zona centro del estado de Veracruz es producto de las modificaciones que han experimentado los distintos ecosistemas. Estos sistemas de producción tienen la finalidad de buscar mejores formas de obtención de bienes y servicios. Un ejemplo puntual es el caso de los municipios colindantes a La Antigua, Veracruz, municipio donde actualmente se cultiva la caña de azúcar. Esta área estaba anteriormente

cubierta de bosque, principalmente en el área localizada entre Zempoala y Quiahuitlan; este lugar fue abandonado en 1543 con la muerte de los habitantes nativos. En el siglo XVII los sistemas de producción ganadera ubicados en la franja costera y de intermontañas, fueron reemplazados por plantaciones de caña de azúcar con el propósito de impulsar una refinería de azúcar (Del Ángel *et al.*, 2011). En Veracruz, los rendimientos de caña de azúcar en las diferentes regiones son cercanos a las 100 toneladas por ha; tal es el caso del Módulo de Riego I-1 La Antigua Veracruz, al que pertenecen los Ingenios azucareros La Gloria y El Modelo (Moreno, 2010). Actualmente las superficies sembradas con caña de azúcar y las actividades ganaderas, destinadas a la producción lechera, ejercen un impacto ecológico sobre la calidad de los sistemas acuáticos, al contaminar el manto acuífero con bacterias coliformes fecales (*E. coli*). Este fenómeno es atribuido a la falta de tratamiento de las aguas negras, a la intensificación de la actividad agrícola y, principalmente, a los desechos fecales del ganado vacuno que son vertidos a las corrientes naturales, este fenómeno es considerado una fuente de contaminación no puntual (Chaves y Araya, 2002).

2.4. Contaminación del agua

La palabra contaminación deriva del latín *contāmīnō*, -āre, -āvī, -ātum (cum, tāmīnō), que significa mezclar, refundir, contaminar, ensuciar, corromper y profanar (Segura, 1985). La contaminación tiene sus orígenes en el primer principio de la Ley de la Termodinámica, esto es, la materia y la energía no se crean ni se destruyen, esto consiste que los sistemas realizan procesos térmicos-mecánicos o “termodinámicos” que se cumplen en la naturaleza (Lleó, 2001). Por tanto, para que un sistema se mantenga en equilibrio, cualquier materia o energía que entre en él deberá ser acomodada por dispersión, descomposición, reciclaje o almacenamiento en alguna forma no nociva. Si la condición anterior se cumple, el sistema no se contaminará. Por lo que el sistema puede ser un río, un sistema de riego o el agua que circula en el interior del suelo, la cual, al acumular cualquier forma de materia o energía (microorganismos, materia orgánica), genera la contaminación. La contaminación del agua también se puede definir como el nivel de impurificación que puede originar efectos adversos a la salud de un número representativo de individuos durante un

periodo de tiempo, causado por el crecimiento demográfico, desarrollo industrial y urbanización. Estos factores tienen la capacidad de evolucionar rápidamente y se relacionan entre si (Martínez *et al.*, 2009).

Este fenómeno se define también como la alteración de un ambiente, especialmente con sustancias y energía generadas por el hombre (Krupa, 1999). La contaminación es un problema de interés mundial para la humanidad y se define como la adición de energía o sustancia que alteran el estado natural de un ambiente, causado por las actividades antropogénicas que tienen lugar en la superficie de la tierra (Krupa, 1999; Pérez y Landeros, 2009; Rebolledo *et al.*, 2011). La contaminación microbiológica es causada por organismos (virus, bacterias, protozoarios y hongos), que provienen principalmente de las descargas de aguas negras como producto del incremento del desarrollo demográfico e industrial, además de los procesos fisicoquímicos y ecofísicos, que ocurren en los sistemas acuáticos, (Wong y Barrera, 1996; Martínez *et al.*, 2009; Lango *et al.*, 2010). La contaminación de origen doméstico genera un alto riesgo a nivel sanitario, debido a las altas concentraciones de microorganismos de origen fecal que se pueden encontrar como las bacterias, virus y parásitos. En el caso de bacterias del grupo de coliformes fecales, *E. coli* y *Enterococcus faecalis* se han empleado como indicadores de contaminación de agua potable, aguas residuales y de uso recreativo. Para el caso de la contaminación fecal se ha propuesto el uso de *Clostridium perfringens* y como posible indicador de contaminación de agua subterránea la presencia de quistes de protozoos (Campos *et al.*, 2008).

Por otra parte el agua de los principales cuerpos de agua está concebida como vulnerable, ante la potencial pérdida de la calidad del agua subterránea, debido al nivel de exposición natural de los acuíferos. La contaminación bacteriológica del agua subterránea puede deberse a diferentes factores y causas como las características del suelo. Un ejemplo de lo anterior, es lo reportado en estudios realizados en la Península de Yucatán, donde se menciona que la amenaza de la contaminación físico-química y bacteriológica se origina por la presencia de rocas del tipo evaporitas que al solubilizarse incorporan agua contaminada de la superficie y por la intrusión salina en las zonas costeras (Bautista *et al.*, 2011).

La contaminación también es provocada por la intensificación de las actividades productivas en los agroecosistemas. Se dice que existe contaminación bacteriológica por coliformes totales y *E. coli* ocurre cuando la concentración de éstas en el agua supera los límites permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, la cual se refiere a la calidad de agua para uso y consumo humano.

2.5. Normas Oficiales Mexicanas

La Norma Oficial Mexicana NOM 127-SSA1-1994, de salud ambiental, agua para uso y consumo humano establece los límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. El límite permisible para coliformes totales el de 2 NMP/100 ml ó 2 UFC/100 ml, para *E. coli* los límites permisibles se consideran no detectables (cero) de UFC ó NMP/100 ml de agua. La Norma Oficial Mexicana NOM-033-ECOL-1997 establece como límite máximo permisible de coliformes fecales 240 NMP/100 ml de agua para el agua de reuso destinado al uso público con contacto directo y una concentración de coliformes fecales de 1000 NMP/100 ml de agua, para el agua de reuso destinada al uso público con contacto indirecto u ocasional.

2.6. Fuentes puntuales de contaminación

El origen de la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas lo constituyen, principalmente, las fuentes puntuales y no puntuales (Perdomo *et al.*, 2001).

Las fuentes de contaminación puntuales son todo tipo de descargas directas con desechos que son vertidos en los cuerpos de agua y tienen la característica de ser distinguibles como las letrinas, fosas sépticas, desechos de las plantas industriales, desechos municipales y sitios de extracción, explotación y construcción (aprovechamientos forestales, minería, etc.). Las fuentes industriales aportan, en general, contaminantes como son nutrientes, metales pesados, compuestos orgánicos específicos que afectan las propiedades físico-químicas específicas como pH, salinidad, demanda de oxígeno, dureza, etc. Entre los desechos se encuentran componentes como los microorganismos patógenos, nutrientes y carbono orgánico, combinándose con aceites, grasas y productos químicos derivados de las industrias,

los cuales entran en las corrientes de desechos domésticos a través de los sistemas de alcantarillado y la escorrentía pluvial. Los desechos industriales contienen además cantidades altas de materia orgánica, provenientes de las plantas procesadoras de alimentos y bebidas, y de la industria del cuero y de la madera (Camargo y Alonso, 2007). Los depósitos de residuos orgánicos son fuentes puntuales de contaminación que contaminan bacteriológicamente el agua subterránea de los pozos y norias (Perdomo *et al.*, 2001).

Las fuentes de contaminación no puntuales terrestres son conocidas también como “fuentes difusas”; se generan por una gama amplia de actividades humanas en la que los contaminantes producidos por ellas, y contenidos en sus descargas, no tienen un punto obvio de entrada a los cuerpos de agua receptores (Ongley, 1997; Martínez *et al.*, 2009). Ambas fuentes se suman al llegar a los ríos y desembocan a los mares en puntos donde evidentemente la concentración de contaminantes es alta. Esta situación ha sido identificada como la causante de la eutrofización y la marea roja en la costa (Bautista *et al.*, 2011). Actualmente las principales fuentes de contaminación que están deteriorando la calidad de las corrientes de agua y del acuífero son las no puntuales que corresponden a la agricultura, por el uso de pesticidas, así como el aporte de residuos de insumos agrícolas y restos vegetales y animales (Bautista *et al.*, 2011), produciéndose también, de esta manera, la contaminación de las corrientes de agua y acuíferos. La actividad forestal intensiva, sobre todo de plantaciones, es también una fuente de contaminantes difusa y produce, al igual que la actividad agrícola, cargas de nutrientes, pesticidas y sedimentos. El efecto principal de la agricultura y la actividad forestal se manifiesta en una mayor movilización de sedimentos, nutrientes y material en forma de partículas (GESAMP, 2001). La contaminación del agua superficial y subterránea, causada por fuentes no-puntuales, se ha convertido en un tema de gran importancia y controversia en los últimos años, señalándose a la agricultura como uno de los contribuyentes principales (Sasson *et al.*, 1993). Se tiene la certeza de que la mayor concentración de materia orgánica con presencia de bacterias se encuentran en la superficie donde se realizan las actividades pecuarias y, en menor proporción, la agrícola; este fenómeno se origina por la intesificación de los sistemas agropecuarios de las áreas rurales (Herrero *et al.*, 2000).

2.6.1. Fosas sépticas

La Agencia de Protección al Ambiente (EPA, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos define a un sistema de tratamiento de agua residual, como un recipiente hermético diseñado y construido para recibir las aguas de desecho de una casa, para separar los sólidos de los líquidos, suministrar una digestión limitada a la materia orgánica retenida, almacenar sólidos y permitir que el líquido clarificado sea descargado para su posterior tratamiento y disposición (Méndez *et al.*, 2007). El uso de fosas sépticas, letrinas o tanques sépticos, se originaron en la Isla de Creta hace más de 4000 años; el uso de cloacas (alcantarillado sin tratamiento), se remonta hasta hace 2000 años en las culturas egipcia, griega y romana, donde avanzaron con el uso del inodoro, cuyo símbolo era la “Cloaca Máxima Romana”. Sin embargo, fueron clausurados porque fomentaban la promiscuidad sexual (Mora y Felipe, 2008). Las cámaras sépticas son las responsables de la contaminación por bacterias coliformes del agua que se encuentran en pozos para consumo humano, por lo cual esto sería un dato importante a considerar para el diseño y ubicación de las norias y pozos profundos, debido a que este fenómeno ocurre regularmente en las zonas rurales (Perdomo *et al.*, 2001). En la ciudad de Mérida la mayor parte del agua residual está siendo colocada directamente al subsuelo a través de tanques sépticos, sumideros, letrinas y en redes de alcantarillado sanitario conectados a pozos profundos a través de los cuales se inyecta el agua residual al manto salino que se infiltra, a su vez, al agua dulce (Méndez *et al.*, 2007). Las fosas sépticas solo remueven menos del 50% de los sólidos disueltos y los efluentes no cumplen con la normatividad nacional de la NOM-067-ECOL de 1994. Por lo cual, éstas son una fuente puntual de contaminación importante para el acuífero y el impacto es más severo si la profundidad es menor a los 40 m. La Universidad Autónoma de Yucatán ha ensayado con reactores anaerobios para diferentes sustratos; sin embargo, estos sistemas de tratamiento de aguas residuales son ineficientes y lentos para las áreas industriales densamente pobladas (Méndez-Novelo *et al.*, 2012). La Norma Oficial Mexicana NOM-006-CNA-1997, define la fosa séptica prefabricada como el elemento de tratamiento diseñado y construido para recibir las descargas de aguas residuales domiciliarias que al proporcionar un tiempo de permanencia adecuado (tiempo de retención), es capaz de separar,

parcialmente, los sólidos suspendidos, digerir una fracción de la materia orgánica presente y retener temporalmente los lodos, natas y espumas generadas.

2.6.2. Drenaje y descargas de aguas negras

El aprovechamiento de las aguas residuales para riego agrícola podría en un principio presuponer una mayor exigencia en la calidad para su uso; además, puede considerarse de riesgo para la salud humana, por la cantidad de microorganismos patógenos y no patógenos que se encuentran en ellas (Sarabia *et al.*, 2011). En Yucatán se vierten 50 millones de metros cúbicos de aguas residuales provenientes de la industria, acuacultura, porcicultura y los servicios; así como 130 millones de metros cúbicos de aguas residuales derivadas del uso público urbano, el cual es la principal causa de la contaminación (Bautista *et al.*, 2011). En Xochimilco, D.F., en las aguas superficiales y las aguas tratadas que se descargan en los principales canales de tratamiento de aguas residuales, han detectado coliformes totales (Juárez *et al.*, 2003). En diversos países del mundo, se valora la calidad de las aguas residuales para el uso en riego localizado o en cultivos hidropónicos, utilizándose los parámetros de calidad de agua superficial y subterránea. Tal es el caso de Venezuela, donde el mayor volumen de agua residual se concentra en las zonas con alta densidad de población. Sin embargo, en las zonas áridas y semi-áridas del mundo, el uso de agua residual en los cultivos cobra mayor importancia para la sobrevivencia y desarrollo socioeconómico de la poblaciones. Además, contribuye al mejoramiento de la fertilidad de los suelos, aunque existe la probabilidad de generar problemas a la salud humana por la presencia de coliformes (Ramón *et al.*, 2009). A partir de la década de los 90's en varios países como Estados Unidos de América (EUA), Israel, México, China, entre otros, cobró importancia el uso de aguas negras para la producción agrícola, principalmente en zonas de rápido crecimiento demográfico. Por lo que los diversos organismos internacionales, como el Banco Mundial y la Organización Mundial de la Salud (OMS), propusieron un modelo que describe los riesgos de la salud relacionados con el empleo de agua residual en la agricultura y la acuacultura (Cifuentes *et al.*, 1994). Actualmente las descargas de aguas residuales provenientes de las zonas urbanas, agrícolas e industriales, han provocado un impacto ecológico negativo sobre las aguas

superficiales, como es el caso de la zona de Alvarado Veracruz, donde la contaminación por bacterias patógenas ha impactado la producción de mariscos (Castañeda *et al.*, 2005).

2.7. Agua subterránea y superficial en el agroecosistema

La palabra agua deriva del latín *aqua*, y la palabra subterráneo del latín *subterraneus* que significa que está debajo de la tierra (Segura, 1985). Por lo consiguiente al hablar de agua subterránea estamos hablando del agua que está debajo de la tierra. Se puede encontrar entre grietas y espacios que hay en la tierra, formados por corpúsculos de arena y piedras, constituyendo así las zonas saturadas, conocidas como acuíferos (Pacheco *et al.*, 2004 y Sarabia *et al.*, 2011).

El agua se considera el compuesto que no tiene sustituto e indispensable para el desarrollo, origen y mantenimiento de la vida; además, regula el clima del planeta y permite la existencia de los ecosistemas y la humanidad. El agua químicamente pura es un líquido inodoro, incoloro e insípido, y transparente en capas de poco espesor, que toma el color azul cuando se mira a través de espesores de 6 a 8 m ya que tiene la capacidad de absorber las radiaciones infrarrojas. Con la presión atmosférica normal (760 mm Hg), el punto de congelación del agua es a 0 °C y su punto de ebullición a 100 °C, alcanza su densidad máxima a una temperatura de 4 °C y se expande al congelarse (Martinez *et al.*, 2009). El agua dulce que se utiliza proviene de dos fuentes, del agua superficial (ríos, lagos, pantanos y depósitos artificiales) y del agua subterránea (acuíferos).

Anteriormente se mencionó que el agua subterránea está almacenada en los acuíferos; sin embargo, es importante mencionar que el acuífero se define como la “formación geológica fisurada o porosa saturada con suficiente permeabilidad para permitir el flujo de agua en cantidades significativas hacia manantiales o hacia captaciones usuales, como pozos o galerías” (De la Isla, 2007). Este puede dividirse de acuerdo a sus características geológicas en: acuífero artesiano, el cual es un “acuífero confinado o en el que hay un pozo artesiano (Artesa: cuenca fluvial de fondo plano y dimensiones reducidas)”; acuífero cautivo o confinado, es decir, un “acuífero en el que la presión del

agua es superior a la atmosférica y en el que no se produce flujo de agua subterránea a través de su techo o muro”, y el acuífero libre o freático que se refiere al “acuífero cuyo límite superior está formado por una superficie freática o libre en la que la presión del agua es igual a la atmosférica” (De la Isla, 2007).

Actualmente el balance entre la disponibilidad de agua, tanto superficial como subterránea, en varias regiones hidrológicas de México es desfavorable; 104 de los 600 acuíferos están sobreexplotados, principalmente en las regiones áridas con poca disponibilidad de agua para satisfacer la demanda de los servicios municipales e industriales. La Comisión Nacional del Agua (CNA) estima que los escurrimientos en el país son de 1 522 km³, de los cuales 410 escurren, 1 064 se evapotranspiran y 48 se percolan a los acuíferos, anualmente; y se induce una recarga de 15 km³ a los acuíferos. La disponibilidad de agua subterránea es del orden de 473 km³ para una población de 100 millones de personas, lo que equivale a 4 000 m³ por persona (Palacios, 2007).

La CNA reportó que el acuífero de la zona costera central de Veracruz abarca nueve municipios, de los cuales Veracruz está abarcado en su totalidad y en forma parcial los municipios de Boca del Río, La Antigua, Jamapa, Manlio Fabio Altamirano, Medellín de Bravo, Paso de Ovejas, Puente Nacional y Soledad de Doblado (CNA, 2001 y Galaviz, 2010).

Sin duda, el agua subterránea es un recurso que puede impactar y revolucionar la agricultura, impulsando el desarrollo socioeconómico de las poblaciones donde se pueden analizar valores, culturas, conocimientos tradicionales, dinámica de mercados, nuevas tecnologías, etc., (Arrojo, 2001). Quizás el problema más importante para el futuro en cuanto al abastecimiento de las zonas urbanas con aguas subterráneas, es el deterioro progresivo de la calidad de la misma (Carles *et al.*, 2001).

Foster *et al.*, (2007) indicó que algunos de los principales motivos por los cuales se deben proteger las fuentes de abastecimiento de agua subterránea son:

- El agua subterránea es un recurso vital para el suministro confiable y económico de agua para consumo humano en los ámbitos urbano y rural. Juega un papel

fundamental en el bienestar humano y de algunos ecosistemas acuáticos y terrestres, pero a menudo es muy poco valorado.

- La cantidad y calidad de agua son factores fundamentales para el abastecimiento de agua a los municipios. El agua subterránea es la mejor fuente de abastecimiento menos contaminada por ser un recurso protegido; el tratamiento (desinfección preventiva) de ésta debería ser, en su caso, el último recurso.
- Las actividades antrópicas han contribuido al deterioro de la calidad del agua subterránea y los usuarios de ésta no han tomado acciones puntuales para proteger la calidad de la misma.
- A nivel mundial, los acuíferos experimentan una creciente amenaza de contaminación ocasionada por la urbanización, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y la explotación minera. Por lo tanto, se requieren campañas proactivas y acciones prácticas que protejan la calidad del agua de éstos.

También es importante conocer los flujos del agua subterránea, ya que esto permite conocer las áreas de recarga, las rutas de tránsito y sus velocidades, los destinos del agua y la identificación de las vías de intrusión salina (Bautista *et al.*, 2011). Las aguas subterráneas son los principales medios receptores de contaminantes, ya que una vez que el contaminante se incorpora al agua subterránea es difícil de eliminarlo. Lo anterior llega a convertirse un proceso irreversible (De las Heras y Moreno, 2005). El estudio de las aguas superficiales ha sido de vital importancia, principalmente por las inundaciones que ocurren a nivel mundial. Tales inundaciones ocasionan pérdidas humanas, destrucción de viviendas y afectaciones en las actividades económicas. En Veracruz se registran frecuentemente inundaciones provocados por los fenómenos hidrometeorológicos. Este estado concentra el mayor volumen de agua superficial, ya que sus ríos descargan al mar más del 30% del caudal de todos los ríos del país (Pérez y Ortiz, 2002).

Además, la contaminación de las aguas superficiales tienen su origen en las fuentes de contaminación puntuales y difusas que se originan de la actividad urbana, periurbana y rural, y de las acciones humanas como la construcción de presas, canales, caminos,

intensificación de los cultivos, tala de árboles y las descargas industriales (Chagas *et al.*, 2006).

2.8. Microorganismos patógenos contaminantes del agua subterránea y superficial

Los procesos globales como el cambio climático afectan directamente la disponibilidad del agua para decenas de millones de personas en diferentes partes del mundo. Por otra parte, el efecto del deshielo de los glaciares ha repercutido a través de fenómenos extremos como inundaciones y sequías. Éstos están afectando las aguas continentales más importantes que el planeta posee, entre ellos, los ríos, lagunas, humedales y aguas subterráneas. Por lo tanto, los recursos naturales que están establecidos dentro de los sistemas ecológicos se encuentran amenazados por la urbanización descontrolada, el desarrollo industrial, la deforestación, la conversión de los agroecosistemas para uso agrícola-ganadero y por la contaminación de desechos urbanos, industriales y agrotóxicos (Muñoz y Stancich, 2005). La Norma Mexicana NMX-AA-42-1987 establece que la presencia y extensión de contaminación fecal es un factor importante en la determinación de la calidad de un cuerpo de agua. Las heces contienen una variedad de microorganismos y formas de resistencia de los mismos, involucrando organismos patógenos, los cuales son un riesgo para la salud pública al estar en contacto con el ser humano. Los organismos considerados como indicadores biológicos se agrupan en tres categorías (Wong y Barrera, 1996):

- a). Los que indican cambios en los factores ambientales.
- b). Los utilizados para cuantificar los niveles de contaminación.
- c). Los que se utilizan para pruebas bajo condiciones controladas en laboratorio y sirven para interpretar y evaluar la importancia de lo sucedido en el ambiente natural.

Cuadro 1. Microorganismos indicadores de la calidad de agua.

De uso frecuente	De uso poco frecuente
Coliformes Totales y Fecales: <i>Escherichia coli</i> *, <i>Salmonella</i> , <i>Shigella</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> *, <i>Vibrio cholerae</i> 01 serotipos: <i>El tor</i> ó <i>Inaba</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Clostridium perfringens</i> .
Estreptococos fecales: Engloba el género <i>Streptococcus</i>	

*Únicas identificadas por métodos rápidos.
Fuente: Cabelli, 1979, citado por Wong y Barrera, 1996.

Sin embargo, un buen indicador biológico debe ser de fácil identificación y muestreo, ser cosmopolita, tener relevancia económica y bioacumular contaminantes; su cultivo en laboratorio debe ser sencillo, su acervo genético y su nicho ecológico deben tener poca variabilidad. En el Cuadro 1 se indican algunos organismos como indicadores alternativos de la pureza del agua, aunque el más empleado es el grupo de organismos coliformes, el cual incluye una gran variedad de bacterias del grupo entérico (Hellawell, 1986).

Actualmente se cuenta con estudios de contaminación microbiológica, entre los cuales se encuentran los relacionados con contaminación por coliformes totales (Sarabia *et al.*, 2011). Estos autores encontraron concentraciones de coliformes totales y fecales en agua de 120 pozos profundos y someros, muestreados por agricultores de algunos municipios de San Luis Potosí. Estos agricultores usan agua subterránea de pozos profundos y someros para el riego de las parcelas que se encuentran cerca de la zona periurbana, donde la disponibilidad es muy limitada, y la superficie de éstas es de 5 000 ha. De acuerdo a los Criterios Ecológicos CE-CCA-001/89 y de la Ley Federal de Derechos de agua 2009, los límites permisibles de coliformes fecales en agua para las

fuentes de abastecimiento para uso público urbano y riego agrícola son de 1 000 NMP/100 ml de agua; en contraste, la concentración promedio de los coliformes fecales obtenidos en pozos profundos fue de 964.05 NMP/100 ml de agua y una concentración promedio de coliformes totales, a nivel somero, de 1 085.70 NMP/100 ml de agua (Sarabia *et al.*, 2011).

En los canales de Xochimilco de la ciudad de México se encontraron niveles de coliformes fecales de 40 NMP/100 ml. Asimismo, se ha comprobado que la existencia de los coliformes fecales, como *E. coli* en el agua subterránea, puede ser causado por la multiresistencia de estas bacterias a los antibióticos transferida por conjugación en otras bacterias mediante plásmidos (Juárez *et al.*, 2003). También se encontró que la supervivencia de los coliformes es más probable en aguas profundas, de lento movimiento y altamente polucionadas. Por lo que no se descarta la probabilidad de que el agua subterránea contengan bacterias patógenas (Perdomo *et al.*, 2001).

En otros países, como Buenos Aires, Argentina en aguas superficiales se registraron la presencia de bacterias coliformes con valores de 307.6 UFC/100 ml, así como una concentración de estreptococos y enterococos fecales de 23 600 UFC/100 ml de agua, con una variación espacial y temporal al 200%. La bacteria *Salmonella spp.*, se considera altamente patógena para el ganado, ya que el ganado consume de 55 a 140 litros de agua al día. La presencia de estreptococos y enterococos se considera un indicador de contaminación fecal de origen animal y no de origen humano. En aguas superficiales la contaminación por bacterias de *Enterococcus faecalis* es mayor al 80%, causada, en mayor proporción, por las actividades humanas como son los desechos de hospitales y, en un menor porcentaje (10%), el agua se contamina por *Enterococcus faecium* (Chagas *et al.*, 2006). Se encontraron en agua de riego coliformes totales que oscilaron entre 10 000 000 a 1 000 000 000 NMP/100 ml de agua, en la zona agrícola de Barbacoas, estado de Aragua Venezuela (Hernández *et al.*, 2011). En el estado de Nayarit se cuantificaron, en pozos profundos de agua potable, concentraciones de coliformes totales y fecales de 43 y 180 NMP/100 ml de agua (Mora-Bueno *et al.*, 2012). En la cuenca hidrológica del río Nazas, de la Comarca Lagunera, México, se

obtuvieron concentraciones de coliformes totales de 365.4 a más de 2 419 NMP/100 ml de agua (Martinez *et al.*, 2009).

En el estado de Veracruz se encontraron niveles de coliformes totales en agua con valores de 20 000 a 240 000 NMP/100 ml de agua y de coliformes fecales de 240 000 NMP/100 ml de agua, en la zona sur de Veracruz (Barrera y Wong, 1996). Actualmente, la situación está vinculada a las dramáticas consecuencias de la contaminación orgánica que está afectando la calidad de los cuerpos de agua y origina el aumento de los desechos domésticos y de la reincorporación de los contaminantes a los cuerpos de agua, principalmente en las zonas de manglares (Moreno *et al.*, 2002). En Pueblo Viejo Veracruz se encontraron concentraciones de coliformes fecales y estreptococos en agua y sedimentos mayores a 240 000 bacterias/100 ml de agua. Esto se atribuye a las descargas urbanas de las ciudades de Tampico, Ciudad Madero y Villa Cuauthémoc y a los numerosos asentamientos humanos que se ubican en la parte norte de la Laguna de Pueblo Viejo que descargan agua residual doméstica al río Pánuco y la Laguna (Barrera *et al.* 1998).

2.9. Estudios recientes de *Escherichia coli* y su impacto en la salud pública

El desarrollo demográfico ha causado que la contaminación biológica genere afectaciones a la salud pública; por ejemplo, enfermedades como el paludismo, tifoideas y la diarrea son las causas principales de millones de muertes, lo cual fue reportado en los informes sobre desarrollo humano de las Naciones Unidas en el 2004. En este mismo informe se señala que las aguas contaminadas causan en los países subdesarrollados casi 2 000 millones de casos de diarrea que provocan unos 5 millones de muertos, entre ellos 3 millones de niños. El agua contaminada con bacterias fecales provoca problemas intestinales en los seres humanos y aún causa afectaciones a la vida salvaje (Figueroa y Marino, 2004).

La bacteria *E. coli* (Figura 2) ha sido considerada como una bacteria comensal no patógena, aunque existen diversas cepas que son capaces de producir enfermedades. Se distinguen tres grandes grupos de *E. coli* patógenas según el tipo de infección que provocan. Un primer grupo está constituido por las cepas uropatógenas, que causan

infecciones en el tracto urinario. Otro grupo, por cepas que causan sepsis (Síndrome de respuesta inflamatoria sistémica) y meningitis neonatal; y, por último, existe el grupo de cepas enteropatógenas que son responsables de un elevado número de infecciones gastrointestinales. Se distinguen las *E. coli* enterotoxigénicas (ETEC), *E. coli* enteroinvasivas (EIEC), *E. coli* enteroagregativas (EAgEC), *E. coli* enteropatógenas (EPEC) y *E. coli* enterohemorrágicas (EHEC) (101,126) (García, 2004).

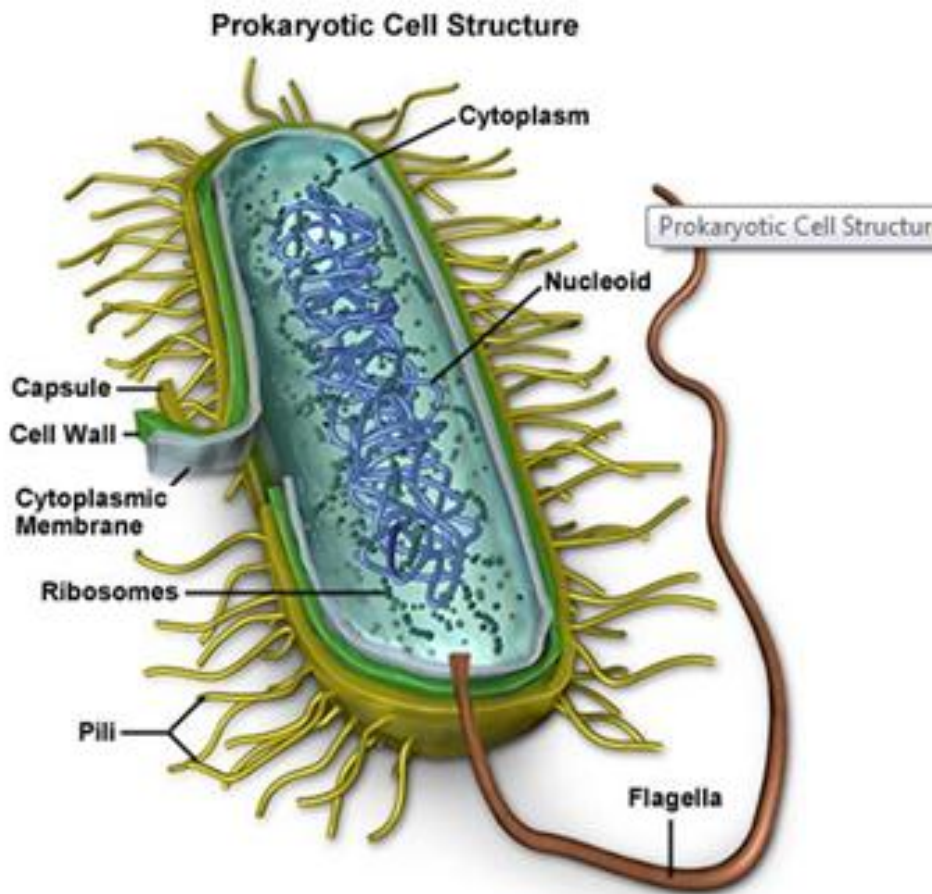


Figura 2. Esquema estructural de la bacteria *Escherichia coli* (Davidson, 2013).

E. coli enteropatógena (EPEC) fue la primera en describirse y es uno de los microorganismos más estudiados; es una de las bacterias más comunes causantes de diarrea infantil en países en vías de desarrollo, como México. Las principales

características de la infección es la diarrea de tipo acuoso que puede ocurrir en diversos grados de intensidad (Vidal *et al.*, 2007). *E. coli* puede desarrollarse a una temperatura óptima de 35 a 40 °C y a un pH de 6 y 7. Particularmente *E. coli* 0157:H7 tolera condiciones de acidez más bajas (pH<4.4), lo que le permite soportar la acidez del estómago del humano sin verse afectada. La bacteria se transmite en humanos por el consumo de alimentos crudos o insuficientemente cocidos, por la ingestión de agua contaminada, por contacto de persona a persona o por el contacto con materia fecal (Michanie, 2003). Se ha demostrado que la bacteria patógena *E. coli* enterohemorrágica (EHEC) causa enfermedades intestinales e infecciones en las vías urinarias. Por tanto su estudio en agua para consumo humano y uso doméstico es esencial para minimizar el riesgo de posibles epidemias en humanos y mortalidad en las aves de corral (Forgetta *et al.*, 2012). *E. coli* puede producir enteritis, infecciones en las vías urinarias (cistitis) y en el sistema nervioso, además *E. coli* 0157-H7 puede producir SUH (Síndrome Urémico Hemolítico). Esta enfermedad está afectando a los humanos en los diferentes países del mundo como Argentina donde se reportan más de 300 casos de enfermedades nuevas por año (Pérez y Rodríguez, 2009). También se reportó que es más probable encontrar la bacteria *E. coli*, en mayor cantidad, en agua y en sedimentos que en mamíferos y aves (Ingle *et al.*, 2011).

En aguas superficiales del estado de Veracruz se identificó la presencia de *E. coli*. La aparición de esta bacteria está asociada a los efluentes de áreas urbanas, agrícolas e industriales que existen en el estado de Veracruz (Castañeda *et al.*, 2005). En el 2003, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SERMANAT, 2009) reportó concentraciones de coliformes fecales de 86 810 NMP/100 ml de agua, en el río Jamapa de Veracruz, y altas concentraciones de coliformes totales y la presencia de *E. coli* en sistemas lagunares del estado de Veracruz (Landeros *et al.*, 2012).

3. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

El agua subterránea es una de las fuentes principales de abastecimiento de agua potable vulnerable a la contaminación microbiológica por organismos coliformes (Bautista *et al.*, 2011). Estos provienen de fuentes puntuales de contaminación, como las aguas negras y los desechos industriales que no son tratados y son descargados en las aguas superficiales más cercanas ó son vertidos en los sistemas lagunares (Lango *et al.*, 2010). Entre las fuentes puntuales de contaminación bacteriológica se encuentran las letrinas, cámaras sépticas de las casas domésticas e industriales de las áreas urbanas y rurales (Sarabia *et al.*, 2011), rastros, corrales ó establos de bovinos, descargas de aguas residuales no tratadas en los sistemas acuáticos, así como los escurrimientos de las lluvias con materia fecal (Sasson *et al.*, 1993; Herrero *et al.*, 2000; Perdomo *et al.*, 2001; Castañeda *et al.*, 2005; Camargo y Alonso, 2007; Rebolledo *et al.*, 2011). Éstas llegan a contaminar las capas profundas saturadas del suelo (Sarabia *et al.*, 2011) y el agua subterránea y superficial del Módulo de Riego I-1 La Antigua. El Módulo de Riego I-1 se constituyó legalmente como Asociación Civil en el año de 1993, denominada “Asociación de Usuarios COANALAG (Concesionaria de Aguas Nacionales para la Agricultura y Ganadería) Módulo de Riego I-1 La Antigua A. C. (Moreno, 2010). En lo subsecuente se hará alusión a esta Asociación como Módulo de Riego I-1 La Antigua.

El agua contaminada se infiltra y forma corrientes subterráneas que se depositan en los acuíferos fósiles y acaban desembocando finalmente en el mar. Los sistemas de abastecimiento de agua potable municipales son fuentes que pueden presentar contaminación por coliformes totales y *Escherichia coli* (indicador de coliformes fecales). Estas bacterias pueden ser las causantes de enfermedades gastrointestinales en humanos (Pacheco *et al.*, 2004). En el Módulo de Riego I-1 La Antigua se cultiva la caña de azúcar, se realizan actividades pecuarias y también existe una diversidad de cultivos y especies hortofrutícolas utilizadas para el autoconsumo y comercialización (Galaviz *et al.*, 2012). Las actividades agropecuarias y agroindustriales que se realizan en los agroecosistemas (Moreno *et al.*, 2002; Del Ángel *et al.*, 2011) provocan de forma indirecta la contaminación del agua subterránea y superficial; además, la contaminación biológica de los ecosistemas acuáticos se origina por las fuentes no

puntuales de contaminación, como la agricultura de riego que es el principal contaminador de estos sistemas (Sarabia *et al.*, 2011).

La contaminación bacteriológica por coliformes totales y *E. coli* del agua superficial y subterránea en el área bajo estudio (Figura 3), así como en los agroecosistemas del estado de Veracruz, están relacionadas a problemas dentro del plano político-tecnológico, como es la falta de aplicación efectiva de la Ley de Aguas Nacionales y las Normas Oficiales Mexicanas aplicables (Moreno *et al.*, 2002). La ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos que provocan derrames, escurrimiento e infiltración de aguas residuales con materia fecal sobre corrientes naturales, pantanos, embalses y cuerpos receptores de agua en general (mares), incrementa el volumen de agua superficial y subterránea contaminada (Perdomo *et al.*, 2001 y Bautista *et al.*, 2011). Asimismo, se considera que los asentamientos humanos establecidos dentro del agroecosistema en estudio son causantes del referido fenómeno de contaminación (Juárez *et al.*, 1990; Perdomo *et al.*, 2001; Galaviz *et al.*, 2012; Landeros *et al.*, 2012).

El agua del acuífero de la zona costera de Veracruz, provee de agua para uso agrícola y doméstico a través de pozos profundos y norias (pozos someros) (CNA, 2001; Galaviz, 2010), los cuales pueden ser focos de infección de enfermedades entéricas que pueden afectar a la población de los municipios de La Antigua, Úrsulo Galván y Paso de Ovejas, Veracruz. Ante esta situación, el Módulo de Riego I-1 La Antigua, es un organismo que proporciona el servicio de riego a los productores de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) y otros cultivos (Galaviz *et al.*, 2012). Sin embargo, se tiene la certeza de que existe contaminación bacteriológica por coliformes totales en agua subterránea y superficial en el agroecosistemas con caña de azúcar del Módulo de Riego I-1 La Antigua. Asimismo, este fenómeno es causado por los asentamientos humanos establecidos dentro del área de estudio, donde se concentran las principales fuentes puntuales y no puntuales de contaminación (Juárez *et al.*, 1990; Perdomo *et al.*, 2001; Galaviz *et al.*, 2012, Landeros *et al.*, 2012).



Figura 3. Esquema de la contaminación por coliformes totales y *E. coli* del agua subterránea y superficial.

4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En México el cultivo de caña de azúcar está representado por 812 000 ha. De las cuales se obtienen anualmente alrededor de 5 millones de toneladas de azúcar. De este total, el 38.4 % proviene de los ingenios azucareros localizados en el estado de Veracruz, como el Ingenio El Modelo y La Gloria que abastecen el mercado nacional e internacional (Galaviz, 2010; Moreno, 2010). Ante esta situación las fuentes puntuales y no puntuales que existen en el agroecosistema con caña de azúcar y los asentamientos humanos del Módulo de Riego I-1 La Antigua, son los causantes de la contaminación de los sistemas acuáticos. La adición de contaminantes bacteriológicos de coliformes totales y *E. coli* en los sistemas acuáticos alteran el estado natural del recurso agua, provocado por las actividades antropogénicas que tienen lugar en la superficie de la tierra (Krupa, 1999; Pérez y Landeros, 2009). El agua superficial y subterránea que se utiliza para riego está contaminada por la presencia de microorganismos patógenos (Ramón *et al.*, 2009; Castañeda *et al.*, 2005). Por tanto, el agua de los pozos profundos, norias, corrientes naturales y canales de riego (Galaviz *et al.*, 2012), no cumple con los parámetros de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994; la cual establece los límites permisibles de coliformes totales y *Escherichia coli* del agua para uso potable y de salud ambiental.

Con base en lo anterior, esta investigación se planteó con el propósito de generar conocimiento que permita responder la pregunta de investigación siguiente: ¿Cuál es el nivel y causa de contaminación bacteriológica por coliformes totales y *E. coli* en el agua subterránea y superficial del agroecosistema con caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz?.

5. HIPÓTESIS

5.1. Hipótesis general

El nivel de contaminación microbiológica por coliformes totales y la presencia de *Escherichia coli* en el agua subterránea y superficial del agroecosistema con caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz, es función de las fuentes puntuales de contaminación existentes en el área de estudio.

5.2. Hipótesis particulares

a) El nivel de concentración de coliformes totales y la presencia de *E. coli* del agua subterránea y superficial, en el agroecosistema con caña de azúcar del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz, supera los límites permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para uso potable.

b) Las fuentes puntuales de contaminación microbiológica por coliformes totales y *Escherichia coli*, que se ubican en el agroecosistema con caña de azúcar del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz puede ser la principal causa de la contaminación del agua subterránea y superficial.

6. OBJETIVOS

6.1. Objetivo general

Conocer el nivel de contaminación microbiológica por coliformes totales y la presencia de *Escherichia coli* en el agua subterránea y superficial del agroecosistema con caña de azúcar (*Saccharum officinarum L.*) del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz, originada por fuentes puntuales de contaminación.

6.2. Objetivos particulares

a) Conocer el nivel de concentración de coliformes totales y la presencia de *E. coli* del agua subterránea y superficial, en el agroecosistema con caña de azúcar del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz, y compararlo con los límites permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

b) Identificar las fuentes puntuales de contaminación microbiológica por coliformes totales y *Escherichia coli* del agua subterránea y superficial, del agroecosistema con caña de azúcar del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Caracterización de la zona de estudio

La investigación se realizó en el agroecosistema con caña de azúcar que comprende el Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz, perteneciente al Distrito de Riego 035. El Módulo de Riego I-1 La Antigua se localiza en la porción central oriente del estado de Veracruz, entre los paralelos 19° 09´ y 19° 25´ Latitud Norte y los meridianos 96° 17´ y 96° 25´ Longitud Oeste, tiene una superficie de 13 793.0 ha y abastece con 247 179 kilómetros de drenes a los municipios La Antigua, Manlio Fabio Altamirano, Paso de Ovejas, Puente Nacional y Úrsulo Galván (Moreno, 2010). Dentro del Módulo se ubican los Ingenios azucareros el Modelo del municipio La Antigua y la Gloria del municipio de Úrsulo Galván, los cuales industrializan la producción de caña de azúcar que se produce en éste.

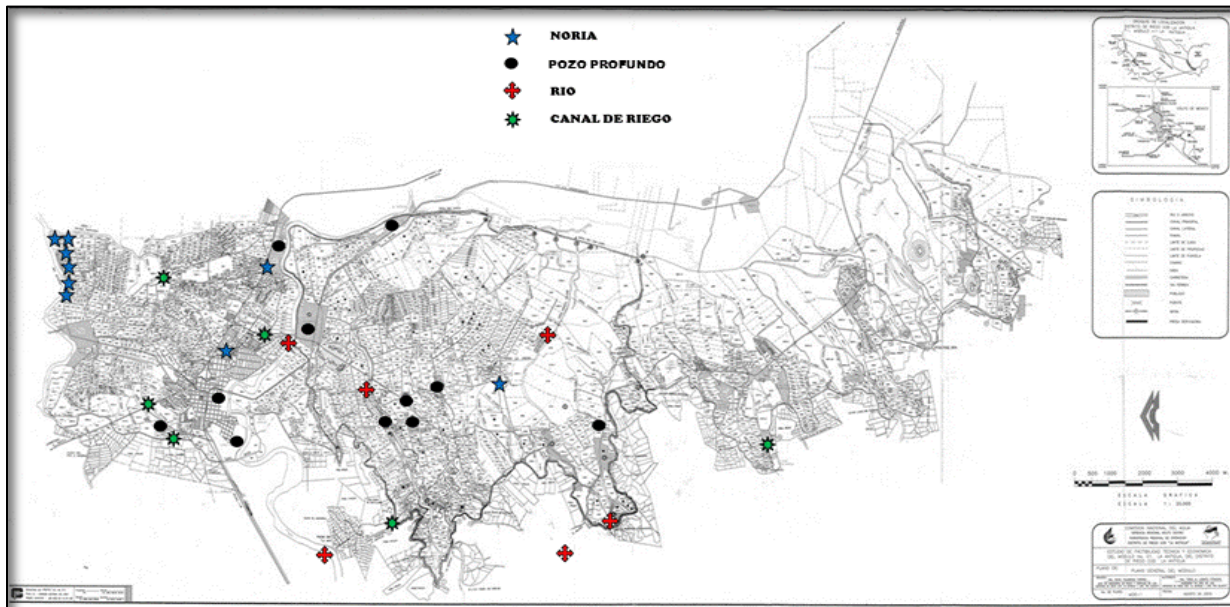


Figura 4. Puntos de muestreo: norias, pozos profundos, canales de riego y corrientes naturales del Módulo de Riego I-1 La Antigua, perteneciente al Distrito de Riego 035 La Antigua, Veracruz.

Hidrología. El Módulo de Riego I-1 La Antigua está conformado por la cuenca del río La Antigua que abarca un área de 2 827 km², nace en la Sierra Madre Oriental a 3 850 msnm de altitud dentro del estado de Puebla y en su paso recibe varios afluentes hasta llegar al Golfo de México (Galaviz, 2010; Moreno, 2010).

Fuente de abastecimiento. El Módulo de Riego I-1 La Antigua cuenta con las aportaciones de agua de la presa derivadora La Antigua. Esta presa suministra un volumen de agua requerido para el sector agrícola cañero y otros cultivos de 213 157 000 m³, en una red de canales de 247 179 km y 382 km de caminos de operación y acceso. Además suministra un volumen de agua 5 833 500 m³ para uso industrial.

7.2. Métodos

7.2.1 Operacionalización de las hipótesis

Cuadro 2. Operacionalización de la hipótesis de estudio sobre la contaminación y las fuentes puntuales de contaminación bacteriológica por coliformes totales y *Escherichia coli*.

VARIABLES	DESCRIPCIÓN	TIPO DE VARIABLE	INDICADOR
Contaminación bacteriológica	Pozos profundos, norias, corrientes superficiales y canales de riego.	Dependiente	Coliformes totales (NMP/100 ml); presencia de <i>Escherichia coli</i> .
Fuentes puntuales de contaminación	Letrinas, cámara séptica y descargas de aguas residuales	Independiente	Identificación y naturaleza

7.2.2. Fase de diagnóstico de la zona de estudio

Para determinar los puntos de muestreo de contaminación bacteriológica, primeramente se tomó como referencia la información proporcionada por los técnicos de la Asociación de Usuarios COANALAG (Concesionaria de Aguas Nacionales para la Agricultura y Ganadería), del Módulo de Riego I-1 La Antigua A. C que consistió en la localización y distribución de las fuentes de abastecimiento de agua subterránea y

superficial, a través de un mapa. Posteriormente, con el permiso de las autoridades del Módulo de Riego I-1 La Antigua y la Comisión Nacional del Agua, se realizó un recorrido de campo en el mes de octubre a diciembre de 2012 para localizar los puntos de muestreo. En total se seleccionaron 32 puntos de muestreo en los municipios de La Antigua, Paso de Ovejas y Úrsulo Galván, considerando como fuentes de agua subterránea aquellas de pozos profundos (de agua potable y riego) y norias (de uso doméstico), y como agua superficial aquella de corrientes naturales (Río la Antigua, Río Chico y Río Tolome) y canales de riego (principal repartidor, canal principal, canal lateral, dren 1) (Cuadros 3 y 4). De cada punto de muestreo se obtuvo información relacionada con sus características, las cuales se indican en el Cuadro 5 y se referenciaron con un GPS marca Garmin Edge Touring (Figura 5). Con ayuda de los usuarios del Módulo de Riego I-1 se identificaron las fuentes puntuales de contaminación bacteriológica, como son: fosas sépticas, descargas de aguas negras y sistema de drenaje, las cuales también fueron georeferenciadas.

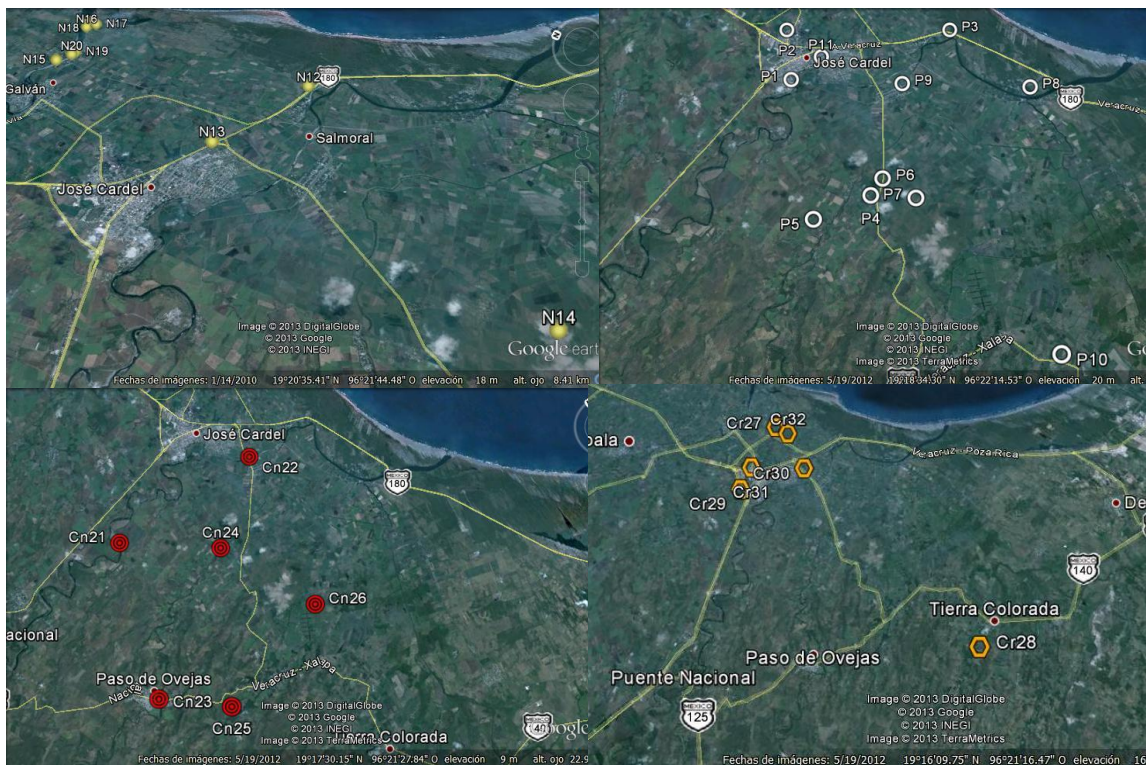


Figura 5. Puntos de muestreo de agua de Pozos (P), Norias (N), Corrientes naturales (Cn) y Canales de riego (Cr) del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.

Cuadro 3. Puntos de muestreo de agua subterránea del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.

No.	Pozo profundo*	Ubicación	No.	Noria	Ubicación
1	Cabezas	Calle Rodríguez clara/Rivada Everardo Chávez, La Antigua	12	Genaro Heredia	San Pancho, La Antigua
2	El Modelo	Pozo No. 4- Prolongación José Cardel	13	COANALAG	Instalaciones- Vicente López, La Antigua
3	Playa oriente	Pozo No. 6-Río Papaloapan, Golfo de México, La Antigua	14	Caño prieto	Casa-Caño prieto, Paso de Ovejas
4	La Ceiba	Calle principal, La Ceiba, Paso de Ovejas	15	Honorio Castillo López	Casa- La Barra, Ú. Galván
5	El Mango	Pozo No. 2, calle principal, El Mango, Paso de Ovejas	16	Arnulfo Hernández Pereina	Casa- La Barra, Ú. Galván
6	Faisán	Faisán- Paso de Ovejas.	17	Arnulfo Hernández Pereina	Parcela-La Barra, Ú. Galván
7	La Víbora	Emilio Zapata Miguel Alemán, Paso de Ovejas	18	Pedro Fonseca Rodríguez	Casa- La Barra, Ú. Galván
8	La Posta	La Posta-La Antigua	19	Julia López Acosta	Casa- La Barra, Ú. Galván
9	Salmoral	Salmora-La Antigua	20	Marcial Castillo López	Casa- La Barra, Ú. Galván
10	Rancho la cuartana	Carretera km 171- Jalapa-Veracruz			
11	Vicente López	Pozo No. 3-Almendro Pino Suárez, La Antigua			

*Determinados con base en la información proporcionada por el Módulo de Riego I-1.

Cuadro 4. Puntos de muestreo de agua superficial del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.

No.	Corriente Natural*	Ubicación	No.	Canal de riego*	Ubicación
1	Río La Antigua	Obra de toma	7	Principal repartidor	Río La Antigua
2	Río La Antigua	Puente el Salmoral	8	Canal principal	Km 32+000- La Antigua, viga de aforo.
3	Río Chico	Paso de Ovejas	9	Canal lateral	Km 11+840-sublateral Cardel
4	Río Chico	Puente Faisán	10	Canal lateral	Km 6+728-Carretera Salmoral-Cardel
5	Río Tolome	Loma fina	11	Dren 1	Carretera Nautla-Cardel
6	Río Tolome	Tolome	12	Dren 1	Vado la pequeña

*Determinados con base en la información proporcionada.

Cuadro 5. Características de los puntos de muestreo de agua subterránea y superficial del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.

Tipo	Equipo de bombeo		Gasto de bombeo (l/s)		Profundidad (m)		Altitud (msn)		Características
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	
Pozo profundo	100 HP	15 HP	70	8	100	17	36	11	Sumergible
Noria	50 HP	10 HP	45	0.12	10	6.5	12	7	Electrico y de Jarrita
Corrientes naturales	-----	-----	-----	-----	1.2	0.3	51	11	Río La Antigua, Río Chico y Río Tolome
Canal de riego	-----	-----	-----	-----	2.2	0.7	34	9	Revestido (concreto)

7.2.3. Muestreo de agua subterránea y superficial en el Módulo de Riego I-1 La Antigua

La colecta de muestras de agua en pozos profundos, norias, canales de riego y corrientes naturales seleccionados, se realizó con base en lo establecido en las Normas Oficiales Mexicanas NOM-109-SSA1-1994, NOM-127-SSA-1994, NOM-180-SSA1-1994, NMX-AA-042-1987 en febrero de 2013. Las muestras se trasladaron al Laboratorio de Investigación de Recursos Acuáticos (LIRA) del Instituto Tecnológico de Boca del Río.

7.2.4. Análisis bacteriológico de coliformes totales y *E. coli* en agua subterránea y superficial

En cada una de las muestras de agua colectadas se determinó el número de coliformes totales y la presencia de *E. coli* de acuerdo a lo establecido en la Norma Mexicana NMX-AA-042 de Aguas, mediante la determinación del número más probable de coliformes totales y la presencia de *E. coli*. Para lo anterior se utilizó el método Colisure (Colilert) que consistió en usar placas Quanti-Tray de 48 celdas grandes. Para esto, en un vaso de precipitado estéril, conteniendo 90 ml de agua destilada estéril, se agregaron 10 ml de la muestra de agua colectada y el reactivo Colilert; la mezcla se agitó hasta disolverse, se colocó en la placa Quanti-Tray, la cual se selló y se incubó a 35 ± 1 °C durante 24 h, a fin de determinar los coliformes totales. Para conocer la presencia y ausencia de *E. coli*, la mezcla contenida en la placa Quanti-Tray se incubó a 35 ± 1 °C durante 48 h. Esto se realizó para cada muestra de agua, considerando tres repeticiones (tres placas por muestra).

7.2.5. Análisis estadístico

El análisis de los datos obtenidos se realizó con estadística paramétrica y no paramétrica; para esta última se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis. Se hizo uso del programa estadístico de Statistica versión 7. Para el análisis de varianza de los puntos de muestreo de agua de los canales de riego, los datos fueron sometidos a pruebas de comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Concentración de coliformes totales (NMP/100 ml) en aguas subterráneas y superficiales

Las concentraciones de coliformes totales (52 419.2 NMP/100 ml) en agua superficial fueron superiores a las concentraciones de coliformes totales encontrados en el agua subterránea (198.6 NMP/100 ml) ($p < 0.01$, Figura 6). Esto podría indicar que existen fuentes puntuales de contaminación bacteriológica que contaminan el agua en el agroecosistema con caña de azúcar del Módulo de Riego de I-1 La Antigua. Se estima, que los efluentes de los desechos de las casas, fábricas pequeñas, rastros y de nosocomios vierten miles de m^3 anuales por año a los principales depósitos y corrientes de agua (Gordillo *et al.*, 2010). La existencia de coliformes en el agua subterránea y superficial presentados en la Figura 7, pudiera involucrar la presencia de bacterias de los géneros *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Escherichia*, *Hafnia*, *Klebisella*, *Serratia* y *Yersinia* (Méndez *et al.*, 2010). Esto podría ser un riesgo para la salud de los habitantes de las comunidades que viven en el agroecosistema del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz (Silva *et al.*, 2002; Camargo y Alonso, 2007). En la Figura 7, se observa que las concentraciones de coliformes totales del agua de los canales de riego (76 501.1 NMP/100 ml), superaron las concentraciones de coliformes totales de las corrientes naturales (28 337.2 NMP/100 ml) de los ríos La Antigua, río Chico y Tolome. Aunque con valores muy bajos, el número de coliformes totales en agua subterránea presentó una tendencia similar para el agua de pozos profundos (309.9 NMP/100 ml) y norias (87.3 NMP/100 ml) ($p > 0.05$). Sin embargo, los niveles de coliformes totales en estas aguas superan los límites permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-1994, cuyo valor es de 2 NMP/100 ml de agua. En contraste, la concentración de los organismos coliformes totales de pozos profundos y norias no superan los límites permisibles de coliformes totales de la Norma Oficial Mexicana, NOM-033-ECOL-1997, los cuales varían de 240-1000 NMP/100 ml.

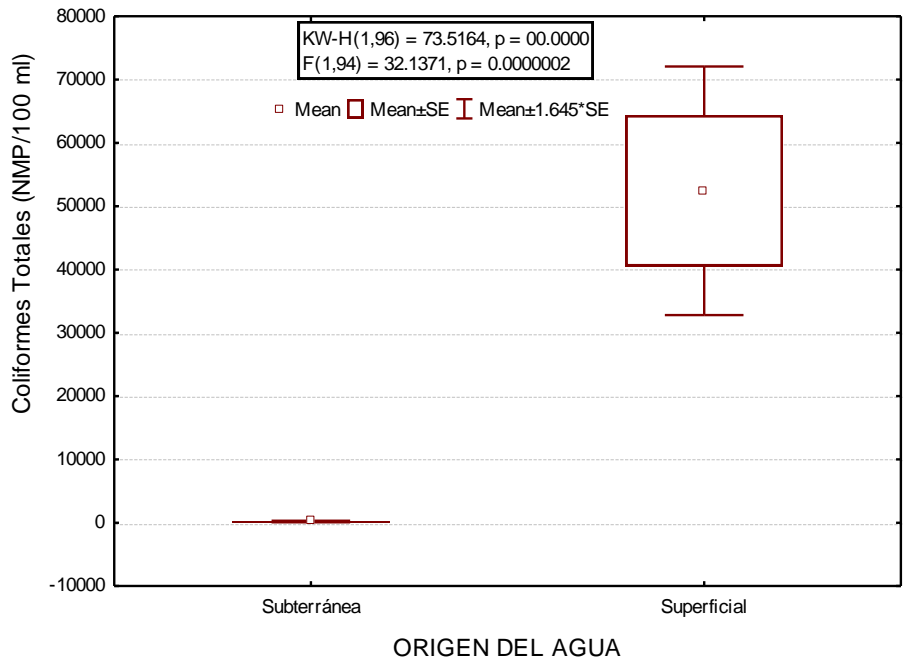


Figura 6. Concentración de coliformes totales en agua superficial y subterránea en el agroecosistema con caña de azúcar del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.

Las concentraciones de coliformes totales encontrados en aguas superficiales (Figura 7), sobresalen de aquellas encontradas en agua somera de 120 pozos para uso agrícola del Valle de San Luis Potosí, que fueron de 2400 NMP/100 ml; no obstante, este valor excede los límites permisibles establecidos por los Criterios ecológicos CE-CCA-001/89 y la Ley Federal de Derechos de Agua, 2009 (Sarabia *et al.*, 2011). De la misma manera, los valores de coliformes encontrados en este estudio rebasan los valores de 307.6 UFC/100 ml encontrados en aguas superficiales en Argentina (Chagas *et al.*, 2006). Asimismo, se tienen registros de que en los sistemas lagunares del Golfo de México, los coliformes totales oscilan de 3 a 525 000 NMP/100 ml de agua, mientras que en los ríos, el número de coliformes totales supera la media de 2419 NMP/100 ml de agua (Landeros *et al.*, 2012). Considerando estas estadísticas, el impacto de la contaminación del agua por bacterias coliformes totales en la zona bajo estudio del estado de Veracruz es significativo; situación que puede estar provocando

serios impactos negativos en la salud pública; así como en el mercado de especies marinas (Lango *et al.*, 2012).

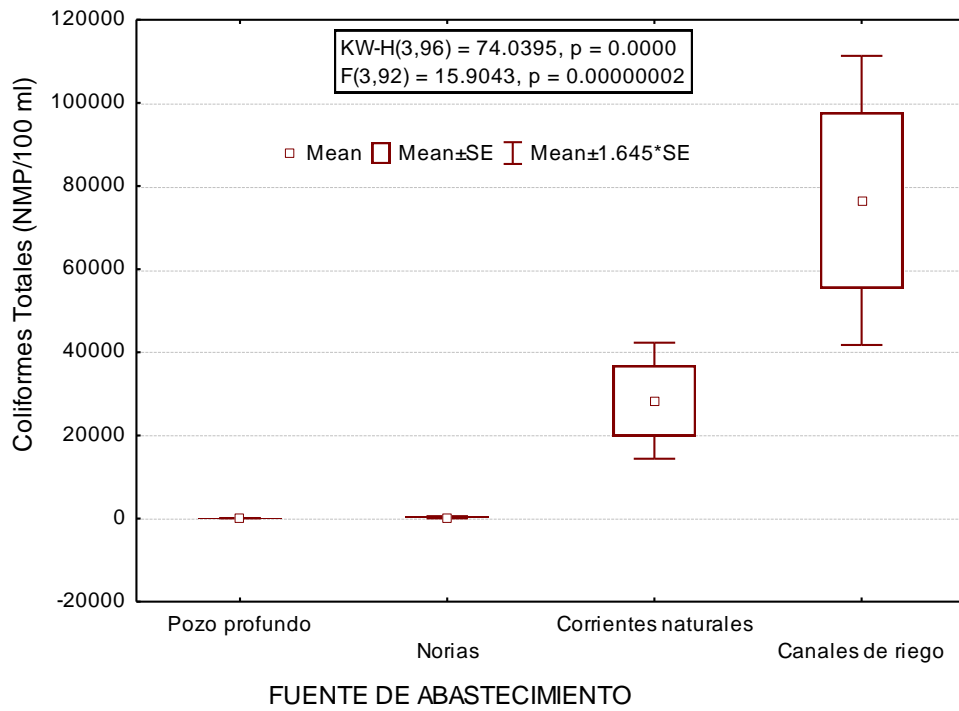


Figura 7. Concentración de coliformes totales en las diferentes fuentes de abastecimiento de agua del agroecosistema con caña de azúcar.

En las diferentes fuentes de abastecimiento, el número de coliformes totales fue mayor en los canales de riego que en pozos profundos, norias y corrientes naturales ($p < 0.01$; Figura 7). Con respecto a la concentración de coliformes totales observados en el agua del río La Antigua que entra a los canales de riego del Módulo de Riego I-1, se encontró que la concentración de las bacterias coliformes, al final de los canales de riego, se incrementó (Cuadro 6). La razón de lo anterior, es que durante algunos recorridos en la zona de estudio, se pudo observar que los canales de riego que cruzan en las comunidades del Módulo de Riego I-1, son utilizados por los pobladores como colectores de aguas negras y desechos domésticos y de crianza de animales. Lo que resulta en un mayor grado de contaminación del agua de riego por bacterias patógenas, entre las que se encuentran los coliformes totales. Esta agua de riego eventualmente llegará a corrientes superficiales y a los acuíferos causando así el deterioro de la calidad del agua de estos cuerpos receptores (Pacheco *et al.*, 2004).

Los coliformes pueden sobrevivir, en agua subterránea de lento movimiento y ser altamente contaminadores; por lo tanto, el incremento de las bacterias coliformes totales en el agua del canal de riego, indica la probabilidad de que el agua subterránea también contenga microorganismos patógenos (Perdomo *et al.*, 2001). En el Cuadro 6, se muestra que hubo diferencias estadísticas significativas entre las concentraciones de coliformes totales del agua de los tres canales de riego y el Dren 1. Se encontró que el Dren 1 registró la mayor concentración media de coliformes totales, con un valor de 129 332.5 NMP/100 ml, y se encuentra ubicado entre las coordenadas de 19° 22' 37.85" N y 96° 22' 31.94" O (Ciudad Cardel, Veracruz) y 19° 22' 80.3" N 096° 20'62.0" O (Úrsulo Galván).

Este Dren recibe descargas de la clínica del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) de la ciudad de Cardel, Veracruz; así como escurrimientos de aguas residuales de la zona urbana y rural del Módulo de Riego I-1 La Antigua; y agroquímicos provenientes del cultivo de la caña de azúcar (Galaviz *et al.*, 2012). La velocidad con que ocurra este fenómeno de contaminación depende de las características químicas, físicas y biológicas del suelo (Pacheco *et al.*, 2004).

Cuadro 6. Concentraciones medias de coliformes totales en agua de los canales de riego, del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz

Canal de riego	Coliformes Totales (NMP/100 ml)	Canales de riego	Coliformes Totales (NMP/100 ml)
Entrada de agua	52951.5 b	Principal repartidor	5 559.3c
		Canal principal	69 100.0b
Salida de agua	64580.0 a*	Canal lateral	31 071.1c
		Dren 1	129 332.5a*

*Medias con diferentes letras en una columna son estadísticamente diferentes ($p < 0.01$).

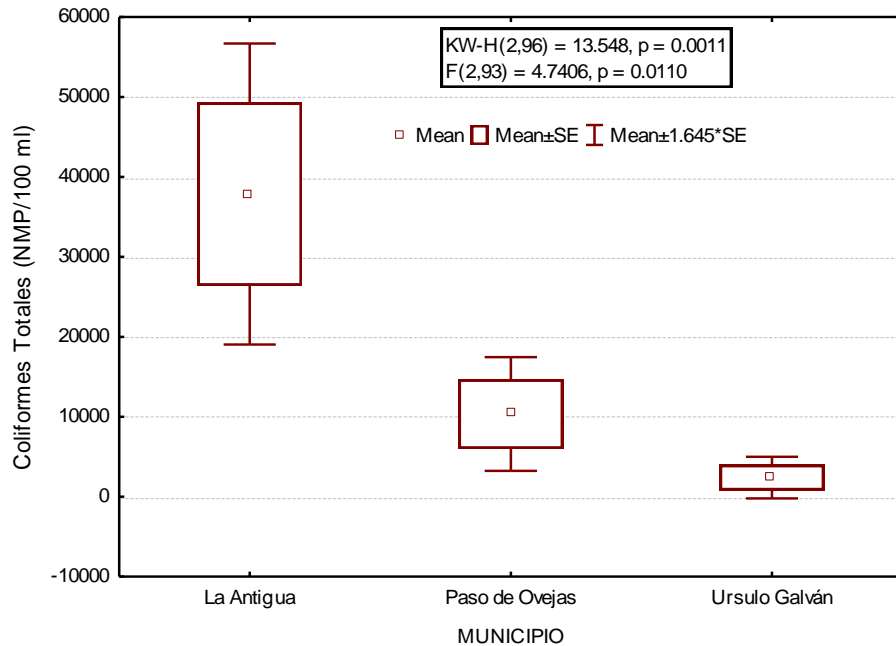


Figura 8. Concentración de coliforme totales por municipio, ubicados en el Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.

Respecto al agua de los tres municipios considerados en este estudio, la Figura 8 muestra que en el municipio de La Antigua se obtuvieron los valores más altos de coliformes totales, tanto en agua subterránea como superficial. Estos valores podrían indicar que en este municipio existen más fuentes puntuales de contaminación bacteriológica que afectan la calidad de agua. Las concentraciones de coliformes totales encontrados en la zona urbana de Ciudad Cardel e Infonavit del municipio La Antigua, superan las concentraciones de bacterias coliformes totales de las localidades del Módulo de Riego I-1 La Antigua (Figura 9). Caño prieto, presentó una concentración de coliformes totales de 50 000 NMP/100 ml de agua que superaron estadísticamente al resto de las localidades, con excepción de las concentraciones observadas en Salmoral, Vicente López, Úrsulo Galván, Cardel Infonavit (130 000 NMP/100 ml) y Cardel (240 000 NMP/100 ml) (Figura 9). Estos últimos datos son mayores a los encontrados en los municipios de Paso de Ovejas y Úrsulo Galván (Figura 8). Lo anterior, puede deberse a la mayor carga orgánica que existe en las aguas residuales que escurren en la superficie del suelo del municipio La Antigua (Romero *et al.*, 2009); así como a las condiciones de temperatura y pH (7.8 a 8.7) que imperan en la región y

que son propicias para el desarrollo de las bacterias coliformes totales y *E. coli* (Barrera *et al.*, 1998).

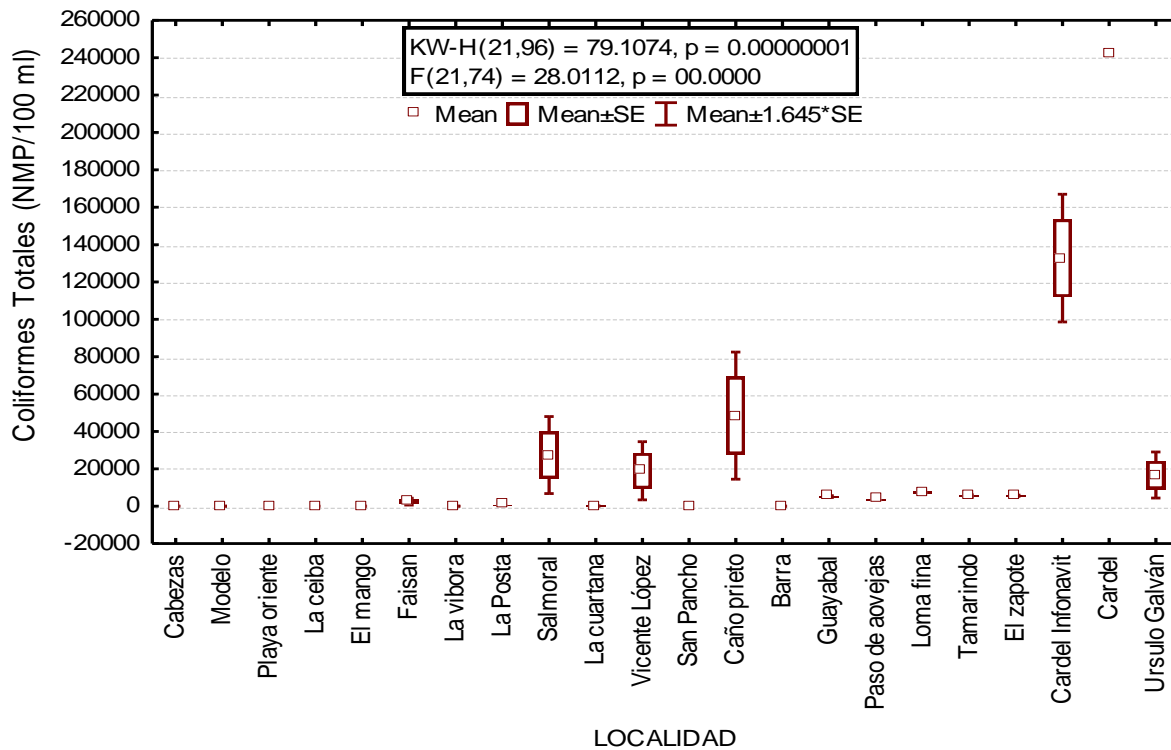


Figura 9. Concentración de coliformes totales por localidades, ubicadas en el Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.

8.2. Concentración de coliformes totales (NMP/100 ml) en los puntos de muestreo

En la Figura 10 se observa que de los 11 puntos de muestreo correspondientes a los pozos profundos, solo en cinco de ellos se detectó la presencia de coliformes totales; siendo el pozo de La Posta donde se registró la mayor concentración, seguido del pozo del Salmoral y del Rancho la cuartana ($p < 0.01$). Los valores rebasan los límites permitidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. La razón por lo que en seis pozos profundos no se registró presencia de coliformes, podría deberse a la baja cantidad de oxígeno y a la presencia de pH altos (mayores de 10.2) (Aburto y Ball, 2009). Estudios sobre agua subterránea en Mérida Yucatán, mostraron que temperaturas del orden de 26 a 28 °C y pH de 6 a 7.8 (Cabrera *et al.*, 2002), favorecieron el desarrollo de bacterias coliformes totales. En el agroecosistema con

caña de azúcar del Módulo de Riego I-1 La Antigua, el pozo del Rancho La Cuartana (Figura 10) es el único pozo profundo de agua, destinado para fines agrícolas y pecuarios. La concentración de coliformes totales encontrados en el pozo profundo del Rancho La Cuartana, supera los límites permisibles de concentración de coliformes totales establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Esta contaminación por coliformes totales en agua del pozo profundo indica la presencia de estiércol animal acumulado en feedlots y zonas de abrevadero animal en las cuencas de drenaje (Perdomo *et al.*, 2001).

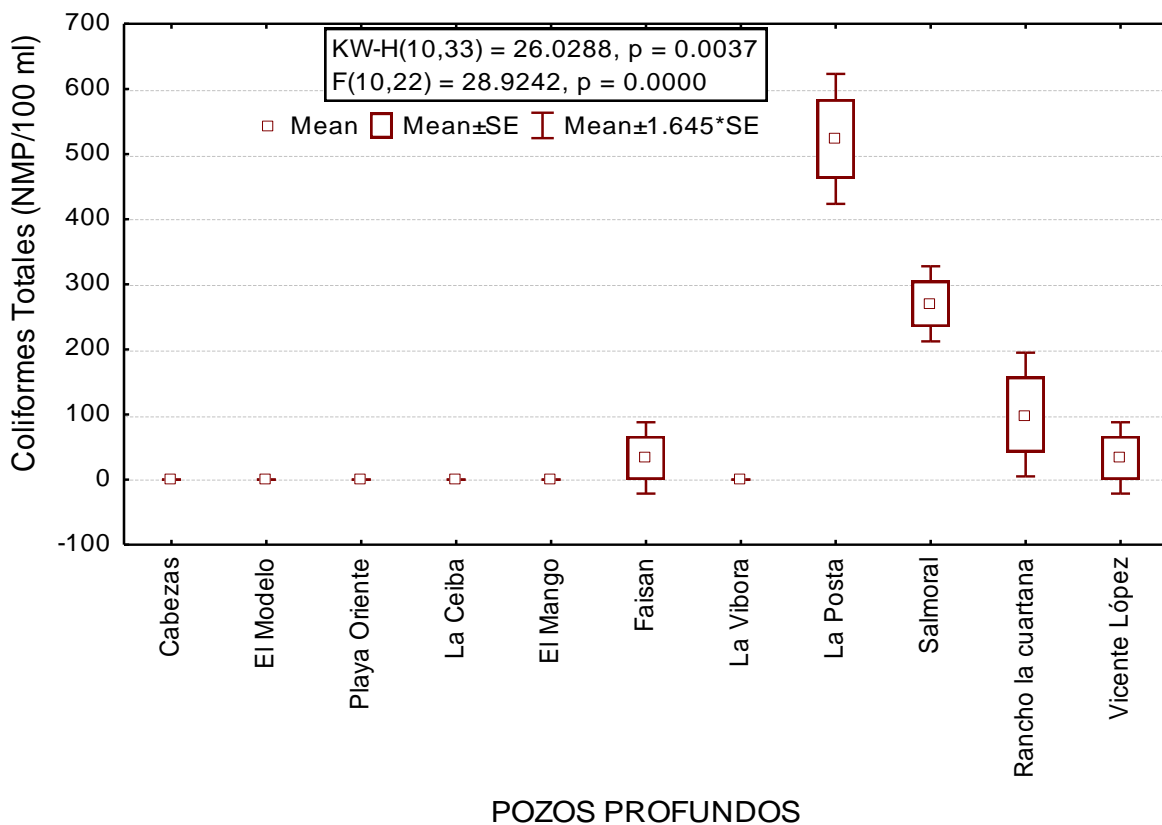


Figura 10. Concentración de coliformes totales por punto de muestreo en agua subterránea de pozos profundos.

Algunos estudios indican que la presencia de coliformes totales en pozos profundos para uso agrícola, está relacionada con la vulnerabilidad de este tipo de agua a la contaminación bacteriológica, la cual está muy influenciada por la precipitación (Bautista y Aguilar, 2011). Se considera que aunque el agua subterránea reúna las

condiciones de potabilidad al ingresar al sistema de distribución, puede contaminarse en la distribución o por el manejo intradomiciliario deficiente, el cual es afectado por el almacenamiento de agua en cisternas, tinacos y otros depósitos (Flores *et al.*, 1995).

No se encontraron concentraciones de coliformes totales en muestras de agua obtenidas de norias ubicadas en las casas habitaciones ni en parcelas con caña de azúcar de la localidad La Barra de Chachalacas (H. Castillo, A. Hernández, A. Hernández-Parcela, P. Fonseca, J. López, M. Castillo) perteneciente al municipio de Úrsulo Galván ($p < 0.01$; Figura 11). Esto podría ser resultado de la intrusión salina (CNA, 2003), que tiene una acción bactericida; además, se ha comprobado que el valor del pH del océano llega a ser de 8.10 ± 0.02 . Sin embargo, el agua de los océanos es altamente afectado cuando la salinidad del agua aumenta, ya que el pH tiende a disminuir (Hernández *et al.*, 2003). Los valores más altos de coliformes totales se encontraron en la noria ubicada en Caño Prieto (mayores a 2500 NMP/100 ml).

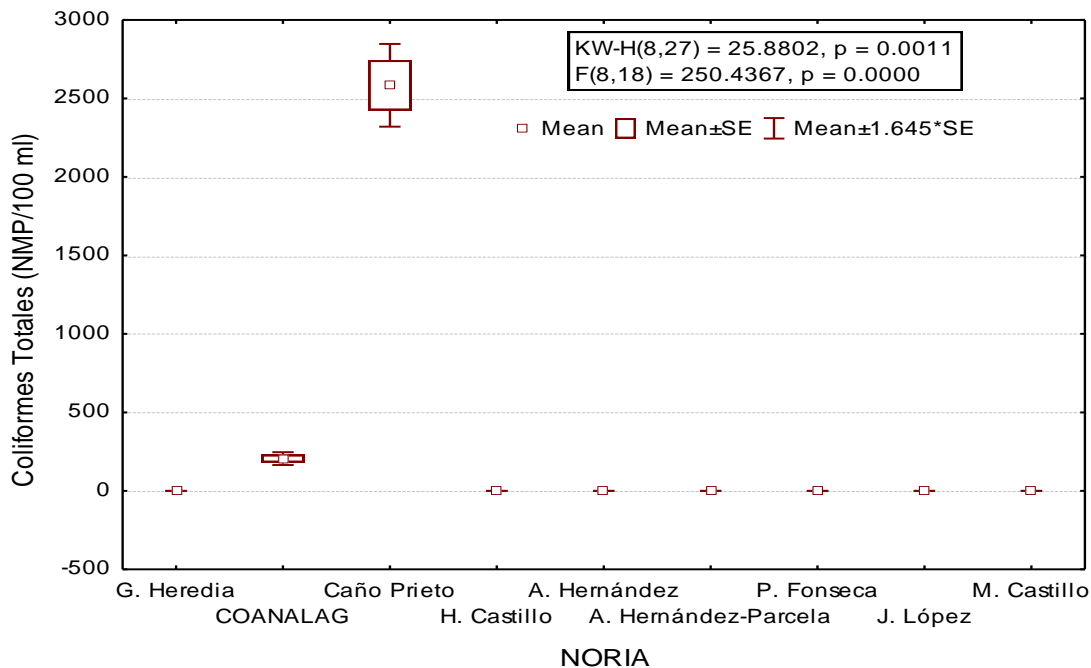


Figura 11. Concentración de coliformes totales en norias como puntos de muestreo.

De las norias muestreadas, solo en la de Caño Prieto y COANALAG se detectó presencia de coliformes (>2 500 NMP/100 ml y 250 NMP/100 ml, respectivamente).

Estos datos son cercanos a aquellos obtenidos en Uruguay en agua de pozos de zonas rurales cuyos valores fluctuaron de 50 a 1 200 NMP/100 ml (Perdomo *et al.*, 2001). En todos los puntos de muestreo de los ríos considerados como corrientes naturales, se detectaron coliformes totales ($p < 0.01$; Figura 12). El agua del río Tolome, colectada en la localidad del mismo nombre, presentó mayor concentración de coliformes que el agua del río Tolome colectada en Loma Fina. Sin embargo, las concentraciones de coliformes totales encontrados en este punto de muestreo, fueron superiores a las concentraciones de bacterias en los puntos de muestreo de agua del río Chico en Paso de Ovejas y el Puente el Faisán, así también a las concentraciones de organismos coliformes totales en los puntos de muestreo del río La Antigua. El agua del río La Antigua, en el puente Salmoral, contiene mayor concentración de bacterias coliformes totales ($> 50\,000$ NMP/100 ml) que el agua del río La Antigua en el punto de muestreo de obra de toma ($p < 0.01$).

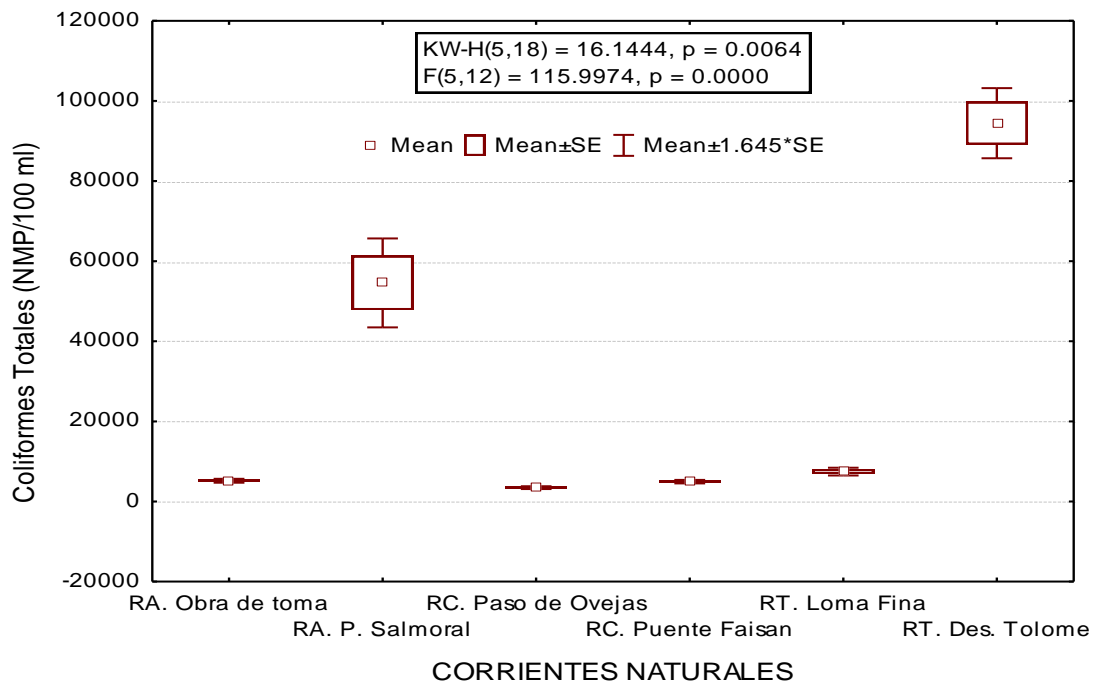


Figura 12. Concentración de coliformes totales por punto de muestreo en corrientes naturales. RA= Río La Antigua, RA. P.= Río La Antigua Puente Salmoral, RC= Río Chico, RT. Des.= Descarga Río Tolome.

Estas altas concentraciones de organismos coliformes en agua de los ríos, es el resultado del vertimiento de millones de litros de aguas residuales, la mayoría sin el más mínimo tratamiento, las cuales provienen de áreas urbanas y descargas de la industria y drenaje agrícola (Olivas *et al.*, 2011). Las concentraciones de coliformes totales en los puntos de muestreo en la descarga del río Tolome y en el río La Antigua, en el Puente Salmoral, se debe principalmente a la mayor acumulación de coliformes totales en las partes bajas, generando un problema de contaminación bacteriológica de origen fecal. Se considera como responsable de este fenómeno, el establecimiento de asentamientos humanos marginales, que ocasionan degradación del ecosistema, e insalubridad debido a la carencia de servicios sanitarios básicos (Barrios y Cañizares, 2001). Con respecto a los muestreos en canales de riego (Figura 13), no se encontró presencia de coliformes totales en dos puntos de muestreo, sin embargo el Dren 1, Nautla-Cardel (>240000 NMP/100 ml) fue el que superó en concentración al resto de los puntos de muestreo, seguido del canal de riego lateral (>120000 NMP/100 ml) ubicado en el km 11+840 ($p < 0.01$). Estas cantidades altas de coliformes totales en el agua de los canales de riego hacen que ésta sea inapropiada para el consumo animal y para el riego; en Sonora México se han encontrado concentraciones de 930 a 9 383 NMP/100 ml de agua (López y Lechuga, 2001), inferiores a los encontrados en el Módulo de Riego I-1, La Antigua. Estas altas concentraciones de coliformes totales en agua destinada para riego agrícola, aumenta los riesgos de infección en humanos al estar en contacto con ésta (Cifuentes *et al.*, 1993). El mayor contenido de coliformes totales en canales de riego corresponde a las descargas de aguas negras y crudas de la zonas urbanas más grandes con mayor número de habitantes; sin embargo, el uso agrícola de estas aguas constituye sin duda una fuente de exposición a los productos de los agroecosistemas, que se venden en el mercado local o que van directo a la industria, así como para la explotación ganadera (Rivera *et al.*, 2007). Además las actividades económicas y las agropecuarias consumen más del 95% del agua de los acuíferos (sistema de flujo de agua profunda) y someras (sistema de flujo de agua somero); contaminando principalmente el agua somera, con las descargas urbanas que se conducen en canales de cielo abierto y que son utilizados para la agricultura (Sarabia *et al.*, 2011).

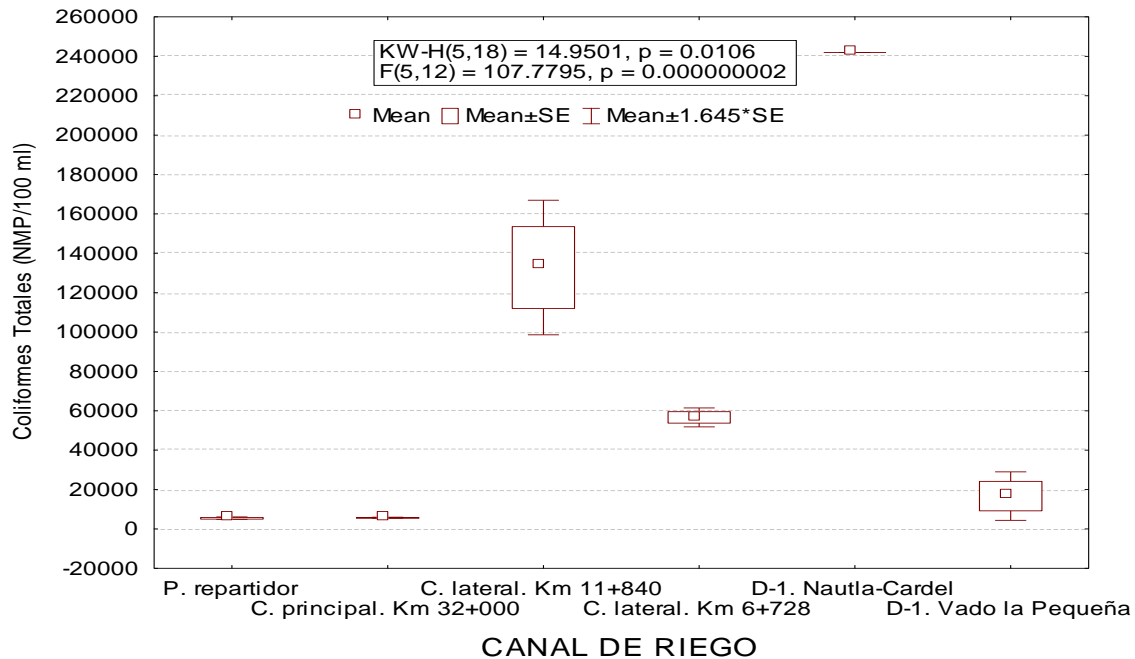


Figura 13. Concentración de coliformes totales en los puntos de muestreo en canales de riego del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.

8.3. Presencia de *E. coli* en aguas subterráneas y superficiales, y en los puntos de muestreo

Considerando las tres repeticiones de agua colectadas en los 32 puntos de muestreo, la presencia de *E. coli* fue diferente en cada repetición. En la repetición uno, la bacteria se detectó en el 44% de las muestras; en la segunda, en el 53 % y en la tercera en el 50% de las muestras (Figura 14). De acuerdo con Galaviz *et al.*, (2012) la presencia de *E. coli* tanto en este tipo de agua, representan riesgos para la salud pública. Este tipo de contaminación está altamente relacionado con las características químicas, físicas y biológicas del suelo (Pacheco *et al.*, 2004). Asimismo, se ha comprobado que la incidencia de *E. coli*, en el agua subterránea, se debe a la resistencia de ésta a los antibióticos; por lo tanto, el agua de los pozos profundos y norias que se utiliza para consumo puede ser la principal causa de diarrea en humanos (Juárez *et al.*, 2003).

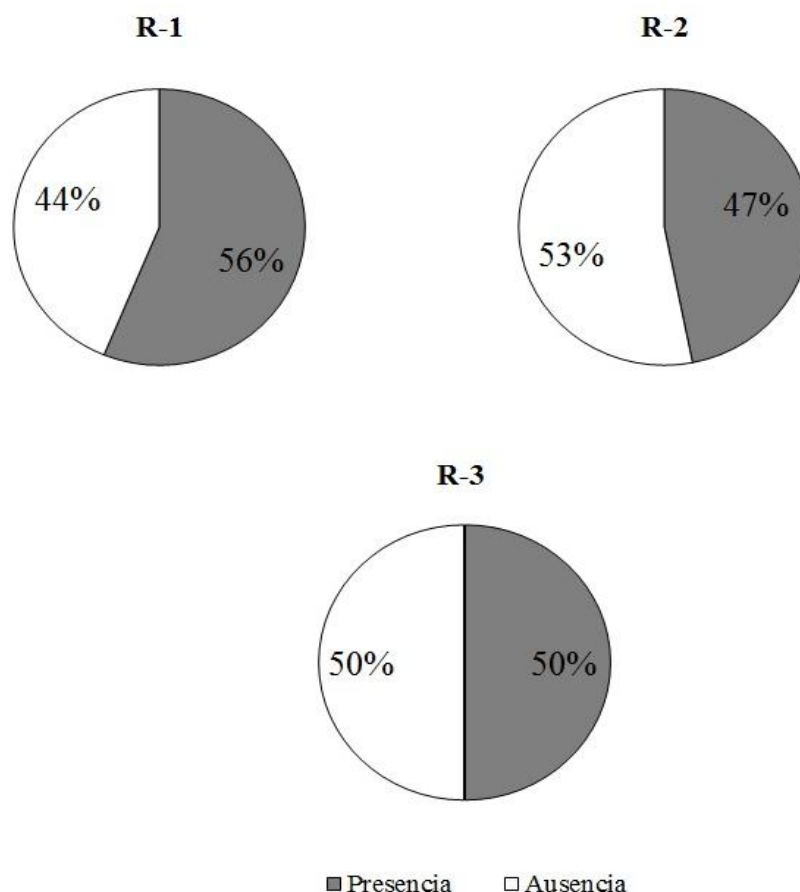


Figura 14. Presencia de *Escherichia coli* en los 32 puntos de muestreo del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz. R1, R2, R3=repeticiones.

La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, indica que el agua para uso potable debe estar libre de *E. coli*; esto debido a que el grupo de *E. coli* enterohemorrágicas que contiene los serotipos O157:H7 y *E. coli* O157 –no móvil- y los serotipos de otros países (O26:H11, O111:H8, O103:H2, O113:H21 y O104:H21), pueden ocasionar el Síndrome Urémico Hemolítico (SUH) en niños de 1 a 8 años, provocando la muerte en algunos casos (Michanie, 2003). Del total de muestras de agua obtenidas de los 32 puntos de muestreo el 63% corresponde al agua subterránea y el 37% a aguas superficiales. De las muestras de agua subterránea analizadas, solo el 17% presentó contaminación por *E. coli*; mientras que del agua superficial, el 34% de las muestras estuvo contaminada (Figura 15). En la Figura 16 se observa la presencia de *E. coli* en agua subterránea y superficial detectada en la zona urbana y rural; las muestras de agua superficial tanto de la zona urbana como rural fueron las más contaminadas

(100% y 89%, respectivamente). La bacteria se detectó en el 100%, 83%, 70% y 22% de las muestras de agua correspondientes a las corrientes naturales, canales de riego, pozos profundos y norias, respectivamente (Figura 17). Los resultados obtenidos por municipios indican contaminación por *E. coli* en el 64% y 58% de las muestras de agua colectadas en La Antigua y Paso de Ovejas, respectivamente (Figura 18).

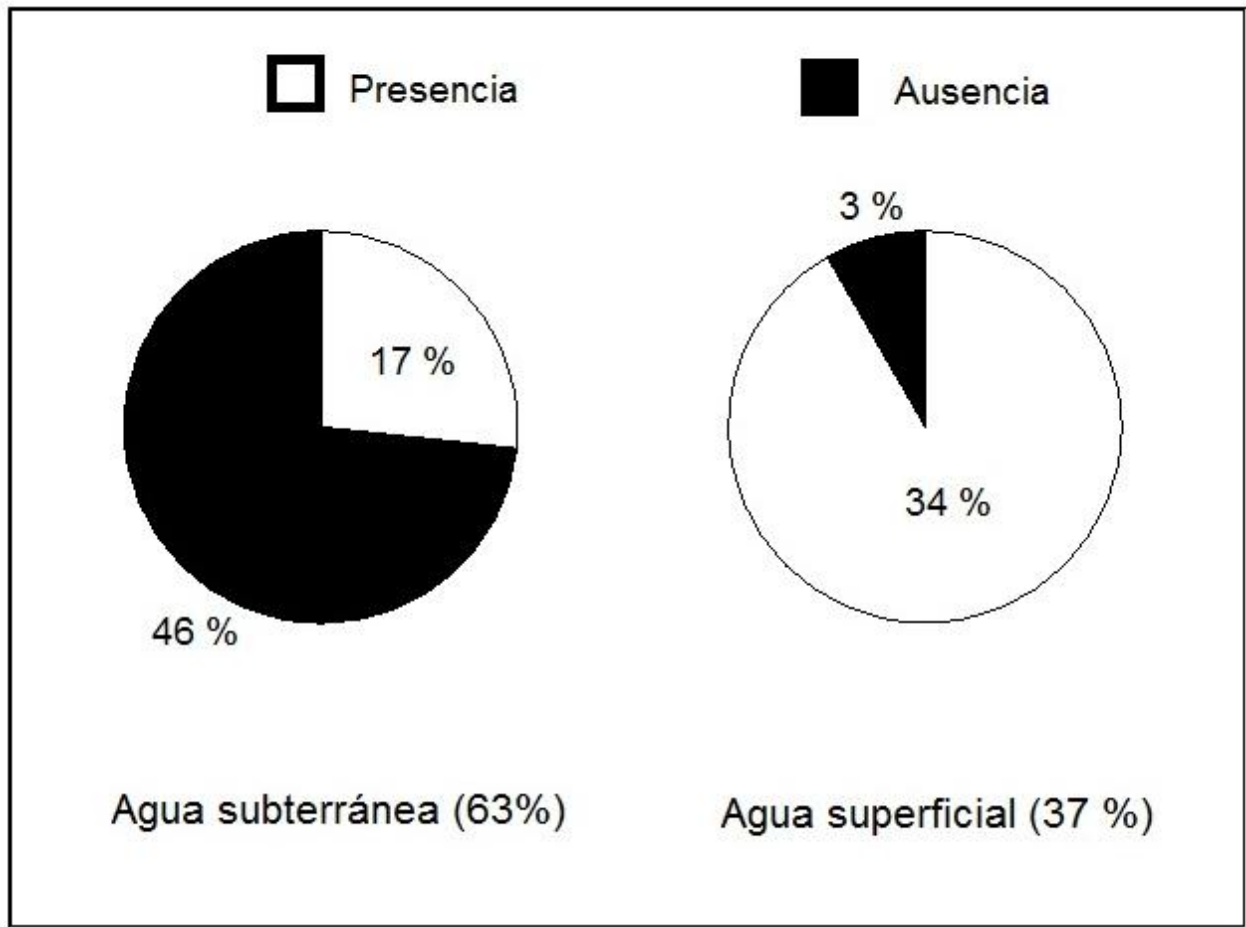


Figura 15. Presencia de *Escherichia coli* en agua subterránea y superficial del Modulo de Riego I-1, La Antigua, Veracruz.

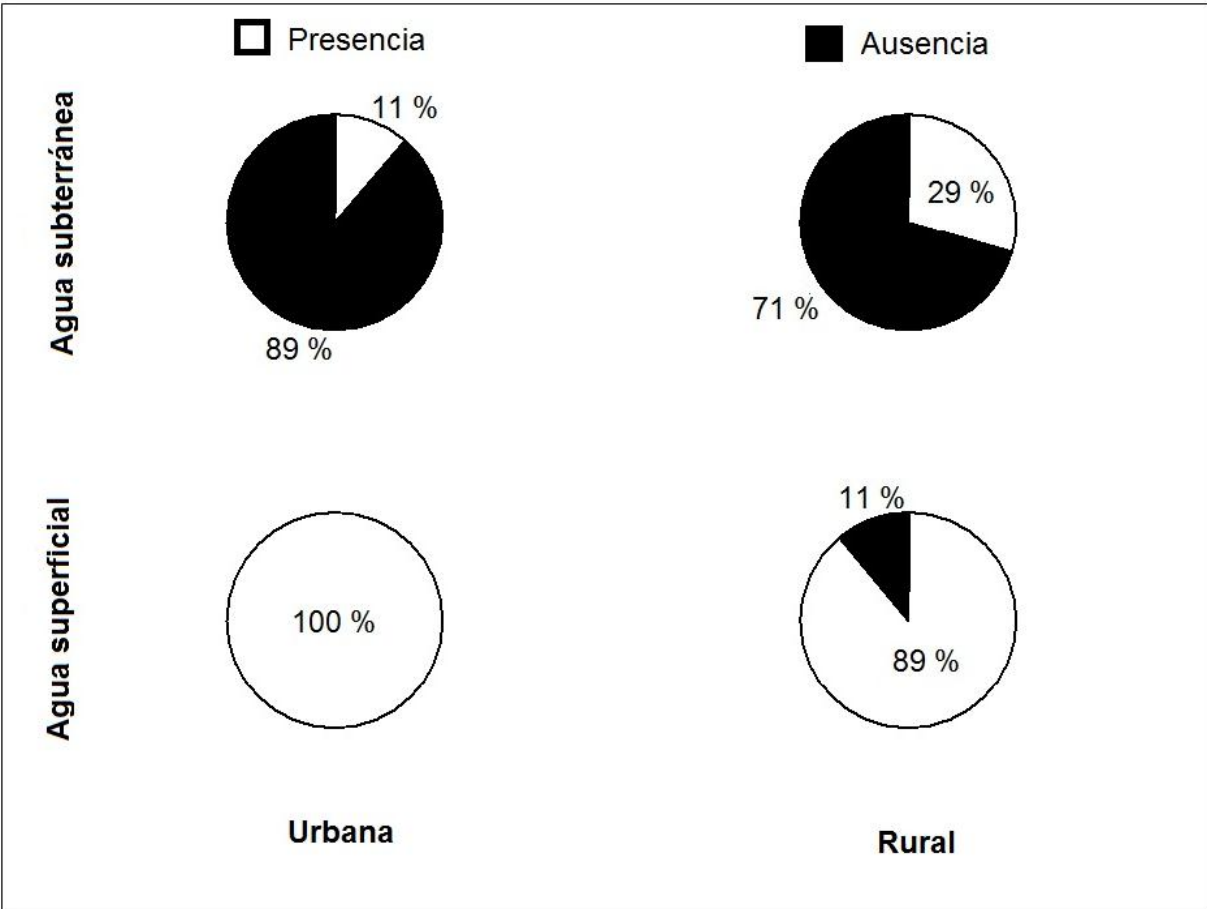


Figura 16. Presencia de *Escherichia coli* en el agua subterránea y superficial de la zona urbana y rural del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.

En el Cuadro 7 se presenta la presencia de *E. coli* en las diferentes fuentes de abastecimiento de los tres municipios bajo estudio. La bacteria se detectó en toda el agua de los municipios de Paso de Ovejas y La Antigua. De estos dos municipios, el 100% de las muestras de agua de corrientes naturales, presentaron contaminación, en contraste con el agua de norias de Úrsulo Galván.

Se encontró en aguas subterráneas provenientes de pozos profundos, que *E. coli* y otros organismos de coliformes totales incrementan la tasa de asimilación de NO_3^- , al sintetizar los aminoácidos y proteínas, así como el consumo de O_2 (Perdomo *et al.*, 2001). Se considera que las condiciones biofísicas y ambientales como el contenido de nitrógeno, la resistencia a condiciones de pH, factores edafológicos, permiten que *E. coli* pueda sobrevivir en las aguas subterráneas (Cifuentes y Ruiz, 1994; Juárez *et al.*,

2003). La presencia de *E. coli* en el agua podría generar riesgos epidemiológicos en humanos como las enfermedades de tipo gastrointestinal (Landeros *et al.*, 2012). Por lo tanto, es importante garantizar que los lineamientos mencionados por las Normas Mexicanas se apliquen eficazmente.

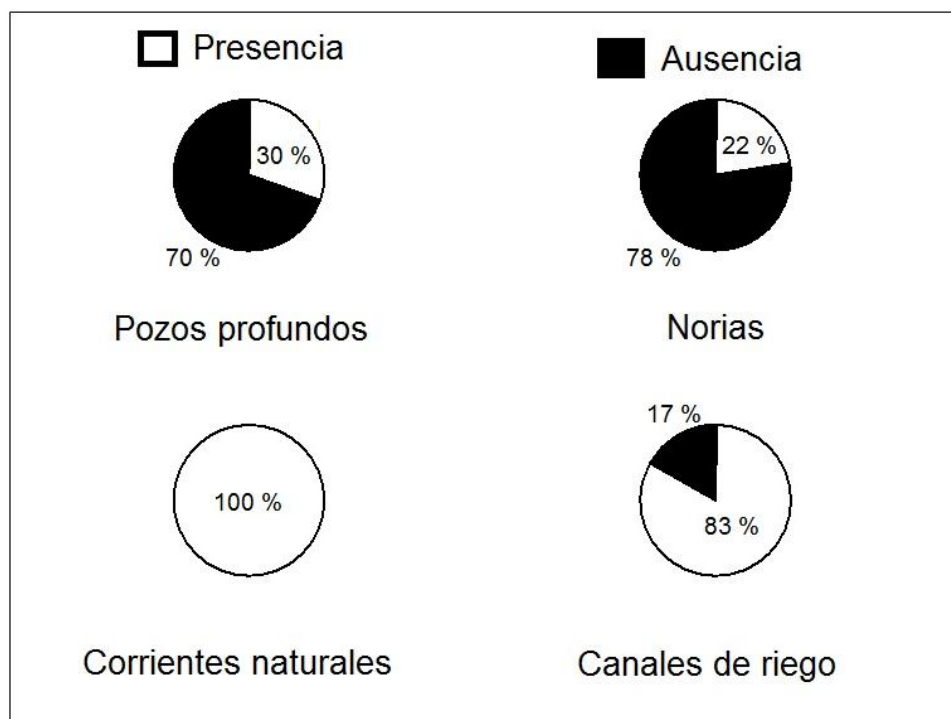


Figura 17. Presencia de *Escherichia coli* en pozos profundos, norias, corrientes naturales y canales de riego del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.

Cuadro 7. *Escherichia coli* en agua de pozos profundos, norias, corrientes naturales y canales de riego en los municipios del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.

Fuentes de abastecimiento	Úrsulo Galván	Paso de Ovejas	La Antigua
	Presencia (%)	Presencia (%)	Presencia (%)
Pozos profundos	-----	80	39
Norias	0	100	50
Corrientes naturales	-----	100	100
Canales de riego	100	50	100

Nota: espacios sin valor, indican la ausencia de fuente de abastecimiento.

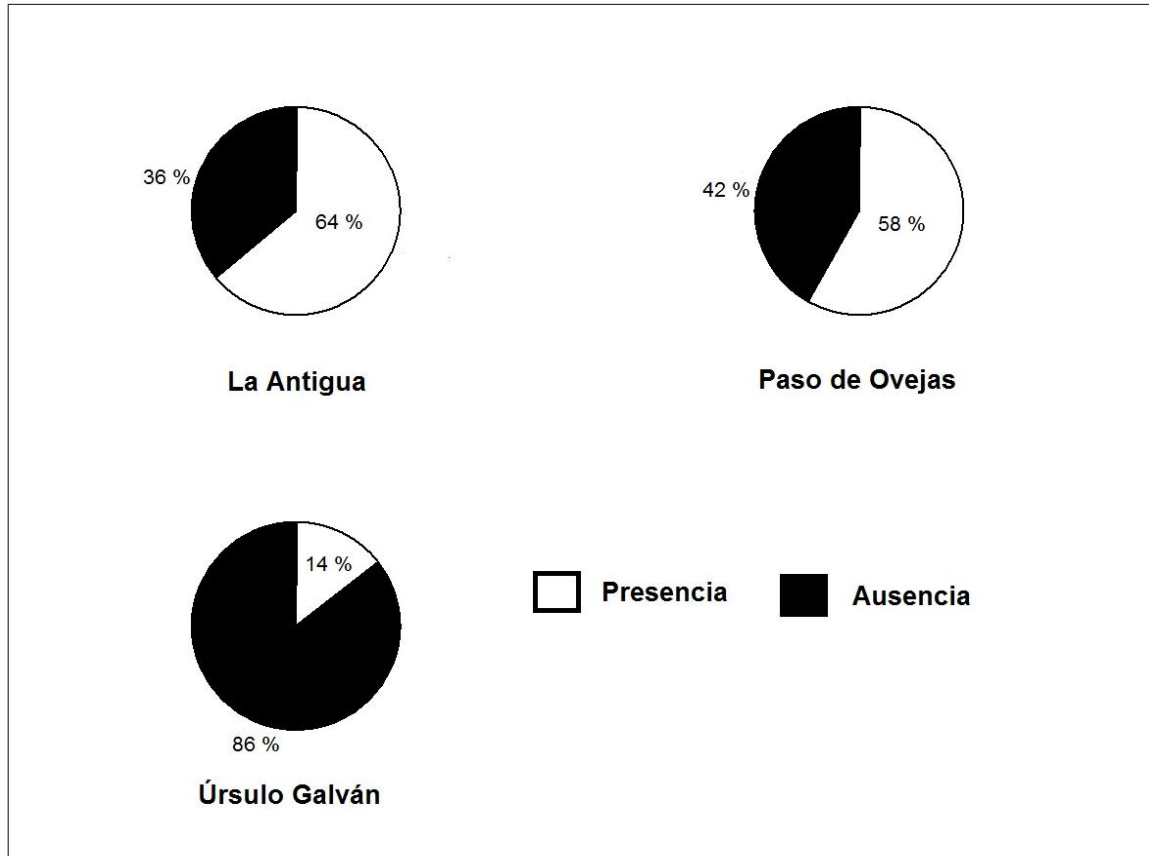


Figura 18. Presencia de *Escherichia coli* en agua del agroecosistema con caña de azúcar, en los municipios del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.

Respecto a la presencia de *E. coli* en agua subterránea y superficial encontrados en este estudio, es probable que dentro de este género se tenga la presencia de *E. coli* enteropatógena, la cual es una bacteria cuya epidemiología se ha estudiado poco en México, y puede ocasionar daño histológico en la mucosa del intestino delgado de personas infectadas, ocasionando la muerte de éstas, principalmente de los niños (Vidal *et al.*, 2007). Es importante conocer la presencia de *E. coli* tanto en agua subterránea como superficial con el fin de prevenir y mitigar el impacto a la salud humana y minimizar los riesgos de enfermedades gastrointestinales en niños menores de cinco años, lo cual es una prioridad tanto regional como nacional. Esto debido a la alta mortalidad infantil ocurrida en el año 2000 y 2007, que fue de 22.9 defunciones por 1000 menores de cinco años y 13.2 defunciones por 1000 menores de cinco años, respectivamente (Esparza *et al.*, 2009). Aunque se conocen las implicaciones de la

presencia de *E. coli*, en general, Flores *et al.*, (1995) indican que los sistemas de almacenamiento y distribución de agua intradomiciliario no cuentan con sistemas de cloración eficiente para su control. Además, estos microorganismos pueden estar presentes en menor proporción en agua subterránea profunda que en agua subterránea somera (Ramírez *et al.*, 2009).

En el estado de Veracruz existen reportes sobre la contaminación por *E. coli* de los sistemas acuáticos donde se obtienen las especies marinas para consumo (Castañeda *et al.*, 2005); esta contaminación se origina por los escurrimientos y los principales causas de agua previamente contaminados y que desembocan en el Golfo de México (Lango *et al.*, 2010).

Con base en los resultados de este estudio, se acepta la hipótesis particular, que indica que existen concentraciones de coliformes totales y presencia de *E. coli* en el agua subterránea y superficial del agroecosistema con caña de azúcar del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz, que superan los límites permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para uso potable.

8.4. Fuentes puntuales de contaminación bacteriológica de coliformes totales y *E. coli* en el agroecosistema con caña de azúcar

En el Módulo I-1 La Antigua, se identificaron 26 fuentes puntuales de contaminación bacteriológica de tipo permanente que fueron fosas sépticas, descargas de aguas negras, vertimientos de nosocomio y sistemas de drenaje (alcantarillados ubicados principalmente en las zonas urbanas) (Figura 19). De éstas fuentes, el 53% correspondieron a fosas sépticas, 19% a sistema de drenaje, 9% a descargas de aguas negras y 19% a fuentes no identificadas (Figura 20). Parte de las descargas de aguas negras localizadas en ciudad de Cardel y Paso de Ovejas, son vertidos a los canales de riego y al río La Antigua. Las fosas sépticas se encuentran confinadas en la poblaciones rurales (Playa Oriente, La Ceiba, El Mango, El Faisan, La Víbora, La Posta, El Salmoral, La Cuartana, La Vicente López, Caño Prieto, La Barra, Loma Fina y El Guayabal).

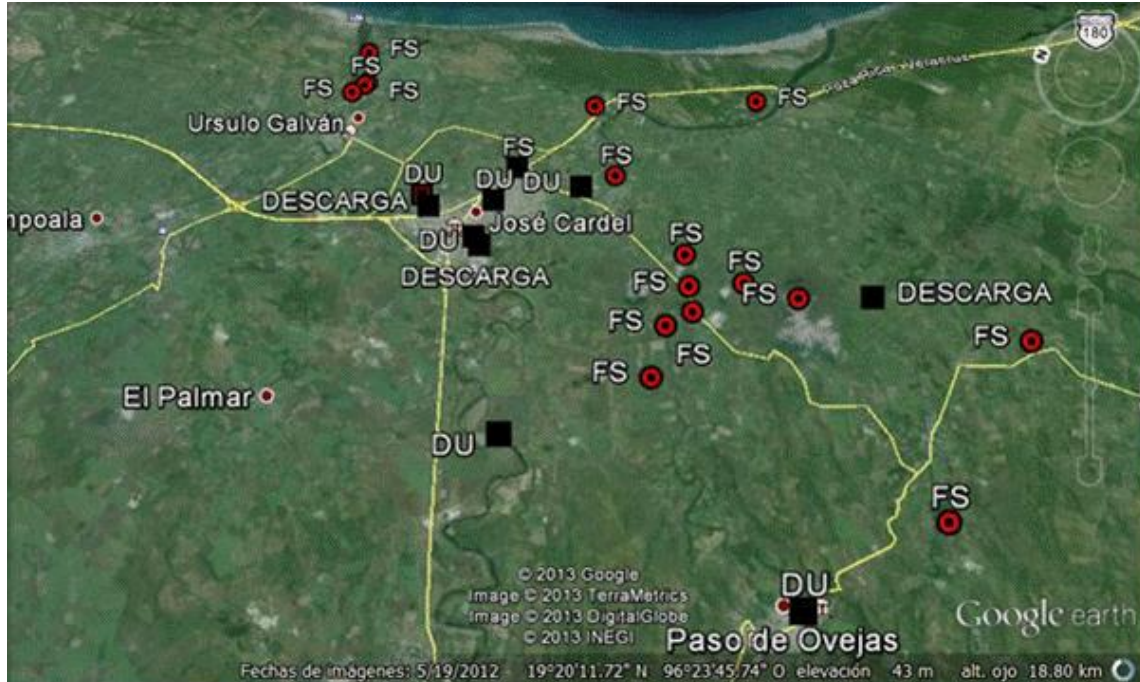


Figura 19. Fuentes puntuales de contaminación bacteriológica. Drenaje urbano (DU), fosas sépticas (FS) y descargas de aguas negras en el Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.

Las fuentes puntuales de contaminación encontrados en los tres municipios estudiados se indican en el Cuadro 8. En los tres municipios las fosas sépticas fueron las principales fuentes puntuales de contaminación con 72% en Úrsulo Galván, 58% en Paso de Ovejas y 39% en La Antigua. En este último municipio también destacó la presencia de descarga de drenaje con 31%.

En el Cuadro 9 se presentan los tipos de fuentes puntuales de contaminación en las fuentes de abastecimiento. Las fosas sépticas representaron el 73% y 78% de la contaminación en pozos profundos y norias, respectivamente; mientras que los drenajes constituyeron el 50% en corrientes naturales. En canales de riego, el 50% de las fuente no se identificaron pero el drenaje, fosas sépticas y descargas de aguas negras fueron similares. Mendez *et al.*, (2010), reporta que en Yucatán las fosas sépticas son una fuente de contaminación bacteriológica del agua subterránea.

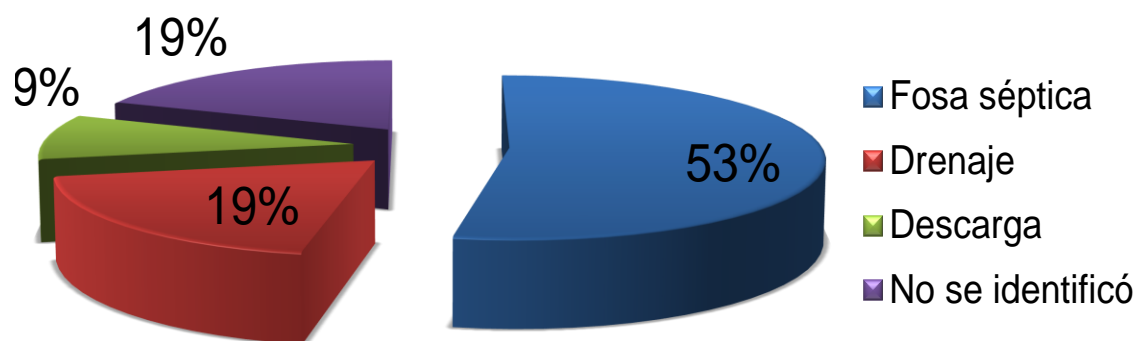


Figura 20. Fuentes puntuales de contaminación permanentes localizadas en el Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.

Cuadro 8. Fuentes puntuales de contaminación en los municipios de La Antigua, Paso de Ovejas y Úrsulo Galván.

Fuentes puntuales	Úrsulo Galván	Paso de Ovejas	La Antigua
	%	%	%
Fosa séptica	72	58	39
Drenaje	14	9	31
Descarga	-----	8	15
No se identificó	14	25	15

Nota: espacios sin valor, indica la ausencia de fuente de abastecimiento.

Cuadro 9. Fuentes puntuales de contaminación en pozos profundos, norias, corrientes naturales y canales de riego del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz.

Fuentes puntuales	Pozos profundos	Norias	Corrientes naturales	Canales de riego
	%	%	%	%
Fosa séptica	73	78	17	17
Drenaje	18	-----	17	17
Descarga	9	-----	16	16
No se identificó	-----	22	50	50

Nota: espacios sin valor, indica la ausencia de fuente de abastecimiento.

Al analizar la situación actual de los sistemas de saneamiento en el área de estudio, existe la posibilidad de riesgos a la salud humana como lo ocurrido en el siglo V y XV, en las culturas egipcias, griega y romanas donde las poblaciones sufrían grandes mortandades por deficientes condiciones sanitarias (Mora y Felipe, 2008). Las descargas de aguas negras vertidas en el río La Antigua, contaminan esta agua superficial, la cual a su vez se utiliza para el riego de los cultivos. Por lo tanto, esta agua del río representa una fuente de contaminación puntual para el agua de los canales de riego del Módulo I-1 La Antigua. El uso de los canales de riego es importante para el desarrollo de la producción y sostenimientos de los agroecosistemas, como en el caso de Chile donde 2.5 millones de ha de la región norte hasta la región Araucania depende económicamente del uso de agua de riego (Habic y Parra, 2001). Además, el uso de agua de riego contaminada por bacterias podría incrementar brotes de enfermedades gastrointestinales asociadas al consumo de fruta y hortalizas contaminadas; un ejemplo de esto es el caso de Chihuahua, México donde se encontró *E. coli* con valores de 2 a 3 de NMP/100 ml de agua y coliformes totales de 3 a 7 NMP/100 ml de agua de riego (Avila-Quezada *et al.*, 2008). Martínez *et al.*, 2009 indican que el agua contaminada puede ser un vehículo de transmisión de enfermedades puesto que acarrea desechos fecales de humanos y animales y de industrias como los Ingenios de la caña de azúcar. También mencionan que la falta de servicios de evacuación sanitaria de desechos y de agua limpia para beber, cocinar y

lavar son las principales causas de más de 12 millones de defunciones por año en el mundo. Por lo anterior, la contaminación del agua superficial y subterránea es originada por las fuentes puntuales (descargas de desechos en los canales y tuberías) y fuentes no puntuales (la agricultura). En este caso, la caña de azúcar y otros cultivos del Módulo de Riego I-1, La Antigua se consideran como fuentes no puntuales de contaminación.

Con los resultados obtenidos se acepta parcialmente la hipótesis particular que indica que las fuentes puntuales de contaminación microbiológica por coliformes totales y *Escherichia coli*, que se ubican en el agroecosistema con caña de azúcar del Módulo de Riego I-1 La Antigua, Veracruz puede ser la principal causa de la contaminación del agua subterránea y superficial. Esto es debido a que la contaminación por coliformes totales y *E. coli*, obedece principalmente a las fuentes puntuales de contaminación como las fosas sépticas, descargas de aguas negras y desechos de nosocomios (Lango *et al.*, 2010).

9. CONCLUSIONES

La concentración de coliformes totales y la presencia de *E. coli* se registraron tanto en aguas superficiales como en subterráneas; los valores presentados en pozos profundos, norias, corrientes naturales y canales de riego superan los límites permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. La concentración de coliformes totales de pozos profundos y norias no superan los límites máximos permisibles de contaminantes de la NOM-033-ECOL-1997 de aguas residuales. La contaminación bacteriológica por coliformes totales y *E. coli* se debe a las fuentes puntuales de contaminación como las fosas sépticas, descargas de aguas negras y desechos de nosocomios, que son vertidos en los canales de riego y corrientes naturales. Además, parte de los coliformes totales y *E. coli* que entran al sistema de conducción de agua que se utiliza para regar la caña de azúcar, provienen del agua del río La Antigua, el cual abastece al Módulo de Riego I-1 La Antigua. Por lo anterior, este tipo de contaminación bacteriológica es un riesgo para la salud de los habitantes de las zona urbana y rural que se localizan en el área del Módulo referido. Con base en lo anterior, es necesario establecer la cultura del cuidado ambiental y, en particular, de la calidad del agua; así como garantizar que las Normas Oficiales Mexicanas se apliquen eficientemente, a fin de prevenir mayores impactos negativos al ambiente y a la salud pública.

10. LITERATURA CITADA

- Adame G. J., R. A. Trigos L., L. G. Iglesias A., N. Flores E., M. Luna R. 2011. Variaciones isoenzimáticas y patogénica de *Fusarium* spp. Asociadas con la pudrición de tallo y raíz de vainilla. *Tropical and Subtropical Agroecosistemas*.13: 299-306.
- Altieri M. A. 1999. *Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable*. Editorial Nordan–Comunidad. 327 p.
- Arias G. F. 1976. *Teoría de sistemas*. Capítulo uno. Coordinador Fernando Arias Galicia. Trillas. México. 13-22 p.
- Armida-Alcudia L., O. Ruiz-Rosado, S. Salgado-García, F. Gallardo-López, M. E. Nava-Tablada, J. F. Juárez-López. 2011. Socioeconomic and technological factors in sugar cane (*Saccharum officinarum* L.) agroecosystems production in Chontalpa, Tabasco. *Tropical and subtropical Agroecosystems*, 13: 261-269.
- Arrojo A. P. 2001. Valoración de las aguas subterráneas en el marco económico general de la gestión de aguas en España. *La economía del agua subterránea y su gestión colectiva*. Compiladores: Nuria Hernández Mora y Ramón Llamas. Fundación Marcelino Botín. Ediciones Mundi-Prensa. España. 550 p.
- Ávila-Quezada G., E. Sánchez, E. Muñoz, R. Martínez L., E. Villalobos. 2008. Diagnóstico de la calidad microbiológica de frutas y hortalizas en Chihuahua, México. *Revista internacional de botánica experimental*. 77: 129-136.
- Barrera E. G., I. Wong C., A. S. Sobrino F., X. Guzmán G., F. Hernández G., F. Saavedra V. 1998. Estudio preliminar de contaminación bacteriológica en la laguna pueblo viejo, Veracruz, México. *Rev. Int. Contaminación Ambiental*. 14 (2): 63-68.

- Bautista F., Y. Aguilar D., E. Batllori. 2011. Amenazas, vulnerabilidad y riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la península de Yucatán. *Teoría y Praxis* 9: 9-31.
- Cabrera S. A., J. Pacheco A., E. Cuevas S., J. Ramírez., M. Comas., A. Cámara. 2002. Hidrogeoquímica del agua que subyace a la Japay I, en Mérida, Yucatán, México. *Ingeniería* 6 (3): 29-40.
- Camargo J. A. y A. Alonso. 2007. Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Ecosistema*, 16 (2): 98-110.
- Campos P. C., M. Cárdenas G., A. Guerrero C. 2008. Comportamiento de los indicadores de contaminación fecal en diferente tipo de aguas de la sabana de bogota (Colombia). *UniversitasScientiarum* 13(2): 103-108.
- Carles G. J., M. García M., L. Avella R. 2001. Aspectos económicos y sociales de la utilización del agua subterránea en la comunidad Valenciana. La economía del agua subterránea y su gestión colectiva. Compiladores: Nuria Hernández Mora y Ramón Llamas. Fundación Marcelino Botín. Ediciones Mundi-Prensa. España. 550 p.
- Castañeda C. Ma. del R., V. Pardio S., E. Orrantia B., F. Lango R., 2005. Influence of wátertemperatura and salinity on seasonal occurrences of *Vibrio cholera* and enteric bacteria in oyster-producing areas of Veracruz-México. *Marine Pollution Bulletin* 50 (2005): 1641-1648.
- Chagas C. I., J. Morettón J., J. Santanatoglia O., M. Paz, H. Muzio, M. De Siervi, M. Castiglioni. 2006. Indicadores de contaminación biológica asociados a la erosión Hídrica en una cuenca de pampa ondulada Argentina. *Cl. Suelo (Argentina)* 24 (I) 1-10.
- Chaves C. A. y F. Araya R. 2002. Efectos de la actividad humana en la cuenca del río San Carlos. *Tecnología en Marcha*. 18 (2): 10-14.

- Cinfuentes E., U. Blumenthal, G. Ruíz-Palacios, S. Bennett, A. Peasey. 1994. Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual: El Valle del Mezquital, México. *Salud pública de México*. 36(1): 3-9.
- CNA. 2001. Comisión Nacional de agua. Segunda sección: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 83p. [En línea] URL: <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=62&n3=92>
- CNA. 2003. Programa hidráulico regional 2002-2006. Comisión Nacional del Agua (CNA), Región X Golfo Centro, México.
- CNA. 2005. Comisión Nacional de agua. Plan Director para la modernización integral del riego 035, La Antigua, Veracruz. 149 p.
- Cordero C. D. 2008. Esquemas de pago por pagos por servicios ambientales para la conservación de cuencas hidrográficas en el Ecuador. *Investigación Agraria: Sistemas y recursos forestales* 17(1): 54-66.
- Davidson M. W. 2013. Cell Biology and Microscopy estructura and function of cells &viruses. Universidad Estatal de Florida. URL: (Fuente:<http://micro.magnet.fsu.edu/cells/bacteriacell.html>). Fecha de consulta: 20/11/2013.
- De la Heras I. J. y J. L. Moreno A. 2005. La calidad del agua contaminación de las aguas producida por la agricultura. Limitaciones para su uso en la agricultura. *Agua y Agronomía*. Editores: F. Martín de Santa, O. M., P. López F. y A. Calera B. Grupo Mundi Prensa. 606 p.
- De la Isla B. M. de L. 2007. Rescatemos nuestros ríos. Compiladora: María de Lourdes de la Isla de Bauer. Colegio de Postgraduados. Programa de Hidrociencias. *Graphi comunicaciones*. Coyoacan, D. F. México. 201 p.

- Del Ángel P. A. L., G. Díaz P., R. Guajardo P., B. C. Linares B. 2011. Landscapes and fragile economy: ecosystems and agroecosystems in the Coatepec- La Antigua basin, Veracruz Mexico.14: 629-642.
- Esparza A. M., A. Bautista-Márquez, Ma. del C. Gonzales-Andrade, V. L. Richardson-López-Collada. 2009. Mortalidad por enfermedad diarreica en menores, antes y después de la introducción de la vacuna contra el rotavirus. Salud pública de México. 51(4): 285-290.
- Farrand R. J. y E. Mendoza S. 2005. El marco teórico y la teoría de sistemas. Quivera, 7 (002): 230-248.
- Ferguson C., A. M. De Roda H., N. Altavilla, D. Deere and N. Ashbolt. 2003. Fate and transport of surface water pathogens in watersheds. Crit. Rev. Envir. Sci. Tech. 33: 299-361.
- Figueruelo A. J. E. y M. Marino D. 2004. Química física del ambiente y de los procesos medioambientales. Editorial REVERTE. S. A. Barcelona-Bogotá-Buenos Aires-Caracas-México. 591 p.
- Flores A. J. J., G. J. Suárez H., M. A. Puc F., M. R. Heredia N., Ma. de la L. Vivas R., J. Franco M. 1995. Calidad bacteriológica del agua potable de la ciudad de Mérida, México. Salud pública de México. 37(3): 236-239.
- Forgetta V., H. Rempel, F. Malouin, Jr. Vaillancourt, E. Topp, K. Dewar and S. Diarra M. 2012. Pathogenic and multidrug-resistant *Escherichia fergusonii* from broiler chicken. Poultry Science 91: 512-525.
- Foster S., H. Garduño, K. Kemper, A. Tuinhof, M. Nanni, C. Dumars 2007. Protección de la calidad del agua subterránea: definición de estrategias y establecimiento de prioridades 2002-2006. Banco mundial programa asociado de la GW.MATE (Equipo Asesor en Gestión de Aguas Subterráneas). Washington D. C. Nota informática 8: 6p. [URL:www.worldbank.org/gwmate](http://www.worldbank.org/gwmate).

- Galaviz V. I. 2010. Contaminación del agua con nitratos y nitritos y su impacto en la salud pública en la zona de influencia del Módulo de Riego (I-1) La Antigua, Ver. México. Tesis para obtener el grado de Doctor en ciencias. Tepetates, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz. Colegio de Posgraduados Campus Veracruz. 129 p.
- Galaviz V. I., C. Landeros S., Ma. del R. Castañeda C., F. Lango R. 2012. Theoretical Conceptual Assembly for the Analysis of Sugarcane Agroecosystems in the Central Gulf of Mexico: An Eclectic Model. *Journal of Agricultural Sciencia*. 4 (12): 214-220
- García A. C. 2004. Detección del gen *stx₂*, en muestras ambientales y evaluación de su variabilidad. Tesis de doctorado, microbiología ambiental y biotecnología (1999-2001), Universidad de Barcelona: 283 pp.
- GESAMP (IMO/FAO/UNESCO–IOC/WMO/WHO/AIEA/UN/UNEP- Joint Group o Experts on the Scientific Aspects on Marine Environmental Protection), 2001. *Protecting the Oceans from Land-based Activities* GESAMP Reports and Studies (71): p.162.
- Gordillo M. A. J., R. B. E. Cabrera C., M. Hernández M., E. Galindo, E. Otazo, F. Prieto 2010. Evaluación regional del impacto antropogénico sobre el aire, agua y suelo, caso: Huasteca Hidalguense, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 26 (3): 229-251.
- Guber A. K., R. Shelton D., and A. Pachepsky Y. 2005. Effect of manure on *Escherichia coli* attachment to soil. *J. Environ. Qual.* 34: 2086-2090.
- Habic C. E. y O. Parra B. 2001. Impacto ambiental de los canales de riego sobre la fauna de peces. *Recursos naturales y biodiversidad*. 17 (3): 52-60.
- Hellawell J. M. 1986. *Biological indicators of freshwater pollution and environmental manegement*. Elsevier Applied Sciencies Publishers, NY. 546 P.

- Hernández J., Y. Espinoza, L. Malpica, M. De Jesús 2011. Calidad del agua de riego y parámetros microbiológicos y químicos del suelo de la zona agrícola de Barbacoas, estado Aragua. *Rev. Fac. Agronomía* 37(1): 1-10.
- Herrero M. A., V. Maldonado M., G. Sardi, M. Flores, A. Orlando y L. Carbo. 2000. Distribución de la Calidad del agua subterránea en sistemas de producción agropecuarios bonaerenses. Dos condiciones de manejo y grado de contaminación. *Revista Arg Producción Animal*. 20 (3-4): 237-245.
- Hunter C., J. Perkins, J. Tranter, and P. Hardwick. 2000. Fecal bacteria in the waters of and upland area in Debeshire, England: The influence of agricultural land use. *J. Environ. Quality* 29: 1253-1261.
- Ingle D. J., O. Clermont, D. Skurnik, E. Denamur, T. Walk S., and M. Gordon D. 2011. Biofilm formation by and thermal niche and virulence characteristics of *Escherichia spp.* *Applied and environmental microbiology*. 77 (8): 2695–2700.
- Juárez F. L. A., J. Silva S., F. J. Uribe S., E. Cifuentes G. 2003. Microbiological indicators of water quality in the Xochimilco Canals, Mexico City. *Salud pública de México*. 45 (5): 389-395.
- Juárez M. J., G. Martínez R., J. Díaz S., M. L. Pérez G., H. Brust C. 1990. Evaluación del sistema integral para tratamiento del agua en un hospital general de la ciudad de México. *Salud Publica* 32: 566-574.
- Krupa S. V. 1999. *Polución, población y plantas*. Editorial Mexicana. Edición Rogelio Dromundo Salazar. Registro número 306. 184 pp. ISBN 968-839-251-0.
- Landeros S. C., F. Langos R., Ma. del R. Castañeda C., I. Galaviz V., I. Nikolskii G., Palomarez, G. M., Reyes, V. C., Mínguez, R. M. M. 2012. Assessment of Water Pollution in Different Aquatic Systems: Aquifers, Aquatic Farms on the Jamapa River, and Coastal Lagoons of Mexico. *Journal of Agricultural Sciencia*. 4 (7): 186-196.

- Landeros S.C., S. L. Hernández R., M. C. López V, y A. Ortega L. 2000. Pérdidas de nitrógeno (N-NO₃) proveniente de fertilizantes en los ingenios la gloria y el modelo del estado de Veracruz. Avances de Investigación del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz. Tepetates, Veracruz, México.
- Lango R. F., Ma. del R. Castañeda C., J. E. Zamora C., G. Hernández Z., M. A. Ramírez B., E. Solis M. 2012. La acuarifolia de especies ornamentales marinas: un mercado de retos y oportunidades. Lat. Am. J. Aquat. Res. 40(1): 12-21.
- Lango R. F., C. Landeros S. and Ma. del R. Castañeda C. 2010. Bioaccumulation of cadmium (CD), lead (PB), and arsenic (AS), in crassostreaVirginica (Gmelin, 1791), from tamiahua lagoon system, Veracruz México. Rev. Int. contam. Ambie. 26(3):201-210.
- Lleó A. 2001. Física para ingenieros. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, Barcelona, México. 590 p.
- López R. O. y M. Lechuga A. 2001. Contaminantes en los cuerpos de agua del sur de Sonora. Salud pública de México. 43 (4): 298-305.
- Martínez D. J. P., F. Gallardo L., L. C. Bustillo G., y A. Pérez V. 2011. El agroecosistema, unidad de estudio y transformación de la diversidad agrícola. In: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). 2011. La biodiversidad en Veracruz: Estudio de Estado. Gobierno del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana Instituto de Ecología A. C. México.
- Martínez R. A., K. Fonseca G. y J. L. Ortega S. y C. García L. 2009. Monitoreo de la calidad microbiológica del agua en la cuenca hidrológica del Río Nazas, México. Revista química viva 8(1): 35-47.
- Méndez N. R. I., L. San Pedro C., E. R. Castillo B., E. Vázquez B. 2010. Modelación del tiempo de conservación de muestras biológicas de agua. Revista Internacional Contaminación Ambiental. 26 (4): 327-335.

- Méndez-Novelo R. I., E. A. Chan-Gutiérrez, E. R. Castillo-Borges, E. R. Vázquez-Borges, A. E. Espadas-Solis. 2012. Digestión anaerobia de efluentes de fosas sépticas. Ingeniería Investigación y Tecnología. VIII (3): 339-349.
- Michanie S. (2003). *Escherichia coli* O157:H7: La bacteria que disparó el HACCP en la industria de la carne. Énfasis alimentos 9(3): 1-7.
- Mora A. D., C. Felipe P. 2008. Saneamiento y relación con la salud de la niñez en el contexto mundial 2004. Revista costarricense de salud pública. 17(33): 56-66.
- Mora-Bueno D., L. del C. Sánchez-Peña., L. M. Del Razo, C. A. González-Arias, I. M. Medina-Díaz, M. del L. Robledo-Marengo, A. E. Rojas-García. 2012. Presencia de arsénico y coliformes en agua potable del municipio de Tecuala, Nayarit, México. Rev.Int. Contam.Ambie. 28(2) 127-135.
- Moreno C. P., J. L. Rojas G., D. Zárate L., A. Ortiz P., A. L. Lara D., T. Saavedra V. 2002. Diagnóstico de los manglares de Veracruz: Distribución, vínculo con los recursos pesqueros y su problemático. Madera y Bosques. 8 (1): 61-88.
- Moreno S. J. C. 2010. Evaluación del manejo del nitrógeno en el agroecosistema caña de azúcar. Tesis para obtener el grado de Doctor en ciencias. Tepetates, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz. Colegio de Posgraduados Campus Veracruz. 129 p.
- Muñoz A. y Stancich. 2005. Condiciones para la sustentabilidad del agua. Un modelo público para la provincia de Santa Fe, Argentina. Integrantes de la asamblea Provincial por el Derecho al agua, la red vida y el programa Argentina sustentable. 2-12.
- NMX-AA-42 (1987). Norma Oficial Mexicana. Calidad del agua determinación del número más probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (Termotolerantes) y *Escherichia coli*. Presuntiva. Pp 1-21.

NOM-127-SSA1 (1994). Norma Oficial Mexicana. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Publicada en el año 2000. URL: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>. Fecha de consulta: (5 de agosto de 2012).

NOM-180-SSA1 (1998). Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Equipos de tratamiento de tipo doméstico. URL: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/180ssa18.html>. Fecha de consulta: (5 de agosto de 2012).

NOM-109-SSA1-1994. Proyecto de Norma Oficial Mexicana, bienes y servicios. Procedimientos para la toma, manejo y transporte de muestras de alimentos para su análisis microbiológico. URL: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/ssa1/ssa1109p.pdf>. Fecha de consulta: (5 de agosto de 2012).

Olivas E. E., J. P. Flores M., M. Serrano A., E. Soto M., J. Iglesias O., E. Salazar S., M. Fortis H. 2011. Indicadores fecales y patógenos en agua descargada al río Bravo. Terra Latinoamericana. 29(4): 1-8.

Ongley E. D. 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Estudio FAO Riego y Drenaje No 55. FAO, Roma, Italia.

Orozco B. V. y E. A. Gutiérrez G. 1983. Contaminación fecal contera en la zona del Puerto de ensenada, baja california. Ciencias marinas. 9 (1): 27-34.

Pacheco A. J., A. Cabrera S., R. Pérez C. 2004. Diagnóstico de la calidad de agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México. Ingeniería 8 (2): 165-179.

Palacios V. E. 2007. El uso de los recursos hidráulicos en México en el siglo XXI. Rescatemos nuestros ríos. Compiladora: María de Lourdes de la Isla de Bauer.

Colegio de Postgraduados. Programa de Hidrociencias. Graphi comunicaciones. Coyoacan, D. F. México. 201 p.

Parra L. F. 1981. ¿Para qué sirve la teoría de sistema en sociología?. REIS. 15(81): 77-111.

Perdomo C. H., N. Casanova O., S. Ciganda V. 2001. Contaminación de aguas subterráneas con nitratos y coliformes en el litoral sudoeste del Uruguay. Agrocienca. 5(1). 10-22.

Pereyra D. D., D. G. Cruz T., J. A. Pérez S. 2011. La evapotranspiración Real (ETR) en la cuenca del río La Antigua, Veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático. Investigaciones Geográficas, Boletín del instituto de Geografía, UNAM. (75): 37-50.

Pérez C. y R. D. Rodríguez F. 2009. Innovación docente. Infecciones infantiles provocados por *Escherichia coli*: Síndrome urémico hemolítico y otras. Innovaciones docente. Infecciones infantiles provocadas por *Escherichia coli*: Síndrome urémico hemolítico y otras. Serie pedagógica De la Universidad a la Escuela. Revista Iberoamericana de Educación. 50(2): 1-8.

Pérez V. A. y C. Landeros S. 2009. Agricultura y deterioro ambiental. Elementos 73: 19-25.

Pérez V. A., M. A. Ortiz P. 2002. Cambio de cubierta vegetal y vulnerabilidad a la inundación en el curso bajo del río Papaloapan, Veracruz. Investigaciones Geográficas, Boletín del instituto de Geografía, UNAM. (48): 90-105.

Ramírez E., E. Robles, Ma. G. Sainz, R. Ayala, E. Campoy. 2009. Rev. Internacional de contaminación ambiental. 25(4): 247-255.

Ramírez S. J., G. Contreras F., M. C. Gómez E. 2005. La fase estacionaria en la bacteria *Escherichia coli*. Revista latinoamericana de microbiología. 43 (3-4): 92-101.

- Rebolledo M. A., A. L. Del ángel P., J. V. Megchún G., J. Adame G., J. Nataren V. y A. Capetillo B. 2011. Coberteras vivas para el manejo de malezas en mango (*Mangifera indica L.*) Cv. Manila. *Tropical and Subtropical Agroecosistemas*.13: 327-338.
- Rivera V. R., O. L. Palacios V., J. Chávez M., A. Belmont M., I. Nikolski G., Ma. de L. De la Isla De B., A. Guzmán Q., L. Terrazas O., R. Carrillo G. 2007. Contaminación por coliformes y Helminetos en los ríos Texcoco, Chapingo y San Bernardino Tributarios de la parte oriental de la cuenca del valle de México. *Rev. Int. Contaminación Ambiental*. 23 (2): 69-77.
- Rodríguez A. G. 2002a. Principales características y diagnóstico de los grupos patógenos de *Escherichia coli*. *Salud publica México*. 44(5): 464-475
- Rodríguez O. M. y I. Espejel. 2001. *Las Aguas Residuales Municipales como Fuentes Terrestres de Contaminación de la Zona Marino-Costera en la Región de América Latinas y el Caribe*, documento Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA, Oficina Regional de América Latina y el Caribe ORPALC y Oficina de Coordinación del Programa de Acción Mundial para la Protección del Medio Marino frente a las Actividades Realizadas en Tierra PAM, México, DF.
- Romero A. M., A. Colín C., E. Sánchez S., Ma. L. Ortiz H. 2009. Tratamientos de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la carga orgánica. *Rev. Int. Contaminación Ambiental*. 25 (3): 157-167.
- Sans F. X. 2007. La diversidad de los agroecosistemas. Asociación española de ecología terrestre (AEET). *Ecosistemas*. 16(1):44-49.
- Sarabia M. I. F., R. Cisneros A., J. Aceves De A., H. M. Durán G., J. Castro L. 2011. Calidad del agua de riego en suelos agrícolas y cultivos del Valle de San Luis Potosí, México. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*. 27 (2): 103-113.

- Sasson A. 1993. La alimentación del hombre del mañana. UNESCO. Reverté S.A.
- Segura M. S. 1985. Diccionario Etimológico Latino-Español. Editores: Enrique Fontanillo Merino y Hipólito Remondo Fernández. Ediciones generales Anaya. Villafrancia, Madrid, España. 1113 p.
- Silva M. S., E. Martínez M., A. Álvarez E. 2002. Tecnología alternativa compatible con el ambiente para el tratamiento de aguas de enfriamiento: ionización de plata y cobre. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 18(3): 117-130.
- Vidal J. E., A. Canizález R., J. Gutiérrez J., F. Navarro G. 2007. Patogénesis molecular, epidemiología y diagnóstico de *Escherichia coli* enteropatógena. Salud pública de México. 49(5): 376-386.
- Wong C. L. y G. Barrera E. 1996. Implicaciones microbiológicas en la zona costero-marina, p. 369-376. In: A. V. Botello, J. L. Rojas.Galaviz, J. A. Benítez, D. Zárate-Lomelí (Eds). Golfo de México, Contaminación e impacto Ambiental; Diagnóstico y Tendencias. Universidad Autónoma de Campeche. EPOMEX Seria Científica, 5. 666 p.