

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES

CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS

*“ESTUDIO SOBRE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN DE LOS
CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS
RELACIONADOS CON EL CAUCE DEL RÍO SAN PEDRO”*

T E S I S

Que presenta

GUILDA GUZMÁN COLIS

Para obtener el grado de

DOCTORADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

TUTOR

Dr. en C. FRANCISCO JAVIER AVELAR GONZÁLEZ

Aguascalientes, Ags., Abril de 2011.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

COMITÉ TUTORIAL

Dr. en C. Francisco Javier Avelar González
(Universidad Autónoma de Aguascalientes)

Dra. en C. Elsa Marcela Ramírez López
(Universidad Autónoma de Aguascalientes)

Dr. en C. Frédéric Thalasso
(CINVESTAV)

ASESOR EN ESTADÍSTICA

M. en C. Silvia Rodríguez Narciso
(Universidad Autónoma de Aguascalientes)

AGRADECIMIENTOS

A Dios,

Por quien soy lo que soy, por llenar continuamente mi vida de bendiciones y darme un sinfín de oportunidades para ser mejor. Gracias Señor.

A mis hijos,

Por cederme su tiempo para continuar estudiando, por ser una de las partes más importantes de mi vida y los que me impulsan a seguir superándome.

Los quiero mucho.

A mis padres, mis hermanos y el resto de mi familia,

Por el cariño y apoyo que me dan siempre, por creer en mí.

Gracias por estar siempre presentes, los quiero.

A mis amigas y amigos,

Por su afecto, sus palabras de aliento y todos los momentos de alegría y tristeza que comparten conmigo. Gracias por su amistad y apoyo.

A mi comité tutorial,

Por su apoyo y valiosa asesoría para la realización de este trabajo.

Gracias al Dr. Javier Avelar por la confianza que puso en mi para desarrollar el presente proyecto.

A la maestra Silvia Rodríguez,

Por su tiempo, conocimientos y apoyo para realizar el análisis estadístico de los datos.

A la Dra. Consolación Martínez y al Dr. Roberto Rico,

Por sus valiosas observaciones para enriquecer esta tesis.

A mis compañeros del laboratorio 52,

Por su disponibilidad e invaluable apoyo en este proyecto.

Muchas gracias Félix, Laurita, Romy, Samanta y Mony.

A Grupo Ha',

Por darme la oportunidad de crecer profesionalmente. Gracias a cada uno de mis compañeros por su apoyo, muchas gracias Luis Marín por las facilidades otorgadas para terminar la tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología,

Por la beca No. 170010, otorgada para la realización de mis estudios de Doctorado.

A todas las personas que desinteresadamente de alguna u otra manera me apoyaron en la realización y culminación de este proyecto, muchas gracias.

CARTAS DE LIBERACIÓN



Centro de Ciencias Básicas

**M. en C. GUILDA GUZMÁN COLIS
ALUMNO (A) DEL DOCTORADO
EN CIENCIAS BIOLÓGICAS,
P R E S E N T E .**

Estimado (a) alumno (a) Guzmán:

Por medio de este conducto me permito comunicar a Usted que habiendo recibido los votos aprobatorios de los revisores de su trabajo de tesis y/o caso práctico titulado: **"Estudio sobre los niveles de contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos relacionados con el cauce del Río San Pedro"**, hago de su conocimiento que puede imprimir dicho documento y continuar con los trámites para la presentación de su examen de grado.

Sin otro particular me permito saludarle muy afectuosamente.

ATENTAMENTE
Aguascalientes, Ags., 29 de marzo de 2011
"SE LUMEN PROFERRE"
LA DECANO


M. en C. MARTHA CRISTINA GONZÁLEZ DÍAZ

c.c.p.- Archivo
MCGD,mjda



Aguascalientes, Ags., 30 de Junio de 2009

DR. FRANCISCO JAVIER ÁLVAREZ RODRÍGUEZ
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS
PRESENTE.

Por este medio, hago constar que la M. en C. Guilda Guzmán Colis, cumplió con todos los requisitos de su trabajo del proyecto de tesis: *"Estudio sobre los niveles de contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos relacionados con el cauce del Río San Pedro"*, del Doctorado en Ciencias Biológicas.

Su documento de tesis ha sido revisado y avalado como versión final por los miembros del comité tutorial, por lo cual puede procederse a la programación de su Examen de Grado.

Sin otro particular por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE
"SE LUMEN PROFERRE"

COMITÉ TUTORAL


DR. EN C. FRANCISCO JAVIER AVELAR GONZÁLEZ
TUTOR

DR. EN C. FRÉDERIC THALASSO
ASESOR

DRA. EN C. ELSA MARCELA RAMÍREZ LÓPEZ
ASESOR

c.c.p. M. en C. Guilda Guzmán Colis.- Alumno.
c.c.p. Archivo



Dr. FRANCISCO JAVIER ÁLVAREZ RODRÍGUEZ
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS
PRESENTE

Estimado Dr. Álvarez,

Hago de su conocimiento que he tenido el placer de participar como asesora de tesis de la M. en C. Guilda Guzmán Colis, estudiante del programa de Doctorado en Ciencias Biológicas.

El desarrollo de su trabajo doctoral durante este periodo de estudios mostró su gran capacidad y calidad como investigadora.

Por este conducto hago de su conocimiento que la M. en C. Guzmán Colis, pasante del Doctorado en Ciencias Biológicas, ha finalizado satisfactoriamente la redacción de su tesis y se encuentra preparada para la defensa de su tesis.

Para los fines que la presente convenga, le envío mis distinguidos y cordiales saludos.

ATENTAMENTE
Aguascalientes, Ags., a 26 de junio del 2009

"SE LUMEN PROFERRE"

Elsa Marcela Ramírez López.
Dra. en C. Elsa Marcela Ramírez López
Asesora

Centro de Ciencias Básicas, Departamento de Ingeniería Bioquímica.
Av. Universidad No. 940, Ciudad Universitaria, 20100, Aguascalientes, Ags.
Teléfono: 01 (449) 910 8426, Fax: 01 (449) 910 8401
Correo electrónico: emramir@correo.uaa.mx



Cinvestav

17 de junio de 2009

A QUIEN CORRESPONDA

Con el presente, informo que revisé el borrador de tesis "Estudio sobre los niveles de contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos relacionados con el cauce del río San Pedro", que presenta Guilda Guzmán Colis, para obtener el grado de Doctora en ciencias biológicas, de la Universidad Autónoma de Aguascaliente.

Mi opinión al respecto del trabajo presentado es que la tesis está bien escrita y presenta de forma clara y objetiva, una gran cantidad de resultados relativos a la calidad ambiental de presas, ríos y pozos del Estado de Aguascalientes. La tesis es original, en numerosos aspectos y en particular, presenta una interpretación estadística y discusión de los resultados sobresaliente.

Con este trabajo, Guilda Guzmán Colis demuestra tener la capacidad de realizar de forma integral e independiente, investigación científica original y de buen nivel, así como de interpretar y discutir resultados en el contexto de la literatura y de sacar las conclusiones pertinentes.

Por todo lo anterior, considero que la tesis "Estudio sobre los niveles de contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos relacionados con el cauce del río San Pedro", puede considerarse como la versión definitiva y Guilda Guzmán Colis puede defenderla públicamente.

Atentamente,

Dr. Frédéric Thalasso
Investigador Titular 3C

Departamento de Biotecnología y Bioingeniería - Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN.
Av. IPN 2508, Col. San Pedro Zacatenango - 07360 México. Tel. +52 (55) 57.47.33.20. Fax. +52 (55) 57.47.33.13.

RESUMEN

El presente trabajo formó parte del Proyecto General: “Estudio sobre los agentes, cargas contaminantes y toxicidad que afectan la cuenca del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes” (FOSEMARNAT-2004-01-78). Este estudio comprendió la evaluación de la calidad del agua de los principales cuerpos de agua relacionados al cauce del río San Pedro y de los pozos aledaños al mismo. Además de integrar la información de estudios previos derivados del proyecto general, en el presente trabajo se propone el empleo de técnicas estadísticas para el manejo y análisis de datos, así como un programa de monitoreo del cauce del río San Pedro y los principales cuerpos de agua relacionados.

Se evaluaron las presas El Saucillo, Presidente Calles, Gral. Abelardo L. Rodríguez y El Niágara, y el pequeño cuerpo de agua denominado El Sabinal. También fueron evaluados 17 pozos de agua, seleccionados en función de su cercanía con el cauce del río San Pedro (< 300 m). Se realizaron dos campañas de muestreo, una en temporada de sequía y otra posterior a las lluvias. Se determinaron parámetros de campos, indicadores de materia orgánica, nutrientes, tóxicos orgánicos, microbiológicos y metales pesados. El empleo del índice de calidad del agua (ICA) como forma de agrupación simplificada de algunos parámetros indicadores del deterioro de la calidad del agua, permitió de manera más sencilla evaluar la calidad de los cuerpos de agua. De acuerdo con el ICA, la presa Presidente Calles tiene calidad “aceptable”, mientras que el agua de las presas El Saucillo y Gral. Abelardo L. Rodríguez, fluctúa entre los límites de calidad “aceptable” y “poco contaminada”. La calidad del agua de la presa El Niágara y El Sabinal es reflejo de la condición actual del río San Pedro, ubicándose dentro de los niveles de “poco contaminado” a “fuertemente contaminado”. Los resultados obtenidos en los pozos de agua, no mostraron evidencia concluyente de contaminación del acuífero por aguas superficiales.

Las pruebas no paramétricas de Mann-Whitney y ji-cuadrada no mostraron diferencias significativas del nivel de contaminación del río San Pedro y El Chicalote, entre las campañas de muestreo. El análisis de correlación indicó una baja relación entre los contaminantes presentes en agua y sedimentos de los ríos. El análisis de componentes principales (ACP) permitió identificar que las variables de materia orgánica y nutrientes son las de mayor influencia. Pese a que no fue posible realizar el análisis geoestadístico, la información obtenida de los análisis antes mencionados, aunada a la variabilidad espacial de los índices de calidad (ICA e IGCA) y el objetivo del monitoreo, permitieron establecer la frecuencia, el número y ubicación de las estaciones de muestreo, así como los parámetros a medir en el programa de monitoreo del cauce del río San Pedro y cuerpos de agua relacionados.

ÍNDICE

RESUMEN.	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.	xi
ÍNDICE DE TABLAS.	xiv
1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Disponibilidad y Presiones del Agua Dulce.	1
1.2. Evaluación y Monitoreo de la Calidad del Agua Dulce.	3
1.3. Área de Estudio.	11
2. JUSTIFICACIÓN.	18
3. OBJETIVOS.	19
3.1. Objetivo General.	19
3.2. Objetivos Particulares.	19
4. METODOLOGÍA.	20
4.1. Selección de los sitios de muestreo y recolección de muestras en los cuerpos de agua superficial.	21
4.2. Selección y recolección de muestras de los pozos de agua. . .	23
4.3. Determinaciones analíticas.	24
4.4. Análisis de datos.	26
4.5. Integración de Información y diseño del programa de monitoreo.	27
5. RESULTADOS.	36
5.1. Cuerpos de agua superficial.	36
5.2. Comparación del nivel de contaminación.	66
5.3. Cuerpo de agua subterránea.	69
5.4. Integración de información y programa de monitoreo.	72
6. DISCUSIÓN.	90
7. CONCLUSIONES.	106
8. ANEXOS.	108
9. GLOSARIO.	203
10. BIBLIOGRAFÍA.	209

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de las subcuencas actuales del Estado de Aguascalientes.	11
Figura 2. Principales corrientes y cuerpos de agua del Estado de Aguascalientes.	13
Figura 3. Distribución de los acuíferos de Aguascalientes.	15
Figura 4. Planteamiento metodológico general del estudio.	20
Figura 5. Mapa del Estado de Aguascalientes con los cuerpos de agua seleccionados y la ubicación de los sitios de muestreo en cada uno de ellos.	22
Figura 6. Mapa del Estado de Aguascalientes con la ubicación de los pozos seleccionados	23
Figura 7. Mapa del Estado de Aguascalientes con la ubicación de los sitios de muestreo en los ríos San Pedro y Chicalote.	29
Figura 8. Acercamiento de los sitios evaluados en los ríos San Pedro y Chicalote, localizados en la zona centro del Estado.	30
Figura 9. Ubicación de las estaciones de muestreo en la presa El Saucillo.	35
Figura 10. Concentraciones de coliformes totales y fecales, presa El Saucillo.	37
Figura 11. Concentraciones de materia orgánica y nutrientes, presa El Saucillo.	38
Figura 12. Intervalos de las concentraciones de metales pesados, presa El Saucillo.	39
Figura 13. Distribución espacial del ICA de la presa El Saucillo.	40
Figura 14. Ubicación de las estaciones de muestreo en la presa Presidente Calles.	41
Figura 15. Concentraciones de coliformes totales y fecales, presa Presidente Calles.	43
Figura 16. Concentraciones de materia orgánica y nutrientes, presa Presidente Calles.	44

Figura 17. Intervalos de las concentraciones de metales pesados, presa Presidente Calle.	45
Figura 18. Distribución espacial del ICA de la presa Presidente Calles. . . .	46
Figura 19. Ubicación de las estaciones de muestreo en la presa Abelardo L. Rodríguez.	47
Figura 20. Concentraciones de coliformes totales y fecales, presa Abelardo L. Rodríguez	49
Figura 21. Concentraciones de materia orgánica y nutrientes, presa Abelardo L. Rodríguez.	50
Figura 22. Intervalos de las concentraciones de metales pesados, presa Abelardo L. Rodríguez	51
Figura 23. Distribución espacial del ICA de la presa Abelardo L. Rodríguez.	52
Figura 24. Ubicación de las estaciones de muestreo en la presa El Niágara.	54
Figura 25. Concentraciones de coliformes totales y fecales, presa El Niágara.	55
Figura 26. Concentraciones de materia orgánica y nutrientes, presa El Niágara.	56
Figura 27. Intervalos de las concentraciones de metales pesados, presa El Niágara.	57
Figura 28. Distribución espacial del ICA de la presa El Niágara.	59
Figura 29. Ubicación de las estaciones de muestreo en El Sabinal.	60
Figura 30. Concentraciones de coliformes totales y fecales en El Sabinal. .	61
Figura 31. Concentraciones de materia orgánica y nutrientes en El Sabinal.	62
Figura 32. Intervalos de las concentraciones de metales pesados en El Sabinal.	64
Figura 33. Distribución espacial del ICA en El Sabinal.	65
Figura 34. Comparación de los valores del ICA entre los cuerpos de agua superficial evaluados.	66

Figura 35. Comparación de los indicadores de DBO ₅ y DQO entre los cuerpos de agua superficial evaluados.	67
Figura 36. Tablas de contingencia 2x2 y valores de ji-cuadrada de los ríos San Pedro y El Chicalote.	73
Figura 37. Gráficas de correlación de parámetros con coeficientes mayores a 0.5.	74
Figura 38. Valor característico de los componentes principales de los ríos San Pedro y El Chicalote.	75
Figura 39. Relación de las variables y combinaciones lineales de los dos primeros componentes del río San Pedro.	76
Figura 40. Relación de las variables y combinaciones lineales de los dos primeros componentes del río El Chicalote	77
Figura 41. Diagrama de dispersión de sitios de muestreo del río San Pedro.	78
Figura 42. Diagrama de dispersión de los sitios de muestreo del río El Chicalote.	79
Figura 43. Diagrama de dispersión de los sitios de muestreo de los ríos San Pedro y El Chicalote.	79
Figura 44. Análisis de componentes principales del río San Pedro.	80
Figura 45. Análisis de componentes principales del río El Chicalote.	81
Figura 46. Comportamiento espacial de la calidad del agua del río San Pedro.	82
Figura 47. Comportamiento espacial de la calidad del agua del río El Chicalote.	84
Figura 48. Mapa de contornos del IGCA con todos los sitios de muestreo del río San Pedro posicionados y con los sitios seleccionados para el programa de monitoreo.	85
Figura 49. Mapa de contornos del IGCA con todos los sitios de muestreo del río El Chicalote posicionados y con los sitios seleccionados para el programa de monitoreo.	86
Figura 50. Mapa con la ubicación de las estaciones de colecta para el programa de monitoreo propuesto.	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Presiones que sufren los ecosistemas de agua dulce.	2
Tabla 2. Corrientes que alimentan las principales presas en la cuenca del río San Pedro.	14
Tabla 3. Capacidad, área y número de estaciones de muestreo de los cuerpos de agua seleccionados.	21
Tabla 4. Ubicación, profundidad y usos de los pozos seleccionados.	24
Tabla 5. Sitios de muestreo evaluados en el cauce del río Chicalote.	27
Tabla 6. Sitios de muestreo evaluados en el cauce del río San Pedro.	28
Tabla 7. Valores promedio de los parámetros de campo de la presa El Saucillo.	37
Tabla 8. Valores promedio de los parámetros de campo de la presa Presidente Calles.	42
Tabla 9. Valores promedio de los parámetros de campo de la presa Abelardo L. Rodríguez.	48
Tabla 10. Valores promedio de los parámetros de campo de la presa Abelardo L. Rodríguez.	54
Tabla 11. Valores promedio de los parámetros de campo de El Sabinal . . .	61
Tabla 12. Concentración de los metales As, Hg, Fe, Mn y Zn en pozos agrícolas.	69
Tabla 13. Concentración de los metales As, Hg, Fe, Mn y Zn en pozos de agua potable.	70
Tabla 14. Parámetros que presentaron diferencias significativas en los ríos San Pedro y El Chicalote.	73
Tabla 15. Resumen de programa de monitoreo.	87
Tabla 16. Propuestas para el sITox.	102

1. INTRODUCCIÓN

“El agua es el elemento y principio de las cosas”

Tales de Mileto

1.1. Disponibilidad y Presiones del Agua Dulce

El agua cubre tres cuartas partes de la superficie total de la tierra, lo que representa aproximadamente 1400 millones de Km³ de agua. A pesar de esta aparente abundancia, existen diferentes factores que limitan la cantidad de agua disponible para el consumo humano (Arellano, 2002; CONAGUA, 2004). De acuerdo con el balance hídrico del planeta, solamente el 0.007% de las aguas dulces se encuentran realmente disponibles para el hombre en fuentes superficiales y subterráneas. Esta disponibilidad presenta enormes diferencias en las distintas partes del mundo, debido principalmente a la densidad de población y a las amplias variaciones de la precipitación. Cerca del 75% de la población humana se concentra en países y regiones donde sólo existe el 20% de la disponibilidad de agua (UNESCO/WWAP, 2003). Sin embargo, la crisis global del agua no sólo es un problema cuantitativo, los problemas en torno a la calidad del agua son crecientes y muy variables entre las regiones y los países en el mundo. La calidad de las aguas dulces: ríos, lagos y aguas subterráneas, refleja gran medida sus condiciones socioeconómicas (Toledo, 2002).

La calidad y la cantidad del agua procedente de fuentes superficiales y subterráneas, experimentan la influencia de la geografía, el clima y las actividades humanas (Heinke, 1996). Aunque no se conocen con exactitud los efectos que producen las variaciones climáticas sobre los recursos hídricos, se estima que el cambio climático será el responsable de aproximadamente el 20% de incremento en la escasez global del agua, lo que a su vez contribuirá al aumento de las cargas contaminantes y junto con el incremento de la temperatura, provocarán el deterioro de la calidad del agua. Existe una amplia gama de usos humanos y de procesos de transformación que alteran (Tabla 1), a veces de forma irreversible, la integridad de los ecosistemas de agua dulce (UNESCO/WWAP, 2003).

Tabla 1. Presiones que sufren los ecosistemas de agua dulce.

ACTIVIDAD HUMANA	EFFECTO POTENCIAL	FUNCIÓN EN PELIGRO
<i>Crecimiento demográfico y de consumo</i>	Aumenta la extracción de agua y la adquisición de tierras cultivadas mediante el drenaje de humedales; aumenta la necesidad de todas las demás actividades, con los riesgos consiguientes.	Prácticamente, todas las funciones del ecosistema, incluyendo funciones de hábitat, producción y regulación.
<i>Desarrollo de infraestructura (presas, diques, desvíos, etc.)</i>	La pérdida de integridad altera el ritmo y la cantidad de las corrientes fluviales, la temperatura del agua y el transporte de nutrientes y sedimentos, y como resultado el relleno del delta bloquea las migraciones de peces.	Cantidad y calidad del agua, hábitats, fertilidad de la llanura de inundación, pesquerías, economías del delta.
<i>Conversión de tierras</i>	Elimina componentes clave del entorno acuático; pérdida de funciones; integridad; hábitat y biodiversidad; altera pautas de escurrimiento; inhibe la recarga natural, rellena de limo los cuerpos de agua	Control natural de inundaciones, hábitats para pesquerías y aves acuáticas, recreo, suministro de agua, cantidad y calidad del agua.
<i>Exceso de cosecha y explotación</i>	Reduce recursos vivos, las funciones del ecosistema y la biodiversidad (agotamiento de aguas subterráneas, colapso de pesquerías)	Producción de alimentos, suministro de agua, calidad y cantidad de agua.
<i>Introducción de especies exóticas</i>	Competencia de especies introducidas; altera producción y ciclo de nutrientes; y causa pérdida de biodiversidad entre especies nativas.	Producción de alimentos, hábitat de fauna y flora, actividades de recreo.
<i>Descarga de contaminantes en tierra, aire o agua</i>	La contaminación de cuerpos de agua altera la química y ecología de ríos, lagos y humedales; las emisiones de gas invernadero producen notables cambios en los patrones de escurrimiento y precipitación.	Suministro de agua, hábitat, calidad del agua; producción de alimentos; cambio climático puede también repercutir en la energía hidráulica, capacidad de dilución, transporte, control de inundaciones.

Fuente: IUCN, 2000.

No obstante que el bien más importante que ofrecen los ecosistemas de agua dulce es proporcionar el agua tanto para el consumo doméstico como para las actividades agropecuarias y la industria, estos sistemas cumplen con otras funciones significativas: favorecen la diversidad y riqueza en especies, previenen y regulan las inundaciones,

previenen la intrusión de agua salada, reducen los efectos de la erosión al mantener sedimentos, retienen sustancias nutritivas y eliminan sustancias tóxicas, estabilizan el microclima, sirven de sumidero de carbono para el mundo, sirven de medio de transporte y constituyen excelentes lugares turísticos (Bucher *et al.*, 1997, Aguilar, 2003). Por lo tanto, al deteriorarse sustancialmente la calidad del agua, no sólo se reduce la disponibilidad para los usos humanos directos sino también para las funciones y los servicios ambientales necesarios para el sostenimiento de la vida en el planeta (Toledo, 2002).

1.2. Evaluación y Monitoreo de la Calidad del Agua Dulce

La calidad del agua de los sistemas dulceacuícolas está definida por la composición química y microbiológica de esta, referida siempre a un uso en particular que se le dé al recurso (Bartram y Ballance, 1996; CENMA, 2006). En realidad la calidad del agua se degenera diariamente por la acción de un amplio conjunto de contaminantes como aguas residuales sin tratamiento previo, desperdicios provenientes de la producción de alimentos y la manufactura de papel, fertilizantes, metales pesados, microbios, disolventes industriales, compuestos tóxicos como el petróleo y los plaguicidas, nutrientes inorgánicos provenientes del riego, lluvia ácida y sedimentos (PNUMA, 2004).

Los estudios científicos sobre la calidad del agua surgieron de la preocupación por la salud humana. Uno de los primeros trabajos se registró en el año de 1840, cuando se estudió el agua utilizada para beber en las grandes ciudades de Inglaterra, a fin de tratar de entender las causas que provocaban las epidemias periódicas de tifoidea y cólera. En el año de 1910, investigadores evaluaron la relación entre los efluentes industriales y la salud humana; y hasta el año de 1950 legisladores de Norte América y Europa establecieron leyes de protección a los ecosistemas acuáticos (O'Neill *et al.*, 1994).

A nivel mundial, la década de los 70 del siglo XX marcó el comienzo de una serie de actividades en torno del agua, debido principalmente a la problemática ambiental que presentaban desde entonces muchos cuerpos de agua en el mundo (UNESCO/WWAP, 2003). En las últimas décadas existe un creciente interés por conocer y proteger los ecosistemas dulceacuícolas, estudiar sus cambios en el tiempo y desarrollar criterios

físicos, químicos y biológicos que permitan estimar el efecto y magnitud de las intervenciones humanas (Norris y Hawkins, 2000; Toro *et al.*, 2003).

El estudio de la calidad del agua involucra las acciones de evaluación y monitoreo, de acuerdo con Chapman (1996), el proceso de evaluación corresponde a la valoración de la naturaleza física, química y biológica del agua en relación con su calidad natural, efectos humanos y uso pretendido. Este proceso incluye el uso del monitoreo como principal herramienta para definir la condición del recurso, establecer tendencias y determinar las fuentes potenciales de contaminación.

Las operaciones involucradas en la evaluación de la calidad del agua son muchas y complejas, dado que involucra amplias y diversas disciplinas (Ward *et al.*, 1990). De acuerdo con MacDonald (1994) en Timmerman *et al.* (2000), los pasos a seguir para desarrollar un proyecto de monitoreo y evaluar efectivamente la calidad del agua son los siguientes:

- (1) Proponer objetivos generales.
- (2) Definir presupuesto aproximado y limitaciones de personal.
- (3) Revisar la información existente.
- (4) Definir objetivos específicos e hipótesis.
- (5) Determinar las variables a ser monitoreadas, ubicación de toma de muestras, procedimientos de muestreo y técnicas analíticas.
- (6) Evaluar los datos de calidad de agua monitoreados o desprendidos de análisis empíricos.
- (7) Revalorar los objetivos específicos y su compatibilidad con los recursos disponibles.
- (8) Iniciar monitoreo piloto.
- (9) Analizar y evaluar la información obtenida del monitoreo piloto.
- (10) Revalorar objetivos de monitoreo y su compatibilidad con los recursos existentes, y modificar los proyectos de monitoreo en forma apropiada.
- (11) Continuar monitoreo.
- (12) Preparar informes regulares y recomendaciones.

El proceso para determinar los objetivos comienza con una investigación profunda de todos los factores y actividades que influyen directa o indirectamente la calidad del

agua: características geográficas del área, usos del agua, desarrollo económico y fuentes de contaminación (Bartram y Ballance, 1996). Dependiendo del objetivo del programa, el monitoreo puede ser de dos tipos:

- *Monitoreo con un objetivo particular:* monitoreo direccionado a un área y problema específico, involucrando un conjunto simple de variables.
- *Monitoreo con multiobjetivos:* monitoreo que cubre varios usos del agua: consumo humano, industrial, agrícola y vida acuática. Requiere del registro de un conjunto numeroso de variables.

Una vez establecidos los objetivos se debe concebir un plan para llevarlos a cabo, el cual debe incluir el tipo de muestra, el número y ubicación de las estaciones de colecta, el tipo de variables y la frecuencia del muestreo. Todo esto, considerando los recursos humanos y económicos disponibles. Aunque el costo de los programas de monitoreo es relativamente bajo, comparado con los impactos económicos y sociales producidos por los efectos de la contaminación que no fueron detectados a tiempo para tomar acciones preventivas adecuadas (Colin y Quevauviller, 1998). El plan de muestreo reúne previamente los antecedentes necesarios sobre los niveles base (o límites máximos permisibles) de los constituyentes que se desean estudiar y las metodologías adecuadas para la determinación de cada uno de ellos. Asimismo, en dicho programa se debe considerar la representatividad e integridad de la muestra. La etapa de muestreo es fundamental en el monitoreo de la calidad del agua, dado que es aquí donde se pueden cometer los errores más grandes, más aún si considera que los errores se propagan en los análisis posteriores de laboratorio (CENMA, 2006). Además, el monitoreo de la calidad del agua debe ser acompañado de un monitoreo hidrológico apropiado (Chapman, 1996).

La selección de la ubicación de las estaciones de muestreo y la frecuencia del mismo, son altamente dependientes de las características del cuerpo de agua y de su nivel de deterioro (Bartram y Ballance, 1996). Una selección apropiada permitirá evaluar la variación espacial y temporal de la calidad del agua, buscando determinar la distribución superficial de la contaminación y las tasas de migración de los contaminantes, así como valorar la efectividad de las medidas para controlar o remediar dicha contaminación (Qadir *et al.*, 2008).

La selección de la variables a determinar en una evaluación y monitoreo de la calidad del agua está en función de los objetivos planteados inicialmente en el programa, sus principales usos y fuentes contaminantes, así como de los costo que involucra dicho monitoreo o evaluación (NHWQM, 1996). De acuerdo con O'Neill *et al.* (1994), Chapman (1996), Bartram y Ballance (1996) y Salas (2004), dentro de las variables posibles a seleccionar se encuentran:

1. **Parámetros Hidrológicos:** La determinación del régimen hidrológico del cuerpo de agua es un aspecto importante en la valoración de su calidad. La medición del flujo del cuerpo de agua es importante en un programa, ya que éste afecta significativamente su capacidad para asimilar y transportar contaminantes. La descarga es el volumen de flujo por un periodo de tiempo dado, la cantidad de materia disuelta y suspendida de un cuerpo de agua dependen de la descarga y la concentración de la misma. La medición del nivel del agua es necesaria para calcular el flujo de masa en lagos y aguas subterráneas. Se recomienda realizar frecuentemente una determinación de la concentración de sedimentos.
2. **Parámetros Generales:** La temperatura de las aguas superficiales es influenciada por la latitud, altitud, estación del año, hora del día, circulación del aire, profundidad del cuerpo de agua, etc., su determinación es importante, ya que afecta los procesos físicos, químicos y biológicos del cuerpo de agua. El color y la turbiedad del agua determinan la profundidad a la cual la luz es transmitida, esto controla la productividad primaria del cuerpo de agua. El olor del agua resulta de la presencia de compuestos orgánicos volátiles, usualmente, la presencia de olor puede deberse a la presencia de residuos domésticos o industriales, o a una productividad biológica alta. La conductividad es sensible a las variaciones de los sólidos disueltos, principalmente a las sales minerales. El pH es una variable importante en la valoración de la calidad del agua, debido a su influencia en los procesos biológicos y químicos que se llevan a cabo dentro del cuerpo de agua y todos los procesos asociados con las reservas de agua y su tratamiento. El potencial redox caracteriza el estado de oxidación-reducción de las aguas naturales. El oxígeno disuelto es un compuesto esencial para todas las formas de vida acuática, incluyendo a los organismos responsables por los procesos de autopurificación en las aguas naturales, su contenido varía con la temperatura, salinidad, turbulencia, actividad

fotosintética y presión atmosférica; alto contenido de materia orgánica disminuye los niveles de oxígeno disuelto. La dureza de las aguas dulces depende principalmente de la presencia de sales disueltas de calcio y magnesio. La determinación de clorofilas es una medida indirecta de la biomasa de algas y un indicador del estado trófico de un cuerpo de agua.

3. **Nutrientes:** El nitrógeno es un elemento esencial para todos los organismos vivos, en cuerpos de agua puede encontrarse como amonio, nitritos, nitratos y nitrógeno orgánico. El fósforo es otro elemento esencial y existe en los cuerpos de agua en forma particulada y disuelta como ortofosfatos, fósforo inorgánico total y fósforo total; generalmente es el nutriente limitante para el crecimiento de las algas, por lo tanto, controla la productividad primaria del cuerpo de agua. Las fuentes de estos nutrientes pueden ser naturales o antropogénicas.
4. **Materia Orgánica:** La mayoría de los cuerpos de agua dulce contienen materia orgánica, la cual puede ser medida como carbono orgánico total (COT). Otros indicadores de la materia orgánica presente pueden obtenerse midiendo propiedades relacionadas, principalmente la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) o la demanda química de oxígeno (DQO). Usualmente la DQO incluye toda la DBO y otras demandas químicas. En la mayoría de las muestras la $DQO > DBO > COT$, sin embargo, en algunos casos esta relación puede no ser verdad, como cuando las muestras contienen sustancia tóxicas. El contenido de materia orgánica en cuerpos de agua es empleado como un indicador de contaminación. Los ácidos húmicos y fúlvicos contribuyen también con la calidad del agua superficial, usualmente no son tóxicos, pero tienen efectos en los procesos hidroggeoquímicos y bioquímicos.
5. **Iones Mayores:** Las concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- son generalmente muy variables en aguas superficiales y subterráneas debido a la geología local, y condiciones climáticas y geográfica.
6. **Otras variables inorgánicas:** Otros de los compuestos que se puede encontrar en los sistemas dulceacuícolas y afectar su funcionamiento son los sulfuros, compuestos de sílice, fluoruros, boro y cianida.

7. **Metales:** Las fuentes de contaminación de los cuerpos de agua por metales pesados pueden ser antropogénicas o geogénicas. La evaluación de la contaminación de metales pesados es un aspecto importante en los programas de monitoreo, el Sistema de Monitoreo Ambiental Global (GEMS) incluye diez metales importantes: Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn. Aunque no son estrictamente metales, también son incluidos el As y Se. La Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA) considera con prioridad alta al As, Cd, Cu, Cr, Pb, Hg, Ni y Zn. Algunos metales como el Al, Cu, Fe, Mn y Zn son esenciales en concentraciones traza para funciones fisiológicas y procesos bioquímicos.
8. **Contaminantes Orgánicos:** Muchos compuestos orgánicos entran en los cuerpos de agua como resultados de las actividades humanas, estos compuestos tienen propiedades físicas, químicas y toxicológicas significativamente diferentes. Por lo cual, no es factible realizar un monitoreo individual, sin embargo, es posible seleccionar los contaminantes orgánicos prioritarios, basándose en su prevalencia, toxicidad y otras propiedades. Aceites minerales, productos del petróleo, fenoles, pesticidas, Bifenilos policlorados (PCBs) y agentes tenso-activos (detergentes) son algunos ejemplos de estos tipos de compuestos.
9. **Indicadores Microbiológicos:** El riesgo más común para la salud humana asociada con el agua, es la presencia de microorganismos patógenos. Muchos de estos provienen de aguas contaminadas con heces fecales humanas, las cuales contienen una variedad de patógenos intestinales: *Salmonella*, *Shigella*, *Escherichia Coli*, *Campylobacter*, *Vibrio* y *Yersinia*. Otros patógenos ocasionalmente encontrados son: *Mycobacterium*, *Pasteurella*, *Leptospira* y *Legionella*.

La amplia variedad de contaminantes que actualmente son liberados al medio ambiente, ha motivado el impulso de nuevas metodologías para evaluar la calidad del agua de los sistemas dulceacuícolas. La importancia de métodos biológicos empleando plantas o animales de todos los niveles taxonómicos han sido demostrados para toda clase de monitoreos de la calidad del agua y programas de evaluación. El uso de la biota proporciona una medida integrada de todos los impactos sobre un cuerpo de agua, también como una posible interpretación histórica niveles de contaminación. Algunos

bioensayos y pruebas de toxicidad son usados ampliamente en el mundo, debido a su simplicidad y bajo costo. Su uso es recomendado fuertemente en conjunto con monitoreos o programas de evaluación de variables físicas, químicas e hidrológicas (Chapman, 1996; Figueroa *et al.*, 2003).

Independientemente del tipo de variables usadas en la evaluación y monitoreo de la calidad de un cuerpo de agua, siempre se genera un gran número de datos que requieren de un tratamiento adecuado para su interpretación. La forma y nivel de la presentación de estos datos es crucial (Chapman, 1996). Por lo cual, los datos generados deben de ser procesados y presentados de manera fácil y sencilla, que permita entender los patrones espaciales y temporales de la calidad del agua, considerando los procesos naturales, características del cuerpo de agua y consecuencias del impacto de las actividades humanas, a fin de tomar decisiones y acciones correctas para un manejo tipo preventivo o correctivo (Bartram y Ballance, 1996).

Con el fin de facilitar la interpretación de las variables físicas, químicas y biológicas, se han desarrollado e implementado en varios países el uso de índices de calidad (ICA) y de contaminación del agua (Samboni *et al.*, 2007). Estos índices son herramientas matemáticas sencillas y compresibles, empleadas para transformar el gran número de datos sobre la calidad del agua en un número simple y de fácil manejo para las personas encargadas del control de la calidad de las fuentes de agua (Kannel *et al.*, 2007). Según Fernández y Solano (2005), en el mundo hay por lo menos 30 índices de calidad del agua que son de uso común, y consideran un número de variables que van de tres a 72. Sin embargo, es probable que el número sea mayor, considerando el continuo desarrollo de nuevos índices de calidad del agua, que se adapten a las características específicas de los cuerpos de agua en estudio y satisfagan los requerimientos de acuerdo al uso del recurso hídrico (Rosemond *et al.*, 2007). Para el caso latinoamericano, el desarrollo y aplicación de estos índices se ha dado con más auge en México (Samboni *et al.*, 2007). El índice INDIC-SEDUE fue el primero en desarrollarse y aplicarse en México y en Jalisco, tuvo un uso común en la antigua Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología en el Departamento de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental de la Subdelegación de Ecología de la Delegación SEDUE-JALISCO. Este índice está basado en el índice desarrollado por Dinius en 1989, adaptado y modificado por la Dirección General de Protección y Ordenación Ecológica (DGPOE) de la SEDUE, proporciona un valor global incorporando entre 13 y 18 parámetros (temperatura, pH, oxígeno disuelto,

conductividad, turbiedad, color, DBO, SST, SDT, SAAM, fósforo total, nitrógeno amoniacal, nitratos, coliformes totales y fecales, dureza total, alcalinidad y cloruros), jerarquizados en función de su influencia en el grado de contaminación (Guzmán, 1997; SEMARNAP, 1999). Sin embargo, una desventaja grande del ICA es que no incluye la estimación de contaminación por agentes tan importantes como metales pesados (Ortiz *et al.*, 2005).

Adicionalmente, los programas de monitoreo requieren de continuidad y organización para asegurar la preservación y el manejo de las fuentes de agua (Champan, 1996). Esto ha motivado a los investigadores a desarrollar y probar diferentes tecnologías para facilitar dicha continuidad y organización. El empleo de imágenes satelitales y sistemas de información geográfica, para evaluar la calidad de sistemas acuáticos ha presentado resultados satisfactorios. Además, este tipo de estudios permite visualizar la orientación de las corrientes en el cuerpo de agua y evaluar rápidamente la ubicación de las principales fuentes de contaminación (Lathrop y Lillesand, 1986; Harrington *et al.*, 1992; Goitía *et al.*, 2002). Otras tecnologías que se están desarrollando en la Unión Europea, cumpliendo los requerimientos de calidad y criterios de sensibilidad dentro de un costo aceptable, son las tecnologías ópticas, sensores electroquímicos y bioquímicos (bacterias, microalga, etc.), tecnologías microelectrónicas y computacionales, y tecnologías quimiométricas para la interpretación de datos con técnicas avanzadas como análisis multivariados, herramientas numéricas, redes neuronales y lógica difusa (Colin y Quevauviller, 1998; Tortajada, 2002; Valencia, 2007).

En nuestro país, la Comisión nacional del Agua, a través de su red nacional de monitoreo (RNM), realiza desde 1973 la medición sistemática de la calidad del agua en los principales cuerpos de agua del territorio nacional, adoptando actualmente como indicadores de contaminación el contenido de DBO_5 , DQO y SST (CONAGUA, 2005). Información insuficiente ante la necesidad de conocer un mayor número de parámetros para valorar la calidad del agua manera más precisa, a fin de tomar medidas adecuadas de prevención, control o remediación de los mismos. Más aún, considerando que cerca del 70% de los cuerpos de agua del país presentan algún nivel de contaminación (CONAGUA, 2007). Siendo el común denominador de los diferentes grados de deterioro, el desarrollo urbano e industrial, aunado al insuficiente e inadecuado tratamiento de las aguas residuales que son vertidas a los cuerpos de agua superficial con poco o nulo respeto por las capacidades asimilativas de los mismos.

1.3. Área de Estudio

El Estado de Aguascalientes se localiza en el centro de la República Mexicana, entre las coordenadas geográficas 21° 37' a 22° 28' de latitud norte y 101° 50' a 103° 00' de longitud oeste. Colinda al norte, este y oeste con el Estado de Zacatecas, y por el sur con el Estado de Jalisco. Tiene una superficie de 5,589 Km² (0.28 % del territorio nacional), con una población total de 1'182,586 habitantes (INEGI, 2006). El Estado de Aguascalientes queda comprendido dentro de la Región Hidrológica 12, Lerma-Santiago-Pacífico y sus condiciones hidrológicas se circunscriben en ella, en una extensión de 5 516 km² (el área restante pertenece a la región 37, El Salado). Incluye cuatro subcuencas: *El Niágara*, *Juchipila*, *Paso del Sabino* y *San Pablo y Otras*. En la Figura 1 se muestra la distribución de las subcuencas actuales, que corresponden a la nueva regionalización estipulada por la CONAGUA (2000).

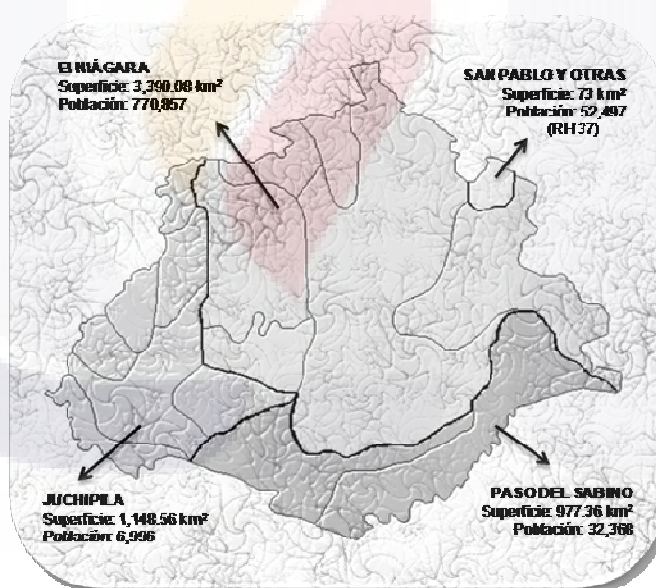


Figura 1. Distribución de las subcuencas actuales del Estado de Aguascalientes (modificada de CONAGUA, 2000).

El río San Pedro (también llamado río Aguascalientes) es el principal cuerpo de agua del Estado, cruza la entidad en dirección norte a sur hasta su confluencia con el río Santiago, cubriendo una distancia aproximada de 90 km en línea recta (IMTA, 1997). La cuenca del río San Pedro tiene una superficie de 6720 Km², ocupando 6275 Km² de la cuenca del Río Verde en la subregión Alto Santiago, de la Región Hidrológica 12, y 445 Km² de la Región del Salado. La cuenca está integrada por las planicies y valles de la región central donde confluyen las principales vertientes hidrológicas, en donde se localizan las tierras de mayor potencial productivo y se asientan los principales centros de población que demandan el desarrollo industrial (Ortiz, 2009). En sus márgenes se asientan 50 comunidades y seis cabeceras municipales, incluyendo la capital del Estado, que en conjunto albergan al 80% de la población del Estado; así como industrias textiles, del vestido, procesadoras de alimentos, automotriz y electrónica (IMTA, 1997).

De acuerdo a la clasificación de Koppen, la cuenca presenta un clima semiárido con frío en invierno y la temperatura atmosférica media anual es 17°C. La precipitación promedio es de 531 mm/año, y varía desde 381 mm en la porción norte, hasta 538 mm en la zona oeste. El período lluvioso ocurre entre los meses de junio y septiembre, durante los cuales llueve aproximadamente el 75% del total medio anual. El promedio de evaporación potencial anual es de 2195.40 mm (Ortiz, 2009).

La cuenca del río San Pedro drena el 80% la superficie en época de lluvias al río San Pedro, fluyendo el drenaje en una distancia aproximadamente 112 km. El río nace al norte en el cerro el Devisadero en la sierra de San Pedro a una altura de 2370 msnm; en el Poblado San Jerónimo, del municipio de ciudad Cuauhtémoc en el Estado de Zacatecas, donde recibe el nombre de río La Venta. Ingresa al estado de Aguascalientes por la comunidad de Zacatequillas municipio de Cosío, y lo abandona por el poblado de Chilarillo en Encarnación de Díaz, Jalisco donde el río cambia de nombre por Río Verde influente al Río Santiago conocido también como Río Lerma que desemboca en la barra de San Blas en las costas de Nayarit, vertiente al océano pacífico (Ortiz, 2009). Los afluentes principales del río San Pedro (Figura 2), son por la margen derecha Arroyo El Saucillo, río Pabellón, río Santiago y río Morcinique; por la margen izquierda recibe al río Chicalote y de menor importancia a los arroyos Mesillas, San Francisco, El Lirio, El Cedazo, Los Arellanos, La Concepción, El Chaveño, Los Hornos y Hondo Tepezalá (CONAGUA, 1999; CONAGUA, 2007).

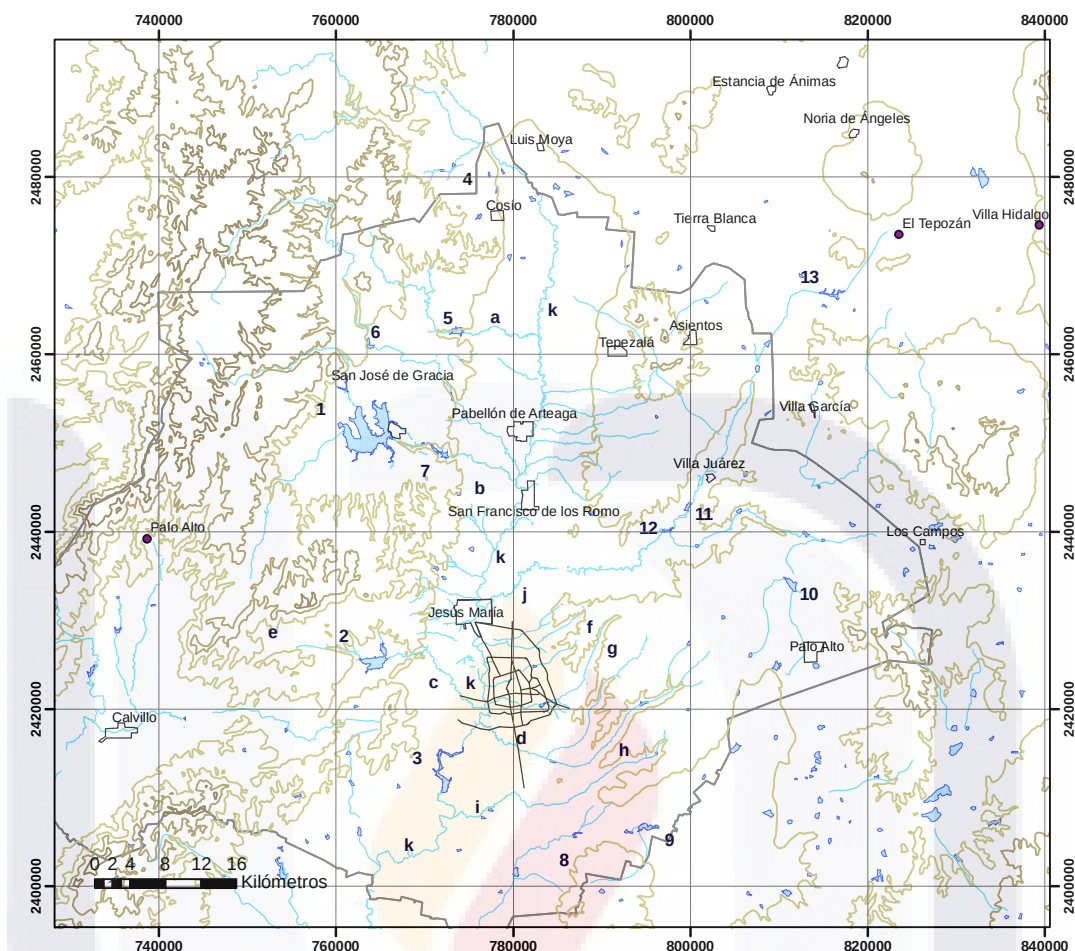


Figura 2. Principales corrientes y cuerpos de agua del Estado de Aguascalientes. Ríos y arroyos importantes: a) Río Pabellón, b) Río Santiago, c) Río Morcinique, d) Arroyo San Francisco, e) Arroyo Milpillas, f) Arroyo Los Arellano, g) Arroyo El Cedazo, h) Arroyo Calvillito, i) Arroyo Las Venas, j) Río Chicalote y k) Río San Pedro. Presas importantes: 1) P. Presidente Calles, 2) P. Abelardo L. Rodríguez, 3) P. El Niágara, 4) P. Natillas, 5) P. El Saucillo, 6) P. Túnel de Potrerillo, 7) P. El Jocoqui, 8) P. El Muerto, 9) P. San Bartolo, 10) P. La Colorada, 11) P. El Llaverio, 12) P. El Gigante y 13) P. El Gigante. (Ortiz, 2009).

Los principales cuerpos de agua superficial del Estado que comunican con los afluentes del río son las presas: Gral. Abelardo L. Rodríguez, Presidente Calles, El Saucillo y El Niágara (Figura 2). Esta última, forma parte del propio cauce del río San Pedro (CONAGUA, 2000). Las corrientes que alimentan a estas presas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Corrientes que alimentan las principales presas en la cuenca del río San Pedro.

PRESA	CORRIENTE
El Saucillo	Arroyo Saucillo
Potrerillos	Río Pabellón
50 ANIVERSARIO	Río Blanco
Presidente Calles	Río Santiago
El Jocoqui	Río Santiago
Gral. Abelardo L. Rodríguez	Río Morcinique
El Niágara	Río San Pedro
Natillas	Arroyo El Lirio

Fuente: CONAGUA, 2000.

El río Chicalote es la segunda corriente importante en el Estado, su cuenca se ubica al este de la entidad. Este río es de naturaleza intermitente y nace también en el Estado de Zacatecas e ingresa a la entidad por la zona norte del poblado de Villa Juárez, recorriendo sobre el estrechamiento formado por la sierra que limita lateralmente el valle. Recibe los escurrimientos de los arroyos Chiquihuite, Las Pilas y Caldera, alimentando las presas San Gil, El Llaverio, El Gigante y La Biznaga, para descargar sus excedentes en la confluencia con el río San Pedro (Ortiz, 2009).

La disponibilidad media anual de aguas superficiales en el estado es del orden de 353.1 Mm³, la cual sólo cubre el 35% de las necesidades del sector agropecuario, el resto de la demanda de este sector (65%), más el 100% del abastecimiento de los sectores industrial y doméstico, es cubierto con agua extraída de los mantos freáticos de la entidad (Figura 3). Actualmente, los cinco acuíferos del Estado se encuentran con un nivel de sobreexplotación cercano al 100%, principalmente el acuífero del Valle de Aguascalientes (CONAGUA, 2007). Este acuífero subyace al Valle del mismo nombre, localizado en la porción central del Estado de Aguascalientes (Figura 3), ocupando una franja con orientación Norte-Sur de 80 km de longitud y 25 km de ancho. Comprende parcialmente los municipios de Aguascalientes, Jesús María, San Francisco de los Romo y San José de Gracia; y en su totalidad los municipios de Cosío, Pabellón de Arteaga, Rincón de Romos y Tepezalá. En él se asienta la ciudad de Aguascalientes que se constituye como

el principal polo de desarrollo de la región, concentrándose las mayores demandas de agua para usos público-urbano, industrial y de servicios (CONAGUA, 2002).

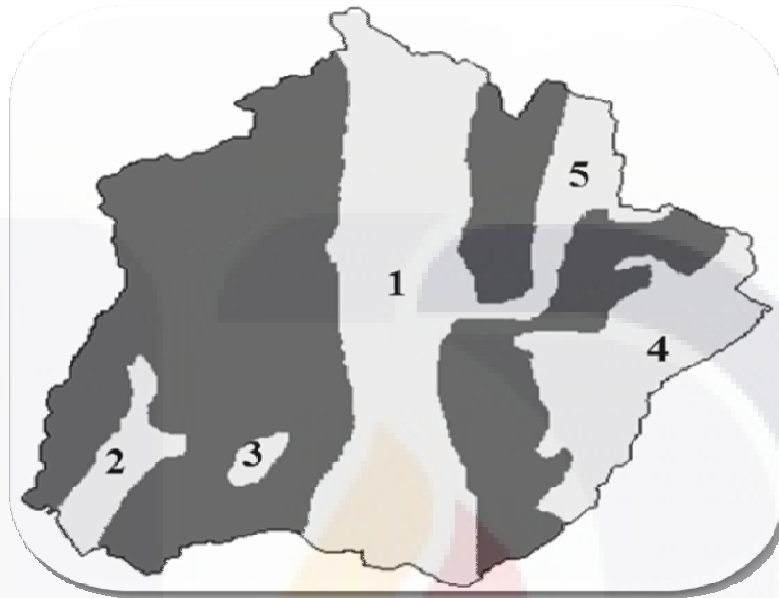


Figura 3. Distribución de los acuíferos de Aguascalientes: 1. Aguascalientes, 2. Calvillo, 3. Venadero, 4. El Llano y 5. Chicalote (modificada de CONAGUA, 1999).

El acuífero es del tipo libre y semiconfinado, el flujo subterráneo ocurre con dirección predominante Norte-Sur, al igual que el río San Pedro. La unidad geohidrológica de origen tectónico fallada paralelamente de tipo normal al este y al oeste está constituida por arenas tobáceas y depósitos aluviales del Cuaternario (gravas, arenas, limos y arcilla), con espesor de unos metros (periferia) a más de 400 m (centro del Valle) que sobreyacen en conglomerados y rocas ígneas fracturadas del Terciario. Las fronteras laterales están dadas, al este por la Sierra de Tepezalá, el Valle de El Llano y el Valle de Chicalote; y al oeste por la Sierra Fría. El volumen total que entra al acuífero del Valle de Aguascalientes se estimó en 235 Mm^3 , incluyendo la recarga natural e inducida, mientras que la descarga natural y concesionada (al 30 de abril del 2002) es de 10 y $348.68 \text{ Mm}^3/\text{año}$ respectivamente. Lo cual, genera un déficit de aproximadamente 123.68 Mm^3 anuales (CONAGUA, 2002).

En forma global, existe un déficit en el balance estatal de 199.9 Mm³, debido a que la demanda del recurso es superior al agua que se tiene ofertada y no es posible aumentar el aprovechamiento de los acuíferos porque están en veda (CONAGUA, 2000). Este nivel de sobreexplotación, principalmente en el acuífero del Valle de Aguascalientes, ha provocado inversiones de flujo y agrietamiento por subsidencia, aumentando las posibilidades de infiltración de contaminantes al acuífero (SEDUE, 1999). Se ha reportado a nivel nacional que los acuíferos de Aguascalientes, San Luís Potosí, Hidalgo, Guanajuato y Yucatán son los más afectados por la contaminación con descargas de aguas residuales (Treviño y Cázares, 1999).

El aprovechamiento de aguas del subsuelo se hace a través de una extracción total de 448 Mm³, que se distribuyen para los diferentes usos: 318.0 Mm³ para uso agropecuario, 119.0 Mm³ para abastecimiento público y 11.0 Mm³ para industria autoabastecida. Estos mismos sectores son los que generan aproximadamente 120 Mm³/año de aguas residuales (CONAGUA, 2008), de las cuales, cerca del 93% son tratadas en los diferentes sistemas de tratamiento de la entidad (INAGUA, 2007). Sin embargo, las eficiencias con que trabajan estos sistemas de tratamiento oscilan entre el 97.5 y 8.2% de remoción de DBO, el amplio rango radica principalmente en el tipo de infraestructura, registrándose los porcentajes más altos en la plantas de tratamiento con lodos activados y los más bajos en sistemas lagunares, donde la principal causa que origina el mal funcionamiento es el diseño inadecuado a las características del agua residual generada por la comunidad (Guzmán, 2005). Del total de las descargas de aguas residuales tratadas y crudas, el 96.7% es vertido en la cuenca del río San Pedro, y el 3.3% restante en la del río Juchipila (CONAGUA, 2003).

Las descargas de contaminantes que han sido depositadas durante décadas en los principales cuerpos de agua superficial del Estado de Aguascalientes, han provocado una grave afectación a ríos, arroyos, presas y bordos. A raíz de varios estudios, el INAGUA (Instituto del Agua del Estado) consideró contaminados los ríos San Pedro y Chicalote; los arroyos La Salud, El Molino, Los Arellano, El Cedazo y San Francisco; además de las presas El Niágara, Media Luna, Plutarco Elías Calles, Abelardo L. Rodríguez y San Jerónimo (Castañeda, 2001).

Las agua que se encuentran en su cauce son principalmente aguas residuales tratadas y crudas generadas por los diversos sectores del Estado, ya que el río no presenta flujo base (CONAGUA, 2007). Por lo tanto, la contaminación del río constituye un posible riesgo para la salud pública de las comunidades aledañas y es una fuente

potencial de contaminación del acuífero del Valle de Aguascalientes, principal suministro de agua potable del Estado, el cual subyace al cauce del río San Pedro, siguiendo su misma trayectoria (IMTA, 1997).

Estudios previos han reportado la presencia de compuestos orgánicos persistentes en el cauce principal y varios de sus afluentes (IMTA, 1997), y toxicidad aguda en los principales arroyos y ríos afluentes (Rico-Martínez *et al.*, 2000). En la evaluación realizada a la presa El Niágara durante 1990 se encontraron niveles altos de nitrógeno amoniacal, ortofosfatos, detergentes, grasas y aceites, y coliformes fecales en el agua, haciéndolo un reservorio inadecuado para la biota (Flores-Tena y Silva-Briano, 1995). Ramírez *et al.* (2007), en un estudio circunscrito al municipio de Aguascalientes, encontró sitios altamente contaminados con materia orgánica, fósforo total, nitrógeno total, detergentes (SAAM) y metales pesados (Al, Cd, Cr, Fe, Hg, Pb y Zn), y observó toxicidad aguda en cerca del 60% de las muestras de agua.

Dentro de la red monitoreo de la Gerencia Regional Lerma-Santiago-Pacífico, en el marco del proyecto de saneamiento de la cuenca del río Santiago, se tienen ubicadas en el Estado dos estaciones de muestreo: una en la presa El Niágara y otra en el río San Pedro aguas abajo de la misma presa (coordenadas UTM: Longitud 768 223.7 m y Latitud 2 408 992.1 m), las cuales son monitoreadas en promedio siete veces por año. La calidad del agua de las estaciones de muestro es reportada con el índice de calidad del agua (ICA), registrándose valores alrededor de 50 para la estación del río San Pedro y de 40 para la presa El Niágara, ambos valores se ubican dentro de la escala de contaminado (Anexo 1) en ambas estaciones (INAGUA, 2007).

Con respecto a la calidad del agua subterránea, en el estudio sobre la definición del flujo regional de agua subterránea se reportaron contenidos de plomo, fosfatos y grasas y aceites, los excedentes de estos últimos son consideradas evidencias de contaminación de origen antropogénico (Rodríguez *et al.*, 1997). Por otro lado, en la evaluación de pozos de la ciudad y en la periferia del la presa El Niágara realizada dentro del marco de proyecto de recarga artificial de acuíferos con agua tratada (IMTA, 1997) se indicó que la calidad del agua subterránea sólo presentó valores por arriba de la norma para agua como fuente de abastecimiento de flúor, fosfatos y nitrógeno amoniacal. También se observaron niveles superiores a la Norma de fluoruros, arsénico, mercurio y plomo; además de fenoles, sustancias activas al azul de metileno (SAAM) y coliformes fecales, evidenciando las posibles infiltraciones de contaminantes al acuífero (Avelar y Llamas, 2000; Castillo, 2003).

2. JUSTIFICACIÓN

El Problema que presentan los recursos hídricos del Estado de Aguascalientes es generado principalmente por el bajo porcentaje de agua superficial disponible para cubrir la demanda total (20%). Asimismo, la contaminación de los principales cuerpos de agua superficial por descargas de aguas residuales, reduce aún más la disponibilidad. Por lo cual, el mayor porcentaje de la demanda es cubierto por fuentes de agua subterránea, ocasionando una sobreexplotación sistemática de los acuíferos de la entidad (CONAGUA, 2000; Avelar, 2003). Las consecuencias de dicha sobreexplotación, aunadas a la contaminación de las aguas superficiales, compromete seriamente la calidad del agua subterránea.

La remediación de los cuerpos de agua superficial puede contribuir de forma significativa a la solución de dicha problemática. Además, de mejorar la calidad del agua de estos cuerpos, puede promoverse con mayor confiabilidad el reuso de las fuentes superficiales de agua, beneficiando tanto la cantidad como la calidad de los recursos hídricos subterráneos. Para llevar a cabo una remediación adecuada es necesario contar con información del estado actual de los cuerpos de agua. Por lo anterior, se requiere de un programa de monitoreo confiable, además de implementar el uso de herramientas estadísticas apropiadas que faciliten el análisis y la interpretación de la información generada (Giljanovic, 2003; Godin *et al.*, 2004; Hadas, 2004; Kelderman y Batima, 2006; Vandenberghe *et. al.*, 2006).

El presente estudio generará datos necesarios sobre el estado actual de los principales cuerpos de agua superficial y subterráneos, relacionados con el cauce del río San Pedro en el Estado. Con esta información y con datos de estudios previos, se pretende diseñar un programa de monitoreo que permita dar seguimiento al estado de contaminación del río y los principales cuerpos de agua relacionados con su cauce; de tal forma que pueda determinarse tanto el impacto de las medidas de saneamiento implementadas, como el efecto del incremento en la contaminación derivada del crecimiento poblacional y las actividades productivas. Además de proponer métodos que faciliten el análisis y la interpretación de los datos generados, empleando técnicas estadísticas apropiadas para integrar toda la información disponible.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Generar información sobre el nivel de contaminación actual de los principales cuerpos de agua superficial y subterráneos relacionados al cauce del río San Pedro, para integrarla a los datos de proyectos derivados del estudio general de la cuenca del río en el Estado de Aguascalientes. Con la finalidad de diseñar un programa de monitoreo de la calidad del agua, adecuado a la cuenca en general del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes. Además de proponer herramientas estadísticas apropiadas, que faciliten el análisis, la integración y la interpretación de la información generada y disponible.

3.2. Objetivos Particulares

- ❖ Determinar el nivel de contaminación de los principales cuerpos de agua superficial, localizados dentro de la zona de influencia del cauce del río San Pedro.
- ❖ Evaluar la posible contaminación del agua subterránea causada por los escurrimientos e infiltraciones de los cuerpos de agua superficial relacionados al cauce del río San Pedro.
- ❖ Integrar la información disponible sobre las condiciones actuales de los principales cuerpos de agua superficial y subterránea del Estado de Aguascalientes.
- ❖ Diseñar un programa de monitoreo de la calidad del agua, adecuado a la cuenca en general del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes.
- ❖ Proponer métodos para analizar, integrar e interpretar los datos generados y disponibles, empleando técnicas estadísticas apropiadas.

4. METODOLOGÍA

El presente trabajo de tesis formó parte del Proyecto General: “Estudio sobre los agentes, cargas contaminantes y toxicidad que afectan la cuenca del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes” (FOSEMARNAT-2004-01-78). Esta tesis comprendió la evaluación de parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y metales pesados de los principales cuerpos de agua relacionados al cauce y pozos aledaños, en dos temporadas diferentes (sequía y posterior a las lluvias). En la Figura 4 se muestra el planteamiento general de la metodología seguida en este estudio.

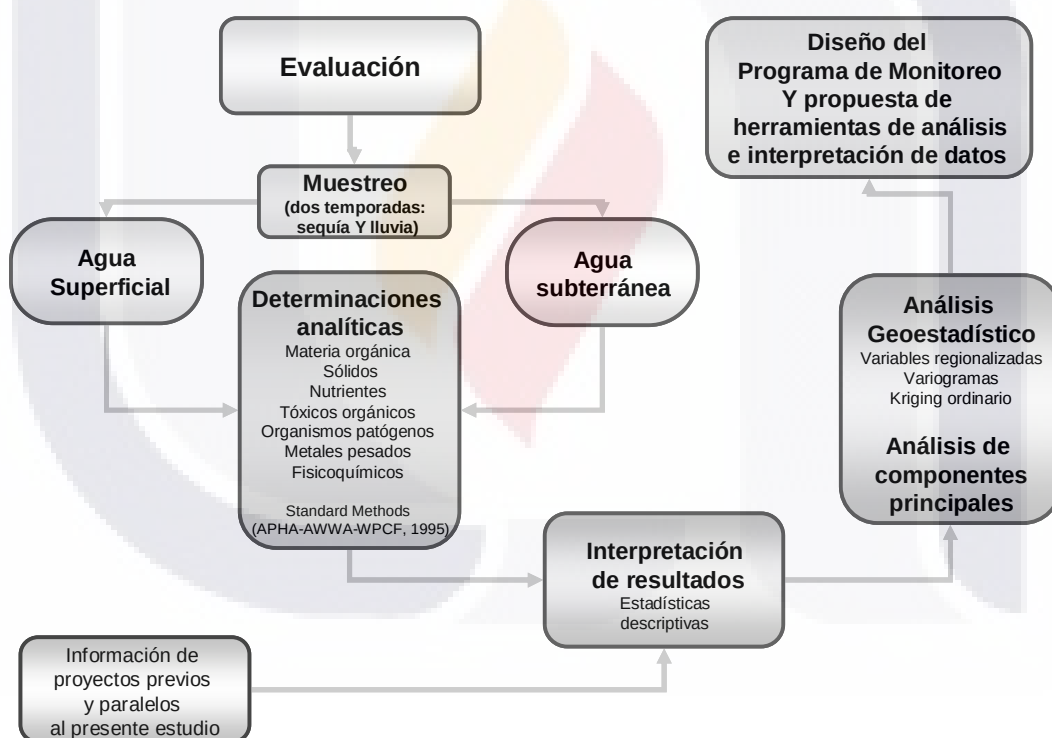


Figura 4. Planteamiento metodológico general del estudio.

4.1. Selección de los sitios de muestreo y recolección de muestras en los cuerpos de agua superficial

Con la finalidad de conocer el nivel de contaminación de los cuerpos de agua superficial que vierten sus aguas a diferentes afluentes del cauce del río San Pedro, se seleccionaron, considerando su importancia en función del volumen de almacenamiento, las presas: Presidente Calles (San José de Gracia), Abelardo L. Rodríguez (Jesús María) y El Saucillo (Rincón de Romos). Así mismo, para conocer el nivel de contaminación de los cuerpos receptores del agua proveniente del cauce del mismo río fueron seleccionados la presa El Niágara (Aguascalientes) y el cuerpo de agua denominado El Sabinal, ubicado aguas abajo de la misma presa.

El número y la ubicación de las estaciones de muestreo en cada cuerpo de agua se determinaron en función del área (Tabla 3) y la morfología de los mismos (Bartram y Ballance, 1996), de manera que estuvieran uniformemente distribuidos en toda la extensión del cuerpo de agua, a fin de obtener muestras representativas de todo el cuerpo (Guzmán, 1997). Por lo cual, previo a los muestreos se realizó una visita de reconocimiento en campo a cada uno de los sitios, además de consultar la morfología en planos hidrológicos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). La ubicación los cuerpos de agua como de los sitios de muestreo en cada uno de ellos, se muestra en la Figura 5. Para ubicar las estaciones de muestreo, se tomaron las coordenadas UTM en cada estación empleando un GPS marca GARMIN modelo GPS map 60c y posteriormente se ubicaron en un plano hidrológico, mediante el software AUTOCAD versión 2004.

Tabla 3. Capacidad, área y número de estaciones de muestreo de los cuerpos de agua seleccionados.

CUERPO DE AGUA SUPERFICIAL	Área estimada (Km²)	Volumen total¹ (Mm³)	No. Sitios de muestreo
Presa Presidente Calles	16.359	340.104	12
Presa Gral. Abelardo L. Rodríguez	3.175	15.997	7
Presa El Saucillo	0.717	6.0*	5
Presa El Niágara	2.507	16.188	7
El Sabinal	0.120*	0.0075*	3

¹CONAGUA, 2006. * SRH, 1976. ** Datos estimados

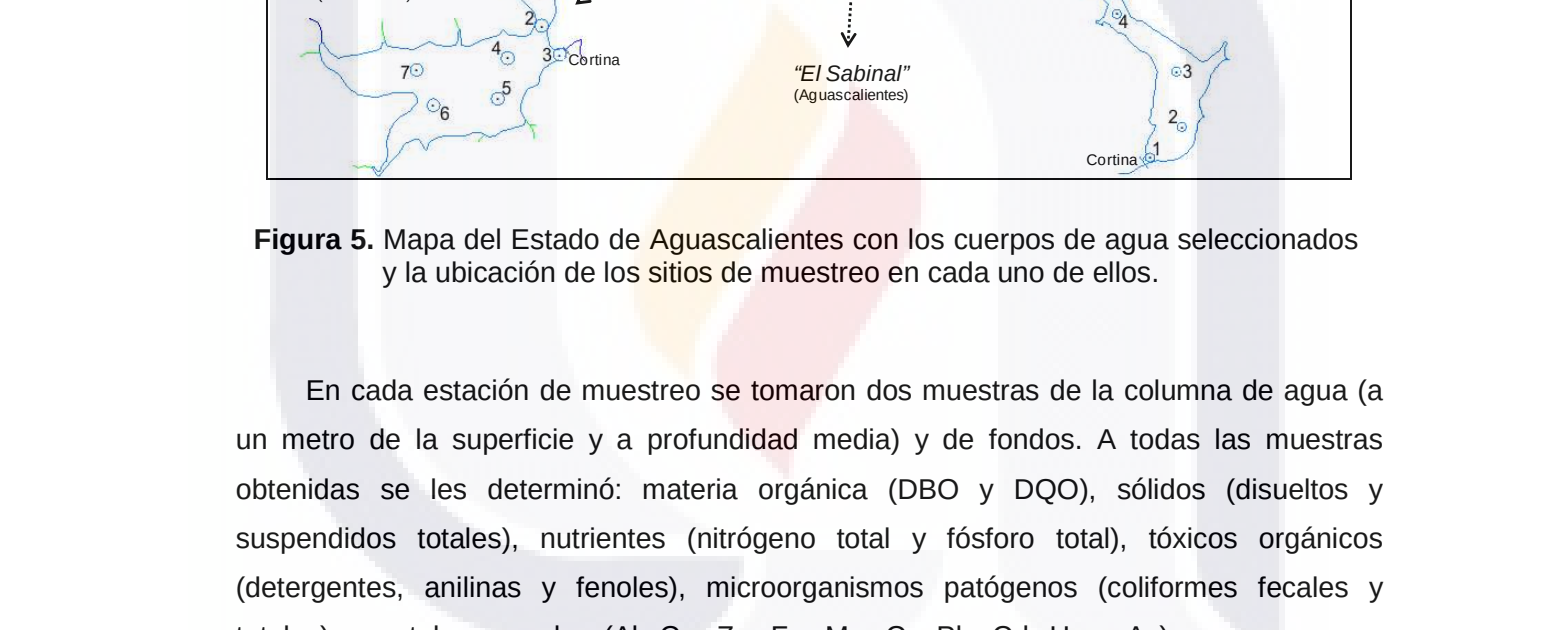


Figura 5. Mapa del Estado de Aguascalientes con los cuerpos de agua seleccionados y la ubicación de los sitios de muestreo en cada uno de ellos.

En cada estación de muestreo se tomaron dos muestras de la columna de agua (a un metro de la superficie y a profundidad media) y de fondos. A todas las muestras obtenidas se les determinó: materia orgánica (DBO y DQO), sólidos (disueltos y suspendidos totales), nutrientes (nitrógeno total y fósforo total), tóxicos orgánicos (detergentes, anilinas y fenoles), microorganismos patógenos (coliformes fecales y totales) y metales pesados (Al, Cu, Zn, Fe, Mn, Cr, Pb, Cd, Hg y As) y en campo se midieron los parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura, conductividad, oxígeno disuelto y turbiedad). La toma y preservación de las muestras se llevó a cabo respetando los criterios internacionales aceptados para cuerpos de agua en el Standard Methods (APHA-AWWA-WPCF, 1998).

4.2. Selección y recolección de muestras de los pozos de agua

Para evaluar la posible contaminación del acuífero del valle de Aguascalientes, fueron seleccionados 17 pozos de agua (12 potables y 5 agrícolas) a lo largo del Estado (Figura 6).

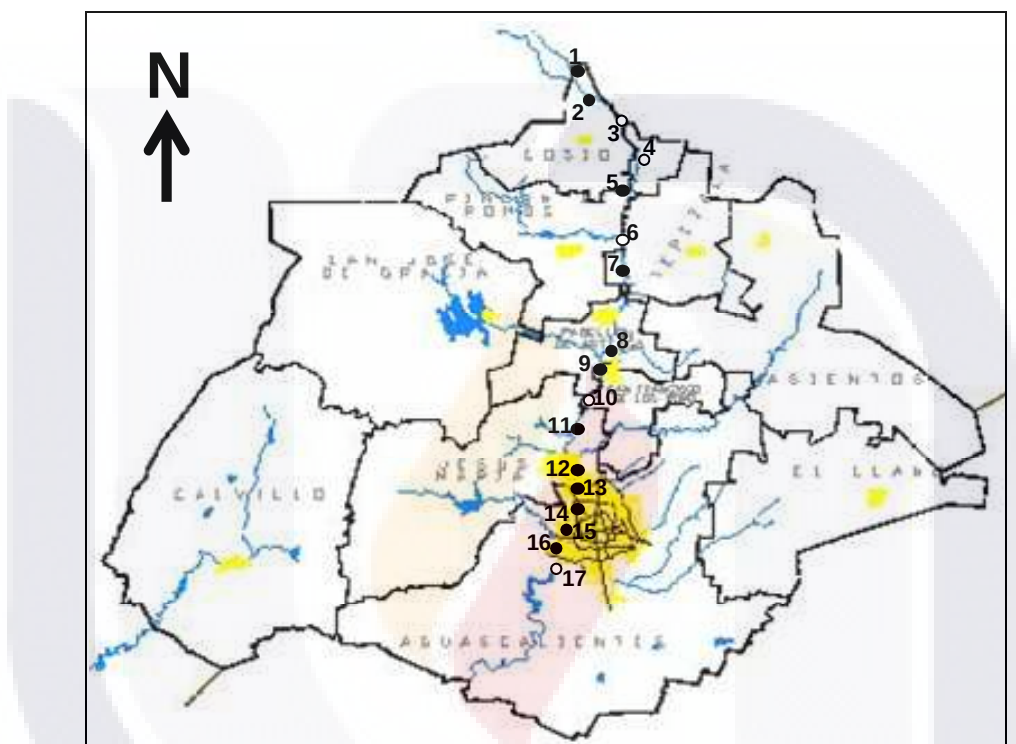


Figura 6. Mapa del Estado de Aguascalientes con la ubicación de los pozos agrícolas (○) y de agua potable (●) aledaños al cauce del río San Pedro.

La selección se realizó con la colaboración de los organismos operadores de los diferentes municipios, en función a su proximidad con el cauce del río San Pedro (< 300 m). Las muestras de agua fueron tomadas después de desconectar el mecanismo de cloración y purgar el sistema por lo menos 15 minutos (APHA-AWWA-WPCF, 1998). A las muestras obtenidas se les determinó los mismos parámetros que a las muestras de agua superficial. Las coordenadas, profundidad y uso de los pozos seleccionados se muestran en el Tabla 4.

Tabla 4. Ubicación, profundidad y usos de los pozos seleccionados.

No. Pozo	Ubicación	Municipio	Profundidad* (m)	Uso
1	Soledad de Arriba	Cosío	151	P
2	Zacatequillas	Cosío	300	P
3	San Jacinto	Rincón de Romos	190	A
4	Rancho El Lagunero	Rincón de Romos	115	A
5	Mar Negro	Rincón de Romos	350	P
6	El Gigante	Tepezalá	225	A
7	Puerta del muerto	Rincón de Romos	285	P
8	Plaza principal	San Fco. de los Romo	350	P
9	El Barranco	San Fco. de los Romo	300	P
10	La Concepción	San Fco. de los Romo	200	A
11	Corral de Barrancos	Jesús María	350	P
12	Fracc. Vergeles	Aguascalientes	195	P
13	Fracc. Colinas del río I	Aguascalientes	353	P
14	Col. Francisco Villa	Aguascalientes	245	P
15	Fracc. López Portillo 2	Aguascalientes	300	P
16	Fracc. Villas de la Cantera I	Aguascalientes	429	P
17	Rancho Hijos de María Morales	Aguascalientes	90	A

P: Potable. A: Agrícola. *Datos proporcionados por los organismos operadores de los diferentes municipios del Estado.

4.3. Determinaciones analíticas

Todas las determinaciones analíticas se ajustaron a los criterios señalados para evaluación de agua y agua residual del Standard Methods (APHA-AWWA-WPCF, 1998). La temperatura, pH, oxígeno disuelto (OD) y conductividad se midieron *in situ*, por medio de métodos electrométricos. La *Temperatura* (2550 B), es un parámetro muy importante por su efecto en reacciones químicas y vida acuática. El *pH* (4500-H-B), determina la actividad de los iones hidrógeno. Ambos parámetros se midieron con el equipo Hach modelo EC10. La determinación de *Oxígeno disuelto* (4500-O-G) se llevó a cabo utilizando el equipo Hach modelo DO175. Este parámetro sirve como base de prueba de la DBO y de la valoración de las condiciones aeróbicas del agua (Romero, 1999). La *Conductividad* (2510 B) es un parámetro que nos da información sobre las concentraciones de los minerales disueltos en muestras de agua y aguas residuales

(CIECCA, 1978). La determinación se realizó por medio del equipo Hach modelo CO150. La *Turbidez* (2130 A) del agua es producida por materias en suspensión, como arcilla o materia orgánica e inorgánica, plancton y otros microorganismos. La medición se realizó con el equipo Hach modelo 46500.

La *DBO* se determinó con la técnica para DBO_5 (5210 B), es el parámetro más utilizado para la medición de la contaminación orgánica y se mide el oxígeno disuelto utilizado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de la materia orgánica (Escalante, 1998). Se usó el método de reflujo abierto para la *DQO* (5200 B), se utiliza para medir la materia orgánica en aguas tanto industriales como municipales que contienen compuestos tóxicos para la vida (Escalante, 1998).

Los *Sólidos Totales Totales* (*STT*), *Sólidos Suspendidos Totales* (*SST*) y *Sólidos Disueltos Totales* (*SDT*) se determinaron por la técnica de secado $103-105^{\circ}\text{C}$ (2540 B-D), son uno de los mejores parámetros usados para valorar la concentración de contaminantes (Romero, 1999). El *Nitrógeno total* (*Nt*) se analizó por el método microKjeldahl (4500-N_{org} C), es necesario su control para prevenir crecimientos excesivos de algas y otras plantas (Escalante, 1998). El *Fósforo total* (*Pt*) se midió por el método de digestión a presión (4500-P B), forma parte de los nutrientes primarios; sin control puede causar el crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas en un cuerpo de agua, con el subsiguiente abatimiento del contenido de oxígeno disuelto en el mismo (CIECCA, 1978).

Los *Coliformes totales* (*CT*) y *fecales* (*CF*) se determinaron por el método del NMP (9221 C), son indicadores de contaminación fecal, y organismos productores de enfermedades (Romero, 1999). Para la determinación de *Detergentes* se empleó la técnica SAAM (Sustancias Activas al Azul de Metileno, 5540 C), su presencia disminuye la tensión superficial del agua y favorece la formación de espuma, inhiben la actividad biológica y disminuyen la solubilidad del oxígeno. El método 4-aminoantipirina, con extracción usando cloroformo (5530 C) se utilizó para la determinación de *Fenoles*; esta determinación incluye una gran diversidad de derivados del fenol. Los fenoles causan problemas de sabor y olor en aguas de consumo. En ciertas concentraciones tienen acción tóxica sobre los peces y otros organismos acuáticos (CIECCA, 1978). La amplia producción y usos de la anilina provocan que se encuentre en una gran variedad de desechos industriales (Dávila, 2002), pueden ser tóxicas para diversos tipos de vida. Para la determinación de *Anilinas* se empleó la técnica propuesta por Hess (Hess *et al.*, 1993).

Los metales fueron cuantificados por medio de espectrofotometría de absorción atómica, utilizando un equipo Perkin Elmer Analyst 100. Dependiendo de la sensibilidad requerida se empleó la modalidad de horno de grafito (3113 B) o flama (3111 B) para determinar Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn. En las determinaciones con flama, a fin de incrementar la sensibilidad del método, las muestras fueron concentradas 10 veces durante el proceso de digestión. El As fue medido por la modalidad de generación de hidruros (3114 B), y Hg por vapor frío (3112 B). Las determinaciones se realizaron por triplicado, en cada lote se utilizó una muestra fortificada al azar (porcentaje de recuperación entre 85 y 115 %), y duplicados al azar (coeficiente de variación menor al 15 %). Todas las determinaciones analíticas empleadas se desarrollaron bajo los controles de calidad recomendados por los Métodos Normalizados (APHA-AWWA-WPCF 1998).

4.4. Análisis de datos

Para evaluar la calidad del agua de los cuerpos estudiados, se empleó la metodología para calcular el índice de calidad del agua (ICA) utilizado por la CONAGUA. El ICA está basado en el índice desarrollado por Dinius en 1987, adaptado y modificado por la Dirección General de Protección y Ordenación Ecológica de la SEDUE (Guzmán, 1997), el cual proporciona un valor global (jerarquizado) incorporando datos individuales de una serie de subíndices. Este ICA considera entre 13 y 18 parámetros, jerarquizados por su peso específico (Ortiz *et al.*, 2005). Para la determinación el índice de calidad se empleó los parámetros de oxígeno disuelto, temperatura, DBO, coliformes totales y fecales, conductividad, pH, sólidos disueltos y suspendidos, fósforo total, SAAM y turbiedad. Las fórmulas de la determinación del ICA así como la escala se muestran en el Anexo 1 del presente trabajo. Con el valor del ICA de cada uno de los sitios de muestreo y sus respectivas coordenadas se elaboró una superficie continua de las presas con el software SURFER 8, donde se observa el comportamiento global del ICA dentro de los cuerpos de agua. También se presentan en forma gráfica, los resultados de cada uno de los parámetros evaluados en cada estación de colecta de los diferentes cuerpos de agua en ambas estaciones, para observar las tendencias espaciales, además de comparar los resultados con los criterios de referencias (Anexo 1). Para observar diferencias significativas entre las campañas de muestreo se realizó la prueba estadística no paramétrica de Mann-Whitney ($\alpha=0.05$) con el programa estadístico MINITAB 14 (Silva *et al.*, 2002).

4.5. Integración de información y diseño del programa de monitoreo

Para el diseño del programa de monitoreo de la cuenca del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes, se tomaron datos de la caracterización de agua y sedimentos de 43 estaciones de colecta ubicadas a lo largo del cauce del río San Pedro (Tabla 5), y 17 estaciones localizadas en el río Chicalote (Tabla 6), principal afluente del río San Pedro. La información fue obtenida de los trabajos realizados por López (2007) y Mora (2007). También se recopiló información sobre indicadores microbiológicos del estudio realizado por Carrasco (2007). La ubicación de los sitios evaluados en ambos ríos se muestra en las Figura 7 y en la Figura 8 se aprecian las estaciones localizadas en la zona centro del Estado.

Tabla 5. Sitios de muestreo evaluados en el cauce del río Chicalote.

Río Chicalote		Coordenadas (UTM)	
		X	Y
1	Santa María Gallardo-Dichosa	797062	2440191
2	Jaltomate	794072	2437089
3	Rancho agropecuario El Becerro	791526	2435848
4	Cañada Honda-Parque	789151	2435990
5	Cañada Honda	789057	2435949
6	Loretito	784703	2435966
7	Parque Industrial San Fco. R	782325	2436760
8	Puertecito de la Virgen	780462	2434089
9	Gómez Portugal-Cremería	780071	2434217
10	Efluente laguna Gómez Portugal	780353	2434217
11	Brandy San Marcos	779668	2433167
12	Confluencia PIVA-Chicalote-GP	779581	2433102
13	Gómez Portugal III	779591	2433140
14	La Florida I	778368	2432998
15	La Florida II	778200	2432990
16	2da. Antigua Paso Blanco	777086	2432067
17	Paso Blanco	777219	2432240

Tabla 6. Sitios de muestreo evaluados en el cauce del río San Pedro.

Río San Pedro		Coordenadas (UTM)	
		X	Y
1	Cd. Cuauhtémoc, Zac. I	773289	2484236
2	Cd. Cuauhtémoc, Zac. II	773143	2484471
3	Cd. Cuauhtémoc, Zac. IV	773207	2484274
4	Confluencia Arroyo de CC-RSP	774541	2484408
5	Zacatequillas	777313	2483699
6	La Soledad	777541	2482861
7	Estación Adame	780478	2480941
8	Luís Moya	780554	2480903
9	Santa María de la Paz	782686	2477388
10	Cosío	783425	2475704
11	San Jacinto I	784411	2473132
12	San Jacinto II	784819	2472981
13	El Chayote	783645	2467035
14	Ejido California	783001	2466276
15	Las Ánimas	781176	2445107
16	PTAR San Francisco de los Romo	780405	2442241
17	FREASA	778491	2439012
18	La Concepción	778109	2438744
19	San Francisco de los Horcones	776466	2434329
20	Bronsville	775631	2433885
21	Rastro Municipal de Jesús María	776125	2432394
22	Los Ramírez	775620	2431948
23	Unión río Chicalote-río San Pedro	776669	2431451
24	Tepatate-San Miguelito	775338	2430241
25	Jesús María I	775258	2430317
26	San Miguelito-presa Jesús María	775259	2430188
27	Colector de Maravillas	775265	2430130
28	Municipal TR	775238	2429742
29	Los Pocitos-Los Arquitos	776074	2426840
30	Bajo río San Pedro	776991	2424873
31	Canal interceptor-Cinépolis	777118	2424603
32	Colonia Curtidores	776681	2422769
33	Salón del Alba	776837	2421092
34	España-Las Huertas	777094	2419507
35	Colegio Esperanza- Vianney	776633	2419519

Continuación Tabla 6.

36	Canteras de San José	776141	2419572
37	Unión río San Francisco y San Pedro	776097	2418651
38	Rancho La Fortuna	775277	2417410
39	Efluente de la PTAR Cd de Ags.	775175	2416791
40	Presa El Niágara	772272	2410801
41	Niágara-Puente	771516	2410628
42	Cascada Sabinal	771900	2408162
43	Sabinal	771678	2408035

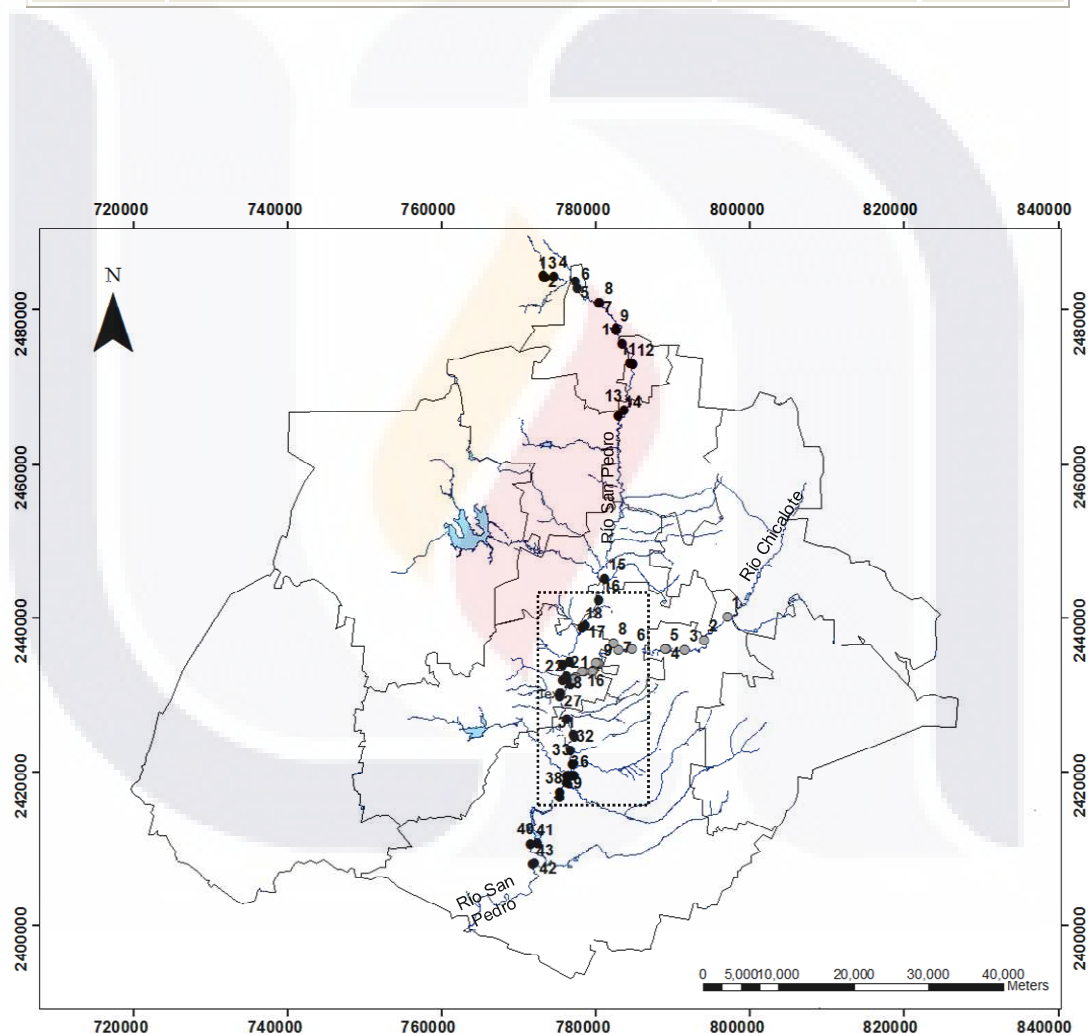


Figura 7. Mapa del Estado de Aguascalientes con la ubicación de los sitios de muestreo evaluados en los ríos San Pedro (●) y Chicalote (◐).

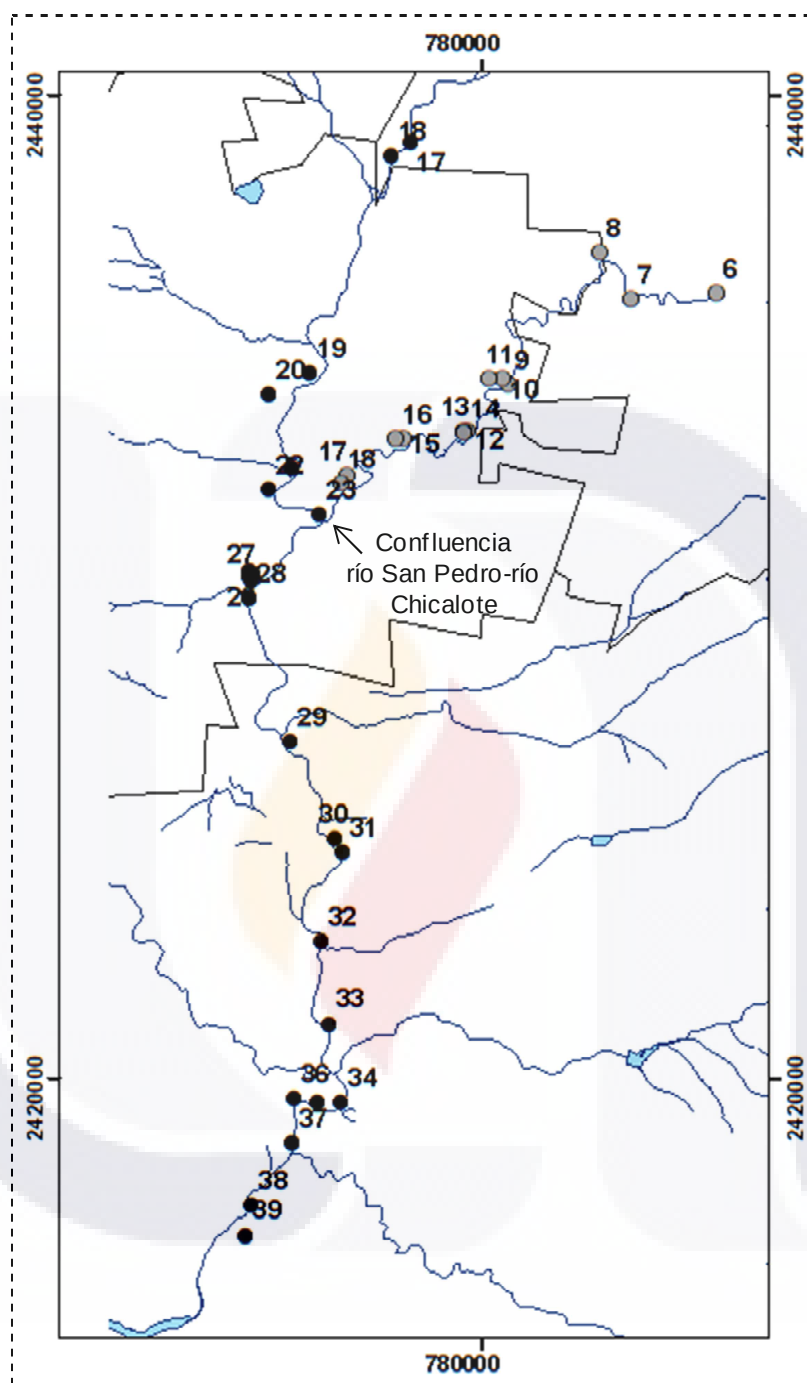


Figura 8. Acercamiento de los sitios evaluados en los ríos San Pedro (●) y Chicalote (●), localizados en la zona centro del Estado.

Como primer paso, se realizó un análisis de estadística descriptiva de los datos para resumir y organizar los datos recopilados de los sitios de muestreo evaluados en los cauces del río San Pedro y el río Chicalote, con la finalidad de tener una idea general de la estructura de la información y comparar la tendencia de cada parámetro en las dos épocas muestreo. Los parámetros evaluados en agua fueron: DBO₅, DQO, Nt, N-NH₃, Pt, grasas y aceites, SAAM, STT, SST, SDT, anilinas, fenoles, CF, OD, conductividad, pH, Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb y Zn. Los parámetros evaluados en sedimentos fueron: DQO, SAAM, Pt, Nt, N-NH₃, anilinas, fenoles, pH, Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb y Zn. Ambas matrices se evaluaron en dos campañas de muestreo, una en la temporada de sequía y otra posterior a las lluvias, durante el año 2005. El análisis descriptivo consistió en la determinación de la mediana, media, cuartiles Q_1 (25%) y Q_3 (75%), valores mínimos y máximos, y desviación estándar (STATISTICA 7).

Pruebas estadísticas

En esta sección se presentan las pruebas estadísticas que se realizaron para obtener mayor información de los datos, a fin de integrar toda la información e identificar las variables involucradas en el programa de monitoreo.

- ❖ Para determinar si el análisis de sedimentos se incluirá de forma separada en el programa de monitoreo de la calidad del agua, se realizó un análisis de correlación (STATISTICA 7) entre las concentraciones de los diferentes parámetros en agua y sedimentos de ambos cauces. Es importante mencionar que para realizar el análisis de correlación se eliminaron los sitios de muestreo donde no se obtuvieron datos de ambos tipos de muestras (agua y sedimentos). Por lo tanto, el análisis se realizó para 26 sitios del cauce del río San Pedro y 14 estaciones en el cauce del río El Chicalote.
- ❖ Para determinar si existen diferencias significativas entre las concentraciones de los parámetros determinados en la época de sequía y posterior a las lluvias, se realizó la prueba no paramétrica y de libre distribución de Mann-Whitney con un $\alpha=0.05$ (Silva et al, 2002). donde los supuestos son válidos. La prueba se realizó con el programa estadístico MINITAB 14. Las hipótesis planteadas fueron:

- H_0 : No existe diferencia significativa entre las temporadas de las campañas de muestreo evaluadas ($M_x = M_y$)
- H_A : Existe diferencia significativa entre las temporadas de las campañas de muestreo evaluadas ($M_x \neq M_y$)

Donde:

M_x : Mediana de la campaña de muestreo realizada en la temporada de sequía

M_y : Mediana de la campaña de muestreo realizada en la temporada posterior a las lluvias

Regla de decisión:

No aceptar H_0 si $p < \alpha$

- ❖ Para probar la independencia de la variabilidad temporal de las concentraciones de los parámetros con el tipo de muestras (agua o sedimentos), se realizó la prueba no paramétrica de Ji-cuadrada (X^2) con $\alpha=0.05$, mediante una tabla de contingencia 2x2 (parámetros evaluados en agua y sedimentos X parámetros que presentaron diferencias significativas entre las campañas de muestreo). Las tablas de contingencia 2x2 tienen un grado de libertad, el valor de la estadística de prueba X^2 con estas condiciones es de 3.841. Se realizaron 28 determinaciones analíticas a las muestras de agua, incluyendo una prueba de toxicidad (Torres, 2008), mientras que para sedimentos se realizaron 18. Las hipótesis planteadas fueron las siguientes:

- H_0 : La variabilidad temporal de la concentración de los contaminantes es independiente de la matriz.
- H_A : La variabilidad temporal de la concentración de los contaminantes es dependiente de la matriz.

Regla de decisión:

Rechazar H_0 si el valor de X^2 es mayor o igual a 3.841

- ❖ Para identificar las variables a evaluar en función de su comportamiento se realizó un análisis de componentes principales (ACP). Este análisis multivariado ayuda a conocer la estructura inherente de los datos, la relación que guardan entre sí las variables y

cuales son aquellas de mayor relevancia. EL método de ACP no requiere necesariamente de supuestos distribucionales. Es un método exploratorio muy flexible que puede aplicarse a diversos datos. El objetivo central del ACP es reducir la dimensionalidad de un problema representado por un número grande de variables que estén correlacionadas, a un conjunto de nuevas variables de menor dimensión no correlacionadas que indiquen las direcciones de mayor variabilidad del fenómeno y que contengan casi toda la información de las variables originales. Estas nuevas variables se obtienen mediante una transformación ortogonal de las variables originales y resultan ser combinaciones lineales de las mismas (Rodríguez, 1995).

- ❖ Para determinar el número y ubicación de las estaciones de muestreo se propuso realizar un análisis geoestadístico. Este análisis es una manera de describir la continuidad espacial de cualquier fenómeno natural, la cual se aplica primordialmente en los problemas de estimación, predicción y simulación de diversas disciplinas, recientemente el monitoreo ambiental (Gallardo, 2006). Los componentes del estudio geoestadístico son el análisis descriptivo o exploratorio, análisis estructural (cálculo o modelado de variogramas) y predicciones (kriging o simulaciones). El análisis estructural está compuesto por: 1) el cálculo del semivariograma experimental y 2) el ajuste a un modelo teórico conocido.

El variograma o semivariograma visualiza y modela el grado de correlación espacial de la variable regionalizada sobre un área definida, obteniendo como resultado la influencia de los datos a diferentes distancias. Un variograma es una medida de varianza y describe la continuidad espacial de un conjunto de datos (Isaaks y Srivastava 1989). Una vez construido el semivariograma experimental es necesario ajustar a este un modelo teórico, con el objetivo de determinar los parámetros descriptivos del semivariograma que posteriormente serán usados en la estimación o predicción.

La predicciones o estimaciones se realizan a través del kriging ordinario (KO), Es un método de predicción espacial puntual con características de ser el mejor predictor lineal con esperanza igual a la de la variable regionalizada que se quiere predecir, tiene como objetivo encontrar la mejor estimación posible a partir de la información disponible, y en efecto, el valor estimado obtenido $Z^*(x)$ de un valor real y desconocido $Z(x)$, consiste en una combinación lineal de pesos asociados a cada localización donde fue muestreado un valor $Z(x_i)$ ($i = 1, \dots, n$) del fenómeno estudiado, observando dos condiciones fundamentales: 1) que el estimador sea insesgado. $E[Z^* - Z] = 0$ y 2) que

la varianza $\text{Var} [Z^* - Z]$ sea mínima, consiguiéndose de este modo minimizar la varianza de error de estimación. Se empleo el programa SURFER 8 para realizar los variogramas o semivariograma y el KO.

Determinación del índice global de calidad del agua (IGCA)

Para la variación espacial del nivel de contaminación se propuso el empleo de un índice global de la calidad del agua (IGCA). Este índice se basó en el Índice de Calidad del Agua del Río Alberta (RWQI). El cual, fue desarrollado como una forma de resumir los datos físicos, químicos y biológicos complejos en un descriptor compuesto simple de la calidad del agua (Alberta Environment, 2008). El IGCA es el resultado del promedio de seis subíndices donde se agrupan los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y metales pesados, evaluados en las muestras de agua del río San Pedro. El subíndice de parámetros de campo (sIC) agrupó a las determinaciones realizadas en campo: pH, OD y conductividad. El subíndice de materia orgánica e inorgánica (sIMO) se conformó a partir de la DQO, DBO₅ y grasas y aceites (GYA). El subíndice de nutrientes (sIN) agrupó al P_t y N_t. Los fenoles, anilinas y SAAM se incluyeron en el subíndice de tóxicos orgánicos (sITO). Los coliformes totales y fecales formaron el subíndice microbiológico (sIF) y el subíndice de metales pesados (sIMP) agrupó al Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb y Zn. Cada uno de los subíndices, así como el IGCA fue calculado mediante la fórmula que se muestra en el Anexo 2.

El valor objetivo representa el nivel deseable de cada uno de los parámetros evaluados para la calidad del agua determinada para un uso específico. En este caso, los niveles deseables se basaron en la calidad del agua para uso agrícola. Para la selección de dichos valores se realizó una revisión de criterios de referencias internacionales que apliquen para el uso del agua señalado y valores típicos en cuerpos de agua. Dicha revisión incluyó las Guías Canadienses de Calidad del Agua (Alberta Environment, 2008), la Ley General de Aguas DL N°17752 (Gobierno de Perú, 2008), Criterios chilenos específicos para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales (República de Chile, 2008), valores típicos de cuerpos de aguas superficial (Chapman, 1996) y el trabajo de Camargo y Alonso (2007), donde señalan límites de nutrientes para diferentes condiciones en cuerpos de agua dulce. Lo anterior, debido a que los criterios nacionales (Criterios ecológicos de la calidad del agua CE-CCA-001-89, SEMARNAT, 1989) no cuentan con valores de referencia para la mayoría de los parámetros analizados. El valor objetivo o

nivel deseable de cada uno de los parámetros que forman los subíndices se muestra en el Anexo 2.

Una vez obtenidos los subíndices y el IGCA de de cada uno de los sitios de muestro de los ríos San Pedro y El Chicalote, estos fueron comparados con la escala de la calidad del agua señalada para el RWQI (Anexo 2). La cual está dividida en cinco categorías: excelente, buena, aceptable, marginal y pobre; clasificadas de acuerdo al grado de amenaza o daño de las condiciones naturales o apropiadas del agua para un uso específico, en función de los valores objetivos señalados para dicho uso. Posteriormente, a fin de identificar posibles tendencias espaciales y zonas más afectadas por la contaminación, fueron graficados los valores del IGCA en dirección Norte-Sur. Lo cual permitió determinar el número de estaciones de colecta y ubicación de las mismas.

5. RESULTADOS

La evaluación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos relacionados al cauce del río San Pedro se realizó mediante dos campañas de muestreo, una en la temporada de sequía (noviembre – abril del 2005), con una temperatura promedio de 21.9 ± 3.7 °C y máximas de 32.2 °C (SMN, 2006). El muestreo posterior a la temporada de lluvias (mayo-julio del 2005), se realizó durante los meses de agosto a octubre, con una lámina acumulada de 499.2 mm y una temperatura promedio de 19.1 ± 0.93 °C (SMN, 2006). A continuación se muestran los resultados de manera individual, de cada uno de los cuerpos de agua evaluados, seguidos de una comparación entre los valores promedio de ICA e indicadores usados por CONAGUA (DBO₅ y DQO), de los cinco cuerpos de agua estudiados. Posteriormente se presentan los resultados de la evaluación realizada a los pozos, y de las pruebas estadísticas realizadas para el diseño del programa de monitoreo.

5.1. Cuerpos de agua superficial

PRESA EL SAUCILLO

La presa El Saucillo se localiza en la comunidad de Escaleras, municipio de Rincón de Romos, tiene un área de 0.717 Km² y su volumen de almacenamiento es de 6.0 Mm³ (SRH, 1976; CONAGUA, 2005). La capacidad de almacenamiento que tenía durante la temporada de sequía fue del 35% (2.1 Mm³), incrementándose a 40% (2.4 Mm³) después de la época de lluvias (CONAGUA, 2007a). Lo anterior, se reflejó en el incremento de la profundidad de las estaciones de colecta durante el segundo muestreo (Figura 9). Esta presa es alimentada principalmente por el arroyo Las Burras y drena sus aguas al arroyo El Saucillo, afluente del río San Pedro (SCT, 2006). De acuerdo con los vecinos de la comunidad de Escaleras, la actividad más importante que se realiza en este cuerpo de agua es la pesca. En la Figura 8 se muestra la ubicación de las estaciones de colecta dentro de la presa El Saucillo.

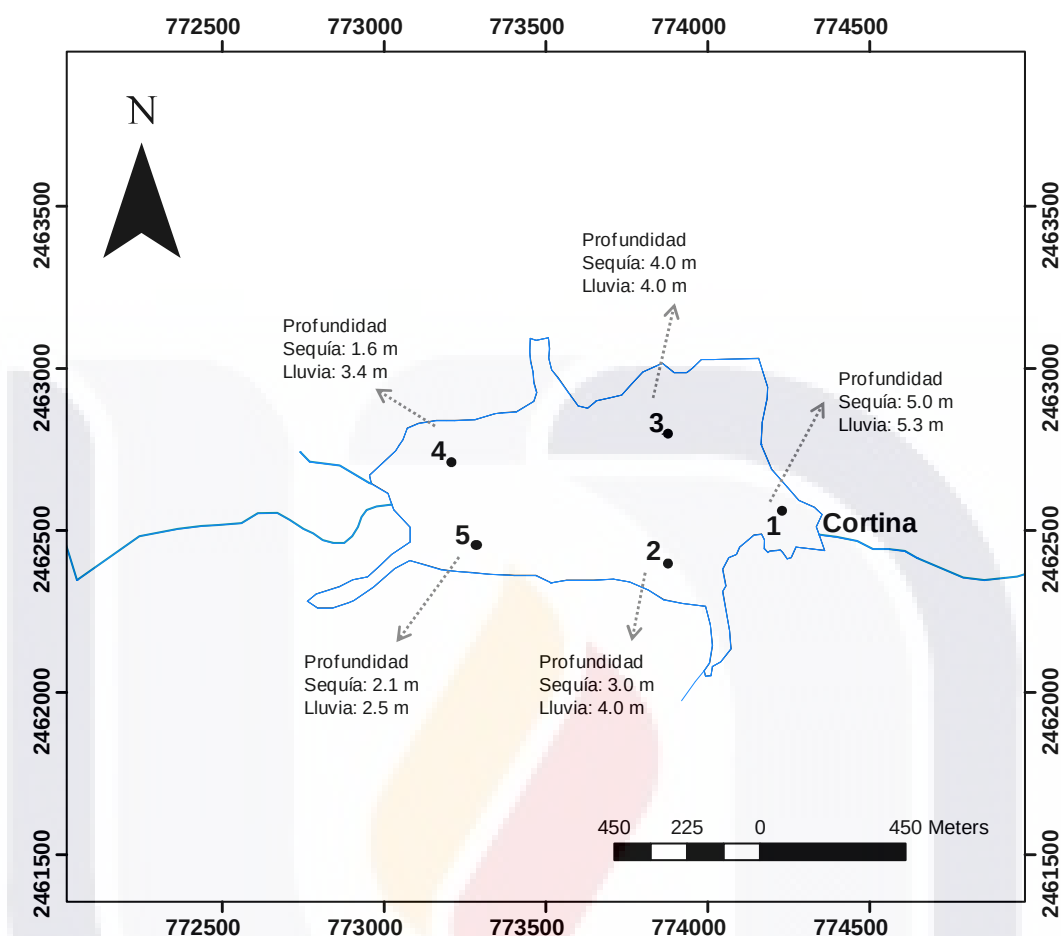


Figura 9. Ubicación de las estaciones de muestreo en la presa El Saucillo.

Las concentraciones de oxígeno disuelto (OD), el pH y la conductividad presentaron un incremento significativo ($p < 0.05$) de los valores observados en la campaña de muestreo de sequía, a los datos observados después de la temporada de lluvias. En la columna de agua y en los fondos, el OD incrementó cerca del 50 y 90% respectivamente, del muestreo de sequía (3.69 y 2.19 mg/L) al realizado después de la época de lluvias (5.45 y 4.10 mg/L respectivamente). Así mismo, el pH aumentó sus valores cerca de una unidad (de 7.6 a valores cercanos a 8.5) y la conductividad incrementó aproximadamente un 45% (de 201 a 292 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Por otro lado, la temperatura disminuyó dos grados centígrados (de 17 a 15 $^{\circ}\text{C}$) y la turbiedad de la columna de agua se redujo de 59 a 19 NTU. En el Tabla 7 se muestra el promedio y desviación estándar de los parámetros de

campo y los valores de todos los parámetros medidos en cada estación de colecta, así como los valores de p obtenidos de la prueba de Mann-Whitney, se muestran en el Anexo 3.

Tabla 7. Valores promedio de los parámetros de campo de la presa El Saucillo.

Campaña de muestreo	Tipo de muestra	Parámetros de campo				
		OD (mg/L)	Temp (°C)	pH	Conductividad (μS/cm)	Turbiedad (NTU)
Sequía	Columna de agua	3.69 ± 0.65	17.9 ± 0.71	7.66 ± 0.18	201 ± 4.8	59 ± 4
	Fondo	2.19 ± 1.03	17.4 ± 0.78	7.64 ± 7.64	201 ± 5.9	>800
Posterior a las lluvias	Columna de agua	5.46 ± 0.96	15.4 ± 0.46	8.92 ± 0.41	292 ± 6.3	19 ± 4
	Fondo	4.10 ± 0.82	15.4 ± 0.57	8.58 ± 0.53	293 ± 5.7	>800

Las concentraciones de coliformes totales y fecales incrementaron cerca de dos órdenes de magnitud en la temporada posterior a las lluvias, en relación con los valores observados en sequía (Figura 10). En ambas campañas de muestreo, las concentraciones más altas de coliformes fecales se observaron en la estación de colecta número 1, ubicada cerca de la cortina (1.5 y 2.5 Log NMP/100 mL respectivamente). En ninguno de los casos se sobrepasó el límite máximo permisible (LMP) para coliformes fecales (B), señalado en los criterios ecológicos de la calidad del agua (CE-CCA-01-89) para uso agrícola (1000 NMP/100 mL ó 3 Log NMP/100 mL).

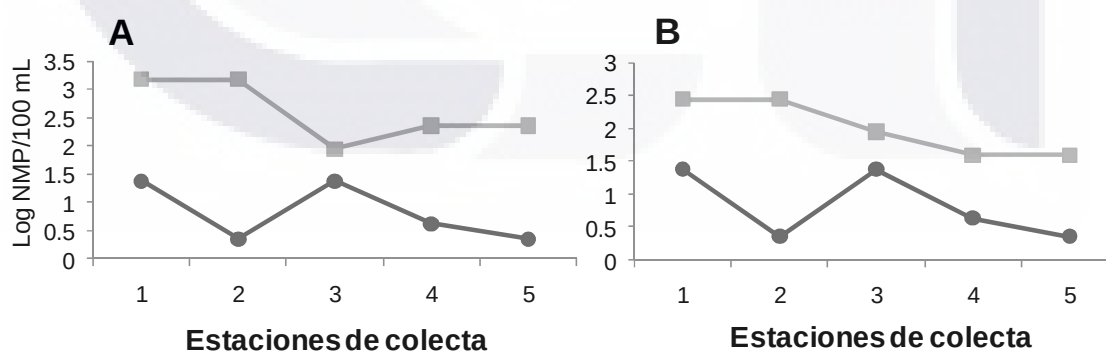


Figura 10. Concentraciones de coliformes totales (A) y fecales (B) encontradas en las estaciones de colecta de la presa El Saucillo, en la temporada de sequía (●) y posterior a las lluvias (■).

No se observaron tendencias espaciales en las concentraciones de materia orgánica y nutrientes, ni en la columna de agua ni en los fondos de la presa (Figura 11). Las concentraciones de DBO_5 en la columna de agua estuvieron entre 5.0 y 20 mg/L en ambas campañas de muestreo, mientras que la DQO se mantuvo en aproximadamente 50 mg/L en sequía, duplicando y triplicando su valor en las estaciones 4 y 5 respectivamente, después de la temporada de lluvias. Las concentraciones de N_t y P_t disminuyeron significativamente ($p < 0.05$), de los intervalos de 10-25 mg/L (con un valor atípico de 230 mg/L en el sitio 2) de N_t y 0.5-0.7 mg/L de P_t (sequía) a menos de 5 y 0.2 mg/L respectivamente. Las concentraciones más elevadas de materia orgánica y P_t en fondos, se observaron en la estación 3 en la campaña de sequía.

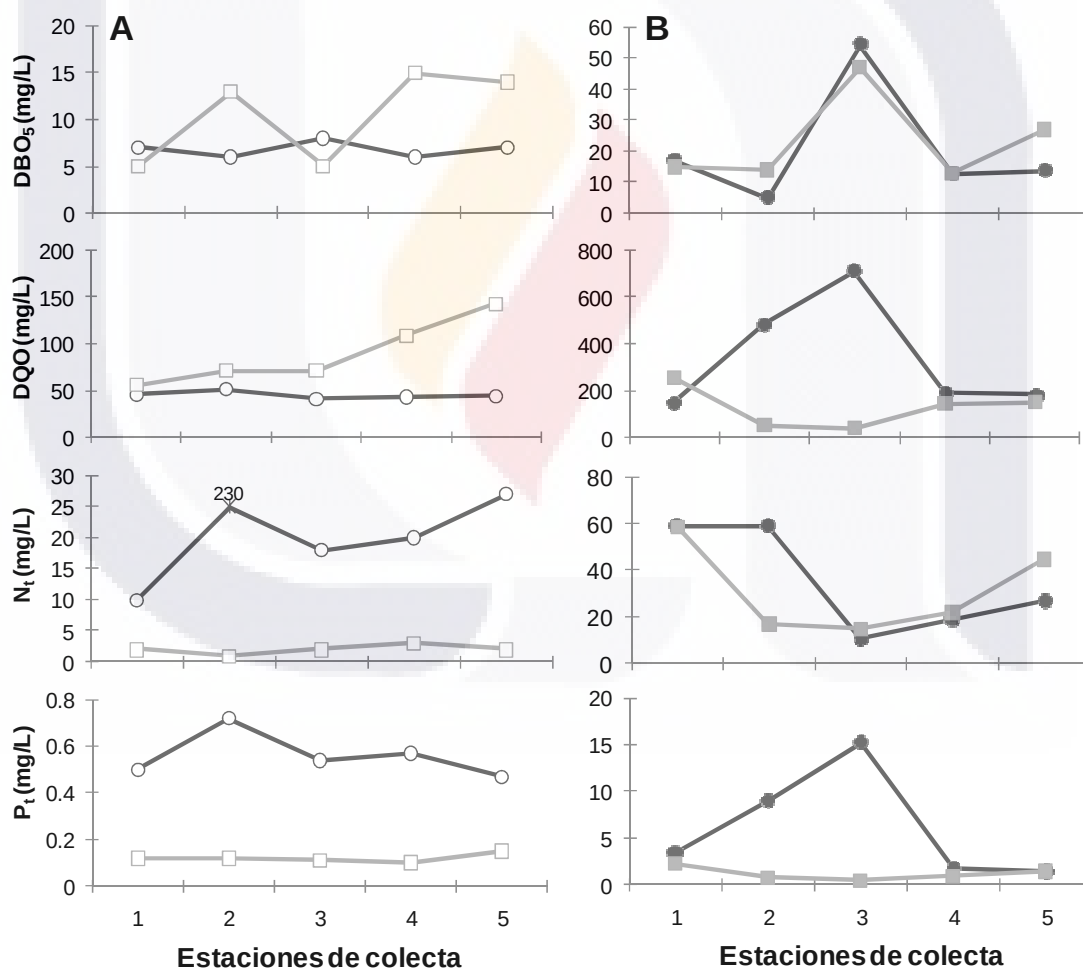


Figura 11. Concentraciones de materia orgánica y nutrientes de la columna de agua (A) y fondos (B) encontradas en las estaciones de colecta de la presa El Saucillo, en la temporada de sequía (○, ●) y posterior a las lluvias (□, ■).

Las concentraciones de SAAM y de fenoles fueron menores a su límite de detección (0.05 y 0.001 mg/L respectivamente), las concentraciones de anilinas en agua fueron del orden de 6 y 8 mg/L con un valor atípico cercano a 75 mg/L (sitio 2), mientras que en los fondos el promedio fue de aproximadamente 14 mg/L (Anexo 3). En relación con los metales pesados, las concentraciones de Cd, Cr, Cu y Pb estuvieron por debajo del límite de detección (0.009, 0.024, 0.023 y 0.135 mg/L respectivamente) en todas las muestras, sólo en la columna de agua el contenido de Zn fue menor a su límite de detección (0.005 mg/L). En la Figura 12 se muestran los intervalos de las concentraciones de los metales pesados encontrados en las presa. Los valores de As en la columna de agua se encontraron dentro del intervalo de 3.0 - 4.0 $\mu\text{g/L}$, 25 veces por debajo del LMP establecido en los CE-CCA-001-89 para agua de uso agrícola, mientras que en los fondos, el intervalo fue de aproximadamente de 8 - 40 $\mu\text{g/L}$. las concentraciones de Hg estuvieron por debajo de 2.0 $\mu\text{g/L}$ en ambas temporadas. Los valores de Fe disminuyeron significativamente (de alrededor de 2.0 a 0.5 mg/L en la columna de agua, mientras que en los fondos se alcanzaron valores hasta de 30 mg/L. El contenido de Al en agua estuvo por debajo del LMP (5.0 mg/L) de la referencia antes mencionada, y en fondos, las concentraciones llegaron hasta 50 mg/L. Los valores de Mn fueron menores a 0.4 mg/L.

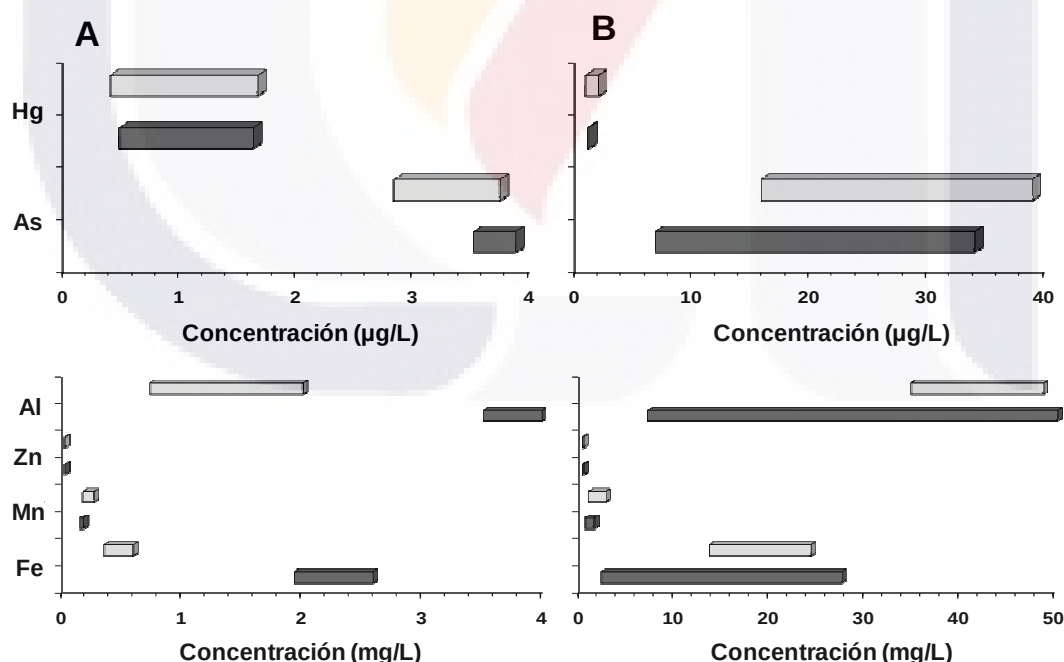


Figura 12. Intervalos de las concentraciones de metales pesados encontrados en la columna de agua (A) y en fondos (B) de la presa El Saucillo, en la temporada de sequía (■) y posterior a las lluvias (□).

Comparando el índice de calidad del agua (ICA) de las estaciones de colecta entre las campañas de muestreo (Figura 13), se observó que en ambas campañas el estado general de la presa El Saucillo, de acuerdo con la escala del ICA fue de “poco contaminado” (valores de ICA de 50 a 69). En la temporada de sequía (A), la estación 2 se encontró con una calidad del agua “aceptable”, a diferencia del resto del cuerpo de agua. Sin embargo, en la campaña de muestreo posterior a las lluvias (B), la calidad “aceptable” del agua se observó en la estación 3.

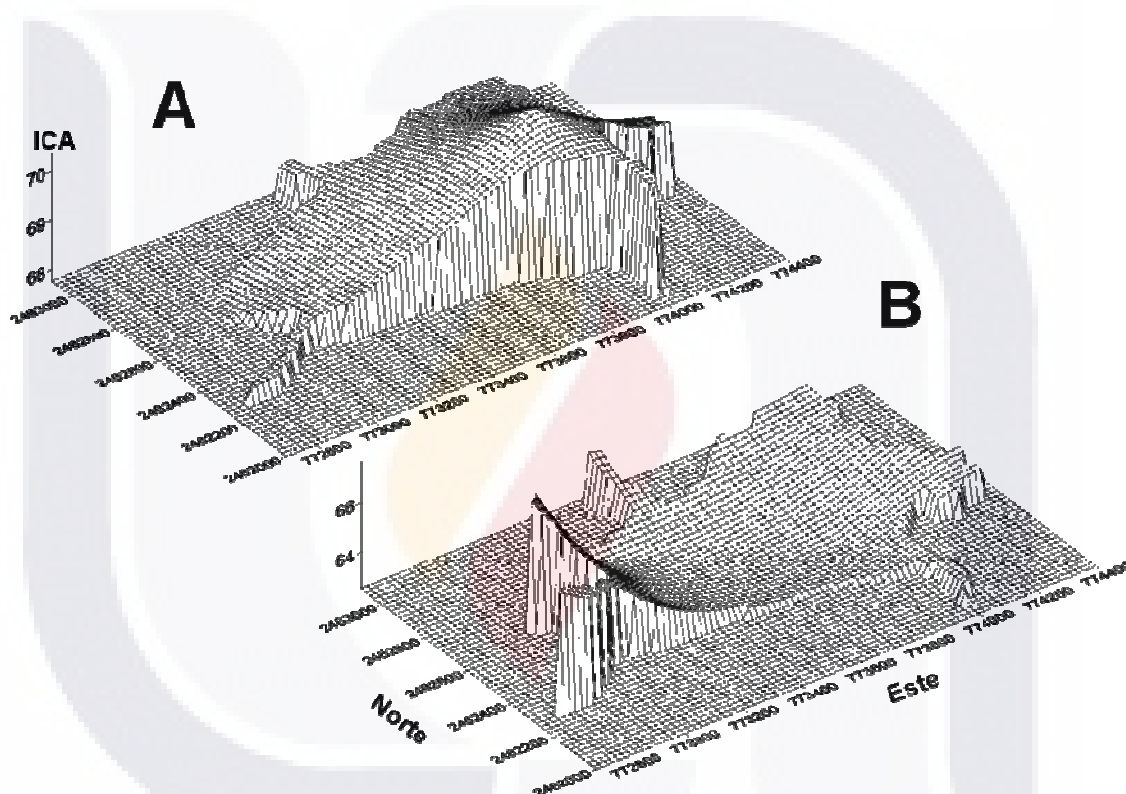


Figura 13. Distribución espacial del ICA en las estaciones de muestreo de la presa El Saucillo. Temporada de sequía (A) y posterior a las lluvias (B). Valores de 50 a 69 pertenecen al nivel de “poco contaminado” y de 70 a 85 al nivel de “aceptable” (CONAGUA, 2005).

PRESA PRESIDENTE CALLES

La presa Presidente Calles es el cuerpo de agua más grande de la Entidad, se localiza en la cabecera municipal de San José de Gracia, tiene un área de 16,359 Km² y su volumen de almacenamiento es de 340.104 Mm³ (CONAGUA, 2005). La capacidad de

almacenamiento durante la temporada de sequía fue del 31% (104.7 Mm^3), incrementándose a 36.6% (126.5 Mm^3) después de la época de lluvias (CONAGUA, 2007a). Lo anterior, se reflejó en el incremento de la profundidad de las estaciones de colecta durante el segundo muestreo (Figura 14). Esta presa es alimentada principalmente por los arroyos: El Toril, Seco, Viejo, La Venada y Los Pinos, también por el agua proveniente de la presa 50 Aniversario. Drena sus aguas a la presa El Jocoqui y de ahí al río Santiago, afluente del río San Pedro (SCT, 2006). Las principales actividades que se realizan sobre este cuerpo de agua son el riego agrícola, la pesca y la recreación. En la Figura 14 se muestra la ubicación de las estaciones de colecta dentro de la presa Presidente Calles.

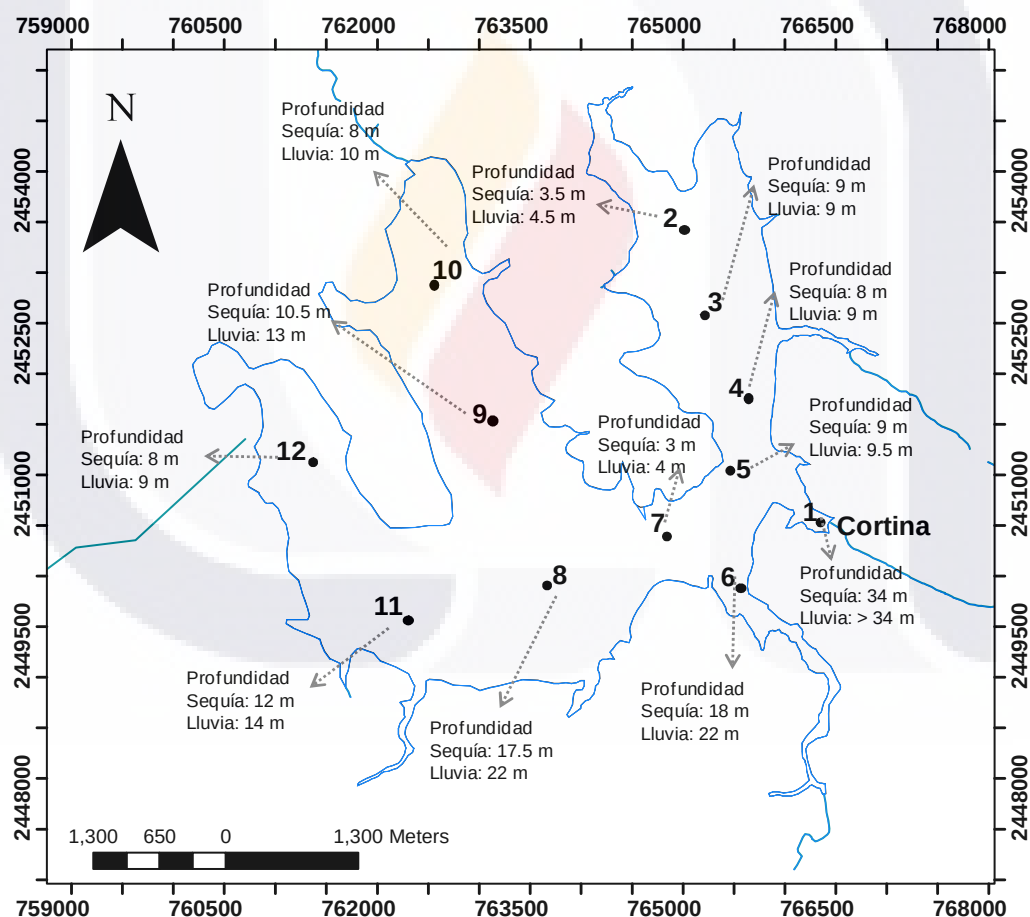


Figura 14. Ubicación de las estaciones de muestreo en la presa Presidente Calles.

Las concentraciones de OD, el pH y la turbiedad presentaron una disminución significativa ($p < 0.05$) del muestreo de la temporada de sequía a la temporada posterior a las lluvias. En la columna de agua el OD disminuyó aproximadamente 25% (de 7.15 a 5.31 mg/L), mientras que en fondos la disminución fue cercana al 5% (de 5.0 a 4.49 mg/L). Así mismo, el pH redujo sus valores 8% (de 8.18 a 7.51) y la turbiedad disminuyó casi el 40% (de 23 a 14 NTU). Por otro lado, la temperatura y la conductividad se mantuvieron casi constantes en ambas campañas (19.9 °C y 102-105 $\mu\text{S/cm}$). En el Tabla 8 se muestra el promedio y la desviación estándar de los parámetros de campo, y los valores de todos los parámetros medidos en cada estación de colecta, así como los valores de p obtenidos de la prueba de Mann-Whitney, se muestran en el Anexo 3.

Tabla 8. Valores promedio de los parámetros de campo de la presa Presidente Calles.

Campaña de muestreo	Tipo de muestra	Parámetros de campo				
		OD (mg/L)	Temp (°C)	pH	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Turbiedad (NTU)
Sequía	Columna de agua	7.15 $\pm$ 1.09	19.9 $\pm$ 1.92	8.18 $\pm$ 0.72	102 $\pm$ 2.0	23 $\pm$ 11
	Fondo	5.00 $\pm$ 1.83	17.3 $\pm$ 1.58	7.28 $\pm$ 0.92	102 $\pm$ 1.2	397 $\pm$ 241
Posterior a las lluvias	Columna de agua	5.31 $\pm$ 0.60	19.9 $\pm$ 1.10	7.51 $\pm$ 0.61	106 $\pm$ 8.1	14 $\pm$ 1.9
	Fondo	4.49 $\pm$ 1.45	18.8 $\pm$ 0.78	7.92 $\pm$ 0.23	103 $\pm$ 4.5	163 $\pm$ 73.2

Las concentraciones de coliformes totales y fecales incrementaron a 45 NMP/100 mL en la temporada posterior a las lluvias (Figura 15) en las estaciones de colecta 3 y 4, las cuales se encuentra ubicadas en la zona de mayor actividad turística (restaurantes y deportes acuáticos). También se observó un ligero aumento en los sitios 9, 10, 11 y 12 (10 y 20 NMP/100 mL), dichas estaciones de colecta se localizan en zonas donde se observó gran cantidad de ganado vacuno. No obstante, en ninguno de los casos se sobrepasó el límite máximo permisible (LMP) para coliformes fecales (B), señalado en los criterios ecológicos de la calidad del agua (CE-CCA-01-89) para uso agrícola (1000 NMP/100 mL ó 3 Log NMP/100 mL).

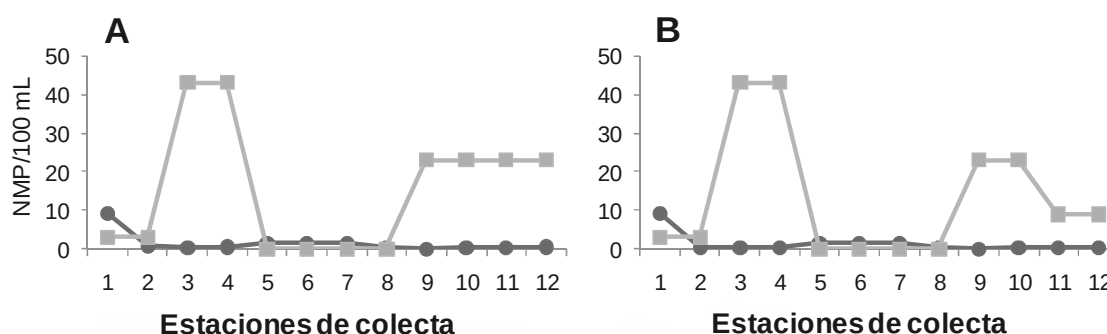


Figura 15. Concentraciones de coliformes totales (A) y fecales (B) encontradas en las estaciones de colecta de la presa Presidente Calles, en la temporada de sequía (●) y posterior a las lluvias (■).

No se observaron patrones especiales en las concentraciones de materia orgánica y nutrientes, ni en la columna de agua ni en los fondos de la presa (Figura 16). No se obtuvieron muestras de fondos en las estaciones de colecta 1, 6 y 8 en la época de sequía, ni en la estación número 1 en la temporada posterior a las lluvias. Las concentraciones de DBO_5 en la columna de agua estuvieron entre 5.0 y 20 mg/L en la campaña de muestreo de la temporada de sequía, disminuyendo a 5.0 mg/L en el segundo muestreo.

La DQO se mantuvo entre 30 y 80 mg/L, con un pico cercano a 100 mg/L en la estación de colecta 6 (sequía), disminuyendo significativamente en la época posterior a las lluvias a 20-40 mg/L, con un pico también cercano a los 100 mg/L (sitio 9). Las concentraciones de N_t y P_t no presentaron diferencias entre las campañas de muestreo. Los valores de N_t estuvieron entre 0.0 y 10 mg/L, con un máximo de 15 mg/L en la estación de colecta 9 (lluvia). Por otro lado, las concentraciones de P_t fueron en general, menores a 0.6 mg/L en todo el cuerpo de la presa. Con excepción de las concentraciones de DBO_5 , no se observaron tendencias temporales en las concentraciones de DQO y nutrientes presentes en los fondos de la presa. La concentración más elevada de DQO (1500 mg/L) se observó en la estación de colecta número 8 (lluvia), las concentraciones más altas de N_t (cerca de 40 mg/L) se encontraron en los sitios 2, 5 y 9 (lluvia), mientras que el valor máximo de P_t (15 mg/L) se observó en la estación 4 en la temporada de sequía.

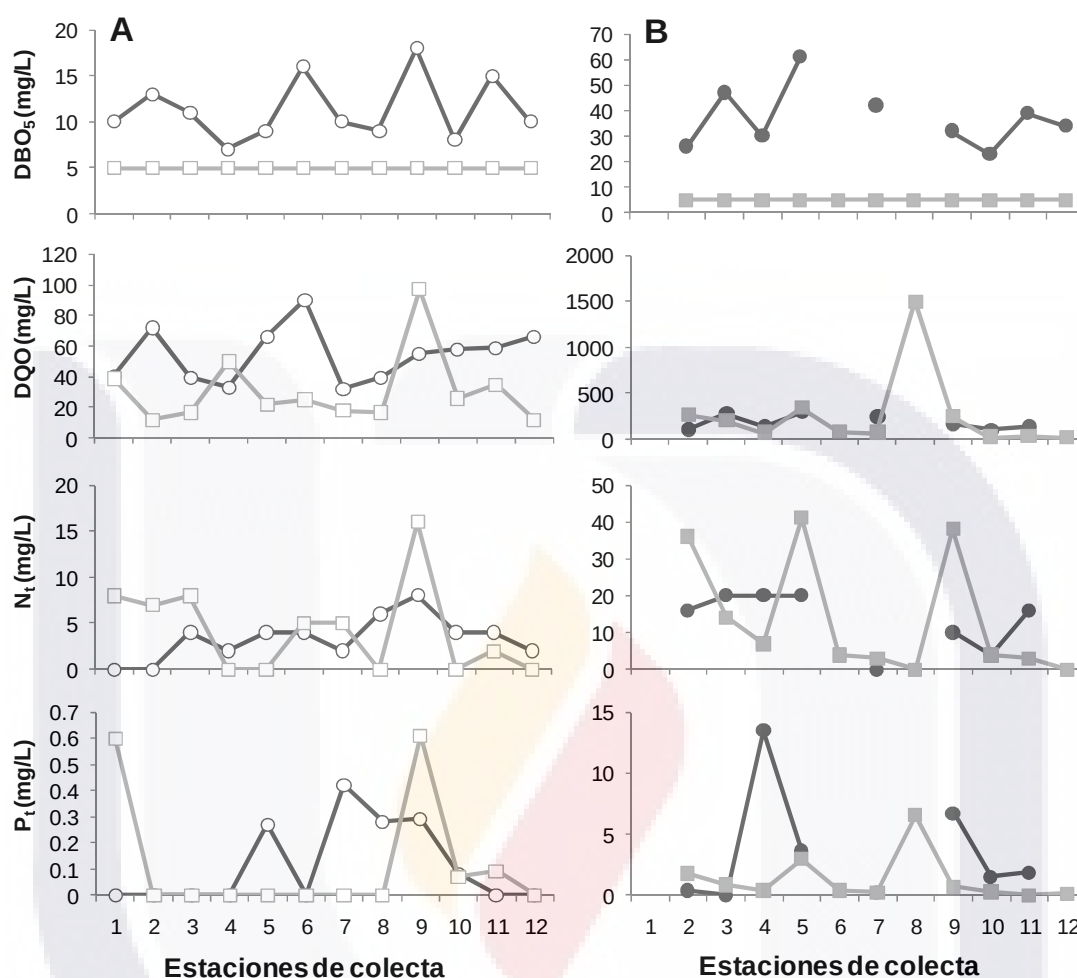


Figura 16. Concentraciones de materia orgánica y nutrientes de la columna de agua (A) y fondos (B) encontradas en las estaciones de colecta de la presa Presidente Calles, en la temporada de sequía ($\circ$, $\bullet$) y posterior a las lluvias ($\square$, $\blacksquare$).

Únicamente se detectaron concentraciones de SAAM cercanas a 0.08 mg/L en muestras de la columna de agua de dos estaciones de colecta (5 y 7) en la campaña de sequía, mientras que en esta misma época también se observaron concentraciones de fenoles en cinco estaciones de colecta, con una concentración promedio de 0.011 ± 0.007 mg/L. Las concentraciones de anilinas en agua fueron del orden de 3.0 mg/L, mientras que en los fondos el promedio fue de aproximadamente 7.0 y 9.0 mg/L en sequía y lluvia respectivamente (Anexo 3).

En relación con los metales pesados, el contenido de Cd, Cr, Cu y Pb fue menor a sus límites de detección (LD) en todas las muestras, y tampoco se encontró Hg en la columna de agua. En la Figura 17 se muestran los intervalos de las concentraciones de los metales pesados encontrados en las presa. Los valores de As en la columna de agua se encontraron dentro del intervalo de 2.0 - 10.0 $\mu\text{g/L}$, al menos 10 veces por debajo del LMP establecido en los CE-CCA-001-89 para agua de uso agrícola, mientras que en los fondos, el intervalo fue de aproximadamente de 4 -90 $\mu\text{g/L}$. Las concentraciones de Hg estuvieron por debajo de su LD (0.3 $\mu\text{g/L}$) en sequía y entre 0.3 y 0.8 $\mu\text{g/L}$ en la temporada de lluvias. Los valores de Fe incrementaron de alrededor de 2.0 hasta 20 mg/L en la columna de agua, mientras que en los fondos se alcanzaron valores hasta de 180 mg/L. El contenido de Al en agua se encontró hasta ocho veces por arriba del LMP (5.0 mg/L) de la referencia antes mencionada, y en fondos, las concentraciones llegaron hasta 220 mg/L. Los valores de Mn y Zn en la columna de agua fueron menores a 0.9 y 0.05 mg/L respectivamente. En fondos, las concentraciones máximas de Mn fueron de 5.0 y 11.0 mg/L, y los valores de Zn estuvieron por debajo de 0.4 mg/L.

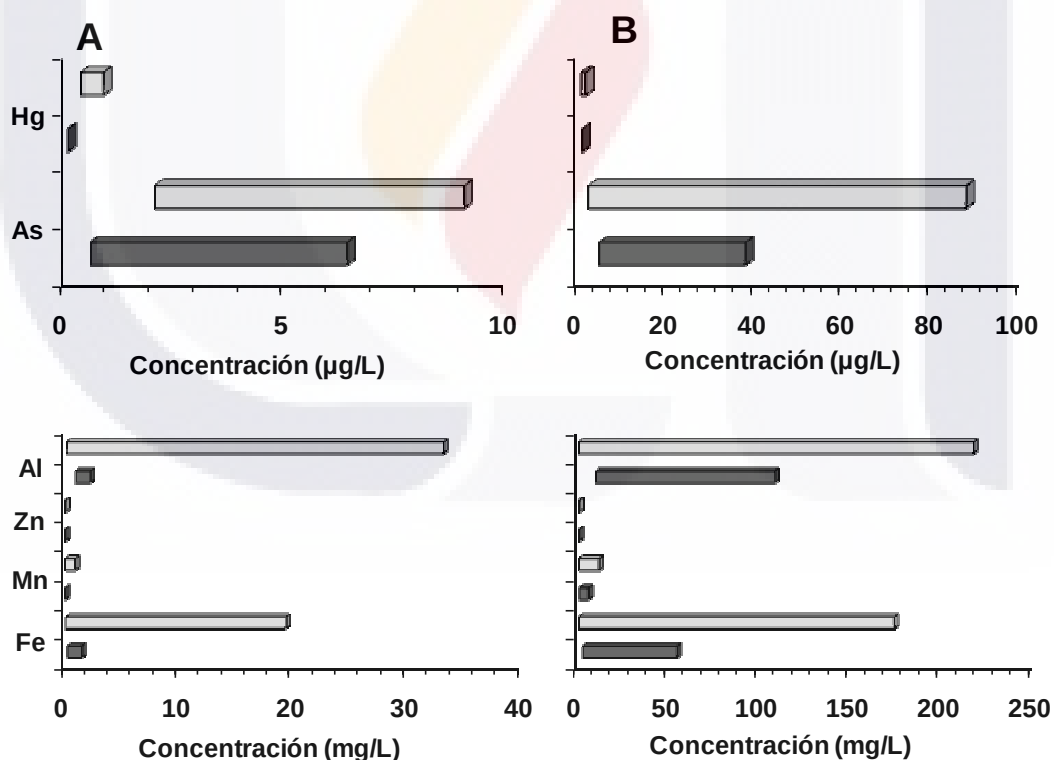


Figura 17. Intervalos de las concentraciones de metales pesados encontrados en la columna de agua (A) y en fondos (B) de la presa Presidente Calles, en la temporada de sequía (■) y posterior a las lluvias (□).

Comparando el índice de calidad del agua (ICA) de las estaciones de colecta entre las campañas de muestreo (Figura 18), se observó que en ambas campañas el estado general de la presa Presidente Calles, de acuerdo con la escala del ICA fue “aceptable” (valores de ICA de 70 a 84).

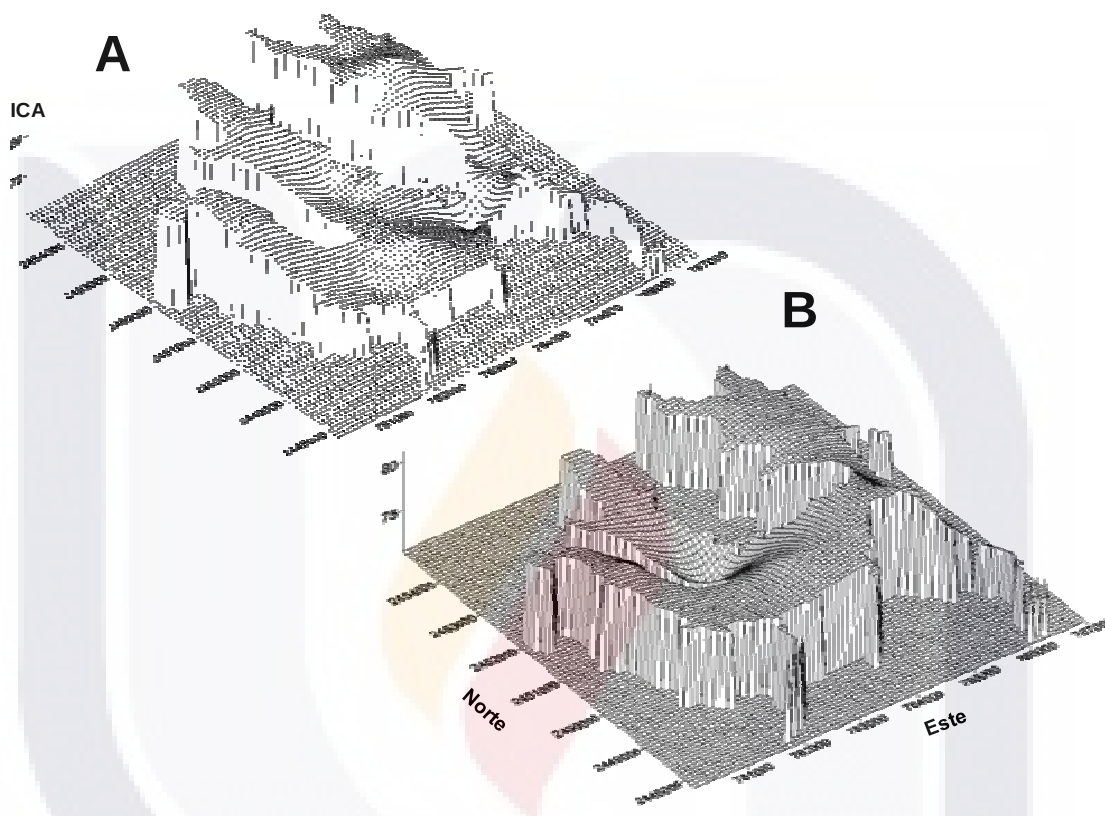


Figura 18. Distribución espacial del ICA en las estaciones de muestreo de la presa Presidente Calles. Temporada de sequía (A) y posterior a las lluvias (B). Valores de 70 a 84 pertenecen al nivel de “aceptable” (CONAGUA, 2005).

PRESA GRAL. ABELARDO L. RODRÍGUEZ

La presa Gral. Abelardo L. Rodríguez se localiza en el municipio de Jesús María, tiene un área de 3.172 Km² y su volumen de almacenamiento es de 15.997 Mm³ (CONAGUA, 2005). La capacidad de almacenamiento durante la temporada de sequía fue del 39% (6.292 Mm³), incrementándose a 41.8% (6.693 Mm³) después de la época de lluvias (CONAGUA, 2007a). Lo anterior, se reflejó en el incremento de la profundidad de las estaciones de colecta durante el segundo muestreo (Figura 19). Esta presa es

alimentada principalmente por los arroyos: San Isidro, Cañada Ancha, El Zapote y las Trancas. Drena sus aguas al arroyo La Gloria y al río Morcinique, afluente del río San Pedro (SCT, 2006). La principal actividad que se realiza sobre este cuerpo de agua es la pesca. En la Figura 19 se muestra la ubicación de las estaciones de colecta dentro de la presa Gral. Abelardo L. Rodríguez.

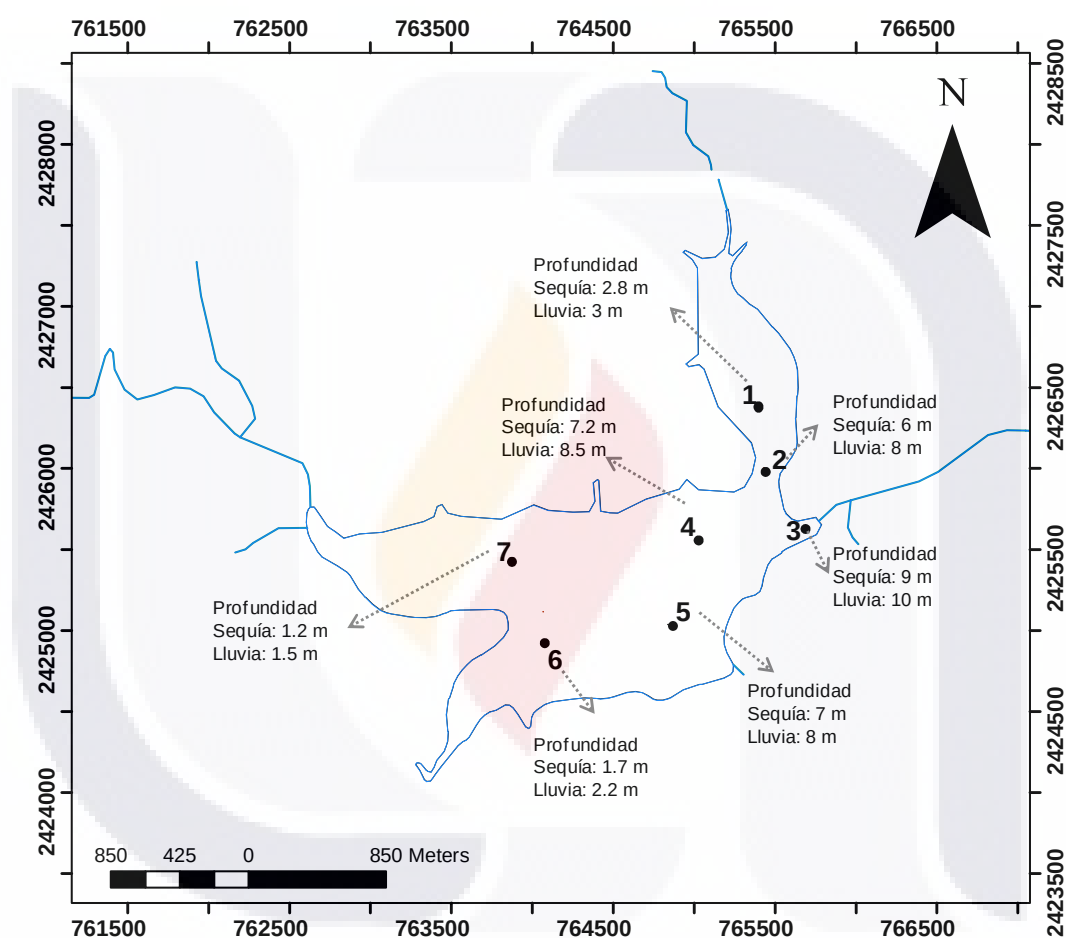


Figura 19. Ubicación de las estaciones de muestreo en la presa Gral. Abelardo L. Rodríguez.

Las concentraciones de OD aumentaron significativamente ($p < 0.05$) de la temporada de sequía (4.44 ± 0.92 mg/L) a la temporada posterior a las lluvias (5.29 ± 0.38 mg/L). Por el contrario, la temperatura y la conductividad disminuyeron significativamente

en la columna de agua. La temperatura se redujo cerca de 3.0 °C (de 19.7 a 16.4 °C), mientras que la conductividad disminuyó 11% (de 293 a 262 $\mu\text{S/cm}$). Los valores de pH (alrededor de 8.3) y turbiedad (entre 10 y 8 NTU) no presentaron diferencias significativas entre las temporadas de muestreo. En el Tabla 9 se muestra el promedio y la desviación estándar de los parámetros de campo, y los valores de todos los parámetros medidos en cada estación de colecta, así como los valores de p obtenidos de la prueba de Mann-Whitney, se muestran en el Anexo 3.

Tabla 9. Valores promedio de los parámetros de campo de la presa Gral. Abelardo L. Rodríguez.

Campaña de muestreo	Tipo de muestra	Parámetros de campo				
		OD (mg/L)	Temp (°C)	pH	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Turbiedad (NTU)
Sequía	Columna de agua	4.44 $\pm$ 0.92	19.7 $\pm$ 1.09	8.38 $\pm$ 0.41	293 $\pm$ 6	10 $\pm$ 2
	Fondo	1.93 $\pm$ 1.52	18.6 $\pm$ 0.87	8.30 $\pm$ 0.49	295 $\pm$ 5	306 $\pm$ 269
Posterior a las lluvias	Columna de agua	5.29 $\pm$ 0.38	16.4 $\pm$ 0.64	8.30 $\pm$ 0.16	262 $\pm$ 13	8 $\pm$ 3
	Fondo	2.25 $\pm$ 2.21	18.6 $\pm$ 0.87	7.85 $\pm$ 0.36	261 $\pm$ 19	> 800

Las concentraciones de coliformes totales y fecales incrementaron significativamente ($p < 0.05$) en el muestreo de la temporada posterior a las lluvias, en relación con las concentraciones de observadas en la campaña de sequía, principalmente en las primeras cuatro estaciones de colecta, en las cuales, se incluye la zona de la cortina. Las concentraciones de coliformes totales en estos sitios fueron mayores a 1000 NMP/100 mL, mientras que los coliformes fecales se encontraron entre 100 y 150 NMP/100 mL (Figura 20), al menos 5.6 veces por debajo del límite máximo permisible (LMP) para coliformes fecales (B), señalado en los criterios ecológicos de la calidad del agua (CE-CCA-01-89) para uso agrícola (1000 NMP/100 mL).

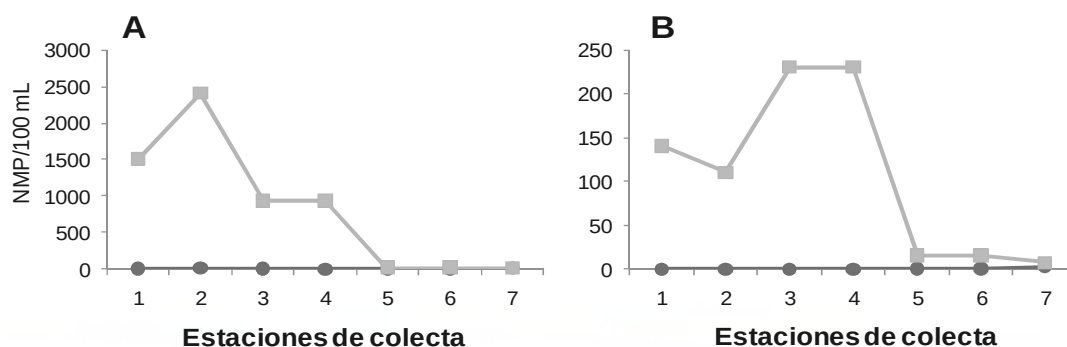


Figura 20. Concentraciones de coliformes totales (A) y fecales (B) encontradas en las estaciones de colecta de la presa Gral. Abelardo L. Rodríguez, en la temporada de sequía (●) y posterior a las lluvias (■).

No obstante que no se presentaron patrones especiales en las concentraciones de materia orgánica y nutrientes (Figura 21), se observó una disminución significativa ($p < 0.05$) en las concentraciones de estos contaminantes en la columna de agua, en el muestreo realizado después de la temporada de lluvias. Las concentraciones de DBO_5 en la columna de agua se redujeron de entre 15 y 35 mg/L a menos de 10 mg/L. La DQO disminuyó de entre 80 y 150 mg/L a 60 y 100 mg/L. Las concentraciones más elevadas de estos dos indicadores de materia orgánica en ambos muestreos, se presentaron en la estación de colecta número 3, ubicada en la zona de la cortina.

Los valores de N_t estuvieron entre 5.0 y 20 mg/L en la campaña de sequía, disminuyendo a menos de 5 mg/L en la campaña posterior a la lluvia. Por otro lado, las concentraciones de P_t fueron en general, menores a 0.6 mg/L en todo el cuerpo de la presa. No se observaron tendencias temporales en las concentraciones de materia orgánica y nutrientes de los fondos de la presa. La concentración más elevada de materia orgánica (150 y 1000 mg/L de DBO_5 y DQO, respectivamente) en fondos, también se observó en la estación de colecta número 3 (lluvia). Las concentraciones más altas de N_t (cerca de 120 y 150 mg/L) y P_t (alrededor de 6 mg/L) se encontraron en los sitios 3 y 4 (lluvia).

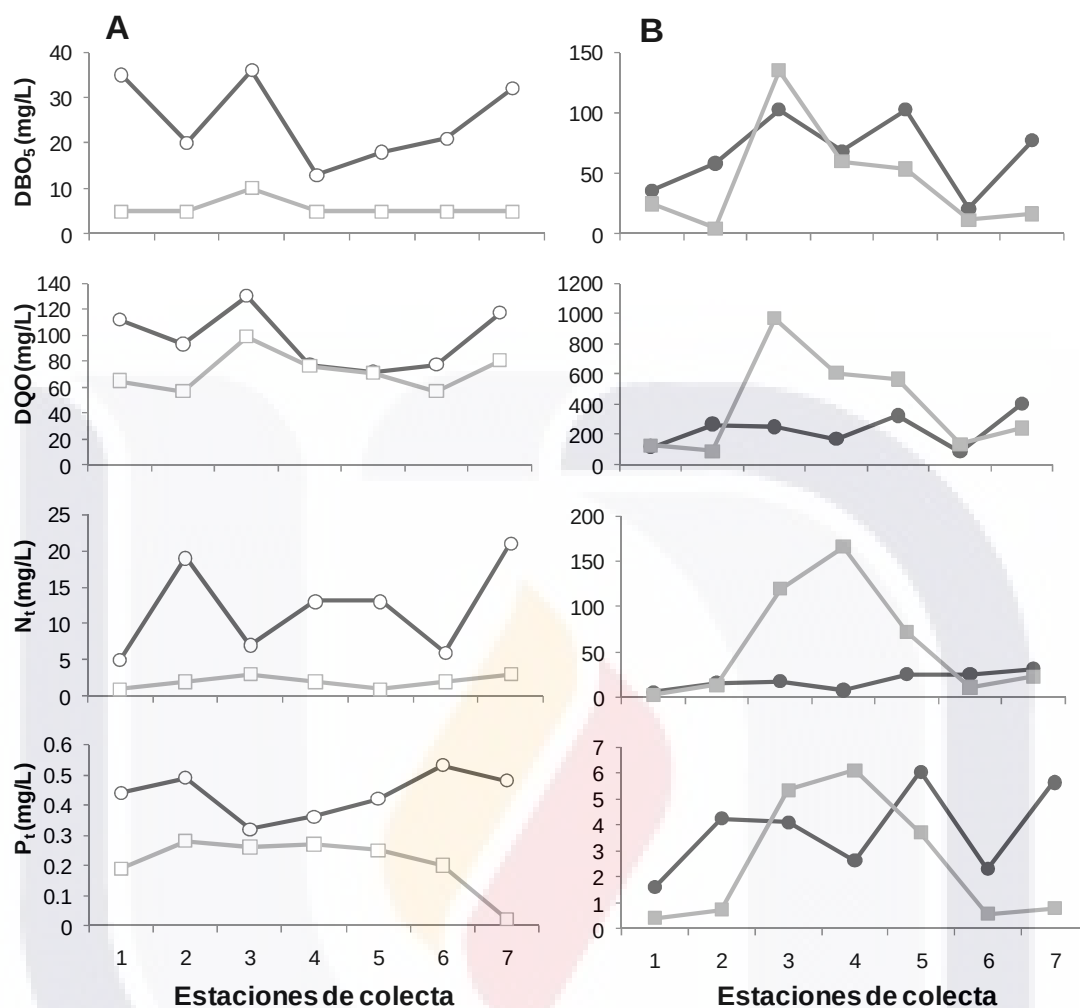


Figura 21. Concentraciones de materia orgánica y nutrientes de la columna de agua (A) y fondos (B) encontradas en las estaciones de colecta de la presa Gral. Abelardo L. Rodríguez, en la temporada de sequía (○,◻) y posterior a las lluvias (●,◼).

La concentración promedio de SAAM en la campaña de sequía fue de 0.11 ± 0.5 mg/L y fue menor a su LD en la temporada posterior a las lluvias. De igual forma, únicamente en esa campaña de muestreo, se observaron concentraciones de fenoles (0.03 mg/L) en la columna de agua de dos estaciones de colecta (2 y 3), mientras que en los fondos las concentraciones permanecieron por debajo de 0.7 mg/L en todo el cuerpo de agua. El contenido de anilinas en agua fueron del orden de 3 mg/L, mientras que en los fondos el promedio fue de aproximadamente 4.0 y 27 mg/L en sequía y lluvia respectivamente (Anexo 3). En relación con los metales pesados, las concentraciones de

los metales Cd y Pb también fueron menores a su LD en todas las muestras, y únicamente en el fondo de la estación de colecta número 5, los valores de Cu y Cr fueron mayores a su LD (0.065 y 0.069 mg/L respectivamente), en el segundo muestreo. En la Figura 22 se muestran los intervalos de las concentraciones de los metales pesados encontrados en las presa. Los valores de As en la columna de agua se encontraron dentro del intervalo de 3.0 - 5.0 $\mu\text{g/L}$, al menos 20 veces por debajo del LMP establecido en los CE-CCA-001-89 para agua de uso agrícola, mientras que en los fondos, las concentraciones más altas fueron de 40 y 80 $\mu\text{g/L}$ (sequía y lluvia respectivamente). Las concentraciones de Hg estuvieron por debajo de 2.0 $\mu\text{g/L}$ en ambos muestreos. Los valores de Fe incrementaron alrededor de 0.2 hasta 2.4 mg/L en la columna de agua, mientras que en los fondos se alcanzaron valores hasta de 100 mg/L. El contenido de Al en agua se encontró hasta cinco veces por debajo del LMP (5.0 mg/L) de la referencia antes mencionada, y en fondos, las concentraciones llegaron hasta 250 mg/L. No se detectó Zn en la columna de agua, y en fondos las concentraciones fueron menores a 0.6 mg/L. Los valores de Mn estuvieron por debajo de 0.2 mg/L en las muestras de agua, mientras que en los fondos se observaron concentraciones hasta de 14 mg/L.

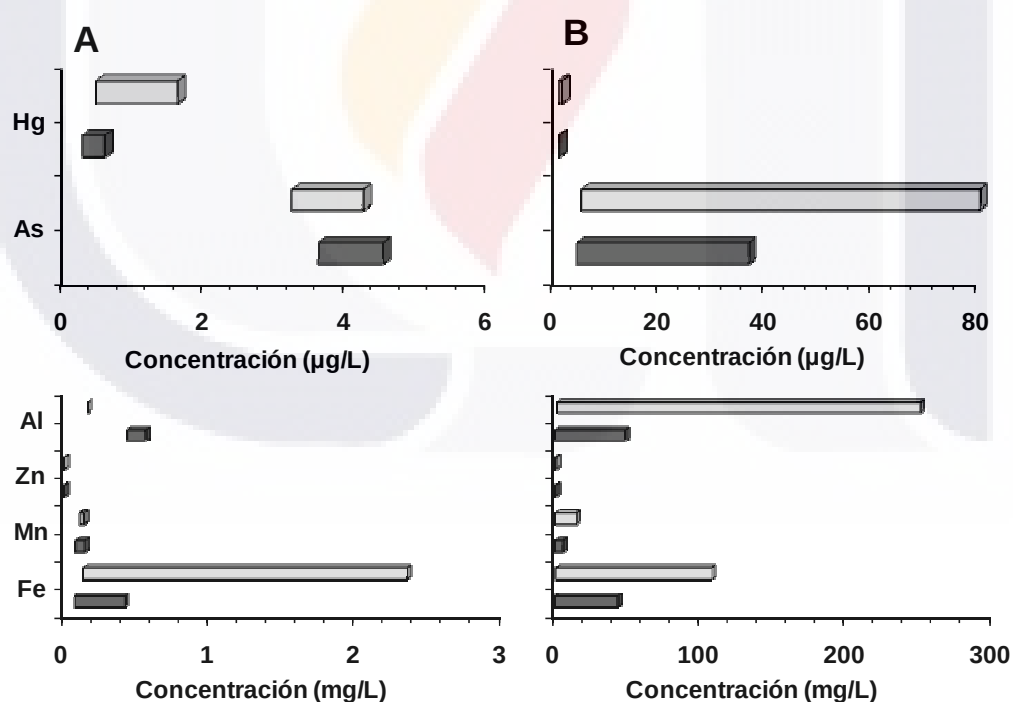


Figura 22. Intervalos de las concentraciones de metales pesados encontrados en la columna de agua (A) y en fondos (B) de la presa Gral. Abelardo L. Rodríguez, en la temporada de sequía (■) y posterior a las lluvias (▒).

Comparando el índice de calidad del agua (ICA) de las estaciones de colecta entre las campañas de muestreo (Figura 23), se observó que el estado general de la presa Gral. Abelardo L. Rodríguez, de acuerdo con la escala del ICA fue de “poco contaminado” (valores de ICA de 50 a 69), en la temporada de sequía (A). En el segundo muestreo (B), el ICA de las estaciones de colecta 5, 6 y 7, incrementaron su valor, pasando al nivel de “aceptable”, a diferencia del resto del cuerpo de agua que permaneció en el nivel de “poca contaminación”.

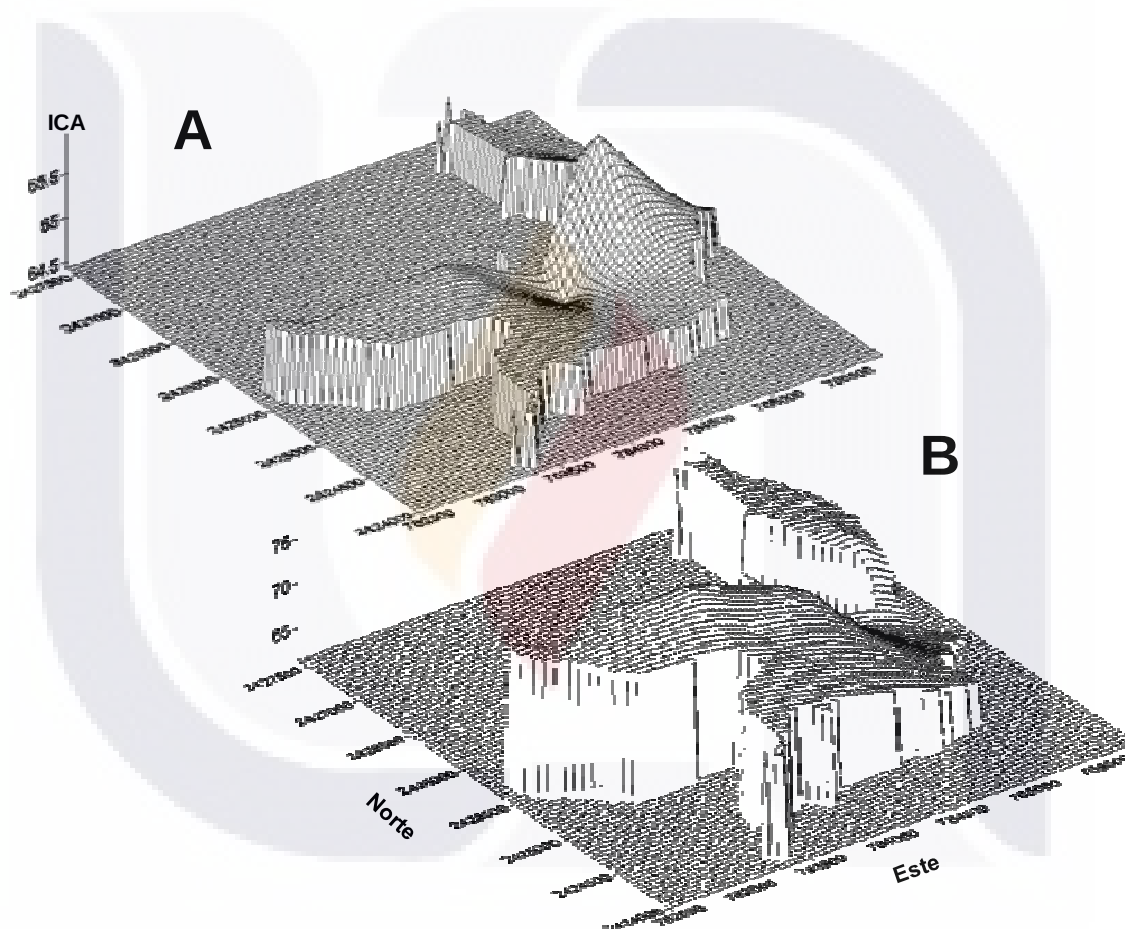


Figura 23. Distribución espacial del ICA en las estaciones de muestreo de la presa Gral. Abelardo L. Rodríguez. Temporada de sequía (A) y posterior a las lluvias (B). Valores de 50 a 69 pertenecen al nivel de “poco contaminado” y de 70 a 84 pertenecen al nivel de “aceptable” (CONAGUA, 2005).

PRESA EL NIÁGARA

La presa El Niágara se localiza en el municipio de Aguascalientes, tiene un área de 2.507 Km² y su volumen de almacenamiento es de 16.188 Mm³ (CONAGUA, 2005). La capacidad de almacenamiento durante la temporada de sequía fue del 74% (12.205 Mm³), incrementándose a 99% (16.102 Mm³) después de la época de lluvias (CONAGUA, 2007a). Lo anterior, se reflejó en el incremento de la profundidad de las estaciones de colecta durante el segundo muestreo (Figura 24). Esta presa forma parte del propio cauce del río San Pedro, también es alimentada por los arroyos: Las Víboras y Los Chivos (SCT, 2006) y en ella se vierten aproximadamente 186,160 m³ de aguas residuales tratadas, provenientes de la planta de tratamiento de la Ciudad de Aguascalientes (INAGUA, 2007). Drena sus aguas al mismo cauce del río San Pedro. El agua almacenada en este cuerpo de agua es empleada principalmente para riego agrícola. En la Figura 24 se muestra la ubicación de las estaciones de colecta dentro de la presa El Niágara. La estación número 7 es el sitio de llegada del agua proveniente del cauce del río San Pedro. La cual es una mezcla de aguas residuales tratadas, aguas crudas derivadas de descargas municipales, industriales y pecuarias, aguas de retorno de campos de cultivo y de precipitación pluvial.

Debido a que las concentraciones de OD durante el primer muestreo fueron muy variables entre las estaciones de colecta, se determinó la concentración mediana de este parámetro. La mediana de OD fue de 2.85 mg/L, con un valor mínimo de 0.15 mg/L (estación 6) y un máximo de 11.82 mg/L (estación 4), mientras que la concentración promedio en la temporada de lluvias fue de 1.33 ± 0.41 mg/L. Los valores promedio de la temperatura, la conductividad y la turbiedad no sufrieron cambios significativos entre las campañas de muestreo. La temperatura se encontró alrededor de 17 °C. La conductividad estuvo cercana a 1000 μ S/cm, con dos valores máximos de aproximadamente 3500 μ S/cm (sitios 2 y 7), observados únicamente en el primer muestreo. La turbiedad fue en promedio de 30 NTU. En la Tabla 10 se muestra el promedio y la desviación estándar de los parámetros de campo, y los valores de todos los parámetros medidos en cada estación de colecta, así como los valores de p obtenidos de la prueba de Mann-Whitney, se muestran en el Anexo 3.

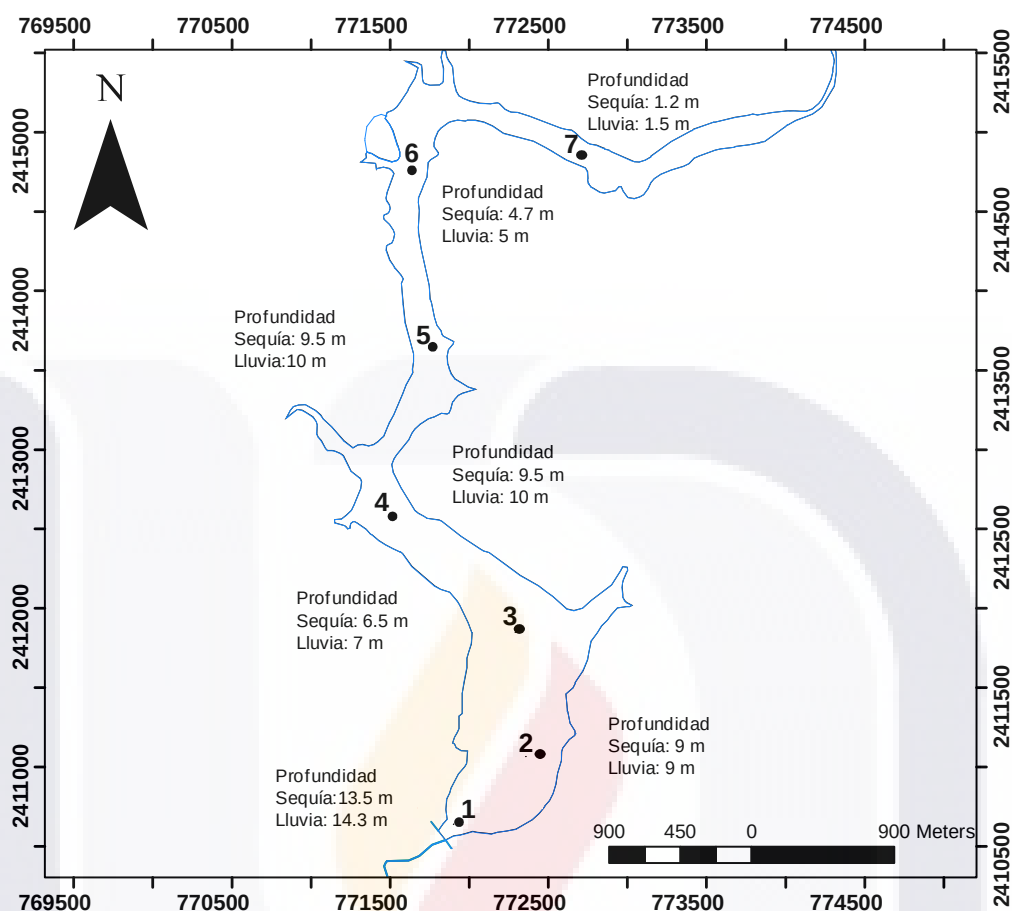


Figura 24. Ubicación de las estaciones de muestreo en la presa El Niágara.

Tabla 10. Valores promedio de los parámetros de campo de la presa El Niágara.

Campaña de muestreo	Tipo de muestra	Parámetros de campo				
		OD (mg/L)	Temp (°C)	pH	Conductividad (μS/cm)	Turbiedad (NTU)
Sequía	Columna de agua	2.85*	17.21 ± 1.48	7.98 ± 0.22	1350 ± 910	32 ± 9
	Fondo	nd	22.61 ± 3.54	7.74 ± 0.20	993 ± 18	>800
Posterior a las lluvias	Columna de agua	1.33 ± 0.41	16.51 ± 0.24	7.64 ± 0.04	1055 ± 65	28 ± 5
	Fondo	0.65 ± 0.29	16.41 ± 0.50	7.48 ± 0.19	1052 ± 70	>800

* Concentración mediana de OD, con una mínima de 0.15 mg/L (estación de colecta 6) y una máxima de 11.82 mg/L (estación de colecta 4).

Igual que en los cuerpos de agua mencionados anteriormente, las concentraciones de coliformes totales y fecales no presentaron diferencias significativas entre las campañas de muestreo. En ambas temporadas, los valores máximos de estos microorganismos (entre 4.0 y 5.0 Log NMP/100 mL) se observaron en las estaciones de colecta 6 y 7 (Figura 25), disminuyendo gradualmente a lo largo de la presa. En la temporada de sequía fue más evidente la reducción de coliformes, donde la concentración mínima se observó en el sitio 2 (alrededor de 1.0 Log NMP/100 mL); mientras que en la época posterior a las lluvias, los valores mínimos se observaron en la estación 4 (aproximadamente 2.5 Log NMP/100mL).

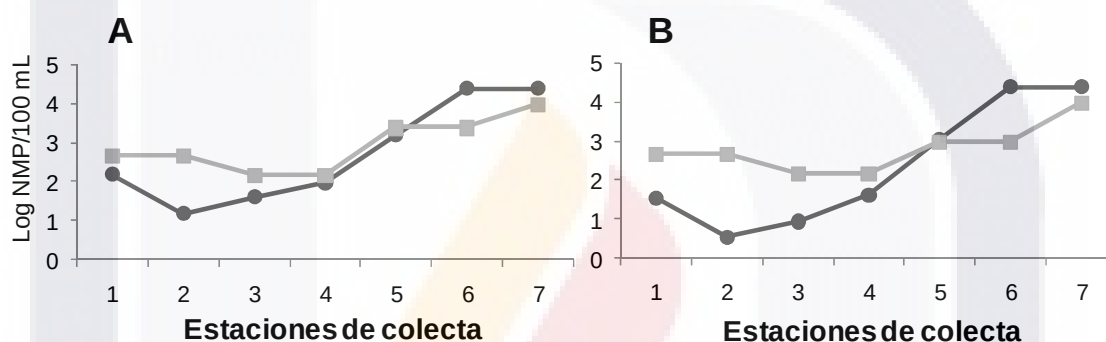


Figura 25. Concentraciones de coliformes totales (A) y fecales (B) encontradas en las estaciones de colecta de la presa El Niágara, en la temporada de sequía (●) y posterior a las lluvias (■).

No se apreció un patrón definido en las concentraciones de materia orgánica y nutrientes a lo largo de la presa (Figura 26). Sin embargo, se observó una disminución significativa ($p < 0.05$) en las concentraciones de estos contaminantes en la columna de agua, en el muestreo realizado después de la temporada de lluvias. Las concentraciones de DBO_5 en la columna de agua se redujeron de entre 50 y 90 mg/L a menos de 40 mg/L. La DQO disminuyó de entre 200 y 350 mg/L a cerca de 100 mg/L (con excepción del sitio 2, con 200 mg/L). La concentración más alta de DBO_5 se observó en la estación de colecta número 7 en ambos muestreos, mientras que la de DQO se presentó en la estación 4. Los valores de N_t estuvieron alrededor de 100 mg/L, con un pico de aproximadamente 150 mg/L (sitio 5) en la campaña de sequía, y disminuyeron a cerca de 75 mg/L en la campaña posterior a la lluvia. Por otro lado, las concentraciones de P_t se encontraron entre 25 y 35 mg/L en sequía, disminuyendo en forma general a cerca de 7.0

mg/L en todo el cuerpo de la presa. No se observaron tendencias temporales en las concentraciones de materia orgánica y nutrientes de los fondos de la presa. La concentración más elevada de materia orgánica (aproximadamente 2250 y 10000 mg/L de DBO₅ y DQO respectivamente), se observó en la estación de colecta número 3 (lluvia). La concentración más alta de N_t (cerca de 1500 mg/L) se encontró también en esta misma estación y campaña de muestreo. De igual forma, uno de los valores máximos de P_t (alrededor de 100 mg/L) se observó en el sitio 3 (lluvia), y en la temporada de sequía la concentración más alta (cerca de 130 mg/L) fue determinada en el fondo del sitio 5.

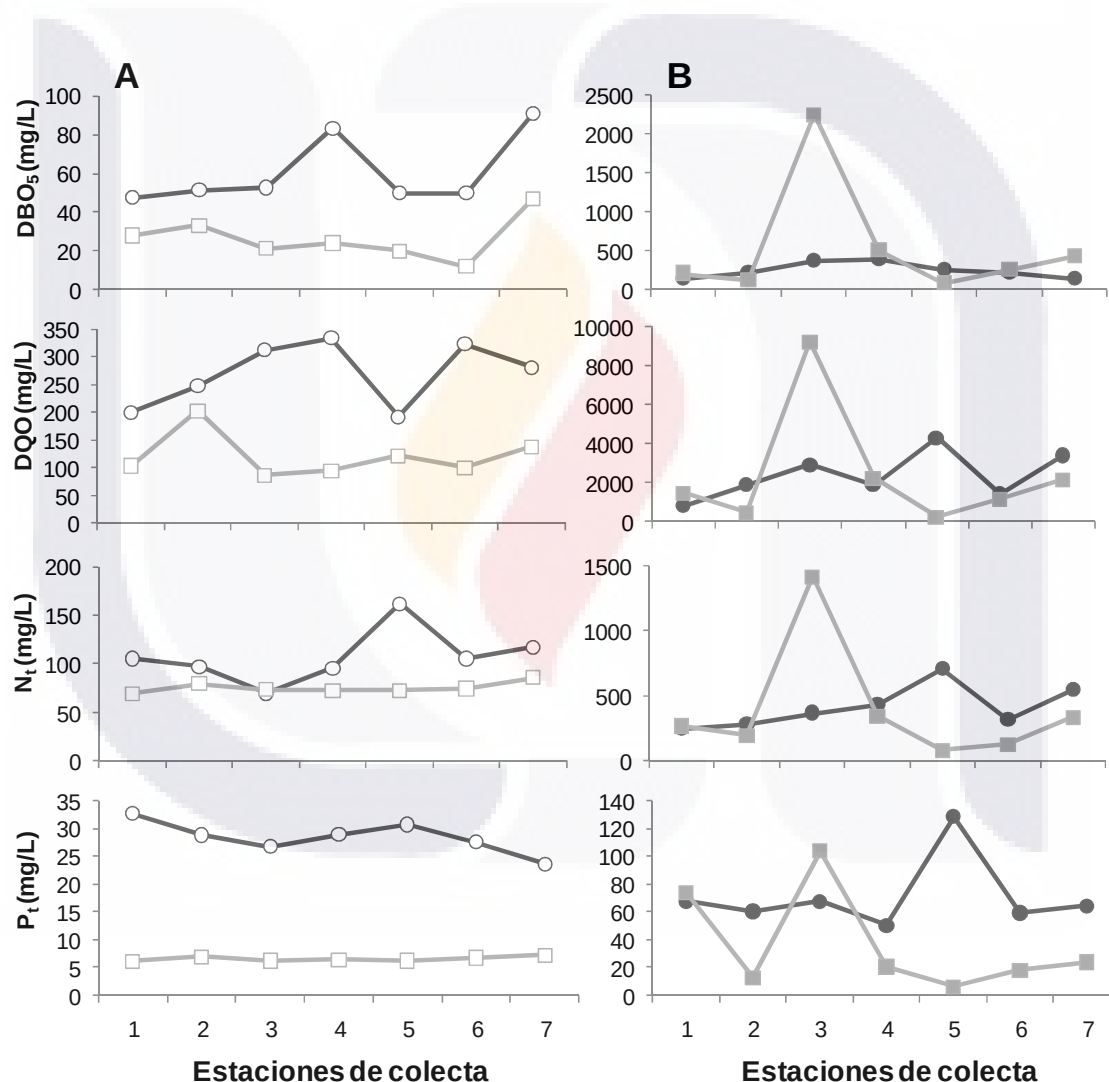


Figura 26. Concentraciones de materia orgánica y nutrientes de la columna de agua (A) y fondos (B) encontradas en las estaciones de colecta de la presa El Niágara, en la temporada de sequía (○, ●) y posterior a las lluvias (□, ■).

La concentración promedio de SAAM en la columna de agua en la campaña de sequía fue de 2.0 mg/L, con un valor máximo de 18 mg/L en el sitio 7, mientras que en la temporada posterior a las lluvias el valor promedio del cuerpo de agua fue de 1.35 ± 0.67 mg/L. En los fondos también se observó la concentración más alta en el sitio 7 con 23.3 mg/L (sequía), el resto de los fondos presentaron concentraciones alrededor de 6.0 mg/L, disminuyendo en promedio 1.56 ± 1.08 mg/L en todas las estaciones de colecta. El contenido de fenoles en ambas campañas se mantuvo alrededor de 0.03 mg/L en la columna de agua, mientras que en el fondo se encontró entre 2.0 y 3.0 mg/L. Los valores de anilinas fueron muy variables en el cuerpo de la presa durante el primer muestreo, registrándose concentraciones entre 3.5 y 23 mg/L, ya en el segundo, el contenido de anilinas fue del orden de 6.0 mg/L, mientras que en los fondos el promedio fue de aproximadamente 50 y 30 mg/L en sequía y lluvia respectivamente (Anexo 3).

En relación con los metales pesados, las concentraciones Cu, Cr, Cd y Pb fueron menores a los límites de detección en todas las muestras de la columna de agua. En los fondos, las concentraciones de Cu fueron menores a 0.5 mg/L, mientras que el contenido de Cr y Pb fue menor a 0.25 mg/L. En la Figura 27 se muestran los intervalos de las concentraciones de los metales pesados encontrados en la presa. Los valores de As en la columna de agua se encontraron dentro del intervalo de 5.0 - 1.0 $\mu\text{g/L}$, al menos 10 veces por debajo del LMP establecido en los CE-CCA-001-89 para agua de uso agrícola, mientras que en los fondos, las concentraciones más altas fueron de 150 y 400 $\mu\text{g/L}$ (sequía y lluvia respectivamente). Las concentraciones de Hg estuvieron por debajo de 2.5 $\mu\text{g/L}$ en ambos muestreos, en los fondos se observaron valores máximos de 4.0 y 5.9 $\mu\text{g/L}$. Los valores de Fe incrementaron de alrededor de 1.0 hasta 3.0 mg/L en la columna de agua, mientras que en los fondos se alcanzaron valores hasta de 300 mg/L. El contenido de Al en agua se encontró al menos 5.0% por debajo del LMP (5.0 mg/L) de la referencia antes mencionada, y en fondos, las concentraciones llegaron hasta 250 mg/L. Las concentraciones de Zn presentes en la columna de agua por arriba de su LD, se encontraron entre 0.005 y 0.047 mg/L, en fondos estuvieron dentro del intervalo de 0.1 a 5.6 mg/L. Los valores de Mn estuvieron entre 0.04 y 0.1 mg/L en las muestras de agua, mientras que en los fondos el intervalo fue de 0.12 a 5.6 mg/L.

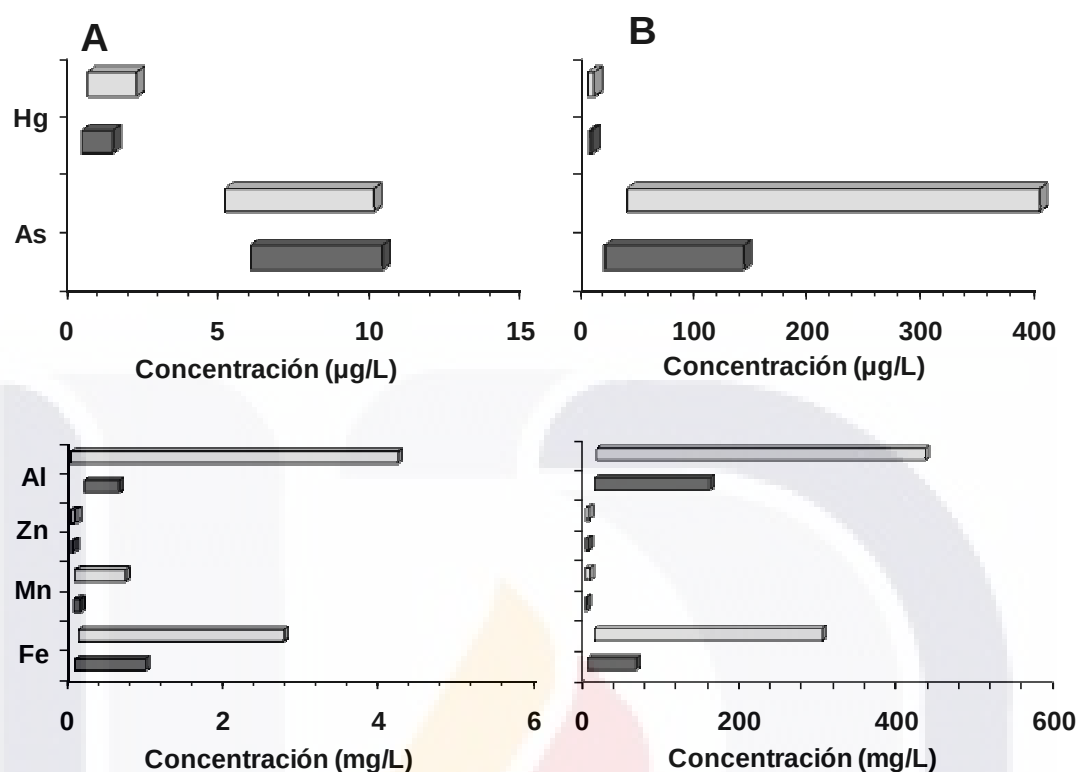


Figura 27. Intervalos de las concentraciones de metales pesados encontrados en la columna de agua (A) y en fondos (B) de la presa El Niágara, en la temporada de sequía (■) y posterior a las lluvias (■).

Comparando el ICA de las estaciones de colecta entre las campañas de muestreo (Figura 28), se observó una disminución del valor del ICA de la zona media de la presa (sitios 2, 3 y 4) pasando de la escala de “poco contaminado” al nivel de “contaminado”, en el muestreo realizado después de la temporada de lluvias. No se observó cambio en la estación 1 (cerca de la cortina), permaneciendo en el nivel de “contaminado” (ICA de aproximadamente 40), mientras que el sitio 6 pasó de “altamente contaminado” a “contaminado”. Pese al incremento del valor del ICA en la estación de colecta número 7 (más próxima al cauce), permaneció en la escala de “altamente contaminado” después de la época de lluvias.

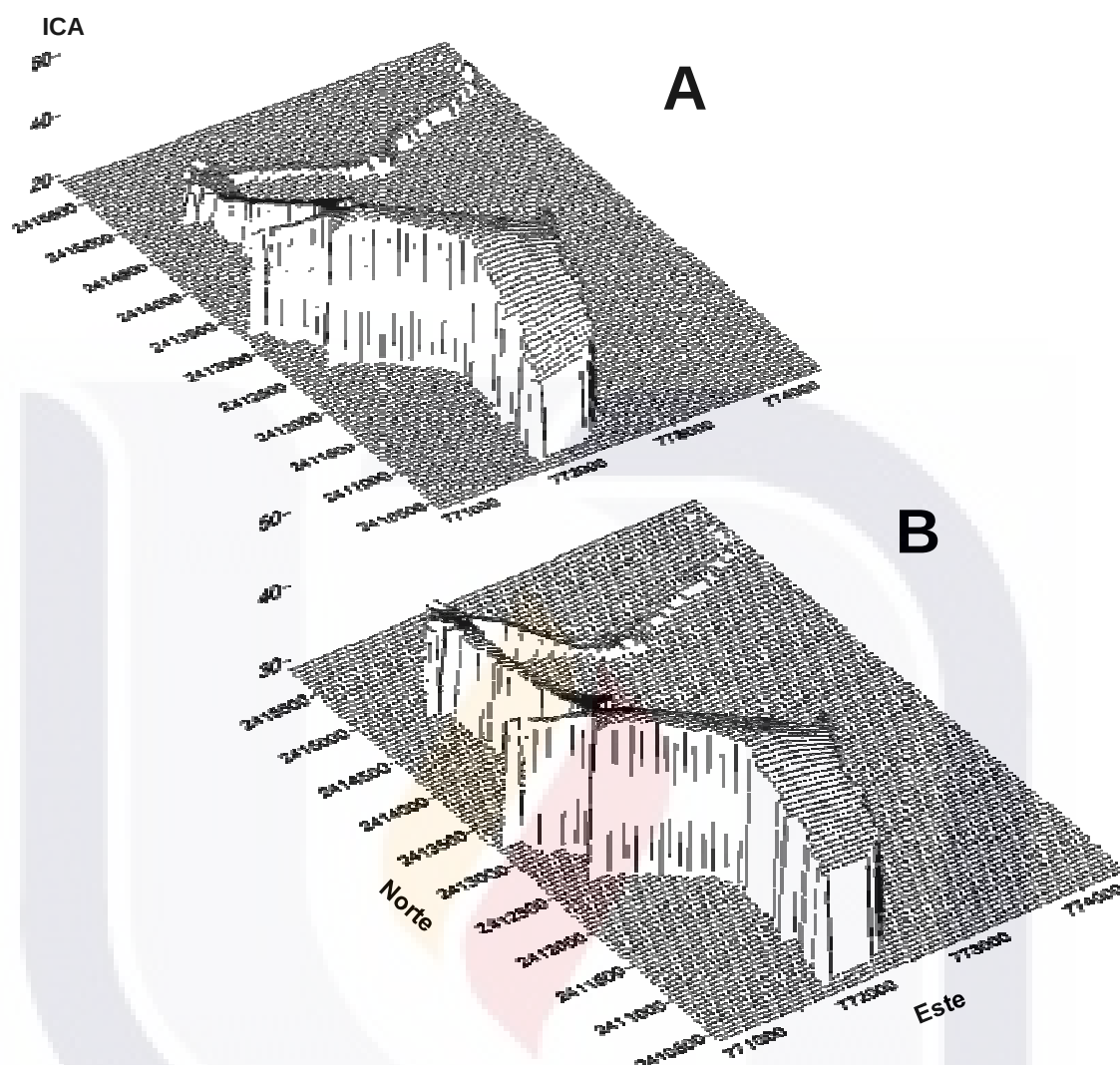


Figura 28. Distribución espacial del ICA en las estaciones de muestreo de la presa El Niágara. Temporada de sequía (A) y posterior a las lluvias (B). Valores de 0 a 29 pertenecen al nivel de “altamente contaminado”, valore de 30 a 49 al nivel de “contaminado” y de 50 a 60 al nivel de “poco contaminado” (CONAGUA, 2005).

EL SABINAL

El Sabinal es un pequeño cuerpo de agua (área y volumen aproximados de 1500 m² y 7500 m³) localizado aguas debajo de la presa El Niágara, dentro del parque recreativo del mismo nombre, en la comunidad de El Salto de los Salado, municipio de Aguascalientes (771678 E, 2408035 N). Este cuerpo de agua presa forma parte del propio

cauce del río San Pedro, a él llega el agua proveniente de la presa El Niágara y escurrimientos del arroyo La Escondida. El cual, conduce las descargas de las comunidades “Las Palomas” y “Granjas Fátima. El agua del Sabinal pasa a pequeños arroyos dentro del parque, para terminar en el cauce del río San Pedro o río Grande, donde el agua es empleada principalmente para riego agrícola. En este cuerpo de agua se consideraron tres estaciones de colecta. En la Figura 29 se muestra una fotografía de las estaciones de colecta. El sitio número 1 se ubicó en la zona media de la parte más amplia del cuerpo de agua, y el sitio 3, en la zona de conexión al cauce del río San Pedro (previo a una pequeña cascada).



Figura 29. Imagen de la ubicación de las estaciones de muestreo en El Sabinal (coordenadas UTM 771678, 2408035).

Las concentraciones de OD y turbiedad aumentaron significativamente ($p < 0.05$) de la temporada de sequía a la temporada posterior a las lluvias. El OD incrementó de 1.47 ± 0.38 a 3.10 ± 0.94 mg/L, mientras que la turbiedad paso de 7 ± 1 a 25 ± 9 NTU. Por el contrario, la temperatura y la conductividad disminuyeron en la columna de agua. La temperatura se redujo cerca de 3.0 °C (de 18.8 a 15.8 °C), mientras que la conductividad disminuyó aproximadamente 8.0% (de 1302 a 1193 $\mu\text{S/cm}$). Los valores de pH (entre 7.7 y 7.9 unidades) no presentaron diferencias significativas entre las temporadas de muestreo. En el Tabla 11 se muestra el promedio y la desviación estándar de los parámetros de campo, y los valores de todos los parámetros medidos en cada estación de colecta, así como los valores de p obtenidos de la prueba de Mann-Whitney, se muestran en el Anexo 3.

Tabla 11. Valores promedios de los parámetros de campo medidos en el Sabinal.

Campaña de muestreo	Tipo de muestra	Parámetros de campo				
		OD (mg/L)	Temp (°C)	pH	Conductividad (μS/cm)	Turbiedad (NTU)
Sequía	Columna de agua	1.47 ± 0.38	18.80 ± 0.74	7.73 ± 0.04	1302 ± 31	7 ± 1
	Fondo	0.36 ± 0.30	17.7 ± 0.2	7.37 ± 0.09	1333 ± 17	>800
Posterior a las lluvias	Columna de agua	3.10 ± 0.94	15.83 ± 0.67	7.92 ± 0.06	1193 ± 23	25 ± 9
	Fondo	1.35 ± 1.21	15.0 ± 0.3	7.67 ± 0.31	1172 ± 64	>800

Las concentraciones de coliformes totales y fecales disminuyeron al menos un orden de magnitud en el muestreo de la temporada posterior a las lluvias (entre 2.0 y 3.0 Log NMP/100 mL), en relación con las concentraciones observadas en la campaña de sequía (cerca de 4.0 Log NMP/100 mL), principalmente en la estación de colecta 3 (Figura 30). Las concentraciones de coliformes totales en los tres sitios de muestreo fueron menores a LMP señalado el los CE-CCA-01-89, para uso agrícola (1000 NMP/100 mL).

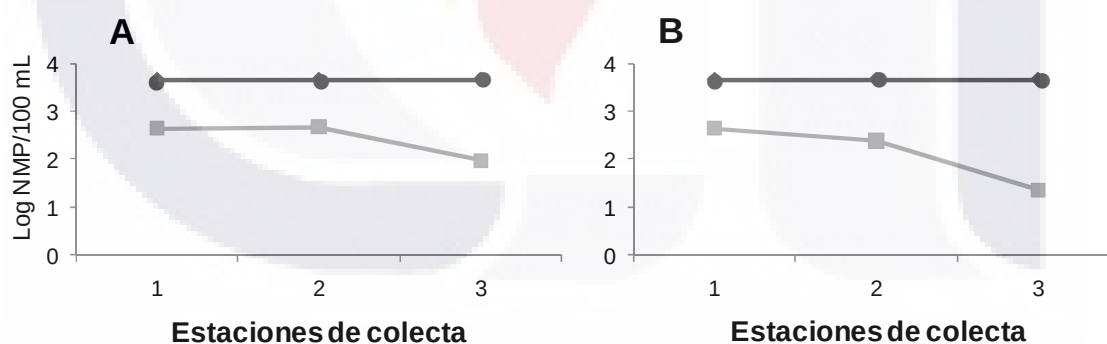


Figura 30. Concentraciones de coliformes totales (A) y fecales (B) encontradas en las estaciones de colecta del Sabinal, en la temporada de sequía (●) y posterior a las lluvias (■).

En la Figura 31 se muestran las concentraciones de materia orgánica y nutrientes encontradas en las estaciones de colecta en ambas campañas de muestreo. Con excepción de P_t , Las concentraciones de materia orgánica y N_t en la columna de agua no

presentaron diferencia entre las campaña de muestreo en la estación de colecta número 1 (alrededor de 50, 150 y 75 mg/L de DBO_5 , DQO y N_t respectivamente).

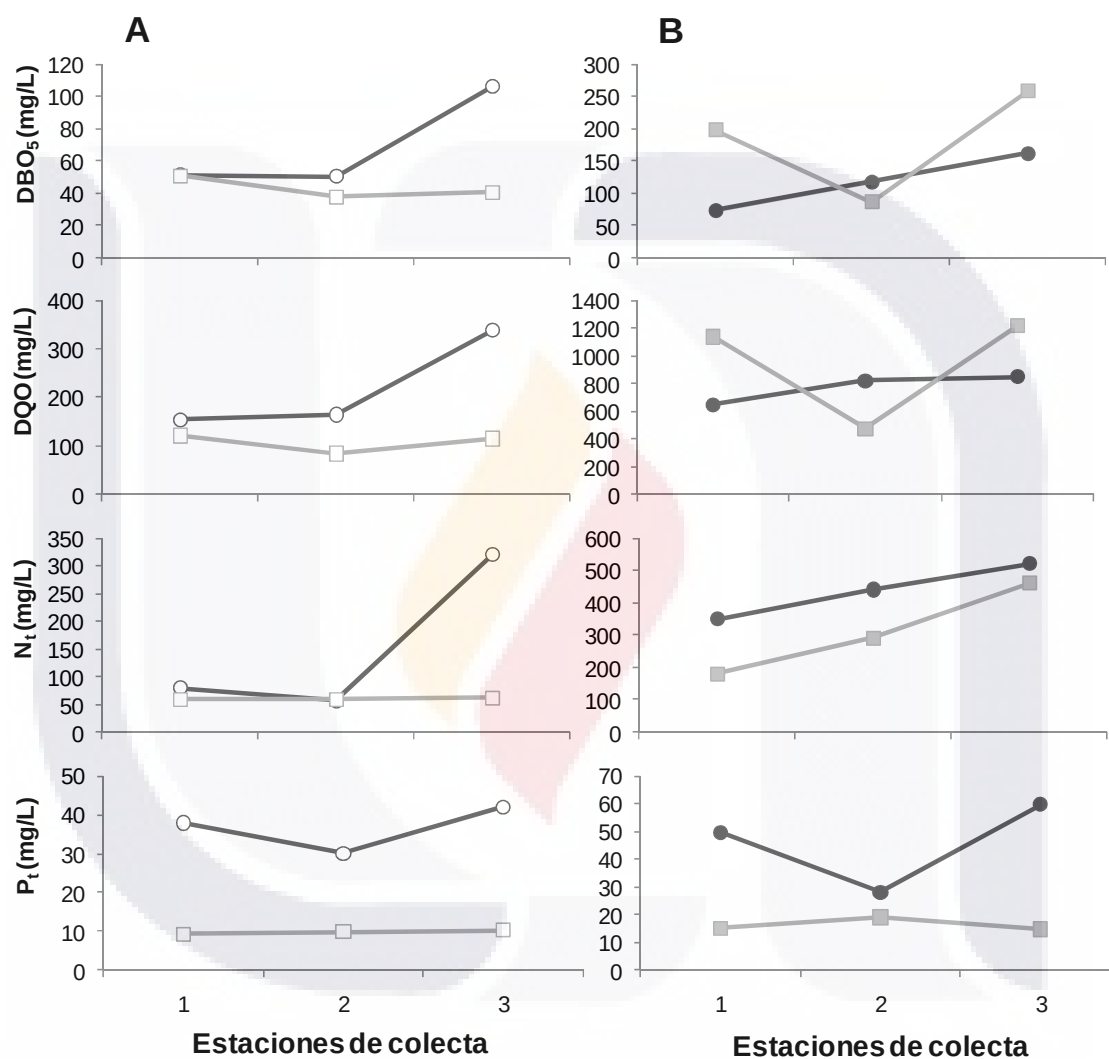


Figura 31. Concentraciones de materia orgánica y nutrientes de la columna de agua (A) y fondos (B) encontradas en las estaciones de colecta del Sabinal, en la temporada de sequía (○, ●) y posterior a las lluvias (□, ■).

En la estación ubicada en la entrada del cuerpo de agua (número 3), misma donde se obtuvieron las concentraciones más altas de estos tres contaminantes (100 mg/L de DBO_5 y aproximadamente 350 mg/L de DQO y N_t), la reducción fue de al menos el 50%.

Los valores de P_t disminuyeron de forma uniforme, de entre 30 y 40 mg/L a cerca de 8 mg/L. No se observaron tendencias temporales en las concentraciones de materia orgánica y nutrientes de los fondos de la presa. La concentración más elevada de materia orgánica (aproximadamente 250 y 1200 mg/L de DBO_5 y DQO respectivamente), se observó en la estación de colecta número 3 (lluvia). La concentración más alta de N_t (cerca de 500 mg/L) se encontró también en esta misma estación y campaña de muestreo. De igual forma, uno de los valores máximos de P_t (alrededor de 60 mg/L) se observó en el sitio 3 en la temporada de sequía.

Las concentraciones de anilinas en la columna de agua disminuyeron un 50% (de 7.0 a 3.0 mg/L) de la temporada de sequía a la de lluvia en los sitios 2 y 3. Sin embargo, en la estación de colecta 1 se incrementó aproximadamente 1.5 mg/L la concentración de este contaminante (de 4.5 a 6 mg/L), en fondos la reducción fue cerca del 75% (de 59 ± 21 a 12 ± 4 mg/L). Por otro lado, el sitio 3 también presentó la concentración más alta de SAAM (4 mg/L) en sequía, la cual, disminuyó a menos de 0.5 mg/L en la época de lluvia, en los fondos la reducción promedio fue cercana a 84% (de 5.0 a 0.8 mg/L). Las concentraciones de fenoles en la columna de agua fueron menores a 0.7 mg/L y en los fondos no superaron los 2.0 mg/L (Anexo 3).

En relación con los metales pesados, las concentraciones de los metales Cd y Pb también fueron menores a su LD en todas las muestras, únicamente en la muestra de agua del sitio 3, los valores de Cr y Al fueron mayores a su LD (concentraciones de 0.27 y 0.75 mg/L respectivamente), en el fondo, el contenido de Cr no se excedió de 0.1 mg/L, y el de Al (Figura 32) presentó concentraciones máximas de 73 y 110 mg/L (sitio 3). Los valores de As en la columna de agua se encontraron dentro del intervalo de 5.0 - 20.0 $\mu\text{g/L}$, al menos 4.0 veces por debajo del LMP establecido en los CE-CCA-001-89 para agua de uso agrícola, mientras que en los fondos, las concentraciones más altas fueron de 70 y 90 $\mu\text{g/L}$ (sequía y lluvia respectivamente). Las concentraciones de Hg estuvieron por debajo su LD en el primer muestreo, en el segundo, entre 0.3 y 0.8 mg/L. Los valores de Fe incrementaron ligeramente de alrededor de 0.09 a 0.3 mg/L en la columna de agua, mientras que en los fondos se alcanzaron valores hasta de 71 mg/L. Las concentraciones de Zn en la columna de agua estuvieron entre 0.006 y 0.03 mg/L, y en fondos las concentraciones fueron menores a 1 mg/L. Los valores de Mn estuvieron por debajo de

0.5 mg/L en las muestras de agua, mientras que en los fondos se observaron concentraciones de 2.5 mg/L.

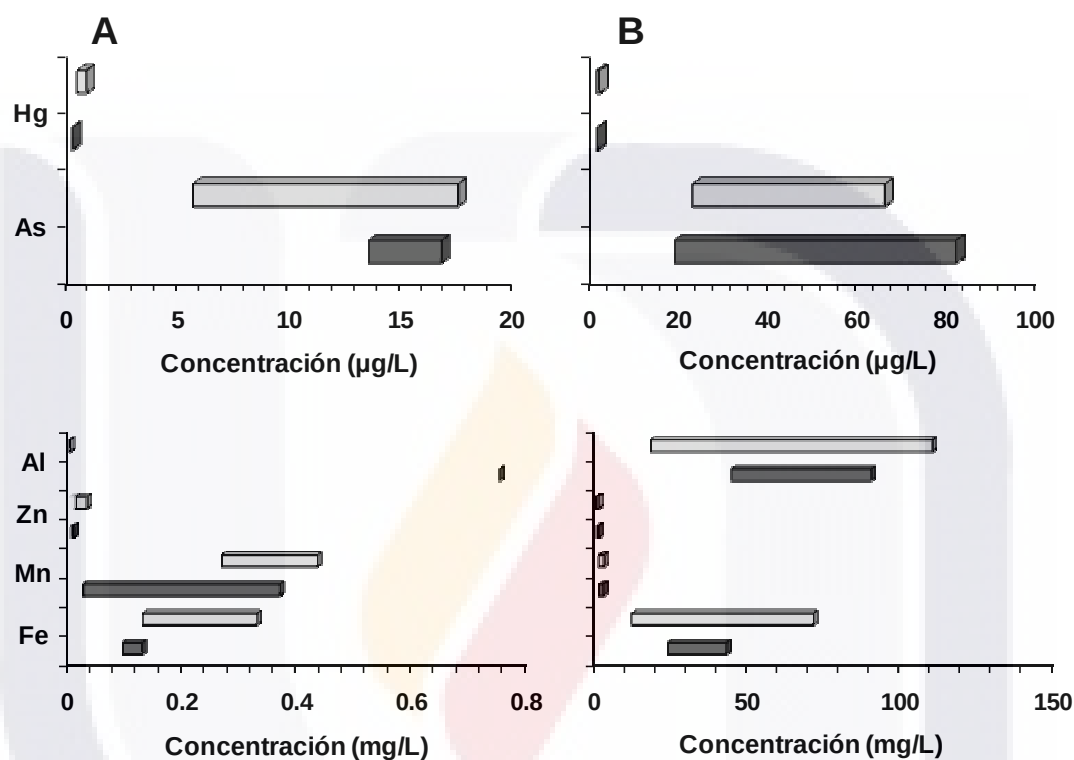


Figura 32. Intervalos de las concentraciones de metales pesados encontrados en la columna de agua (A) y en fondos (B) del Sabinal, en la temporada de sequía (■) y posterior a las lluvias (▒).

Pese a que el ICA de los tres sitios de muestreo incrementó cerca de 10 unidades (Figura 33) en la temporada de lluvia, sólo el sitio 3 pasó del nivel de “contaminado” (sequía) al intervalo de “poco contaminado”. Las otras dos estaciones de colecta, se mantuvieron en la escala de “contaminado”.



Figura 33. Valores del ICA en las estaciones de colecta del El Sabinal en la temporada de sequía y posterior a las lluvias. Valores de 0 a 29 pertenecen al nivel de “altamente contaminado”, valores de 30 a 49 al nivel de “contaminado” y de 50 a 60 al nivel de “poco contaminado” (CONAGUA, 2005).

5.2. Comparación del nivel de contaminación entre los cuerpos de agua

Comparando el ICA promedio de los cuerpos de agua evaluados (Figura 34), sólo se observaron diferencias temporales en El Sabinal. La presa Presidente Calles fue el único cuerpo de agua que permaneció con calidad “aceptable” (ICA entre 70 y 85), mientras que las presas El Saucillo y Gral. Abelardo L. Rodríguez, se encontraron entre los límites de “aceptable” y “poco contaminado”. Por otro lado, los cuerpos receptores del agua proveniente del cauce del río San Pedro (la presa El Niágara y el Sabinal), reflejaron la condición actual del mismo, al ubicarse de forma global en el nivel de “contaminado” con sitios “altamente contaminados”.

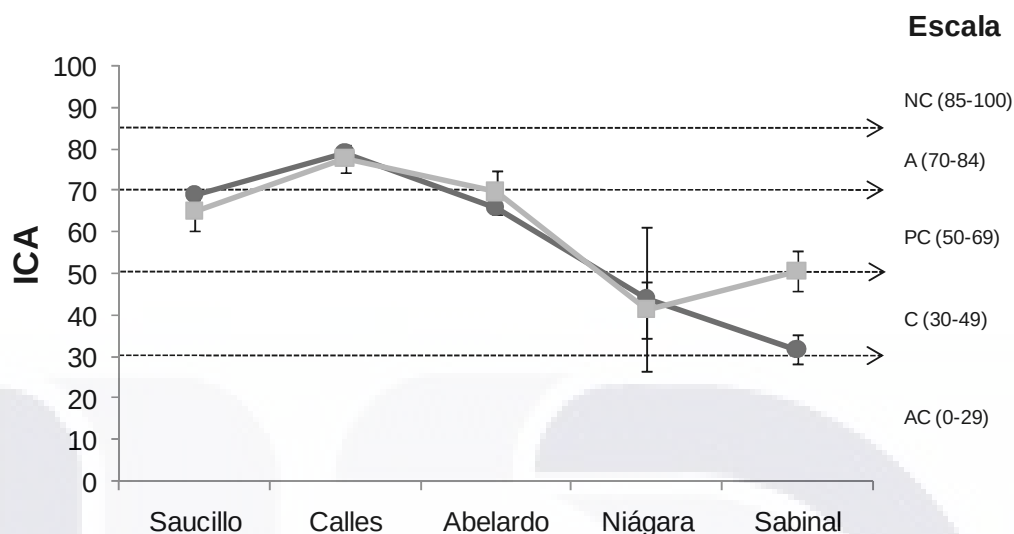


Figura 34. Comparación de los valores del ICA entre los cuerpos de agua superficiales evaluados en la temporada de sequía (●) y posterior a las lluvias (■). Valores de 0 a 29 pertenecen al nivel de “altamente contaminado” (AC), de 30 a 49 al nivel de “contaminado” (C), de 50 a 69 al nivel de “poco contaminado” (PC) y de 70 a 84 al nivel de “aceptable” (A) (CONAGUA, 2005).

Los indicadores que actualmente utiliza la CONAGUA (Anexo 1) para evaluar la calidad del agua en cuerpos de agua superficial son la DBO_5 y la DQO. Estos indicadores muestran la influencia antropogénica desde el punto de vista de la afectación por la presencia de centros urbanos e industriales (CONAGUA, 2005). De acuerdo con la escala de clasificación de DBO_5 , las presas El Saucillo y Presidente Calles se ubicaron dentro del nivel de “buena calidad” (aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable) en ambas campañas de muestreo, mientras que la presa Gral. Abelardo L. Rodríguez sólo se halló en este rubro, en la época posterior a las lluvias, y con calidad “aceptable” (aguas superficiales con indicios de contaminación y con capacidad de autodepuración o con descargas de agua residuales tratadas biológicamente) en la temporada de sequía (Figura 35). Por otro lado, la presa El Niágara se mostró “contaminada” (con aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal) en el primer muestreo, y de calidad “aceptable” en el segundo, mientras que El Sabinal permaneció en el nivel de “contaminado” en ambos. Sin embargo, tomado en cuenta los valores de DQO, únicamente la presa Presidente Calles

se encontró dentro la clasificación de “aceptable” en la temporada posterior a las lluvias. Las presas El Saucillo y Gral. Abelardo L. Rodríguez están “contaminadas”, y los cuerpos receptores de “contraminados” a “fuertemente contaminados” (aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas crudas municipales y no municipales).

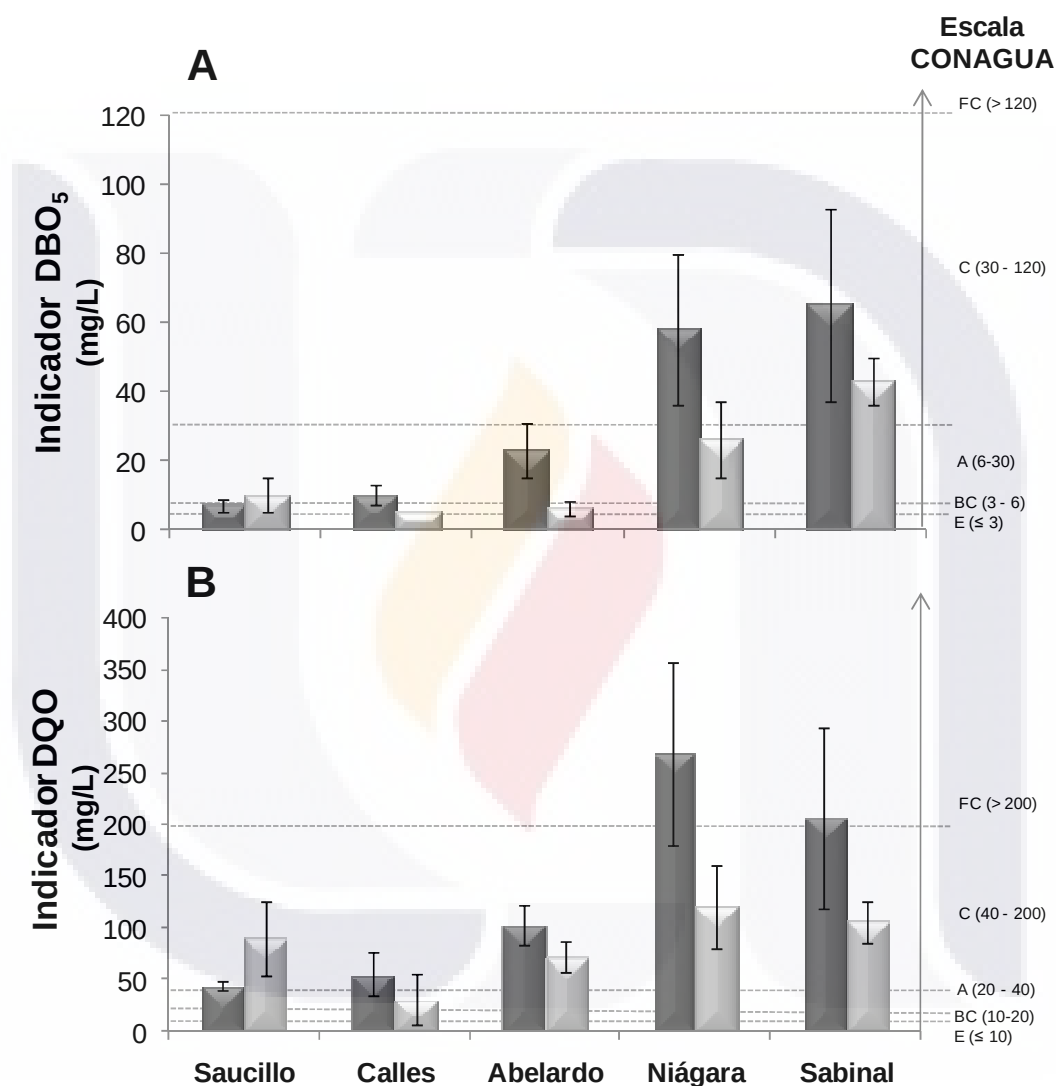


Figura 35. Comparación de los indicadores de DBO₅ (A) y DQO (B) entre los cuerpos de agua evaluados superficiales en la temporada de sequía (■) y posterior a las lluvias (▒). E: Excelente, BC: Buena Calidad, A: Aceptable, C: Contaminada y FC: Fuertemente Contaminada (CONAGUA, 2008).

5.3. Cuerpo de agua subterránea

Las muestras de agua obtenidas de los pozos presentaron concentraciones de oxígeno disuelto muy variables (entre 0.78 a 5.1 mg/L), debido principalmente a la temperatura de las mismas. Sin embargo, el pozo agrícola de la comunidad de “La Concepción” (pozo 10), en el municipio de San Francisco de los Romo, se encontró la concentración mínima de oxígeno disuelto (0.78 mg/L) y la conductividad más alta (1017 μ S) al igual que la turbiedad (3 NTU) con respecto a los valores de los otros pozos evaluados. No obstante lo anterior, para la conductividad no aplica la NOM-127-SSA1-1994 y la turbiedad no sobrepasa el límite máximo permisible (5 NTU). Los valores de pH obtenidos se encontraron dentro del rango permisible de la norma (6.5 y 8.5), con excepción del pozo del Fracc. Villas de la Cantera (pozo 16), el cual presentó un valor por debajo del rango (6.17) al mismo tiempo que la temperatura más alta (36.1 °C).

No se encontraron concentraciones de materia orgánica ni tóxicos orgánicos por arriba del límite de detección (LD) de las técnicas empleadas (0.2 mg /L de DQO, 0.5 mg /L de DBO, 1 μ g/L de fenoles y 50 μ g/L de SAAM) en ninguno de los pozos de agua potable. Sin embargo, en los pozos de uso agrícola se encontraron concentraciones de 14 a 43 mg/L de DQO, y entre 34 y 52 μ g/L de fenoles, tampoco se detectaron concentraciones de DBO y SAAM en estos pozos. Las concentraciones de fósforo total fueron menores a 1 mg/L en la mayoría de los pozos, con excepción de los pozos agrícolas de la comunidad de “La Concepción” (pozo 10) y el rancho “Hijos de María Morales” (pozo 17), 3.73 y 1.39 mg/L de PO_4 respectivamente, de igual forma en estos pozos se presentaron las concentraciones más altas de nitrógeno total (9 y 3 mg/L, respectivamente) que el resto de los pozos. Mientras que sólo en el pozo agrícola de “La Concepción” se encontró coliformes fecales (1100 NMP/100 mL). Las concentraciones de anilinas para pozos de agua potable se encontraron dentro del rango de 0.3 a 3.8 mg/L, registrándose las concentraciones más altas (3.0 y 3.8 mg/L) en los mismos dos pozos agrícolas mencionados anteriormente.

Los resultados obtenidos en el segundo muestreo de los pozos seleccionados, realizado en la temporada de lluvias, mostraron valores de pH dentro del rango permisible, las concentraciones de oxígeno disuelto se mantuvieron entre 1.32 y 4.59 mg/L y las temperaturas entre 20.5 y 36.1 °C, presentándose el valor más alto en el pozo del fraccionamiento de Villas de la Cantera, concordando con la medición del primer muestreo. En cuanto a la conductividad, el valor más alto se registró también en el pozo agrícola de “La Concepción” (1986 μ S), mientras que el valor más bajo se presentó en la comunidad de “Soledad de Arriba” (pozo 1), con 270 μ S. La Turbiedad permaneció en 3

NTU para los valores más altos en los pozos agrícolas y 0 NTU en los pozos de agua potable.

Al igual que en el primer muestreo, no se registraron concentraciones de materia orgánica en ninguno los pozos de agua potable, mientras que en los pozos agrícolas la concentración más alta fue de 8 mg/L de DQO en el mismo pozo que registró la concentración más alta de este mismo indicador en el muestreo realizado en la temporada de sequía (comunidad de “La Concepción”). Aún y cuando, la concentración de coliformes fecales en este mismo pozo fue la más alta, al igual que el primer muestreo, el valor fue significativamente inferior (4 NMP/100 mL) con respecto al muestreo anterior. Tampoco se observaron concentraciones por arriba del LD de SAAM, fenoles y anilinas.

Con respecto a los metales, no se registraron concentraciones de Cu, Cr, Al, Cd y Pb por arriba del límite de detección de la técnica empleada (0.023, 0.014, 0.13, 0.00005 y 0.135 mg/L, respectivamente) en ninguno de los pozos de agua, tanto potables como agrícolas en ambos muestreos (sequía y lluvias). El resto de las concentraciones de As, Hg, Fe, Mn y Zn se muestran en los Tablas 12 (pozos agrícolas) y 13 (pozos de agua potable).

Tabla 12. Concentración de los metales As, Hg, Fe, Mn y Zn presente en los pozos agrícolas durante los dos muestreos.

Pozo agrícola	NP	CM	Metales pesados				
			As (µg/L)	Hg (µg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Zn (mg/L)
San Jacinto	3	S	24	Nd	Nd	0.073	Nd
		L	42	1	0.206	Nd	Nd
Rancho El Lagunero	4	S	51	Nd	0.025	Nd	Nd
		L	---	--	--	--	--
El Gigante	6	S	17	1	Nd	Nd	0.016
		L	20	Nd	Nd	Nd	Nd
La Concepción	10	S	14	Nd	0.361	0.57	Nd
		L	18	Nd	1.715	0.60	Nd
Rancho Hijos de María Morales	17	S	5	3.560	0.063	Nd	Nd
		L	7	1.6	0.11	Nd	Nd
LMP			100	Na	Na	Na	Na
LD			0.3	0.3	0.025	0.012	0.005

CM= Campaña de muestreo. NP= Número de pozo. S= sequía. L= lluvias. Nd=No detectable. Na=No aplica. LMP= Límite máximo permisible según el criterio de calidad del agua para uso agrícola, establecido en CE-CCA-001-1989. LD=Límite de detección. ---- No fue posible tomar la muestra. Los números en negritas sobrepasan los LMP.

Tabla 13. Concentración de los metales As, Hg, Fe, Mn y Zn presente en los pozos de agua potable durante los dos muestreos (sequía y lluvia).

Pozos Potables	NP	CM	Metales pesados				
			As (µg/L)	Hg (µg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Zn (mg/L)
Soledad de Arriba	1	S	3	Nd	Nd	Nd	Nd
		L	3	Nd	Nd	Nd	Nd
Zacatequillas	2	S	14	Nd	Nd	Nd	Nd
		L	11	Nd	Nd	Nd	Nd
Mar Negro	5	S	9	Nd	Nd	Nd	0.006
		L	22	Nd	0.058	Nd	Nd
Puerta del muerto	7	S	18	Nd	0.029	Nd	Nd
		L	32	Nd	Nd	Nd	Nd
Plaza principal	8	S	18	Nd	Nd	Nd	Nd
		L	20	Nd	Nd	Nd	Nd
El Barranco	9	S	15	Nd	0.294	Nd	0.011
		L	19	Nd	Nd	Nd	0.006
Corral de Barrancos	11	S	1	Nd	Nd	Nd	Nd
		L	10	Nd	0.048	Nd	Nd
Fracc. Vergeles	12	S	13	1.5	0.177	0.015	Nd
		L	4	2	Nd	Nd	0.01
Colinas del río	13	S	4	Nd	0.059	Nd	Nd
		L	12	Nd	0.046	0.022	Nd
Francisco Villa	14	S	9	1.15	0.087	Nd	Nd
		L	10	2	0.061	Nd	Nd
López Portillo 2	15	S	10	Nd	Nd	Nd	Nd
		L	12	Nd	.03	Nd	Nd
Villas de la Cantera	16	S	16	0.8	Nd	Nd	Nd
		L	13	Nd	Nd	Nd	Nd
LMP			25	1	0.3	0.15	5
LD			0.3	0.3	0.025	0.012	0.005

CM= Campaña de muestreo. NP= Número de pozo. S=Sequía. L=Lluvia. Nd=No detectable. Na=No aplica. LMP= Límite máximo permisible según la NOM-127-SSA1-1994. LD=Límite de detección. Los números en negritas sobrepasan los LMP.

5.4. Integración de información y programa de monitoreo

Después de realizar el análisis descriptivo de los datos recopilados de los trabajos de López (2007) y Mora (2007) que se muestran en el Anexo 4, se observaron concentraciones máximas, cercanas a 14000 y 6000 mg/L de DQO y DBO₅ respectivamente en el río San Pedro, y de 35000 y 16000 mg/L en el río El Chicalote en la época de sequía. Las cuales disminuyeron en la temporada de lluvias (8000 y menos de 2500 mg/L de DQO y DBO₅, respectivamente en el río San Pedro, y 20000 y aproximadamente 9000 mg/L en el río El Chicalote). Sin embargo, el valor de la medianas de la concentración de DQO no mostró diferencias en ninguno de los cauces, en el río San Pedro fueron de 678 y 587 mg/L en sequía y lluvia respectivamente, mientras que en el cauce del río El Chicalote el valor de las medianas fue de aproximadamente 1200 mg/L. Sin embargo, el valor de la mediana de las concentraciones de DBO₅ en la época de lluvia incrementó más del 70% (416 mg/L) en relación con la mediana de sequía (241 mg/L). En el río San Pedro, el valor de las medianas en sequía y lluvia fueron de 128 y 141 mg/L respectivamente. No se observaron diferencias en los valores del tercer cuartil (Q3) en ninguno de los casos.

Los valores obtenidos del nitrógeno total mostraron concentraciones máximas entre 800 y 1200 mg/L en ambos ríos. No obstante, sólo en el río El Chicalote se observó una diferencia del 25% en el valor de las medianas (180 y 240 mg/L de sequía y lluvia respectivamente). Las medianas de la concentración de nitrógeno total en el río San Pedro fueron alrededor de 130 mg/L. Por otro lado, los valores de las medianas de la concentración de fósforo total fueron las mismas en el río San Pedro (18 mg/L), y en el río El Chicalote se encontraron alrededor de 20 mg/L. Los valores máximos de este parámetro fueron observados en el cauce del río El Chicalote, presentándose concentraciones mayores de 300 mg/L en sequía y 350 mg/L en lluvia. En el caso de río San Pedro las concentraciones máximas se encontraron entre 50 y 90 mg/L. Sólo se observó diferencia del 25% en los valores del tercer cuartil (Q3) en la concentración de nitrógeno total.

Los valores máximos de anilinas en las dos épocas de muestreo fueron cercanas a los 650 mg/L en el río San Pedro y a los 950 mg/L en el río El Chicalote en la época de sequía, disminuyendo casi a la mitad en la temporada de lluvias (300 mg/L) en el río San Pedro y cinco veces menos en el río El Chicalote (200 mg/L). Por otro lado, el valor de la mediana no mostró diferencias significativas entre las dos temporadas evaluadas en

ambos cauces registrando valores tanto en sequía como lluvia de 29 mg/L en el cauce del río San Pedro y cercana a 50 mg/L en el cauce del río El Chicalote. Las concentraciones máximas de SAAM fueron de aproximadamente 110 mg/L en el río San Pedro, el valor de las medianas se encontró cercano a los 30 mg/L. Por otro lado, en el río El Chicalote se observó un valor máximo de detergentes de aproximadamente 170 mg/L en la época de sequía, disminuyendo a cerca de 80 mg/L en la temporada de lluvias. Tampoco se presentó diferencia del valor de la mediana entre las dos épocas (alrededor de 50 mg/L).

Los resultados del análisis estadístico realizado a las concentraciones de metales pesados observados en los sitios de muestro ubicados en el cauce del río San Pedro se muestran en el Anexo 4. Todas las estaciones de muestreo presentaron concentraciones de As, Cr, Cu, Hg y Zn menores a 1 mg/L en las dos épocas evaluadas. En el 50% (mediana) de los sitios no se detectaron concentraciones de Al, As, Cr, Cu, Fe, Hg y Mn después de la época de lluvia. Los valores máximos de Al, Fe y Mn fueron 7.400, 8.860 y 1.010 mg/L, respectivamente, y junto al resto de los valores disminuyeron significativamente (al menos 35%) en la temporada de lluvia. Las concentraciones de As, Cu y Hg encontradas en el río El Chicalote fueron menores a 0.300 mg/L en todos los sitios. Se observaron concentraciones de máximos importantes en la época de sequía de Al, Fe y Zn (62.600, 22.600 y 10.360 mg/L respectivamente). Los cuales, disminuyeron significativamente hasta un 95% su valor en la temporada de lluvia (5.850 mg Al/L, 4.810 mg Fe/L y 0.500 mg Zn/L). En el 25% (Q1) de los sitios evaluados no se detectaron concentraciones de As, Cr y Hg en ambas épocas estudiadas, mientras que el Al, Cu, Fe, Mn y Zn, no fueron detectados en el mismo porcentaje de sitios sólo en la temporada de lluvia. En el anexo 3 del presente trabajo se muestran los resultados completos de las estadísticas descriptivas de agua y sedimentos de ambos cauces.

Para determinar si existieron diferencias significativas entre las concentraciones de los parámetros determinados en los muestreos realizados en la época de sequía y posterior a las lluvias se realizó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney ($\alpha = 0.05$), la cual reveló diferencias significativas entre las campañas de muestreo en las concentraciones de metales pesados en agua y SAAM en sedimentos del río San Pedro, y el contenido de Al, Cu y Mn en agua del río El Chicalote (Tabla 14). Considerando estos resultados se realizó la prueba de Ji-cuadrada (X^2) con $\alpha=0.05$. El valor de la estadística de prueba X^2 (Figura 36) fue menor al valor de referencia (3.841) en ambos ríos. De acuerdo a esto, no se rechaza H_0 y se concluye que la variabilidad temporal de la concentración de los contaminantes es independiente de la matriz. Lo anterior, permite

inferir (función de las dos campañas de muestreo) que la contaminación global de los ríos es independiente de las temporadas estacionales en que se realizaron los muestreos (época de sequía y posterior a las lluvias).

Tabla 14. Parámetros que presentaron diferencia significativa en los ríos San Pedro y El Chicalote entre las épocas evaluadas en muestras de agua y sedimentos.

Río San Pedro				Río El Chicalote			
Agua		Sedimentos		Agua		Sedimentos	
Parámetro	<i>p</i>	Parámetro	<i>p</i>	Parámetro	<i>p</i>	Parámetro	<i>p</i>
Al	0.0000	SAAM	0.0371	Al	0.0356		
As	0.0000			Cu	0.0089		
Cr	0.0016			Mn	0.0439		
Cu	0.0006						
Fe	0.0000						
Hg	0.0058						
Mn	0.0000						
Zn	0.0000						

RÍO SAN PEDRO

Diferencia significativa entre épocas de muestreo	Párametros		
	Agua	Sedimento	Total
Si	8	1	9
No	20	17	37
Total	28	18	46

ji-cuadrada 3.688069021

RÍO EL CHICALOTE

Diferencia significativa entre épocas de muestreo	Párametros		
	Agua	Sedimento	Total
Si	3	1	4
No	25	17	42
Total	28	18	46

ji-cuadrada 0.367252457

Figura 36. Tablas de contingencia 2x2 y valores de ji-cuadrada (X^2) de los ríos San Pedro y El Chicalote.

En general, los resultados no mostraron correlación significativa entre agua y sedimentos en ninguno de los dos cauces. Todos los parámetros evaluados presentaron coeficientes de correlación (r^2) menores a 0.5. Los valores de r^2 por arriba de 0.5, observados en DQO (lluvia) y los metales Cu (sequía), Cr (lluvia) y Zn (sequía) en el río El Chicalote, no fueron consistentes en ambas campañas de muestreo, además en la Figura 37 se muestra como los valores relativamente altos de correlación se deben únicamente a un solo punto. Por lo tanto, se vuelve necesario el análisis de las dos fases del cauce, ya que cada una de ellas presenta un comportamiento diferente. Los resultados del análisis de correlación de los ríos San Pedro y El Chicalote se muestran en el Anexo 4.

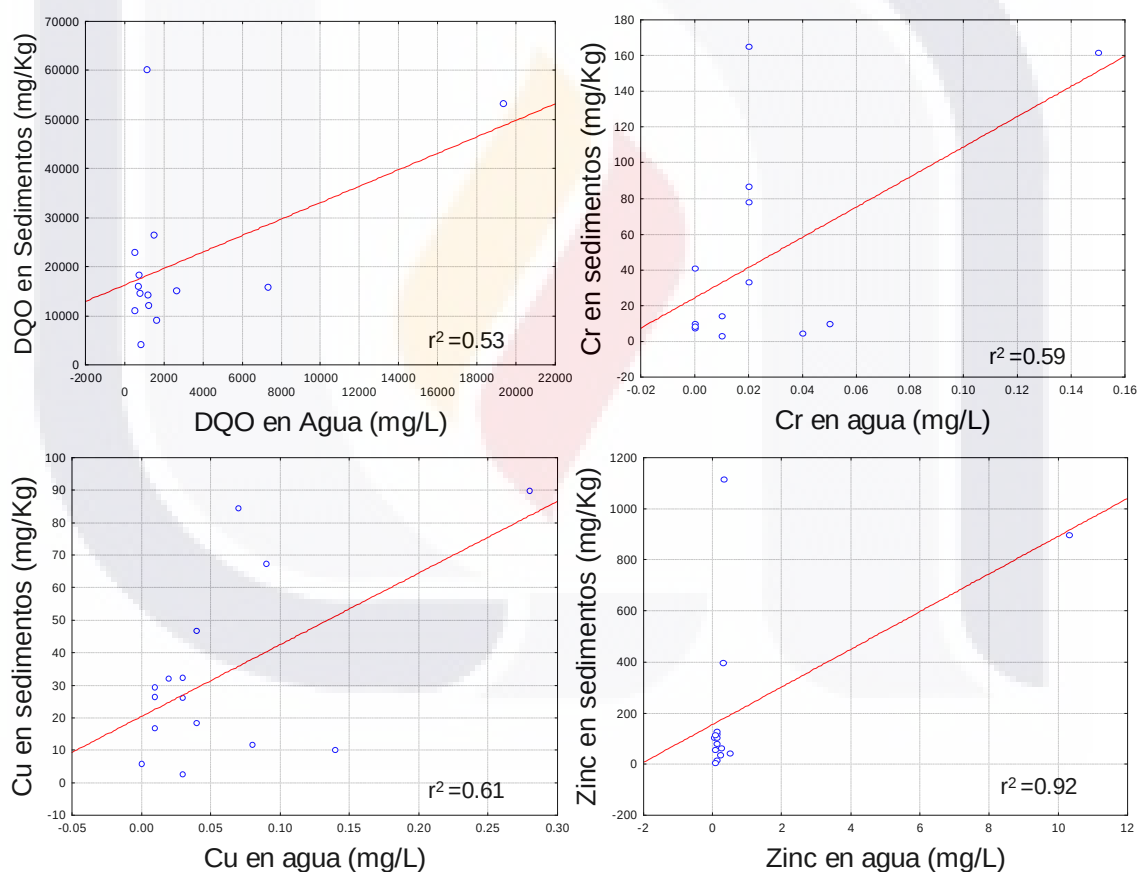


Figura 37. Gráficas de correlación de los parámetros que tuvieron coeficientes de correlación (r^2) mayores a 0.50.

Para definir los parámetros de monitoreo se realizó un análisis de componentes principales (ACP) a cada río, y otro a ambos ríos en conjunto para observar si persiste la tendencia de los parámetros. En estos análisis se incluyó la prueba de toxicidad (PTox) con *Daphnia magna* (Torres, 2008). Para elegir el número de componentes principales (CP) que deben considerarse (que contengan casi toda la información) y así disminuir la dimensionalidad de las variables originales Esta selección de CP se hace de acuerdo a la cantidad de variación que se requiere explicar en el análisis, generalmente se desea explicar un 80% de la variabilidad total del fenómeno del estudio (Rodríguez, 1995). Para lo cual, se empleó el método gráfico, este consiste en graficar los valores de las varianzas (valor característico o eigenvalor de Σ) de los CP ordenadas en forma decreciente. Se eligen los componentes cuyas varianzas se encuentren hasta el primer quiebre que esté más acentuado. De acuerdo a lo anterior, se seleccionaron cuatro CP, ya que fue donde se observó el primer quiebre en el río San Pedro (Figura 38), con un variabilidad acumulada del 64.3%. Con estos mismos componentes, se cubre el 77.9% de la variabilidad del río Chicalote. Al considerar la información de los dos ríos en conjunto, la variabilidad disminuyó a 63% con este mismo número de componentes.

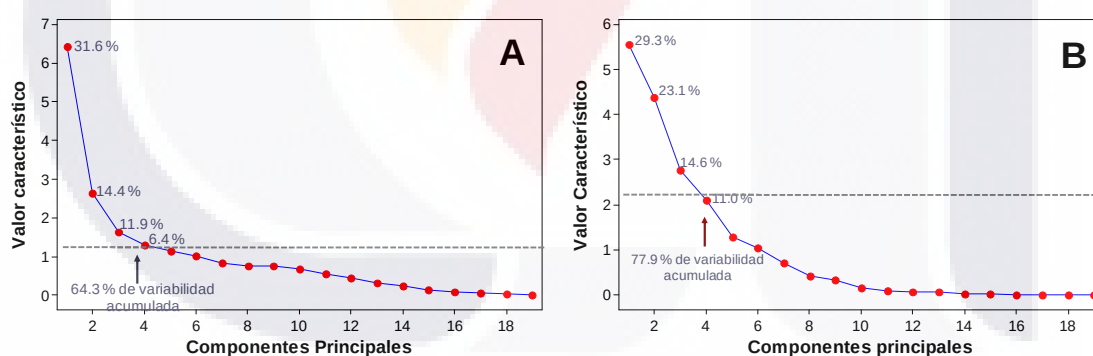
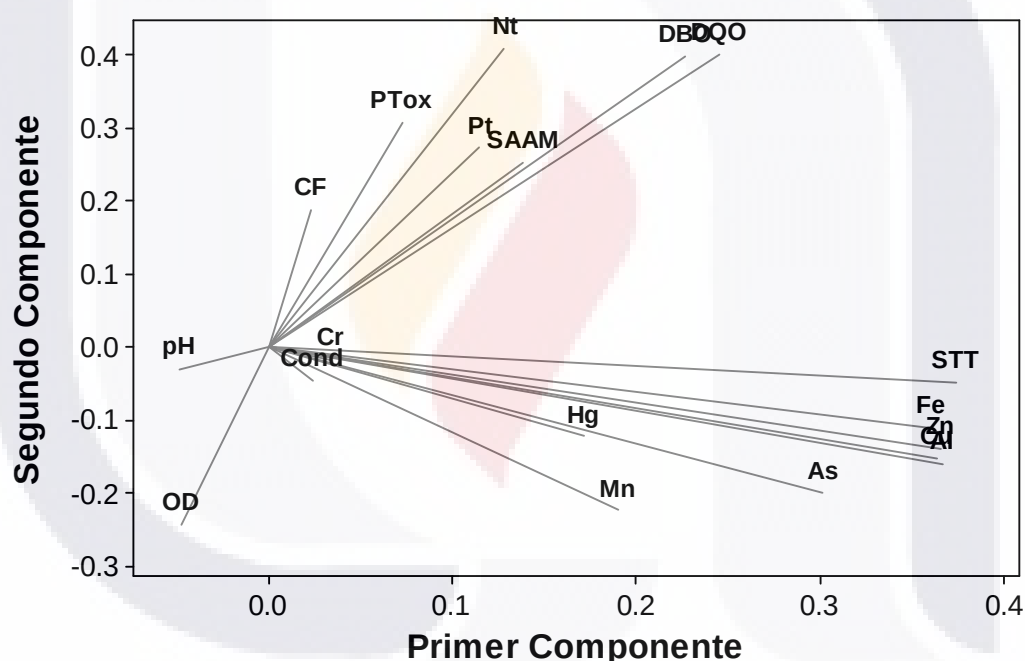


Figura 38. Valor característico (varianza) de los componentes principales de los ríos San Pedro (A) y Chicalote (B).

Con el ACP se pretendía obtener los coeficientes (ponderación) para cada una de las variables, y de esta forma diseñar un índice de contaminación. Para lo cual, era necesario que el mayor porcentaje de variabilidad se comprendiera al menos en los dos primeros CP, lo cual no fue posible. No obstante, el ACP permitió identificar los contaminantes con mayor influencia en ambos ríos y la relación que guardan entre sí. Con lo cual, fue posible seleccionar las variables de mayor impacto e incluirlas en el programa de monitoreo del río San Pedro. Cabe mencionar que se incluyeron ambas campañas de muestreo para la realización del ACP. En las Figuras 39 y 40 se muestra de forma gráfica el comportamiento de los dos primeros CP, así como su expresión en combinaciones lineales de las variables originales, de los ríos San Pedro y Chicalote respectivamente.



$$\begin{aligned} \text{Primer componente } (y_1) = & 0.066 \text{ PTox} + 0.219 \text{ DQO} + \\ & 0.212 \text{ DBO} + 0.106 \text{ Nt} + 0.158 \text{ Pt} + 0.374 \text{ STT} - \\ & 0.068 \text{ SAAM} + 0.358 \text{ Al} + 0.291 \text{ As} + 0.036 \text{ Cr} + \\ & 0.351 \text{ Cu} + 0.376 \text{ Fe} - 0.163 \text{ Hg} + 0.239 \text{ Mn} + \\ & 0.367 \text{ Zn} - 0.040 \text{ Log CF} + 0.087 \text{ pH} - 0.086 \text{ OD} \\ & + 0.092 \text{ Cond} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Segundo componente } (y_2) = & 0.195 \text{ PTox} + 0.434 \text{ DQO} + \\ & 0.435 \text{ DBO} + 0.245 \text{ Nt} + 0.287 \text{ Pt} + 0.133 \text{ STT} - \\ & 0.033 \text{ SAAM} - 0.241 \text{ Al} - 0.230 \text{ As} + 0.004 \text{ Cr} - 0.244 \\ & \text{Cu} - 0.0083 \text{ Fe} - 0.196 \text{ Hg} - 0.042 \text{ Mn} - 0.183 \text{ Zn} + \\ & 0.241 \text{ Log CF} - 0.210 \text{ pH} - 0.209 \text{ OD} + 0.145 \text{ Cond} \end{aligned}$$

Figura 39. Relación de las variables y combinaciones lineales de los dos primeros componentes del río San Pedro.

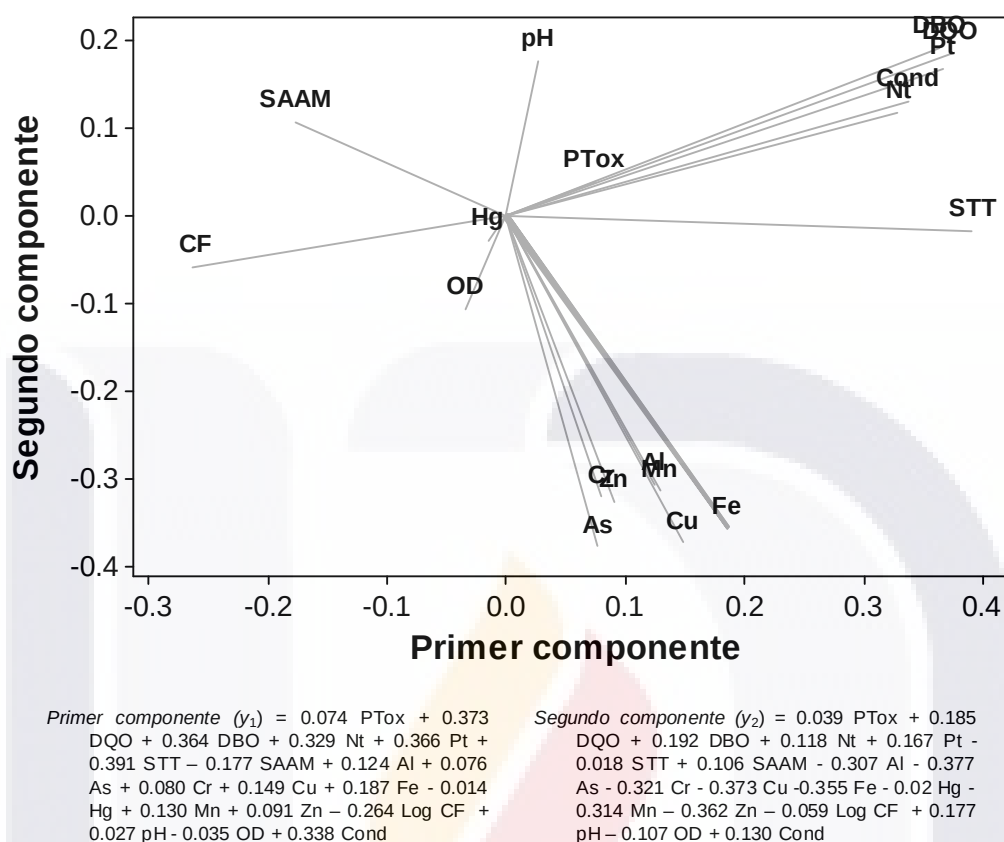


Figura 40. Relación de las variables y combinaciones lineales de los dos primeros componentes del río Chicalote.

Al observar y_1 y y_2 , se tiene que los coeficientes de ambos CP son todos diferentes a cero; esto significa que todas las variables originales (contaminantes) contribuyen de manera significativa en el estudio. Sin embargo, la DBO, DQO, Nt y Pt presentaron coeficientes positivos en los dos CP, con los valores más altos en el primer CP en ambos ríos. Lo cual, indica que son las variables de mayor impacto, que a su vez, generan un mayor efecto en la varianza de las muestras de agua. Además, se encuentran correlacionadas negativamente con el pH y el OD. Los coliformes fecales (CF), SAAM y la conductividad (cond) presentaron un comportamiento diferente en los dos ríos, con coeficientes negativos en ambos componentes ó solo en un CP de mayor magnitud que el de valor positivo. La longitud de las agujas, señala la magnitud de los valores. Las pruebas de toxicidad (PTox) están más relacionadas con la materia orgánica y los

nutrientes, y negativamente correlacionadas con los metales pesados. Los metales pesados también presentaron un comportamiento similar en los dos ríos, agrupados en el cuarto cuadrante, con coeficientes positivos pequeños en uno de los CP y negativos grandes en otro. Lo cual, indica que aunque se encuentran presentes, tienen una menor influencia en relación al resto de las variables.

Al realizar el diagrama de dispersión de los valores de CP1 y CP2 de los ríos San Pedro y Chicalote (Figuras 41 y 42 respectivamente), se pudieron identificar los sitios de muestreo con mayor impacto de materia orgánica y nutrientes, así como las que presentaron los niveles más altos de alguno de los metales determinados. Los sitios más impactados por estos contaminantes en el río San Pedro fueron las estaciones de colecta número 6, 21, 26 y 29, este última también por metales pesados en la campaña de sequía. Por su parte, en el río El Chicalote los sitios más contaminados por materia orgánica y nutrientes fueron las estaciones 1, 12 y 14, este último también con metales pesados junto con el sitio 9. Así mismo, en la Figura 43 se muestra el diagrama de dispersión de los dos ríos juntos, donde se aprecia que los sitios que presentaron en alguna de las campañas de muestreo, la mayor contaminación por materia orgánica y nutrientes principalmente, están ubicados en el cauce del río El Chicalote.

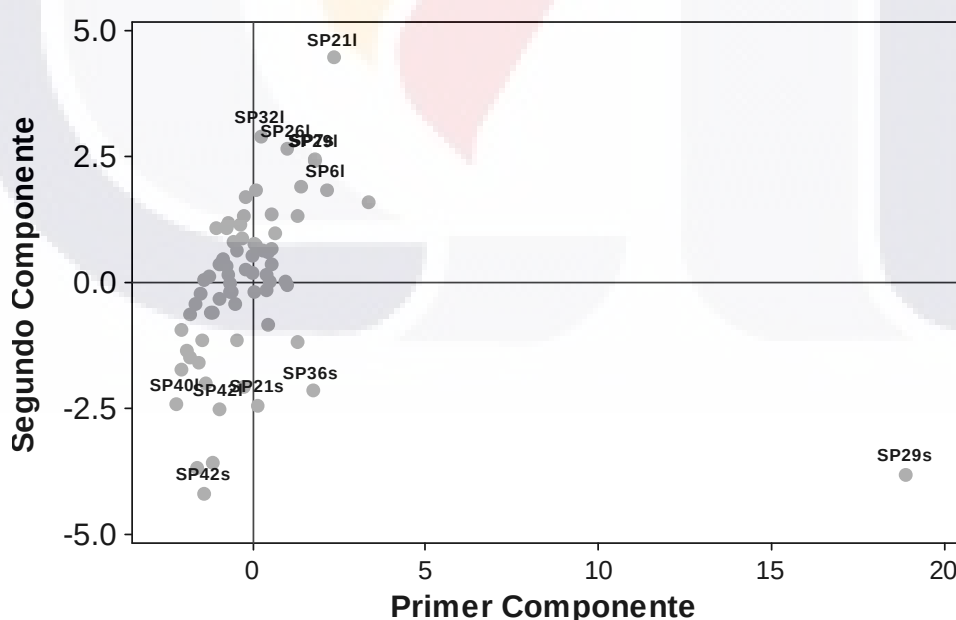


Figura 41. Diagrama de dispersión de las estaciones de muestreo del río San Pedro.

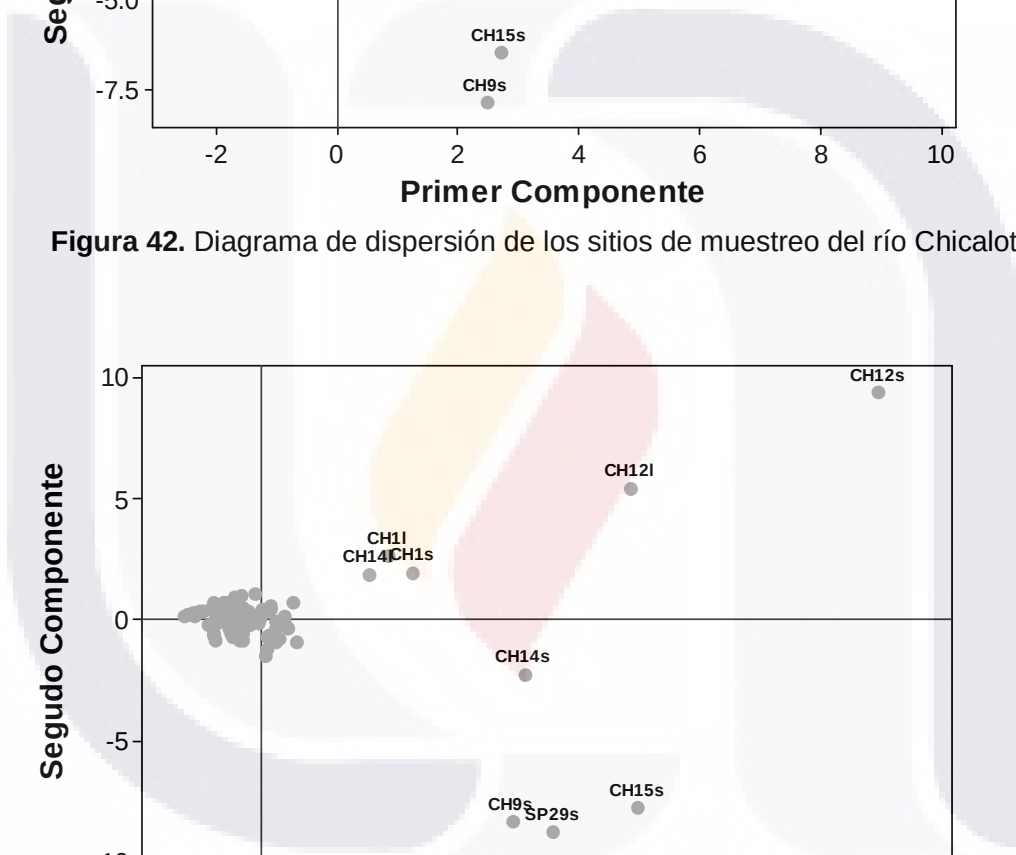


Figura 42. Diagrama de dispersión de los sitios de muestreo del río Chicalote.

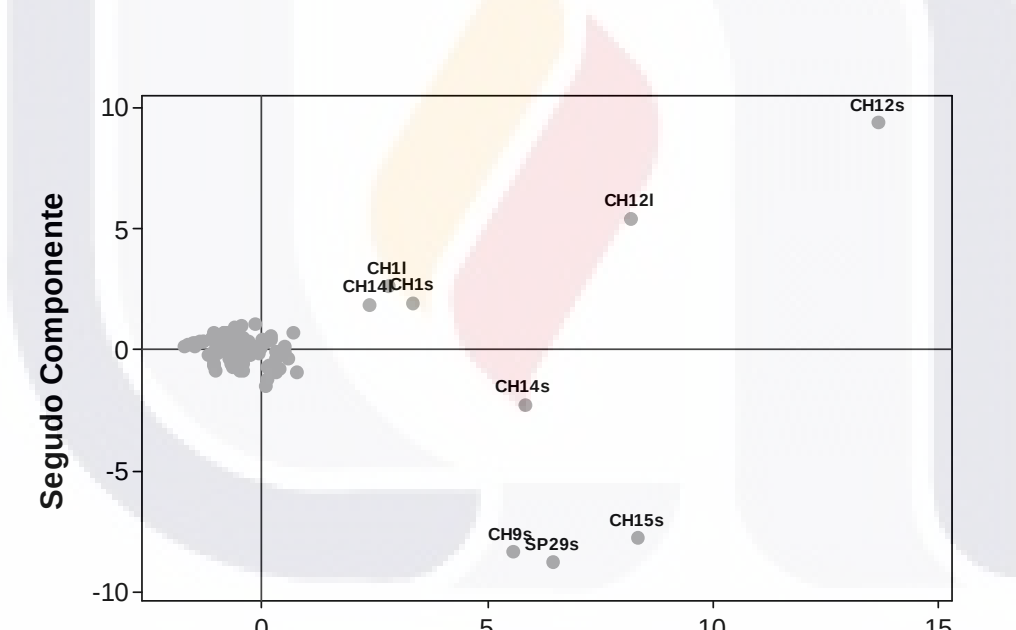


Figura 43. Diagrama de dispersión de los sitios de muestreo de los ríos San Pedro y El Chicalote.

Al realizar un segundo ACP, introduciendo como variable la campaña de monitoreo, se observó que el porcentaje de variabilidad acumulada de los dos primeros componentes fue de 52 y 54% para el río San Pedro y El Chicalote respectivamente. A pesar de que no se pudieron obtener los coeficientes de cada uno de las variables y determinar de este modo un índice de calidad del agua, este análisis mostró las tendencias de los parámetros evaluados y corroborar la variación entre las campañas de muestreo (Figuras 44 y 45). En ambos casos se observó que los indicadores de materia orgánica, nutrientes, tóxicos orgánicos y coliformes se ubicaron dentro del cuadrante positivo del primer y segundo componente, poco correlacionados con la campaña de muestreo e inversamente correlacionados con el OD y el pH. Asimismo, los metales pesados se ubicaron en el cuadrante positivo del primer componente y el cuadrante negativo del segundo componente, inversamente correlacionados con la campaña de muestreo.

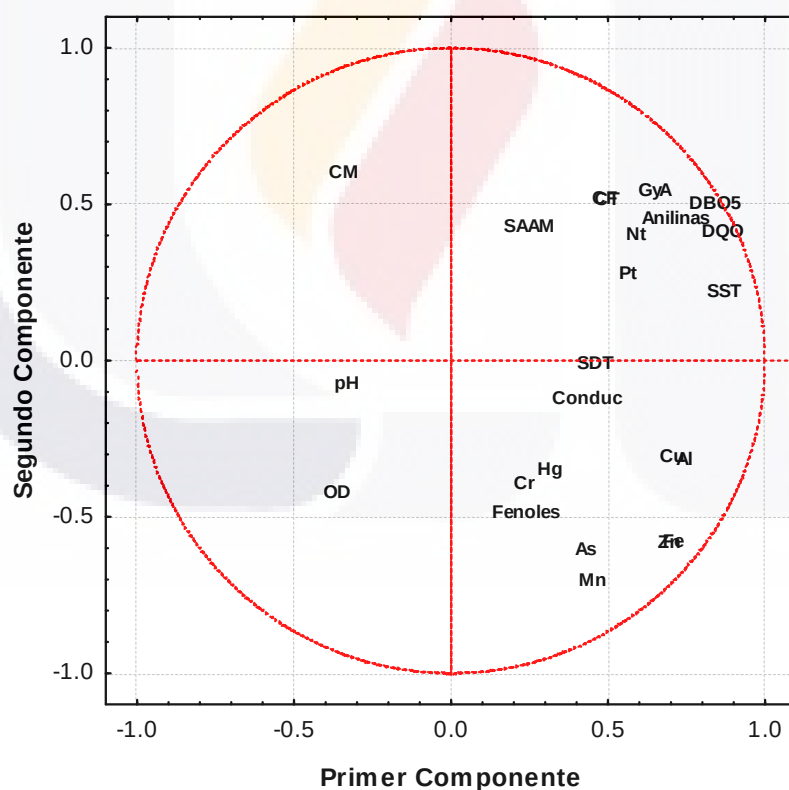


Figura 44. Análisis de componentes principales del río San Pedro.

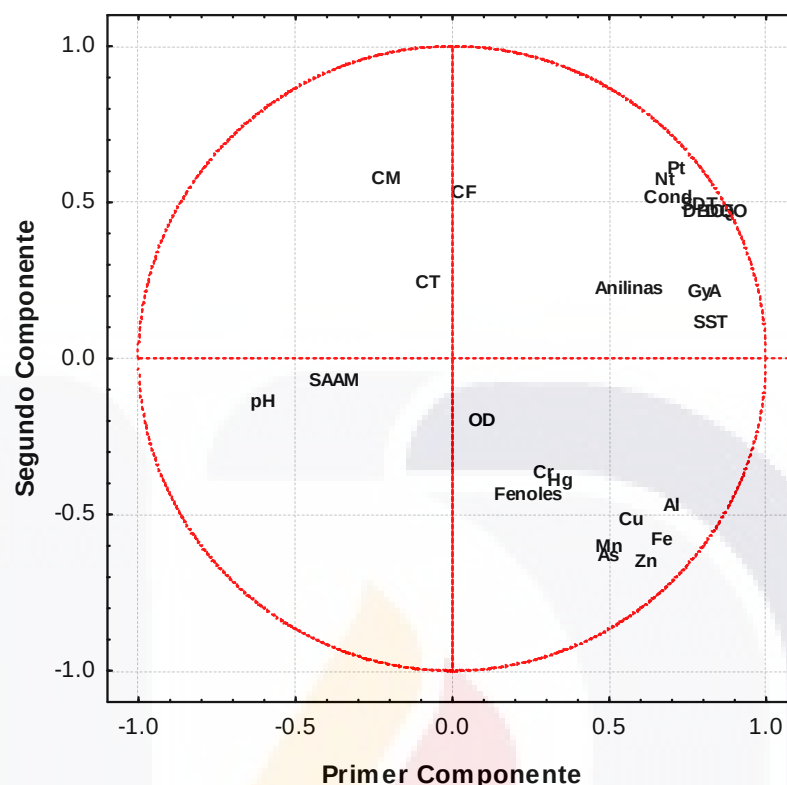


Figura 45. Análisis de componentes principales del río El Chicalote.

El comportamiento espacial de la calidad del agua del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes, evaluado a partir de los subíndices de campo (sIC), materia orgánica (sIMO), nutrientes (sIN), tóxicos orgánicos (sTO), fecal (sIF) y de metales pesados (sIMP) de cada uno de los sitios de muestreo, así como los valores del IGCA, se muestran en la Figura 46. Con excepción de los sitios de colecta próximos a las descargas de las plantas de tratamiento de aguas residuales de San Francisco de los Romo (estación 16) y la Ciudad de Aguascalientes (estación 39), los subíndices sIF, sIN y sITO mostraron valores entre cero y 10 en todos los sitios ubicados lo largo del cauce del río. El sIC se encontró entre el intervalo de valores de 25 a 35 en el 90% de los sitios ubicados en las zonas norte y centro, aumentando a 60 en los dos puntos de descarga de aguas residuales tratadas mencionadas anteriormente. Los valores de sIMO mostraron en general la misma tendencia, observándose un ligero incremento con valores por arriba de 40 en los últimos puntos de muestreo de la zona sur del Estado. A diferencia de los subíndices anteriores,

el SIMP presentó valores de 100 en el 92% y 70% de las estaciones de colecta de las zonas norte y sur de la entidad respectivamente. Por otro lado, en la zona centro se observaron altibajos, con valores máximos de 100 y mínimos de aproximadamente 45.

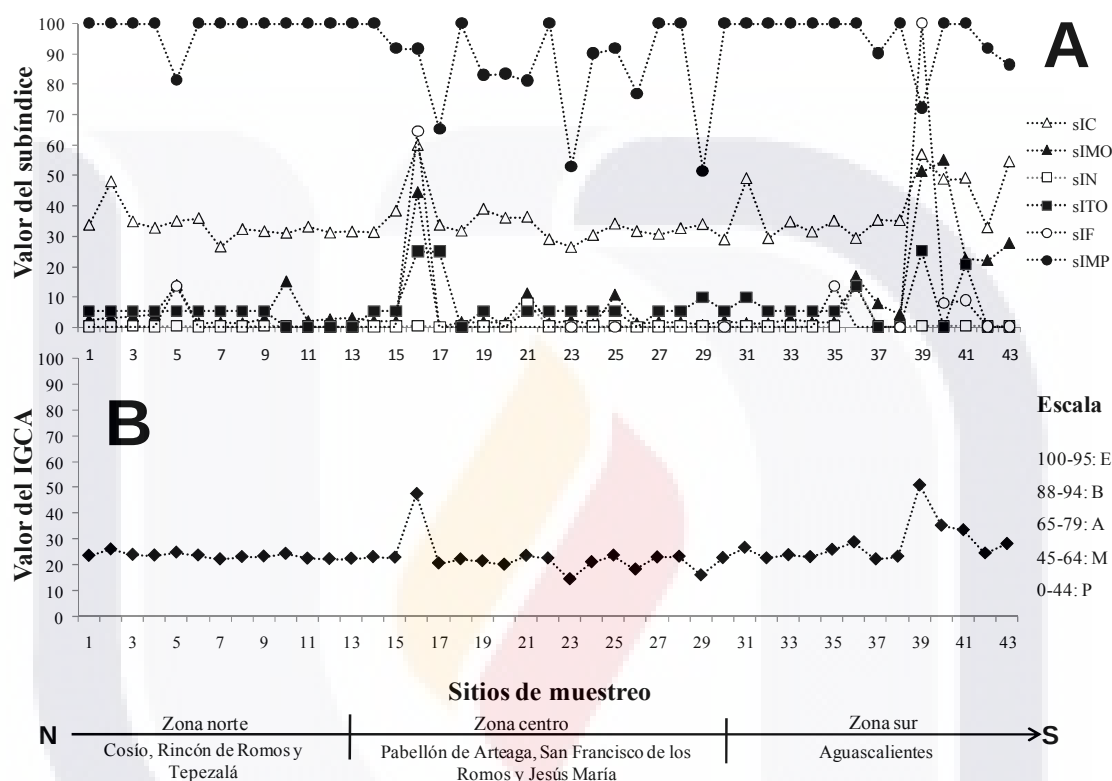


Figura 46. Comportamiento espacial de la calidad del agua del río San Pedro a lo largo del Estado de Aguascalientes. Se muestran los valores de los subíndices de campo (sIC), materia orgánica (sIMO), nutrientes (sIN), tóxicos orgánicos (sTO), microbiológico (sIM) y de metales pesados (sIMP) de cada uno de los sitios de muestreo (A); así como el Índice Global de la Calidad del Agua (IGCA) de los mismos puntos (B).

Evaluado la calidad del agua en forma global, el IGCA en la zona norte mostró una tendencia constante, con valores entre 25 y 30. En la zona centro, este indicador aumentó a 50 en el sitio 16 (planta de tratamiento de aguas residuales de San Francisco de los

Romo), permaneciendo entre 20 y 30 en el resto de los puntos ubicados en zona. Los valores del IGCA en la zona sur se ubicaron alrededor de 30, aumentado a 50 en la estación de colecta 39 (planta de tratamiento de aguas residuales de la Ciudad de Aguascalientes) para disminuir paulatinamente en los puntos posteriores, hasta llegar al valor de 30 en el último sitio de muestreo del río, antes de su salida de la entidad. De acuerdo a la escala, la calidad general del agua del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes se encontró dentro de la categoría de Pobre. La cual, indica que dicha calidad está casi siempre amenazada o dañada, su condición usualmente se aparta de los niveles naturales o convenientes para su uso, que en este caso es el agrícola.

Por su parte, el comportamiento espacial de la calidad del agua del río El Chicalote (Figura 47) mostró valores de uno en los subíndices de materia orgánica (sIMO), nutrientes (sIN), y fecal (sIF) en todos los sitios de muestreo ubicados en este río. El subíndice de tóxicos orgánicos (sITO) en general se mantuvo en 20, con valores de cero en tres puntos (7, 8 y 9) ubicados en el municipio de San Francisco de los Romo, donde se localizan importantes parques industriales y otro (sitio 12) en la comunidad de La Florida en el municipio de Jesús María. Los valores más altos (por arriba de 50) del subíndice de los parámetros de campo (sIC), se observaron en la zona norte del río El Chicalote y en Jesús María, disminuyendo alrededor de 30 en los puntos próximos a la confluencia con el río San Pedro. En cuanto a los metales pesados, únicamente los sitios 3 y 12 se encontraron contaminados por estos compuestos, mostrando valores del subíndice (sIMP) de 45 y 30 respectivamente. El primero corresponde al sitio denominado Rancho El Becerro y el segundo es la confluencia de PIVA-Chicalote-Gómez Portugal. Estos dos mismos sitios presentaron el IGCA más bajo del río El Chicalote, con valores de 15 y 10 respectivamente. No obstante que el resto de los sitios se ubicaron entre 20 y 40, la calidad del agua en todos los sitios se ubicó también dentro de la categoría de Pobre al igual que en el río San Pedro.

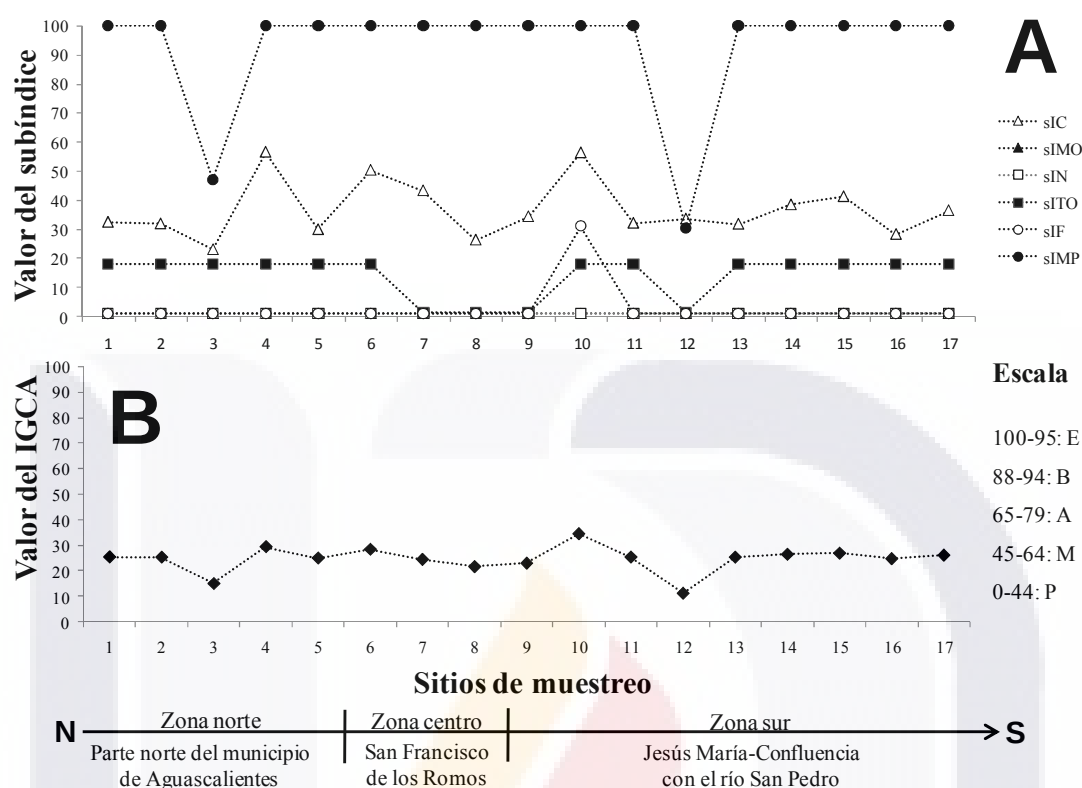


Figura 47. Comportamiento espacial de la calidad del agua del río El Chicalote. Se muestran los valores de los subíndices de campo (sIC), materia orgánica (sIMO), nutrientes (sIN), tóxicos orgánicos (sTO), microbiológico (sIM) y de metales pesados (sIMP) de cada uno de los sitios de muestreo (A); así como el Índice Global de la Calidad del Agua (IGCA) de los mismos puntos (B).

Una vez obtenidos los resultados del IGCA de ambos ríos, estos fueron empleados para realizar un mapa de contorno con los sitios de muestreo posicionados. Los mapas de contorno de los ríos San Pedro y El Chicalote permitieron observar la variación del índice a lo largo de sus cauces, con lo cual, fue posible determinar el número de puntos de muestreo y la ubicación de los mismos de manera más representativa y sin afectar significativamente el comportamiento del IGCA. En el río San Pedro (Figuras 48) se observó la mayor concentración de contornos en las zonas centro y sur del estado, lo cual indica mayor variabilidad del índice en estas zonas. De los 43 sitios de muestreo iniciales, se hizo una reducción a 14 estaciones de colecta, los cuales pueden aumentar a 17,

considerando la posibilidad de ubicar un punto de muestreo entre los puntos 14 y 15 (alrededor de la coordenada norte 2460000), otra estación de colecta aguas abajo del Sabinal y el último punto, antes de que el río abandone el Estado de Aguascalientes.

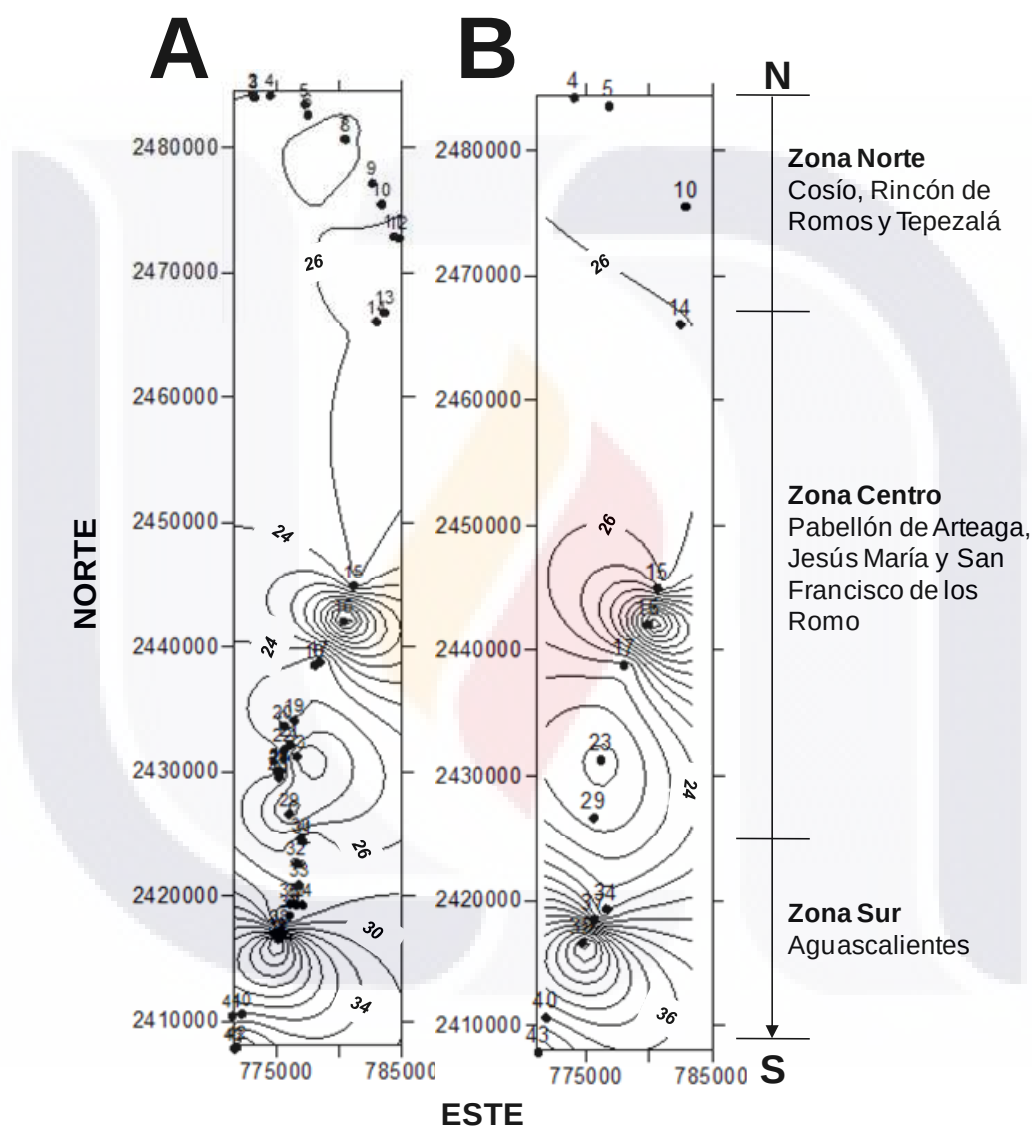


Figura 48. Mapa de contornos del IGCA con todos los sitios de muestreo del río San Pedro posicionados (A) y con los sitios seleccionados para el programa de monitoreo (B).

En el río El Chicalote (Figura 49), la mayor variabilidad del IGCA se observó alrededor del sitio 3, ubicado cerca del rancho agropecuario El Becerro (zona norte del municipio de Aguascalientes), alrededor de la estación de colecta 10 (efluente de la laguna de oxidación de Gómez Portugal) y el sitio 12 (confluencia PIVA-Chicalote-Gómez Portugal), estos dos últimos en el municipio de Jesús María. Las estaciones de colecta seleccionadas en este río para ser consideradas en el programa de monitoreo fueron nueve de los 17 sitios de muestreo evaluados.

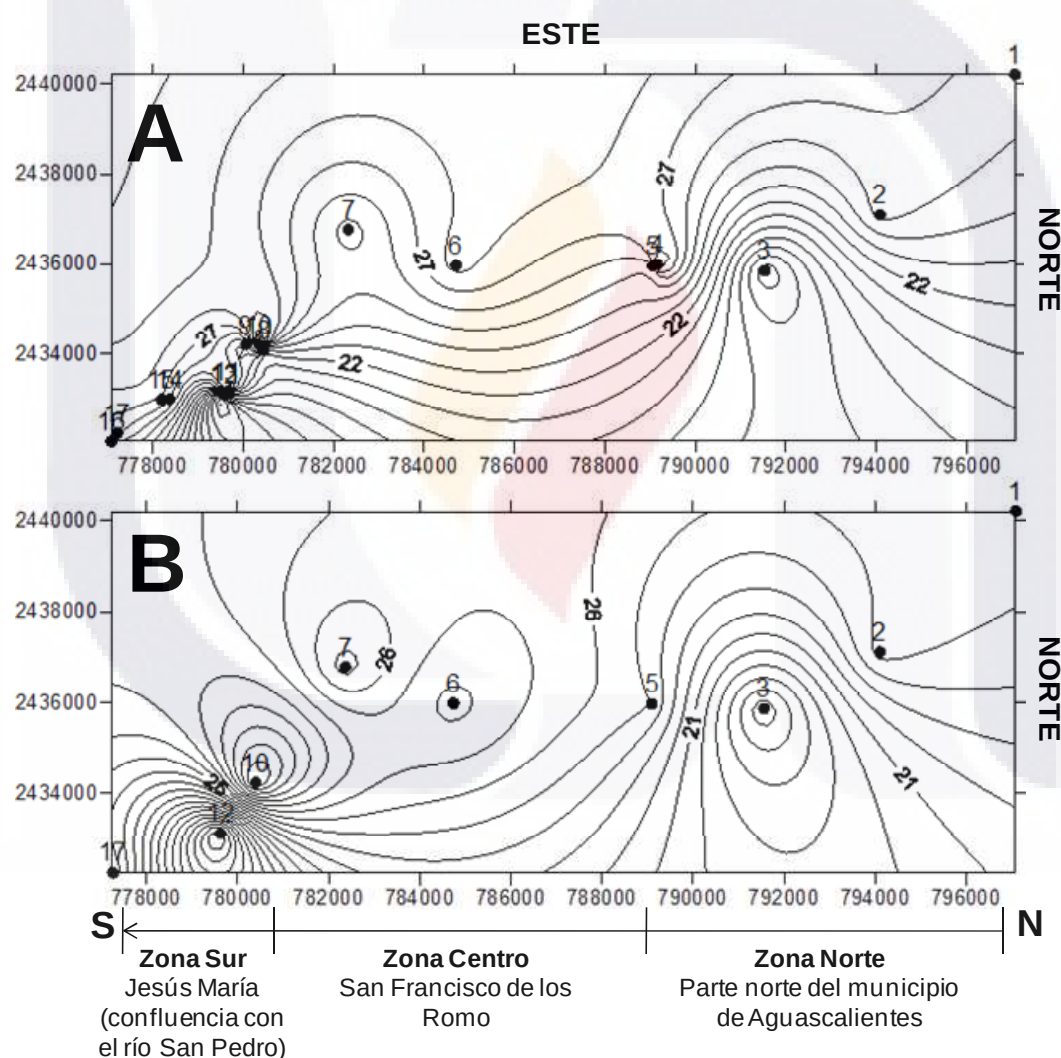


Figura 49. Mapa de contornos del IGCA con todos los sitios de muestreo del río El Chicalote posicionados (A) y con los sitios seleccionados para el programa de monitoreo (B).

De acuerdo con los resultados obtenidos de la integración y análisis de datos, se determinó el tipo de muestra, la frecuencia, los parámetros a analizar y el número de sitios de muestreo que integran la propuesta del programa de monitoreo de los principales cuerpos de agua superficial relacionada con el cauce del río San Pedro. Los pozos no fueron considerados debido a que no se encontró evidencia de contaminación debido al cauce del río San Pedro. Sin embargo, podrán incluirse como control con una frecuencia anual. El resumen de estas variables se muestra en la tabla 15. En función de que no se observó correlación entre los contaminantes encontrados en agua y sedimentos, las muestras se tomarán en ambas matrices. El monitoreo se realizará al menos dos veces por años, sin embargo, en función de los recursos disponibles se puede incrementar de 4 a 12 veces, con lo cual también se obtendrán ACP e índices estadísticamente más robustos. Los parámetros a evaluar en muestras de agua son los indicadores de materia orgánica (DBO₅, DQO, grasas y aceites), nutrientes (fósforo total y medido como fosfatos, nitrógeno total y amoniacal), detergentes, coliformes totales y fecales, sólidos (STT, SDT, SST, STV y SSV), parámetros de campo (OD, conductividad, temperatura y pH) y metales pesados como el As, Cr, Hg, Mn y Cu; ocasionalmente incluir Fe, Al y Zn para observar tendencias, así como Pb y Cd para detectar fuentes potenciales de contaminación).

Tabla 15. Resumen del programa de monitoreo.

Cuerpo de Agua	Matriz	Frecuencia	Variables	Número de sitios de muestreo
Pozos aledaños	Agua	Anual	DBO ₅ , DQO, grasas y aceites, fósforo total, fosfatos, nitrógeno total y amoniacal, STT, SDT, SST, STV y SSV detergentes, coliformes totales y fecales, OD, conductividad, temperatura, pH, As, Cr, Hg, Mn y Cu; (ocasionalmente incluir Fe, Al, Zn Pb y Cd. Pruebas de toxicidad	Pozos más cercanos al cauce y con permiso de monitorear
Río San Pedro	Agua y sedimentos	Al menos dos veces por año (recomendable de 4 a 12 en muestras de agua, dependiendo de los recursos disponibles)		14 a 18
Río El Chicalote				9
Presa El Saucillo	Columna de agua y fondos			1
Presa Presidente Calles				5
Presa Abelardo L. Rodríguez				3
Presa El Niágara				3
El Sabinal				Está considerado en el río San Pedro

En muestras de sedimentos se pueden excluir algunos tipos de sólidos, la DBO_5 , coliformes totales y fecales, e incluir el potencial Redox y el potencial de lixiviación. El número y ubicación de las estaciones de colecta se determinaron en función del tamaño, morfología y resultados de la variabilidad espacial de los índices de calidad del agua empleados (ICA e IGCA). El número de sitios de muestreo se observan en la tabla anterior, la ubicación de los mismos se muestra en la figura 50.

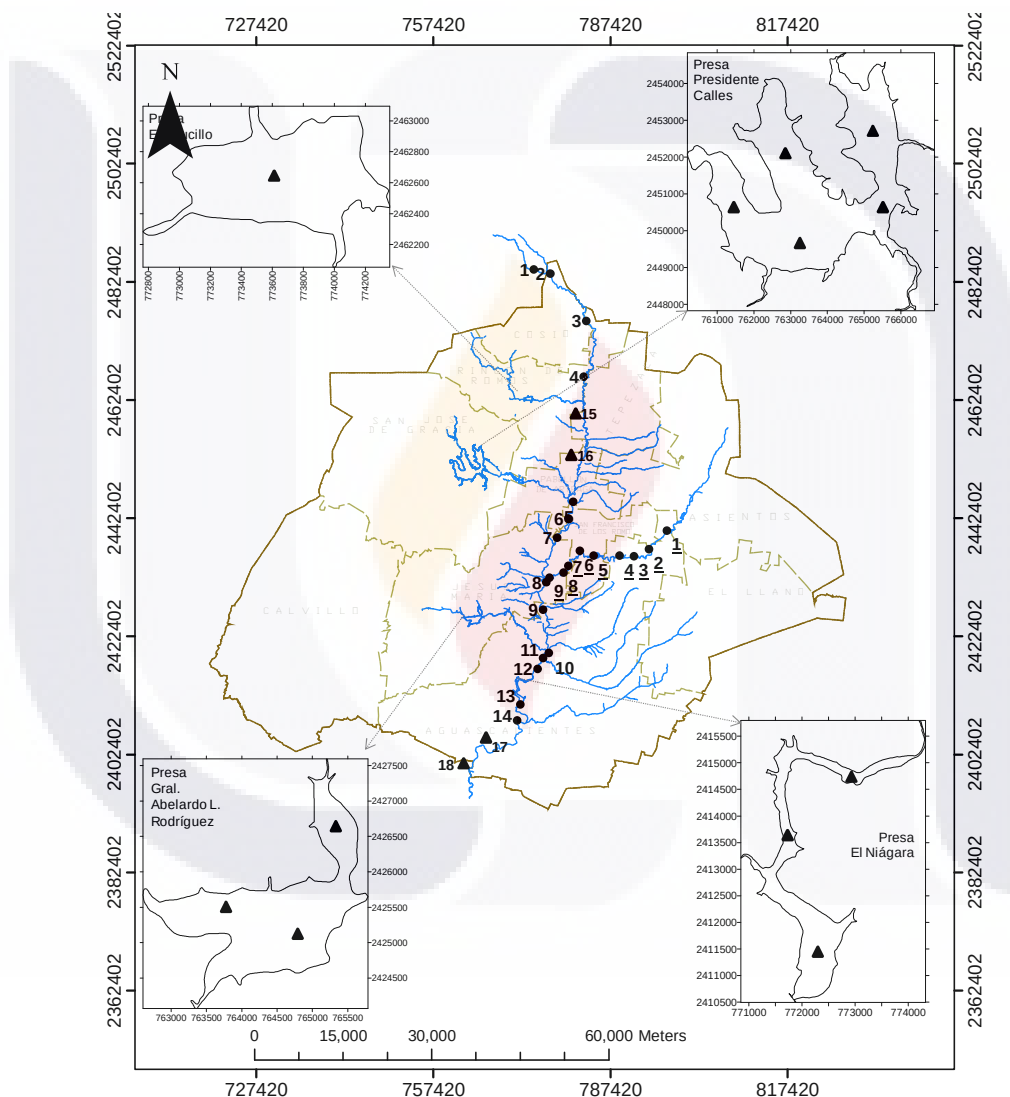


Figura 50. Ubicación de los sitios de muestreo seleccionados para integrar el programa de monitoreo del cauce del río San Pedro y principales cuerpos de agua superficial relacionados. Se muestran los puntos determinados a partir de los valores de los índices de calidad (●) y los sitios propuestos (▲). Los números subrayados corresponden a las estaciones de colecta localizadas en el cauce del río El Chicalote.

5. DISCUSIÓN

Con base en los resultados obtenidos, y considerando los valores de referencia, podemos afirmar que la presa El Niágara y El Sabinal, pese a recibir un efluente previamente tratado, son cuerpos de agua seriamente contaminados por materia orgánica, detergentes (SAAM) y coliformes fecales. Las concentraciones elevadas de nutrientes inorgánicos confirman el problema de eutroficación que también presentan. Lo anterior se corrobora con la determinación del índice de calidad (ICA), donde ambos cuerpos de agua se encontraron de manera global en la escala de contaminado. Sin embargo, en ambos se encontraron zonas con valores de ICA en el rango de fuertemente contaminados, principalmente en las zonas más próximas al cauce del río San Pedro. Resultados esperados, siendo los dos cuerpos receptores del mismo río, confirmando el serio estado de contaminación en que se encuentra este cauce reportado por López (2007) y Mora (2007). A diferencia de los cuerpos de agua antes mencionados, las presas que aporta agua a los diferentes efluentes del cauce del río San Pedro (El Saucillo, Presidente Calles Gral. Abelardo L. Rodríguez), se encuentran en el rango de calidad aceptable tanto para ICA como para el indicador de DBO₅ según el criterio de la CONAGUA (2005).

Es importante señalar que los indicadores de contaminación empleados actualmente por la CONAGUA (concentración de DBO₅ y DQO) no son suficientemente representativos del nivel de contaminación de los cuerpos de agua, ya que sólo contemplan la contaminación desde el punto de vista de materia orgánica. La determinación del ICA permitió involucrar un mayor número de parámetros y realizar comparaciones entre varios cuerpos de agua bajo un criterio unificado y sencillo, las variables incluidas únicamente representan contaminación de tipo doméstico. Aunque existen otros indicadores, en la mayoría de los casos las variables más empleadas para la valoración fisicoquímica del agua se sigue refiriendo a este tipo de contaminación (pH, OD, DBO₅, nitratos o amonio, fósforo total y sólidos suspendidos totales). Por lo cual, la estimación individual por variable sigue siendo necesaria para la valoración de la calidad o contaminación del agua (Samboni *et al.*, 2007). Por otro lado, es importante mencionar que tampoco se cuenta con criterios de referencia para todos los parámetros evaluados,

además de que se encuentran en diferentes fuentes, los LMP son referidos principalmente al uso que se le da al recurso, lo cual dificulta la evaluación total del cuerpo de agua.

Si bien las presas o reservorios son construidas por el hombre para satisfacer varias necesidades, primordialmente las relacionadas con la producción de alimentos, también tienen relevancia ecológica. Por lo cual, el deterioro de la calidad del agua no sólo afecta la disponibilidad de sus uso, también modifica el funcionamiento y la dinámica natural del cuerpo superficial, trayendo consigo las respectivas consecuencias al ambiente en general (Flores-Tena, 1992). En este contexto y de acuerdo a valores típico o normales de de cuerpos de agua superficial sanos, señalados por WHO/UNESCO/UNEP (Chapman, 1996), la presa Presidente Calles fue el único cuerpo de agua que mostró todos valores de parámetros de campo dentro los intervalos típicos (6.0 a 8.0 unidades de pH, 5.0 a 8.0 mg/L de OD, menos de 1000 μ S/cm de conductividad y <1000 NTU de turbiedad). No obstante, que también presentó las concentraciones de DQO y DBO₅ más bajas en relación al resto de los cuerpos de agua evaluados (Figura 34), el promedio de estos indicadores de materia orgánica en la presa completa se encontró por arriba de los valores típicos (20 y 2.0 mg/L respectivamente). Sin embargo, Martínez y Valdivia (2007) reportan valores de alrededor de 6.0 mg/L de DBO₅ y de 13 a 16 mg/L de DQO en la zona entre las estaciones de colecta 1 y 4 (Figura 14), concluyendo que bajo las condiciones de estudio no se encontró impedimento ecológico para la práctica de piscicultura intensiva. Estas concentraciones fueron al menos 30% más bajas que los valores observados de DBO₅ y DQO en este estudio. Valores altos de materia orgánica conllevan a la reducción significativa de la concentración de OD, afectando el funcionamiento y sobrevivencia de las comunidades biológicas (Bartram y Ballance, 1996).

En cuanto a las concentraciones de nutrientes, no se tienen valores típicos de nitrógeno total como tal, sino de sus especies iónicas más comunes en ecosistemas acuáticos: amonio, nitrito y nitrato. Las concentraciones de este contaminante en los cuerpos que aportan agua a los afluentes del río San Pedro fueron menores a 10 mg/L en la época de sequía y 30 mg/L en la temporada posterior a las lluvias, mientras que los cuerpos receptores mostraron concentraciones entre 50 y 150 mg/L, valores por arriba del LMP de la NOM-001-ECOL.1996 (40 mg/L). Las elevadas concentraciones de este nutriente promueven el desarrollo, mantenimiento y proliferación de los productores primario como el fitoplancton, las algas bentónicas y las macrófitas, contribuyendo a la eutroficación. Este fenómeno produce diversos efectos ecológicos y toxicológicos; la

proliferación, muerte y descomposición de los productores primarios conduce a una marcada disminución de la concentración de oxígeno disuelto en los ecosistemas con baja renovación de agua. La muerte masiva de peces y otros animales son probablemente la manifestación más dramática de hipoxia o anoxia en cuerpos eutróficos (Camargo y Alonso, 2007). Lo anterior, es una posible explicación de la inexistencia de especies piscícolas en la presa El Niágara y de la muerte masiva de peces en El Sabinal, observada en el mes de enero del 2004. Por lo anterior, Camargo y Alonso (2007), consideran como nivel seguro para prevenir la eutroficación las concentraciones de 0.5-1.0 mg/L de nitrógeno total. De acuerdo a esto, las presas Presidente Calles, El Saucillo y Gral. Abelardo L. Rodríguez son cuerpos de agua susceptibles a este fenómeno (figuras 16, 11 y 26).

Aunado a las altas concentraciones de Nt, las elevadas concentraciones de fósforo también favorecen la eutroficación. Este nutriente en la mayoría de los casos es el factor limitante del crecimiento de algas, por lo que controla la productividad primaria del cuerpo de agua, las concentraciones típicas de fósforo se encuentran entre 0.005-0.020 mg PO₄/L (Chapman, 1996). Dodds *et al.* (1998) sugiere como límite para prevenir el desarrollo de algas en lagos y ríos las concentraciones de 71-75 µg/L de fósforo total. No obstante que las tres presas portadoras de agua al río San Pedro mostraron en la columna de agua concentraciones menores de 0.6 mg/L de este nutriente, presentaron niveles muy superiores a los valores típicos y al límite para prevenir la eutroficación. Sin embargo, fueron al menos 20 veces menores al LMP de la NOM-001-ECOL-1996 (20 mg/L). Mientras que en los cuerpos receptores se duplicó este valor, lo cual contribuyó a su proceso de eutroficación. Es importante señalar, que el enriquecimiento en nutrientes de ecosistemas acuícolas y la proliferación de algas tóxicas no sólo causa daños a la vida acuática, sino también pueden causar indirectamente efectos adversos sobre la salud humana (Camargo y Alonso, 2007).

Aunque los detergentes (SAAM) no son altamente tóxicos, son los responsables de la formación de espuma; la cual dificulta la aireación, disminuyendo los niveles de OD, afectando los procesos de autpurificación y la biota acuática, además de concentrar otro tipo de contaminantes incluyendo patógenos. La concentración para evitar la formación de espuma es de 0.1 a 0.5 mg/L dependiendo del surfactante (Chapman, 1996; Bartram y Ballance, 1996). Únicamente en la presa El Niágara se observaron contenidos por arriba de estos valores, con concentraciones promedio hasta 14 veces por arriba del valor

superior, con un máximo de 18 mg/L en el punto más próximo al cauce del río San Pedro (Anexo 3). No obstante, se observó una disminución significativa de este contaminante con respecto a los valores reportados por Flores-Tena y Silva-Briano (1995), donde obtuvieron valores en esa misma zona de 362 mg/L. Estos autores también reportaron altas concentraciones de coliformes fecales (8.1×10^8 NMP/100 mL) principalmente en la zona antes mencionada, comparando con nuestros resultado, se observó una disminución de cuatro órdenes de magnitud (2.4×10^4 NMP/100 mL). Sin embargo, los valores continúan por arriba del LMP señalados en la NOM-003-ECOL-1997 (240 NMP/100 mL) y en los CE-CCA-001-89 (1000 NMP/100 mL) para uso agrícola, principal uso que se le da al recurso almacenado en la presa El Niágara. La cual constituye una fuente de exposición para los cultivos forrajeros y agua de consumo del ganado vacuno principalmente. La dispersión del polvo de los sedimentos de las aguas usadas para riego podría constituir un riesgo epidemiológico (Rivera-Vázquez *et al.*, 2007).

En relación a la contaminación por metales pesados, la presa Presidente Calles presentó la concentración más alta de As en relación con los otros cuerpos de agua. Sin embargo, los 37 µg/L observados en la columna de agua de la estación de colecta 5 durante la época de sequía, no sobrepasaron el LMP de 100 µg/L marcado en los CE-CCA-001-89. Así mismo, también en esta presa fueron observadas las concentraciones más elevadas de los metales Mn, Fe y Al (0.86, 19.4 y 8.59 mg/L, respectivamente). La concentración de Al superó 72% el LMP de los criterios ecológicos. No obstante que no se tienen referencias de las concentraciones tóxicas de este metal y no es bioacumulable en planta o animales, exposiciones a niveles altos pueden causar problemas respiratorios y neurológicos (ATSDR, 2006).

Las concentraciones de los contaminantes en los fondos de las presas mostraron las mismas tendencias que las observadas en la columna de agua, siendo la Presa El Niágara y El Sabinal los cuerpos de agua con las concentraciones más altas de materia orgánica, nutrientes, detergentes y organismos coliformes. Con respecto a los metales pesados, en la presa El Niágara se observaron los niveles más altos de As, Hg, Fe, Zn y Al (0.398, 0.005, 300, 2.37 y 431, mg/L respectivamente). Además fue el único cuerpo de agua donde se detectaron concentraciones de Pb en cuatro de las siete estaciones de colecta (Anexo 3) durante la época de sequía. Las fluctuaciones en el contenido de metales a través de los embalses, lo cual se reflejó en los valores del intervalo de concentraciones detectadas, pueden indicar una variabilidad natural y/o una contribución

antropogénica (García *et al.*, 2007). Si bien, el alto contenido de materia orgánica y los valores de pH (por arriba de 7.0 unidades) observados en la presas, contribuyen a la estabilización de los metales en el fondo (Mora, 2007); probablemente están afectando directa o indirectamente a los organismos bentónicos, reduciendo su diversidad y abundancia, alterando la red trófica y el ciclo de nutrientes e incluso alterando las condiciones físicas del hábitat (Morales-Hernández *et al.*, 2003; Oller y Goitia, 2005).

La calidad del agua tanto de la presa el Niágara como de El Sabinal, es un reflejo del estado en el que se encuentra el río San Pedro. Pese al notable incremento de la infraestructura de saneamiento de aguas residuales en los últimos años en el Estado, la calidad del agua de este río y de su principal afluente, el río El Chicalote, sobrepasó el LMP de referencia en dos o más de los parámetros evaluados en al menos el 50% de las muestras de agua (Anexo 3). Las concentraciones máximas de DBO₅, Pt y Nt fueron hasta 7.5 veces superiores a los LMP establecidos para uso público urbano (NOM-001-ECOL-1996), mientras que el contenido de coliformes fecales sobrepasó hasta 40 veces el LMP para uso público con contacto directo (NOM-003-ECOL-1997). No obstante la ausencia de valores de referencia para DQO, anilinas y SAAM, las elevadas concentraciones observadas de estos parámetros en las muestras de agua reflejan el impacto provocado por descargas de aguas residuales domésticas y efluentes provenientes de industrias alimenticias y de ranchos o granjas localizados en su mayoría en la zona centro del Estado. Estudios recientes realizados en otras corrientes del país muestran impactos similares en la calidad de sus aguas, los ríos Mololoa (Nayarit), Zanatenco (Chiapas) y Conchos (Chihuahua) concuerdan con la presencia de coliformes fecales, nitrógeno total, fósforo total y materia orgánica (Graniel y Carrillo 2006.; Holguín *et al.*, 2006; Jáuregui *et al.*, 2007), derivada de las descargas de aguas residuales sin tratamiento previo. Con respecto a la contaminación por metales en las muestras de agua, las concentraciones observadas de As, Cr, Cu, Hg y Zn se encontraron entre 0.5 y 40 veces por debajo de los LMP señalados para agua de uso agrícola (NOM-001-ECOL-1996). Al igual que en las presas, las concentraciones más elevadas de metales correspondieron a Al y Fe, con valores 50% superiores a los LMP señalados en los criterios ecológicos de la calidad del agua (CE-CCA-001-1989), en dos y cuatro sitios del río San Pedro respectivamente, y en un estación de colecta del río El Chicalote.

Los sedimentos también mostraron altos niveles de materia orgánica, fósforo total, nitrógeno total y tóxicos orgánicos. En condiciones naturales, los sedimentos de ríos o

lagos contienen grandes cantidades de materia orgánica, compuesta principalmente por sustancias húmicas y fulvicas (Jian-feng *et al.*, 2009). Por lo cual, las altas concentraciones observadas de materia orgánica en esta matriz no son un indicativo claro de su nivel de contaminación. No obstante la ausencia de valores de referencia del contenido de Pt en sedimentos, su presencia en ellos es importante debido a que ejerce una influencia significativa sobre la geoquímica del As. El fósforo (P) compite con el As por sitios de adsorción en los sedimentos, favoreciendo la liberación de As a la columna de agua, el cual puede causar problemas de toxicidad (Devesa-Rey *et al.*, 2008). Lo anterior, es relevante considerando los niveles significativos de As observados en los sedimentos. Pese a no existir criterios de referencia, las significativas concentraciones de SAAM y anilinas en suelo y sedimentos demuestran el impacto antropogénico en el cauce. Los detergentes pueden estabilizarse en los sedimentos por periodos de hasta tres ó cuatro años sin descomponerse, y su presencia contribuye a la retención de otro tipo de contaminantes, como metales pesados (Seoanez, 1999). Las concentraciones de metales pesados en los sedimentos fueron superiores a los valores observados en las muestras de agua. La principal problemática se presentó por As, Cu y Zn; seguido de Pb y Cr, y por último Fe y Hg

Las diferencias significativas entre las dos campañas de muestreo, observadas únicamente en las concentraciones de metales pesados en las muestras de agua, se debió a un efecto de dilución provocado por las lluvias, aunado al bajo contenido de metales presentes en el agua. Dicho efecto de dilución no fue consistente en el resto de los parámetros debido a que la precipitación pluvial no fue suficiente para diluir las altas cargas de materia orgánica, nutrientes, organismos coliformes y tóxicos orgánicos descargadas a los cauces de los ríos, ya que la precipitación acumulada en el año 2005 fue de 397 mm, 13% por debajo de la media anual estatal (CONAGUA, 2007). Adicionalmente, los escurrimientos provocados por las precipitaciones, arrastran una serie de compuestos presentes en los suelos. Los cuales son conducidos hasta los cauces de los ríos, incrementando las concentraciones de los contaminantes presentes en su agua (Holguín *et al.*, 2006). De acuerdo con la CONAGUA (2007), menos del 30% de los cuerpos de agua superficial del país tienen excelente calidad, el resto presenta algún nivel de contaminación. El común denominador de los diferentes grados de contaminación que presentan la mayoría de las aguas superficiales es el desarrollo urbano, aunado al insuficiente e inadecuado tratamiento de las aguas residuales; las cuales son vertidas a

los cuerpos de agua superficial, con poco o nulo respeto por las capacidades de asimilación del mismo. La purificación natural de estos cuerpos de agua nunca es rápida; aguas altamente contaminadas pueden atravesar grandes distancias, durante días antes de observar un grado significativo de purificación, el cual se ve aminorado por la continua descarga de residuos, disminuyendo paulatinamente la capacidad de autodepuración (Longe y Omole, 2008). La inexistencia de flujo base que presenta los ríos San Pedro y El Chicalote implica un mayor impacto de las descargas contaminantes; sobre todo de los vertidos provenientes de cabeceras municipales, ranchos y granjas e importantes parques industriales ubicados en la zona centro del Estado, debido a su considerable volumen y carga contaminante.

Si bien no se observaron correlaciones significativas entre las concentraciones de los contaminantes evaluados en muestras de agua y sedimentos del cauce del río San Pedro; los niveles de materia orgánica, Nt, Pt y tóxicos orgánicos fueron elevados en ambas matrices. Es probable que los altos contenidos de materia orgánica y detergentes observados en los sedimentos contribuyan a la adsorción de los metales pesados, incrementando la concentración de estos xenobióticos en los sedimentos (Seoanez 1999), y disminuyendo en consecuencia su contenido en las muestras de agua. Por otro lado, el pH es un factor que controla en gran medida la movilidad de los metales pesados; de acuerdo con Petrovich *et al.* (1999) y Jian-feng *et al.* (2009), valores de pH superiores a 6.0 y altos niveles de materia orgánica y detergentes en los sedimentos, como los obtenidos en nuestro estudio; aunados a la textura arcillosa del suelo, permiten conservar una baja actividad o movilidad de los iones metálicos, contribuyendo a su permanencia casi total en los sedimentos. Usualmente, los procesos de adsorción, precipitación, coprecipitación o floculación juegan el papel más importante en la fijación de los metales pesados en sedimentos (Jian-feng *et al.* 2009).

En cuanto a la contaminación del acuífero del Valle de Aguascalientes, el IMTA (1997) y González (2002) señalan que en las proximidades del río San Pedro y la presa el Niágara existe infiltración de agua superficial hacia el acuífero. A pesar de que en el presente trabajo no se observaron pruebas concluyentes de la probable contaminación de este acuífero por dicha infiltración, los resultados observados en dos de los pozos agrícolas evaluados (comunidad de La Concepción, en el municipio de San Francisco de los Romo y Rancho "Hijos de María Morales" en la comunidad del Salto de lo Salado en el municipio de Aguascalientes) mostraron evidencias de contaminación. Las

concentraciones observadas de DQO, N_t , P_t y coliformes fecales puede deberse en primera instancia al mal funcionamiento del sello sanitario, problema muy frecuente en pozos agrícolas ya que este tipo de aprovechamientos no son regulados apropiadamente, a diferencia de los pozos de agua potable. Por otro lado, ambos aprovechamientos agrícolas se encuentran en áreas con manejo de animales (gallinas, pollos, vacas, etc.) y áreas de actividad agrícola, principalmente el pozo del Rancho “Hijos de María Morales” próximo a la presa El Niágara, donde las áreas de cultivo son regadas con agua proveniente de dicha presa. En esta zona el acuífero es de tipo no confinado o libre, el agua se extrae del medio fracturado (González, 2002). De acuerdo con Ortiz (2009), este medio tiene una alta conductividad hidráulica, lo cual favorece el movimiento del agua a través del acuífero. Lo anterior, concuerda con el hecho de que aguas abajo de la presa El Niágara se haya detectado una zona óptima de recarga artificial al cuerpo de agua subterránea (IMTA, 1997). Aunado a la alta conductividad hidráulica, los niveles estáticos en el área oscilan entre 45 y 55 m aproximadamente (Ortiz, 2009), lo cual incrementa la vulnerabilidad del acuífero debido al uso de aguas tratadas para riego agrícola.

Si bien, la reutilización agrícola de este tipo de agua favorece a los cultivos por el contenido de nutrientes y además permite la disminución de los organismos patógenos en las aguas excedentes de riego por el proceso de retención que se produce en el suelo (Esteller, 2002), con frecuencia estas prácticas no son controladas y su uso indiscriminado aparte de generar riegos muy serios para la salud pública con peligros a largo plazo que afectan el suelo, aumentan las tasas de infiltración a los acuíferos subyacentes. Investigaciones realizadas por diversas partes proveen evidencia de que esta recarga ocurre a tasas mayores de 1.000 mm/a (Foster *et al.*, 2006). No obstante, la susceptibilidad del acuífero a ser contaminado está en función de la velocidad del flujo subterráneo y de la dispersión hidrodinámica, gracias a la cual se diluyen los contaminantes (Baptista, 2002). Motivo por el cual, es probable que no se hayan observado concentraciones de contaminantes en otros pozos aledaños al río San Pedro. Esto concuerda con los resultados obtenidos por el IMTA (1996), donde se observó una atenuación considerable de contaminantes al infiltrarse el agua residual en el subsuelo al determinar parámetros físicos, químicos y microbiológicos en pozos cercanos al río San Pedro. Otro factor que puede contribuir a la atenuación de contaminantes es la presencia de paquetes arcillosos (Ortiz, 2009), en la cuales diversas partículas quedan absorbidas. Sin embargo, la capacidad de retención por este concepto tiene un límite, de modo que si

la sustancia no se descompone, el área agotará su capacidad de retención (Ongley, 1997). Por lo tanto, el deterioro que actualmente presenta el río San Pedro ocasiona que este cauce siga representando sin duda un riesgo permanente de contaminación del acuífero. Más aún, considerando que una de las zonas de mayor impacto por el fenómeno de fallamiento en los últimos cinco años se presenta entre el río San Pedro y la falla mayor ubicada al poniente del graben de Aguascalientes. Este fenómeno, provocado en gran parte por el efecto de extracción al medio granular, altera las condiciones naturales del movimiento y velocidad de flujo del agua subterránea y favorece la permeabilidad (Ortiz, 2009), lo cual incrementa la vulnerabilidad del acuífero por infiltración de contaminantes.

Por otro lado, la evaluación de los pozos realizada en el presente estudio permitió observar que la calidad del agua de las fuentes subterráneas se está deteriorando por efectos de la sobreexplotación. Uno de los indicadores de este efecto es el incremento de la temperatura, según González (2002) a medida que pasa el tiempo se ha observado un incremento de la temperatura de 1.5 °C/año, el cual está relacionado de cierta forma con la profundidad del pozo. Esto se reflejó en el pozo de agua potable localizado en el fraccionamiento Villas de la Cantera, el cual presentó la temperatura más alta (36.1 °C) y la mayor profundidad (429 m). Las elevadas temperaturas del agua favorecen la disolución de elementos traza del medio geológico, aunado a que en pozos más profundos, el agua del acuífero tiene mayor tiempo de residencia y por consiguiente más tiempo de contacto con las formaciones rocosa, esto fomenta la mineralización del agua e incrementa el contenido de metales como el As y Hg (Ortiz, 2009). En México la presencia de As se debe a que está dentro del cinturón volcánico, la abundancia de este metal en el subsuelo de nuestro país, lo ha convertido en uno de sus principales productores a nivel mundial (Armienta y Segovia, 2008). Esto concuerda con las elevadas concentraciones de este metal observadas en los sedimentos del cauce del río San Pedro y en otros pozos ubicados principalmente en la zona norte del Estado (Martínez, 2006). Sin embargo, otra posible fuente de contaminación es el uso de plaguicidas órgano arsenicales empleados desde antes de 1945 (Castro, 2006). El bajo contenido de Hg presente en las muestras de agua del cauce del río San Pedro y Las altas concentraciones de este metal, observadas por Avelar y Llamas (2000) en agua de pozos profundos de la entidad, sugiere que el probable origen del Hg observado en tres pozos aledaños al cauce del río San Pedro es geogénico. El Hg se encuentra presente en la pizarra, el granito, la caliza, la arenisca y

otras rocas de origen volcánico. No obstante, el incremento del Hg en el entorno también se debe a su gran número de aplicaciones agrícolas e industriales (Cabrera-Vique *et al.*, 2007).

La calidad del agua tanto de fuentes superficiales como subterráneas relacionadas al cauce del río San Pedro está sujeta a variaciones temporales y espaciales de factores internos o externos (Chapman, 1996). Por su naturaleza multidimensional, la evaluación de calidad del agua de los cuerpos de agua es un tanto complicada. El análisis y la interpretación de un gran número de datos dificulta frecuentemente la valoración global de la calidad del agua, particularmente cuando son aplicados diferentes criterios o cuando no existen criterios de comparación (Sedeño-Díaz y López-López, 2007). A fin de contrarrestar estas dificultades, se han desarrollado numerosas metodologías para evaluar los datos de la calidad del agua, una de estas metodologías es la implementación de un índice, la cual empezó a desarrollarse a partir de 1970 con la finalidad de obtener un panorama global y facilitar la integración e interpretación de los datos de calidad (Kim y Cardone, 2005; Samboni *et al.*, 2007). A partir de entonces diferentes países alrededor del mundo han desarrollado numerosas variaciones de índices, de acuerdo a sus necesidades de aplicación y facilidad de manejo (Shiow-Mey *et al.*, 2004; Bordalo *et al.*, 2006; Samboni *et al.*, 2007; Rickwood y Carr, 2008).

La mayoría de estos índice se basa en un número limitado de datos (Bordalo *et al.*, 2006), como en el caso del ICA empleado para evaluar la calidad del agua de las presas. El cual además de esto, tiene la limitante de no incluir a los metales pesados dentro de las variables empleadas para su determinación. Por tal motivo, a fin de integrar el mayor número de parámetros de la evaluación de los ríos San Pedro y El Chicalote, se propuso el empleo del IGCA (índice global de la calidad del agua), basado en el índice de calidad del agua del río Alberta. El IGCA no tiene la limitante del número de parámetros a incluir para su determinación, además los subíndices que lo conforman permite identificar la influencia de las variables físicas, microbiológicas, de materia orgánica, tóxicos orgánicos, nutrientes y metales pesados en la determinación de la calidad del agua, proporcionando un amplio punto de vista sobre dicha calidad que puede ser transmitido a todo el público en un formato fácil de entender (Lumb *et al.*, 2006). El índice requiere que cada parámetro sea comparado con un valor objetivo, el cual está en función del uso que se le va a dar al agua en cuestión. La falta de criterios para diferentes usos del agua de la mayoría de los parámetros evaluados en las aguas superficiales en nuestro país,

ocasionó que se buscaran valores guía de otros países, a fin de determinar el IGCA. Si bien, este hecho puede considerarse como una limitante del empleo del índice, debido a que los criterios de calidad de otros países son establecidos en parte a las características de sus aguas (Rosemond y Duro, 2007). El amplio intervalo de valores entre las categorías de evaluación de la calidad del agua, amortigua la sobrestimación o subestimación del IGCA determinado a partir de los valores objetivo seleccionados. No obstante, estos valores objetivos pueden cambiarse por criterios establecidos específicamente para el cuerpo de agua a evaluar, en función de su uso, de sus características típicas y normas aplicables. Cabe mencionar que valores del IGCA determinados para un cuerpo de agua no puede ser comparado con los de otro cuerpo de agua a menos que se empleen los mismos valores objetivos (Lumb *et al.*, 2006).

La determinación de este índice en cada una de las estaciones de colecta de los ríos San Pedro y El Chicalote permitió realizar una evaluación espacial de la calidad del agua. La falta de patrones espaciales definidos, así como los altibajos observados en los subíndices se debe probablemente a la variabilidad de las concentraciones de los parámetros evaluados por la forma intermitente en que son vertidas las descargas al cauce (Castañé *et al.* 1998). No obstante que no se encontraron tendencias espaciales definidas, se observó una evidente mejoría en la calidad del agua en los sitios de colecta ubicados en la zona de descarga de aguas residuales tratadas. Sin embargo, no se aprecia de forma evidente el incremento en la infraestructura y capacidad de saneamiento de las aguas residuales, realizado en los últimos años por el Gobierno del Estado, con la construcción y puesta en marcha de nuevas plantas de tratamiento (López, 2007). Por otro lado, de manera indirecta la evaluación espacial de la calidad del agua del río San Pedro reflejó la calidad del agua de tres de sus principales afluentes, la cual se encontró en el mismo estado global del cauce principal, debido a que no se apreciaron cambios significativos en el valor del IGCA en los sitios ubicados aguas abajo de las zonas de confluencia (sitio 27, Río Chicalote; sitio 37, Río Morcinique; sitio 41, Río San Francisco). En general, la calidad del agua del río San Pedro a lo largo del Estado de Aguascalientes se encuentra dañada, usualmente alejada de los niveles adecuados o naturales para uso agrícola. De igual forma, los valores del IGCA del río El Chicalote se encontraron dentro de esta misma categoría. La inexistencia de flujo base que presentan ambos ríos implica un mayor impacto de las descargas contaminantes, principalmente en las zona centro y

sur del Estado. Lo cual es razonable, considerando que en estas zonas se ubica la mayor parte de la población y actividad industrial (Ramírez *et al.*, 2007).

Considerando la importancia que tienen actualmente las pruebas de toxicidad en la evaluación de la calidad del agua, en el presente trabajo se propone integrar un subíndice de toxicidad (sITox) al IGCA planteado anteriormente (Anexo 2). Dicho subíndice estaría formado en primera instancia por la prueba de toxicidad aguda con *Daphnia magna* Stratus (NMX-AA-087-1995-SCFI), y una segunda propuesta sería que este subíndice se conformará por la prueba de toxicidad aguda reportada en unidades de toxicidad (UTa) y la prueba de toxicidad crónica de siete días de *Ceriodaphnia dubia*. La ecuación para determinar el IGCA queda como sigue:

$$\text{IGCA} = (\text{sIC} + \text{sIMO} + \text{sIN} + \text{sITO} + \text{sIF} + \text{sMP} + \text{sITox})/7$$

Donde:

$$\text{sITox} = \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1,732}$$

F_1 , y F_2 se determinan como se muestra en el Anexo 2. F_3 representa las cantidades por las cuales los valores de las pruebas no cumplieron los valores objetivos:

$$F_3 = \left(\frac{cfc}{0.01 \text{ cfc} + 0.01} \right) * 100$$

La variable *cfc* representa la magnitud con la cual la calidad del agua se desvía de los criterios de conformidad. Se calcula dividiendo la sumatoria de la magnitud de cada una de las desviaciones observadas en las pruebas que estuvieron fuera de conformidad (*Nfc*), entre el número total de pruebas:

$$cfc = \frac{\sum_{i=1}^n Nfc_i}{\text{Número total de pruebas}}$$

Para los casos en que los valores de las pruebas no deben exceder el nivel deseable:

$$Nfc_i = \left(\frac{\text{Valor de la prueba fuera de conformidad}_i}{\text{Nivel deseable}_j} \right) - 1$$

Por lo cual, en la segunda propuesta planteada donde se incluyen variables con resultados numéricos, F_3 se determinará como se acaba de indicar. Mientras que en la propuesta de incluir únicamente la prueba de toxicidad, donde el resultado de la misma es una variable categórica (positivo/negativo); se plantea dar un valor numérico de 100 al resultado positivo de la prueba y un valor de 10 cuando la prueba de toxicidad aguda sea negativa. Posteriormente se aplicarán las formulas mencionadas.

Como valores objetivos de las variables incluidas en el sITox se proponen los siguientes:

Tabla 16. Propuestas para el sITox.

Primera Propuesta sITox		Segunda Propuesta sITox	
Variable	Valor objetivo	Variable	Valor objetivo
Prueba de toxicidad aguda con <i>D. magna</i>	Negativo (10)	Prueba de toxicidad aguda con <i>D. magna</i>	$\leq 0.3 \text{ UTa}$
		Prueba de toxicidad sub-aguda por inhibición de esterasas	$\leq 0.3 \text{ UTc}$

Las unidades de toxicidad de las pruebas antes mencionadas se calculan como se muestra a continuación:

$$\text{Toxicidad (UTa)} = 100/\text{CL}_{50} (24 \text{ h})$$

$$\text{Toxicidad (UTc)} = 100/\text{CENO}$$

Donde:

CL₅₀: Concentración que provoca la inmovilidad o muerte del 50% de los organismos utilizados en la prueba en 24 horas.

CENO: Mayor concentración nominal del agente tóxico, que no causa efecto perjudicial, estadísticamente significativo en la sobrevivencia y reproducción de los organismos, en siete días de exposición (CEPIS, 2008).

La evaluación espacial del ICA, realizado con las superficies continuas de las presas así como la del IGCA de los ríos San Pedro y El Chicalote, permitió identificar el número y ubicación de los sitios de muestreo a incluir en un programa de monitoreo. Lo anterior, debido a que no fue posible emplear técnicas geoestadísticas, ya que los datos de la calidad del agua de estas corrientes no se ajustaron a ningún modelo teórico conocido. Sin embargo, es importante mencionar que tanto el número de estaciones como su localización están sujetas a cambio en función del objetivo del monitoreo (Chapman, 1996). Otra de las herramientas empleada en el presente trabajo para evaluar la calidad del agua fue el Análisis de Componentes Principales (ACP), en primera instancia se pretendía emplear este análisis para reducir la variabilidad de los datos obtenidos de la calidad del agua y los pesos para cada una las variables (Rodríguez, 1995). No obstante que acumulada en los dos primeros componentes no se encontró por arriba del 70% para emplear los pesos de las diferentes variables para diseñar un índice específico para los ríos San Pedro y El Chicalote, esta técnica mostró patrones de cada variable y los sitios más contaminados por las mismas (Kim y Cardone, 2005). Además, al incluir la temporada de muestreo como una variable, se observó que los indicadores de materia orgánica, nutrientes y tóxicos orgánicos no estaban correlacionados significativamente con la campaña de muestreo, a diferencia de los metales pesados. Lo cual confirma las pruebas de Mann-Whitney para identificar diferencias significativas de los parámetros evaluados entre las campañas de muestreo. En este sentido, el programa de monitoreo propuesto sugirió al menos dos muestreos en estas temporadas. Sin embargo, la frecuencia de dicho programa también está sujeta al objetivo del monitoreo y a los recursos disponibles (Bartram y Ballance, 1996).

Con respecto a las variables que se van a monitorear, el programa de monitoreo propuesto únicamente incluye parámetros que fueron analizados en los proyectos previos de donde fueron obtenidos los datos de calidad. Estas variables fueron determinadas en función de las actividades que se desarrollan en la área de estudio, así como de estudios previos (Ramírez *et al.*, 2007). No obstante, en el programa de monitoreo se pueden incluir otros parámetros en función del objetivo y del uso del agua. La combinación más simple de parámetros es la temperatura, conductividad eléctrica, pH, OD y sólidos suspendidos totales (SST). Estos parámetros proporcionan el mínimo de información para realizar una primera evaluación, básica y general, de la calidad del agua a estudio. Programas más complejos pueden analizar más de 100 variables parámetros, incluyendo metales y contaminantes orgánicos (Chapman, 1996). Por lo tanto, el programa de monitoreo puede dividirse en un programa básico que incluya las variables propuestas con una frecuencia establecida y otro monitoreo con menor frecuencia que incluya variables de sospecha de contaminación, donde también se pueden evaluar los sedimentos y biota (Bartram y Ballance, 1996).

Si bien, los parámetros evaluados en los sedimentos de los cauces no mostraron ninguna correlación con el nivel de contaminación por los mismos en las muestras de agua. Estos no dejan de ser una preocupación, principalmente por los altos niveles de metales pesados que se encontraron en esta matriz. De acuerdo a los resultados, los metales pesados están fijados en los sedimentos debido al tipo de suelo y a los altos contenidos de materia orgánica. Sin embargo, variaciones de las características fisicoquímicas del agua pueden alterar las condiciones por las que se da el fenómeno de fijación de los metales pesados a los sedimentos y movilizar parte de estos a la columna de agua (Jian-feng *et al.*, 2009). Por otro lado, los suelos tienen una capacidad de retención de contaminantes en función de sus características fisicoquímicas. Sin embargo, es probable que una vez rebasado esa capacidad, los metales u otro tipo de contaminantes migren hacia el subsuelo (Mora, 2007), llegando a contaminar fuentes subterráneas en zonas donde los niveles estáticos sean más someros. Por tal motivo, su inclusión en el programa de monitoreo es importante.

La implementación de un programa de monitoreo para el cauce del río San Pedro y cuerpos de agua relacionados es una alternativa viable para comenzar una gestión adecuada de los recursos, puede iniciarse con un programa piloto, empleando el programa sugerido en el presente trabajo y posteriormente irse cambiando en función de las necesidades y requerimientos del mismo. La información obtenida permitirá la toma adecuada de decisiones para la remediación y prevención de los recursos implicados (Chapman, 1996). La remediación de este importante cauce no sólo prevendrá una posible contaminación de la principal fuente de abastecimiento de agua potable en el Estado, sino contribuirá a disminuir en parte la sobreexplotación del acuífero, por el incremento de disponibilidad de aguas superficiales para el sector agrícola, principal consumidor de agua. Además de recobrar su estado natural en beneficio del paisaje y del entorno ambiental, ya que los ríos son de suma importancia dentro del ciclo hidrológico y constituyen un sistema estructurado para trasladar sedimentos y fluidos vitales, realizando complejas reacciones con el objetivo de dar sustento en todo su recorrido a todas sus diferentes formas de vida (Campoblanco y Gomero, 2000).

6. CONCLUSIONES

La evaluación de los principales cuerpos de agua superficial relacionados con el cauce del río San Pedro, mostró que la calidad del agua de las presas El Saucillo, Presidente Calles y Gral. Abelardo L. Rodríguez, es en términos generales “aceptable”. La calidad del agua de la presa El Niágara y El Sabinal varía de “contaminada” a “fuertemente contaminada” de acuerdo con el ICA y los indicadores empleados por la CONAGUA, reflejando las condiciones actuales del río. En ninguno de los cuerpos de agua se observaron niveles de metales pesados superiores a los de referencia; sin embargo, la presa El Niágara y El Sabinal presentaron las concentraciones más elevadas de As y Hg, mientras que en las presas Abelardo y Calles se observaron los niveles más altos de Fe y Al. El contenido de contaminantes en los fondos de los cuerpos de agua reflejó el nivel de contaminación de la columna de agua.

En general, el cauce del río San Pedro y uno de sus principales afluentes, el río Chicalote se encuentran seriamente contaminados con materia orgánica, nutrientes, detergentes y coliformes fecales, y en algunos sitios de muestreo presentan moderada contaminación de Al, Cr y Hg. No obstante, que en la época de sequía se observaron los valores más altos en las concentraciones de los contaminantes, únicamente se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las campañas de muestreo en el contenido de metales pesados en las muestras de agua. No se observaron correlaciones significativas entre los contaminantes presentes en agua y sedimentos en ninguno de los dos ríos. Los sedimentos reflejaron el impacto antropogénico que ha sufrido el cauce durante décadas de ser utilizado como reservorio de una multitud de residuos, con altos contenidos de tóxicos orgánicos (anilinas y detergentes) y niveles de contaminación por Cr, Cu y Zn. Además del impacto antropogénico, se observó una importante contaminación de origen natural, principalmente por As. Las características de los sedimentos implican un alto nivel de inmovilización de metales pesados y tóxicos orgánicos. La capacidad de autodepuración del río San Pedro es reducida y su nivel de contaminación constituye un riesgo a la salud pública y al entorno ecológico.

No obstante, las concentraciones de DQO y coliformes fecales, observadas en algunos pozos agrícolas durante el muestreo realizado en la época de sequía, no existen evidencias concluyentes de contaminación del acuífero por aguas provenientes del río San Pedro. Los metales As y Hg observados en concentraciones por arriba del LMP (NOM-127-SSA1-1994) en algunos pozos evaluados provienen de fuentes geogénicas.

Las pruebas no paramétricas de Mann-Whitney y ji-cuadrada no mostraron diferencias significativas del nivel de contaminación del río San Pedro y El Chicalote, entre las campañas de muestreo. El análisis de correlación indicó la baja relación entre los contaminantes presentes en agua y sedimentos los mismos ríos. El análisis de componentes principales (ACP) permitió identificar las variables de materia orgánica y nutrientes son las de mayor influencia.

El empleo de los índices facilitó el manejo de los datos obtenidos, permitiendo evaluar de forma más sencilla las tendencias espaciales y la calidad global del agua del río San Pedro y cuerpos de agua superficial relacionados. Lo cual, ayudó además a identificar las zonas más críticas para su atención. Sin embargo, este indicador no reemplaza los procesos convencionales de análisis de datos sobre la calidad del agua.

Con los resultados obtenidos de la calidad del agua del presente estudio y la integración de información obtenida de proyectos previos, aunada a las herramientas de análisis de información empleadas en este proyecto, se propuso un programa de monitoreo del río San Pedro y principales cuerpos de agua relacionados. Seleccionando el número y localización de las estaciones de muestreo, la frecuencia y las variables a monitorear en las muestras de agua y sedimentos. Cuyo objetivo principal es evaluar la calidad del agua, dar seguimiento y controlar las acciones implementadas para su remediación y evaluar una posible contaminación del acuífero.

7. ANEXOS

ANEXO 1. DETERMINACIÓN DE ICA Y PARÁMETROS DE REFERENCIA

FORMULAS PARA EL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA

Nº Parámetro	Ecuación del Parámetro	Ponderación Wi
1. Oxígeno disuelto	$I = (100)(OD) / 14.492 - 0.384 T + 0.064 T^2$	5.0
2. DBO	$I = 120 (DBO)^{0.673}$	5.0
3. Coliformes totales	$I = 97.5 (Ct)^{0.270}$	3.0
4. Coliformes fecales	$I = 97.5 (5 * Cf)^{0.270}$	4.0
5. Conductividad	$I = 540 (Cond)^{-0.379}$	1.0
6. Cloruros	$I = 121 (Cl)^{0.223}$	0.5
7. Dureza total	$I = 10^{1.974 - [0.00174 * Dt]}$	1.0
8. Alcalinidad	$I = 105 (Al)^{-0.185}$	0.5
pH < 7	$I = 10^{0.2336 (pH) + 0.440}$	1.0
9. pH = 7	$I = 100$	1.0
pH > 7	$I = 10^{[4.22 - 0.293(pH)]}$	1.0
10. Grasas y aceites	$I = 87.25 (GyA)^{0.298}$	2.0
11. Sólidos suspendidos	$I = 266.5 (SS)^{-0.37}$	1.0
12. Sólidos disueltos	$I = 109.1 - 0.0175 (SD)$	0.5
13. Detergentes	$I = 100 - 16.68 (SAAM) + 0.161 (SAAM)^2$	3.0
14. Fosfatos	$I = 34.215 (PO_4)^{-0.460}$	2.0
15. Nitrógeno en nitratos	$I = 162.2 (NO_3)^{-0.343}$	2.0
16. Nitrógeno amoniacal	$I = 45.8 (NH_3)^{0.343}$	2.0
17. Color Pt-co	$I = 123 (Color)^{-0.295}$	1.0
18. Turbiedad	$I = 108 (Tur)^{-0.178}$	0.5

Guzmán, 1997. SEMARNAP, 1999.

Fórmula para calcular el ICA (ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA)

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Donde:

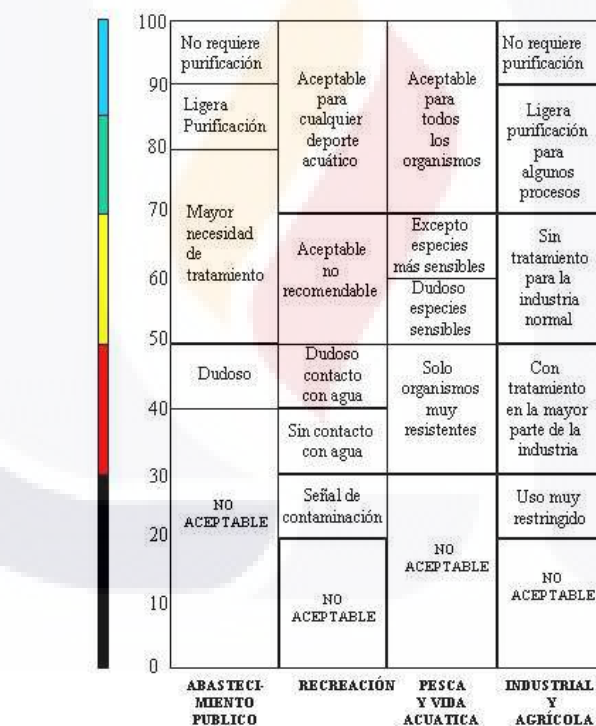
ICA = Índice de Calidad del Agua, $0 < I < 100$

I_i = Función subíndice del parámetro i , $0 < I < 100$

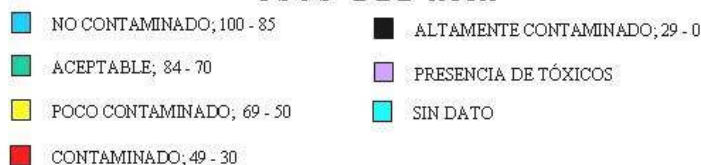
W_i = Peso de importancia del parámetro (ponderación) i , $0 < W_i < 5$

n = Número de parámetros empleados.

ESCALA DE CALIFICACIÓN GENERAL DE LA CALIDAD DEL AGUA
ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA)



USOS DEL AGUA



Fuente: CONAGUA, 2005.

INDICADORES DE CALIDAD EMPLEADOS ACTUALMENTE POR LA CNA

Escala de la clasificación de la calidad de agua
DBO₅ y DQO

Criterio DBO ₅ (mg/L)	Clasificación	Criterio DQO (mg/L)
DBO ₅ ≤ 3	EXCELENTE No Contaminada	DQO ≤ 10
3 > DBO ₅ ≤ 6	BUENA CALIDAD Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable	0 > DQO ≤ 20
6 > DBO ₅ ≤ 30	ACEPTABLE Con indicios de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de agua residuales tratadas biológicamente.	20 > DQO ≤ 40
30 > DBO ₅ ≤ 120	CONTAMINADA Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.	40 > DQO ≤ 200
DBO ₅ > 120	FUERTEMENTE CONTAMINADA Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas crudas municipales y no municipales	DQO > 200

CONAGUA

Subdirección General Técnica

Gerencia de Saneamiento y Calidad del agua

Subgerencia de Estudios de la Calidad del Agua e Impacto Ambiental

Jefatura de Proyectos de Estudios de Calidad del Agua

CRITERIOS DE CALIDAD DEL AGUA

(Niveles máximos en mg/L excepto que se indique otra unidad)

PARÁMETRO	FUENTE DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE	RECREATIVO CON CONTACTO PRIMARIO	RIEGO AGRÍCOLA	PECUARIO	PROTECCIÓN DE LA VIDA ACUÁTICA	
					AGUA DULCE	AGUA MARINA (ÁREAS COSTERAS)
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	1 000	1	1 000	6	1	1
DBO	6	6	6	6	6	6
DQO	6	6	6	6	6	6
Nitratos (como N)	5	6	6	90	6	0.04
Nitrógeno amoniacal	6	6	6	6	0.06	0.01
Oxígeno disuelto ²	4	6	6	6	5	5
Sólidos disueltos totales	500	6	500 ³	1 000	6	6
Sólidos suspendidos totales	500	6	50	6	4	4
Fosfatos (como PO ₄)	0.1	6	6	6	5	0.002
As (µg/L)			100			
Al			5.0			
Cu			0.2			
Cd			0.01			
¹ Los organismos no deben exceder de 200 como número más probable en 100 mililitros (NMP/100 ml) en agua dulce o marina, y no más del 10% de las muestras mensuales deberá exceder de 400 NMP/100 ml.						
² Para oxígeno disuelto, los niveles establecidos deben considerarse como mínimos.						
³ La concentración de sólidos disueltos que no tienen efectos nocivos en ningún cultivo es de 500 mg/l, en cultivos sensibles es de entre 500 y 1000 mg/l, en muchas cosechas que requieren de manejo especial es de entre 1000 y 2000 mg/l, y para cultivos de plantas tolerantes en suelos permeables es de entre 2000 y 5000 mg/l requiriendo de un manejo especial.						
⁴ Los sólidos suspendidos (incluyendo sedimentables) en combinación con el color, no deben reducir la profundidad del nivel de compensación de luz para la actividad fotosintética en más del 10% a partir del valor natural.						
⁵ Los fosfatos totales, medidos como fósforo, no deberán exceder de 0.05 mg/l en afluentes a lagos o embalses ni de 0.025 mg/l dentro del lago o embalse, para prevenir el desarrollo de especies biológicas indeseables y para controlar la eutroficación acelerada.						
⁶ No hay criterio ecológico.						

Fuente: Elaborado por Semarnap, Comisión Nacional del Agua, con base en: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, «Criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89», Diario Oficial de la Federación, Miércoles 13 de diciembre de 1989.

ANEXO 2. DETERMINACIÓN DE LOS SUBÍNDICES QUE CONFORMAN EL IGCA Y VALORES OBJETIVO (NIVELES DESEABLES)

$$IGCA = \frac{\sum \text{Valor del subíndice}}{\text{Número de subíndices}}$$

Cada uno de los subíndices fue calculado mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Valor del Subíndice} = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right)$$

Donde:

F_1 representa el número de variables (parámetros) que no cumplieron con el nivel deseable (definido en función del uso del agua) al menos una vez durante el periodo considerado (un año).

$$F_1 = \left(\frac{\text{Número de variables que no cumplieron con los niveles deseables}}{\text{Número total de variables}} \right) * 100$$

F_2 representa la proporción del número de pruebas individuales que no cumplieron con el nivel deseable, con respecto al número total de las pruebas realizadas durante el periodo considerado (un año).

$$F_2 = \left(\frac{\text{Número de pruebas que no cumplieron con los niveles deseables}}{\text{Número total de pruebas}} \right) * 100$$

F_3 representa la magnitud con la cual los valores de las pruebas se desviaron de los niveles deseables.

$$F_3 = \left(\frac{cfc}{0.01 \text{ } cfc + 0.01} \right) * 100$$

La variable *cfc* representa la magnitud con la cual la calidad del agua se desvía de los criterios de conformidad. Se calcula dividiendo la sumatoria de la magnitud de cada una

de las desviaciones observadas en las pruebas que estuvieron fuera de conformidad (Nfc), entre el número total de pruebas:

$$cfc = \frac{\sum_{i=1}^n Nfc_i}{\text{Número total de pruebas}}$$

Para los casos en que los valores de las pruebas no deben exceder el nivel deseable:

$$Nfc_i = \left(\frac{\text{Valor de la prueba fuera de conformidad}_i}{\text{Nivel deseable}_j} \right) - 1$$

Para los casos en que el valor de la prueba no debe estar por debajo del nivel deseable:

$$Nfc_i = \left(\frac{\text{Nivel deseable}_j}{\text{Valor de la prueba fuera de conformidad}_i} \right) - 1$$

Para los casos en los cuales el nivel es cero:

$$Nfc_i = \text{Valor de prueba fuera de conformidad}_i \text{ IGCA} = \frac{\sum \text{Valor del subíndice}}{\text{Número de subíndices}}$$

VALORES OBJETIVO O NIVELES DESEABLES

Subíndice	Parámetros	Valor o intervalo objetivo (deseable)
De Campo (sIC)	pH	6.5-8.5
	OD	5.5-8.0 mg/L
	Conductividad	2000 μ S/cm
De Materia Orgánica (SIMO)	DBO ₅	15 mg/L
	DQO	20 mg/l
	Grasas y Aceites	10 mg/L
De Nutrientes (sIN)	Fósforo total	0.1 mg/L
	Nitrógeno total	1 mg/L
De Tóxicos Orgánicos (sITO)	SAAM	0.5 mg/l
	Fenoles	10 μ g/l
	Anilinas	2.2 μ g/L
Fecal (sIF)	Coliformes totales	1000 NMP/100 mL
	Coliformes fecales	100 NMP/100 mL
De Metales Pesados (sIMP)	Al	5000 μ g/L
	As	50 μ g/L
	Cd	10 μ g/L
	Cr	50 μ g/L
	Cu	500 μ g/L
	Fe	5000 μ g/L
	Hg	3 μ g/L
	Mn	200 μ g/L
	Pb	100 μ g/L
	Zn	5000 μ g/L

CATEGORÍAS DE LA CALIDAD DEL AGUA (RWQI)

Categoría	valores	Descripción
Excelente	100-95	La calidad del agua está protegida con ausencia virtual de amenaza o daño, su condición está muy cercana a los niveles naturales u originales
Buena	94-80	La calidad del agua está protegida con menor grado de amenaza o daño, su condición rara vez se aparta del niveles natural o conveniente
Aceptable	79-65	La calidad del agua está usualmente protegida pero ocasionalmente es amenazada o dañada, su condición algunas veces se aparta del nivel natural o conveniente
Marginal	64-45	La calidad del agua está frecuentemente amenazada o dañada, su condición frecuentemente se aparta de los niveles naturales o convenientes
Pobre	44-0	La calidad del agua está casi siempre amenazada o dañada, su condición usualmente se aparta de los niveles naturales o convenientes

Fuente: Alberta Environment, 2008.

ANEXO 3. RESULTADOS PUNTUALES DE LAS PRESAS

Presa “El Saucillo”

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Parámetros de campo				
			OD (mg/L)	Temp (°C)	pH	Cond (μS)	Turb (NTU)
Columna de agua	Sequía	1	3.46	18.2	7.41	203.5	57
		2	4.70	18	7.74	205	62
		3	3.36	17.4	7.77	201.5	57
		4	3.49	18.8	7.71	191.3	62
		5	3.98	17.4	7.81	198	62
	Posterior a las lluvias	1	4.91	15.4	8.45	302	17.5
		2	5.66	15.6	8.50	293	26
		3	4.15	14.6	9.35	285	18.5
		4	5.90	15.7	9.18	291	17.9
		5	6.67	15.7	9.10	289	16.8
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)							
Fondos	Sequía	1	1.28	17.2	7.59	203	>800
		2	2.73	17.8	7.63	191.3	>800
		3	0.87	16.2	7.49	205	>800
		4	2.97	18.2	7.69	199.7	>800
		5	3.08	17.8	7.79	206	>800
	Posterior a las lluvias	1	2.87	14.9	7.73	284	>800
		2	4.15	14.6	8.68	297	505
		3	4.18	15.7	9.18	291	246
		4	5.17	15.7	8.56	298	>800
		5	4.13	15.9	8.75	295	274
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)							
Límite de detección				0.1	0.1	0.1	

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Materia orgánica		Sólidos		
			DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	STT (mg/L)	SDT (mg/L)	SST (mg/L)
Columna de agua	Sequía	1	7	45.5	125	105	20
		2	6	51	130	108	22
		3	8	41	180	158	22
		4	6	43	190	156	34
		5	7	44	120	92	28
	Posterior a las lluvias	1	5	56	340	309	31
		2	13	71	280	263	17
		3	5	71	200	196	4
		4	15	109	260	247	14
		5	14	143	180	174	6
	Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)		0.6761	0.0119	0.0283	0.0122	0.0947
Fondos	Sequía	1	17	152	4500	1890	2610
		2	5	485	1190	547	643
		3	54	710	1220	573	647
		4	13	190	1130	531	599
		5	14	183	1370	329	1041
	Posterior a las lluvias	1	15	255	6920	520	6400
		2	14	51	860	277	583
		3	13	40	580	130	450
		4	47	145	1740	707	1033
		5	27	152	1880	413	1467
	Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)		0.6742	0.0747	1	0.2101	1
	Límite de detección		0.5	0.2	0.1	0.1	0.1

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Nutrientes		Tóxicos Orgánicos		
			Pt (mgPO ₄ /L)	Nt (mg/L)	Fenoles (mg/L)	Anilinas (mg/L)	SAAM (mg/L)
Columna de agua	Sequía	1	0.50	10	nd	5.70	nd
		2	0.72	230	nd	74.90	nd
		3	0.54	18	nd	6.65	nd
		4	0.57	20	nd	5.10	nd
		5	0.47	27	nd	9.80	nd
	Posterior a las lluvias	1	0.12	2	nd	nd	nd
		2	0.12	1	nd	nd	nd
		3	0.11	2	nd	nd	nd
		4	0.10	3	nd	3.63	nd
		5	0.15	2	nd	nd	nd
Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)			0.0119	0.0112		0.0097	
Fondos	Sequía	1	3.51	59	nd	21.70	nd
		2	9.05	59	nd	23.50	nd
		3	15.15	11	nd	12	nd
		4	1.72	19	nd	8.30	nd
		5	1.44	27	nd	8.70	nd
	Posterior a las lluvias	1	2.20	59	nd	25.45	nd
		2	0.70	17	nd	12.46	nd
		3	0.45	15	nd	8.73	nd
		4	0.85	22	nd	14.87	nd
		5	1.40	45	nd	12.61	nd
Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)			0.0367	0.8325	-	0.5309	-
Límite de detección			0.06	2	0.001		0.05

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Metales					
			As (µg/L)	Hg (µg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Zn (mg/L)	Al (mg/L)
Columna de agua	Sequía	1	3.56	0.44	2.24	0.13	nd	3.88
		2	3.84	nd	2.28	0.16	nd	3.94
		3	3.70	1.06	2.15	0.13	nd	3.49
		4	3.78	nd	2.57	0.15	nd	3.97
		5	3.60	nd	1.92	0.14	nd	3.86
	Posterior a las lluvias	1	2.80	0.36	0.37	0.15	nd	0.88
		2	3.70	0.36	0.57	0.24	nd	1.98
		3	2.80	nd	0.38	0.16	nd	0.85
		4	3.40	1.62	0.35	0.16	nd	0.79
		5	3.30	1.13	0.33	0.15	nd	0.71
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.367	0.3472	0.0122	0.0857		0.0122
Fondos	Sequía	1	29.32	nd	19.30	1.07	0.07	45.00
		2	6.42	nd	2.00	0.38	nd	6.96
		3	24.04	0.67	27.30	1.26	0.15	53.82
		4	33.55	nd	12.70	1.17	0.07	34.93
		5	14.65	0.62	8.00	0.96	0.06	26.78
	Posterior a las lluvias	1	21.60	0.85	21.70	1.27	0.08	44.09
		2	15.40	0.60	13.50	0.79	0.05	34.71
		3	34.70	1.47	23.20	1.24	0.11	48.51
		4	38.50	0.70	24.10	2.50	0.07	37.95
		5	31.00	0.48	20.80	0.96	0.08	44.92
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.2963	0.0907	0.0122	0.0119	0.2963	0.0907
Límite de detección			0.3	0.3	0.025	0.012	0.005	0.13

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Coliformes	
			Totales (NMP/100ml)	Fecales (NMP/100ml)
Columna de agua	Sequía	1	24	24
		2	2.3	2.3
		3	14.2	14.2
		4	4.3	4.3
		5	2.3	2.3
	Posterior a las lluvias	1	1500	280
		2	1500	280
		3	90	90
		4	230	40
		5	230	40
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)				0.0122
Fondos	Sequía	1	4.3	4.3
		2	9.3	4.3
		3		
		4	46	15
		5	24	9.3
	Posterior a las lluvias	1	46000	24000
		2		
		3		
		4		
		5	2400	150
Límite de detección				
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)				

Presa “Presidente Calles”

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Parámetros de campo				
			OD (mg/L)	Temp (°C)	pH	Cond (μS)	Turb (NTU)
Columna de agua	Sequía	1	5.56	17.85	7.62	101.8	17
		2	8.15	22.40	9.16	107.1	37
		3	7.04	19.40	8.51	104.7	24
		4	7.16	18.95	8.32	103.9	17
		5	6.79	18.75	7.99	101.6	29
		6	7.50	19.05	7.58	102.3	18
		7	6.91	21.80	8.31	101.1	23
		8	7.61	19.95	8.10	102.1	25
		9	7.57	20.45	8.32	100.9	33
		10	7.36	21.65	8.26	99.7	19
		11	7.19	20.10	8.52	100.5	17
		12	7.39	20.90	8.03	101.9	25
	Posterior a las lluvias	1	4.43	19.4	7.85	96.0	17
		2	5.75	21.6	8.55	100.5	7.8
		3	5.67	19.4	6.25	102.6	2.6
		4	5.53	19.5	8.20	101.6	2.3
		5	5.11	19.2	7.95	103.5	2.6
		6	5.78	22	7.65	103.5	1.9
		7	6.14	19.9	7.76	104.6	12.5
		8	5.32	20	7.04	103.6	5.76
		9	4.13	20	7.14	111.8	41.5
		10	4.73	18	7.25	124.6	10.1
		11	5.52	19	7.36	118.5	415
		12	5.65	20.6	7.11	102.5	21.2
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.0000	0.0002	0.0102	0.2145	0.0079
Límite de detección				0.1	0.1	0.1	

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Parámetros de campo				
			OD (mg/L)	Temp (°C)	pH	Cond (μS)	Turb (NTU)
Fondos	Sequía	1					
		2	8.2	20.3	8.80	104.7	111
		3	4.68	16.7	7.05	103.4	183
		4	4.23	15.6	6.71	102.5	420
		5	2.82	15.5	6.57	101.4	>800
		6					
		7	7.7	19.3	8.89	100.8	>800
		8					
		9	3.98	16.6	6.84	103	>800
		10	3.41	17.1	6.58	101.5	753
		11	4.71	17.1	7.40	102.4	337
		12	5.23	17.1	6.69	101.6	581
	Posterior a las lluvias	1					
		2	5.03	19.8	7.95	99.2	>800
		3	4.81	18.2	7.65	103	213
		4	5.49	19.4	8.4	100.2	140
		5	3.35	20.3	7.63	98.7	>800
		6	5.08	19	7.95	101.6	163
		7	4.40	18.5	7.95	103.5	53
		8	0.95	18.6	7.82	115.3	>800
		9	3.62	18	7.71	101.6	>800
		10	6.45	18	7.92	105.7	137
		11	5.05	18	7.94	105.3	289
		12	5.18	19	8.17	103.4	143
Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)			0.9394	0.0402	0.0205	0.6485	0.4033
Límite de detección				0.1	0.1	0.1	

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Materia orgánica		Sólidos		
			DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	STT (mg/L)	SDT (mg/L)	SST (mg/L)
Columna de agua	Sequía	1	9	40.5	110	76	34
		2	13	72	80	52	28
		3	9.5	49	35	24	11
		4	7	34.5	25	17	8
		5	10	68	20	12	8
		6	15.5	101.5	30	18	12
		7	10	32	40	27	13
		8	9.5	43	65	49	16
		9	14	60	60	45	15
		10	8.5	64	90	64	26
		11	10.5	39	120	80	40
		12	10	55	110	72	38
	Posterior a las lluvias	1	5	39	560	255	305
		2	5	12	335	290	45
		3	5	17	250	239	11
		4	5	50	290	258	32
		5	5	22	310	275	35
		6	5	25	315	287	28
		7	5	18	255	227	28
		8	5	17	270	235	35
		9	5	97	1305	1007	298
		10	5	26	295	231.5	63.5
		11	5	35	440	294	146
		12	5	12	250	161.5	88.5
Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)			-	0.0043	0.0033	0.0012	0.0006
Límite de detección			0.5	0.2	0.1	0.1	0.1

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Materia orgánica		Sólidos		
			DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	STT (mg/L)	SDT (mg/L)	SST (mg/L)
Fondos	Sequía	1					
		2	26	107	405	49	356
		3	47	283	640	141	499
		4	30	141	900	171	729
		5	61	293	2590	751	1839
		6					
		7	42	241	1310	183	1127
		8					
		9	32	169	2340	1100	1240
		10	23	104	1420	185	1235
		11	39	137	1170	386	784
		12	34	106	1000	210	790
	Posterior a las lluvias	1					
		2	5	262	9685	3722	5963
		3	5	204	900	205	695
		4	5	75	820	90	730
		5	5	346	2390	230	2160
		6	5	76	1045	315	730
		7	5	72	705	421	284
		8	5	1498	6600	2650	3950
		9	5	250	3660	1105	2555
		10	5	28	850	77	773
		11	5	39	300	264	36
		12	5	22	595	260	335
Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)			-	0.4033	0.6293	0.4251	0.5841
Límite de detección			0.5	0.2	0.1	0.1	0.1

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Nutrientes		Tóxicos Orgánicos		
			Pt (mgPO ₄ /L)	Nt (mg/L)	Fenoles (mg/L)	Anilinas (mg/L)	SAAM (mg/L)
Columna de agua	Sequía	1	nd	nd	0.017	2.96	nd
		2	nd	nd	0.005	2.98	nd
		3	nd	4	0.007	3.24	nd
		4	nd	3	nd	3.29	nd
		5	0.27	3	0.003	3.58	0.096
		6	0.12	3	nd	3.13	0.063
		7	0.42	2	0.020	3.13	0.075
		8	0.28	6	nd	3.03	nd
		9	0.29	5	nd	3.35	nd
		10	0.08	3	nd	3.00	nd
		11	0.25	3	nd	3.08	nd
		12	nd	2	0.006	3.17	nd
	Posterior a las lluvias	1	0.6	8	nd	4.69	nd
		2	nd	7	nd	nd	nd
		3	nd	8	nd	2.62	nd
		4	nd	nd	nd	2.21	nd
		5	nd	nd	nd	nd	nd
		6	nd	5	nd	2.65	nd
		7	nd	5	nd	nd	nd
		8	nd	nd	nd	nd	nd
		9	0.61	16	nd	8.25	nd
		10	0.07	nd	nd	2.09	nd
		11	0.09	2	nd	4.32	nd
		12	nd	nd	nd	nd	nd
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.7950	0.9081	-	0.0404	-
Límite de detección			0.06	2	0.001		0.05

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Nutrientes		Tóxicos Orgánicos		
			Pt (mgPO ₄ /L)	Nt (mg/L)	Fenoles (mg/L)	Anilinas (mg/L)	SAAM (mg/L)
Fondos	Sequía	1					
		2	0.37	16	0.011	3.93	0.104
		3	nd	20	0.004	3.93	nd
		4	13.45	20	0.054	10.46	0.163
		5	3.61	20	0.050	9.75	0.104
		6					
		7	0.23	nd	0.021	3.84	0.125
		8					
		9	6.70	10	0.050	7.15	0.104
		10	1.51	4	0.113	4.54	0.075
		11	1.81	16	0.076	16.95	0.095
		12	1.72	10	0.051	6.59	0.094
	Posterior a las lluvias	1					
		2	1.75	36	nd	37.84	nd
		3	0.85	14	nd	5.55	nd
		4	0.36	7	nd	6.82	nd
		5	2.95	41	nd	7.01	nd
		6	0.38	4	nd	5.04	nd
		7	0.20	3	nd	3.38	nd
		8	6.50	nd	nd	nd	nd
		9	0.64	38	nd	12.28	nd
		10	0.26	4	nd	4.55	nd
		11	nd	3	nd	2.98	nd
		12	0.07	nd	nd	nd	nd
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.2390	0.4474	-	0.2893	-
Límite de detección			0.06	2	0.001		0.05

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Metales				
			As (µg/L)	Hg (µg/L)	Cu (mg/L)	Cr (mg/L)	Fe (mg/L)
Columna de agua	Sequía	1	0.825	nd	nd	nd	0.818
		2	0.813	nd	nd	nd	0.294
		3	1.051	nd	nd	nd	0.272
		4	0.990	nd	nd	nd	0.318
		5	0.935	nd	nd	nd	0.632
		6	0.704	nd	nd	nd	0.307
		7	1.003	nd	nd	nd	0.223
		8	1.071	nd	nd	nd	1.763
		9	0.962	nd	nd	nd	0.264
		10	0.867	nd	nd	nd	0.274
		11	3.530	nd	nd	nd	0.717
		12	1.454	nd	nd	nd	1.253
	Posterior a las lluvias	1	5	0.40	nd	nd	5.490
		2	2	0.58	nd	nd	0.129
		3	2	0.50	nd	nd	0.118
		4	2	0.30	nd	nd	0.118
		5	2	nd	nd	nd	0.166
		6	2	nd	nd	nd	0.094
		7	2	0.51	nd	nd	0.123
		8	2	0.30	nd	nd	0.111
		9	9	0.80	nd	nd	19.400
		10	2	0.65	nd	nd	0.254
		11	3	0.80	nd	nd	2.240
		12	3	0.37	nd	nd	0.393
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.0004	-	-	-	0.1260
Límite de detección			0.3	0.3	0.023	0.024	0.025

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Metales				
			As (µg/L)	Hg (µg/L)	Cu (mg/L)	Cr (mg/L)	Fe (mg/L)
Fondos	Sequía	1					
		2	6.954	nd	nd	nd	5.6
		3	4.753	nd	nd	nd	2.5
		4	9.481	nd	nd	nd	24.4
		5	37.078	nd	nd	0.031	54.3
		6					
		7	6.193	nd	0.191	nd	5.02
		8					
		9	15.907	nd	0.38	nd	29
		10	4.507	0.57	0.57	nd	2.9
		11	19.016	nd	nd	nd	27
		12	5.677	nd	nd	nd	7.04
	Posterior a las lluvias	1	2	0.6	nd	nd	0.12
		2	25	0.4	nd	nd	49
		3	8	0.5	nd	nd	15.20
		4	7	0.4	nd	nd	7.18
		5	17	0.4	nd	nd	43
		6	4	0.37	nd	nd	5.74
		7	4	nd	nd	nd	3.5
		8	87	1.3	0.054	0.058	174
		9	19	0.4	nd	nd	45.2
		10	5	0.5	nd	nd	7.44
		11	2	0.5	nd	nd	0.15
		12	3	nd	nd	nd	0.82
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.6484	-	-	-	0.7612
Límite de detección			0.3	0.3	0.023	0.024	0.025

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Metales			
			Mn (mg/L)	Zn (mg/L)	Pb (mg/L)	Al (mg/L)
Columna de agua	Sequía	1	nd	0.015	nd	1.262
		2	0.016	0.010	nd	1.193
		3	0.013	0.006	nd	1.141
		4	nd	0.010	nd	1.090
		5	0.024	0.030	nd	1.290
		6	nd	0.006	nd	1.056
		7	nd	nd	nd	1.055
		8	nd	0.006	nd	1.202
		9	nd	0.010	nd	1.159
		10	nd	0.010	nd	1.107
		11	nd	0.005	nd	1.638
		12	0.012	nd	nd	1.700
	Posterior a las lluvias	1	0.059	0.012	nd	8.588
		2	0.525	nd	nd	nd
		3	0.016	nd	nd	0.132
		4	0.013	0.006	nd	nd
		5	0.019	nd	nd	0.132
		6	nd	nd	nd	nd
		7	0.019	nd	nd	nd
		8	0.160	nd	nd	nd
		9	0.860	0.051	nd	0.295
		10	0.060		nd	33.203
		11	0.141	0.018	nd	2.429
		12	0.067	0.017	nd	0.460
Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)			0.0002	0.7728	-	0.0404
Límite de detección			0.012	0.005	0.135	0.13

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Metales			
			Mn (mg/L)	Zn (mg/L)	Pb (mg/L)	Al (mg/L)
Fondos	Sequía	1				
		2	1.20	nd	nd	12.333
		3	0.41	0.019	nd	13.444
		4	2.80	0.074	nd	56.777
		5	5.25	0.231	0.163	107.963
		6				
		7	0.80	nd	nd	28.330
		8				
		9	3.30	0.098	nd	57.518
		10	0.48	0.005	nd	9.741
		11	4.39	0.103	nd	55.667
		12	0.79	0.10	nd	12.333
	Posterior a las lluvias	1	0.40	0.012	nd	
		2	0.84	0.109	nd	69.470
		3	0.67	0.057	nd	7.181
		4	1.04	0.025	nd	8.354
		5	1.50	0.098	nd	56.799
		6	0.39	0.006	nd	6.244
		7	0.03	nd	nd	3.196
		8	11.10	0.387	nd	217.160
		9	2.27	0.102	nd	53.060
		10	0.04	0.018	nd	10.932
		11	0.03	nd	nd	0.132
		12	0.10	nd	nd	1.022
Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)			0.1286	0.9697	-	0.1489
Límite de detección			0.012	0.005	0.135	0.13

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Coliformes	
			Totales (NMP/100ml)	Fecales (NMP/100ml)
Columna de agua	Sequía	1	9.3	9.3
		2	0.91	0.36
		3	0.36	0.36
		4	0.56	0.36
		5	1.5	1.5
		6	1.5	1.5
		7	1.5	1.5
		8	0.36	0.36
		9	0.03	0.03
		10	0.36	0.36
		11	0.36	0.36
		12	0.6	0.36
	Posterior a las lluvias	1	3	3
		2	3	3
		3	43	43
		4	43	43
		5	nd	nd
		6	nd	nd
		7	nd	nd
		8	nd	nd
		9	23	23
		10	23	23
		11	23	9
		12	23	9
Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)			0.2145	0.2602
Límite de detección				

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Coliformes	
			Totales (NMP/100ml)	Fecales (NMP/100ml)
Fondos	Sequía	1		
		2		
		3		
		4		
		5	4.3	0.36
		6		
		7	9.3	9.3
		8		
		9		
		10	4.3	2.3
		11		
		12		
	Posterior a las lluvias	1		
		2		
		3		
		4		
		5	4.3	0.36
		6		
		7	9.3	9.3
		8		
		9		
		10	4.3	2.3
		11		
		12		
Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)			-	-
Límite de detección				

Presa “Abelardo Rodríguez”

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Parámetros de campo				
			OD (mg/L)	Temp (°C)	pH	Cond (μS)	Turb (NTU)
Columna de agua	Sequía	1	4.62	20.3	8.12	291	9
		2	3.61	19.5	7.92	293	11
		3	3.68	20.2	8.01	295	9
		4	5.04	18.8	8.84	294	10
		5	4.84	19.3	8.84	298	11
		6	4.83	19.7	8.49	286	9
		7	5.04	21.5	8.33	283	14
	Posterior a las lluvias	1	5.65	17.5	8.49	244	4
		2	5.49	16.6	8.38	265	7
		3	4.82	15.7	8.06	276	10
		4	5.18	15.8	8.27	271	8
		5	5.14	15.9	8.19	265	8
		6	4.91	16.6	8.21	244	15
		7	5.82	16.7	8.49	267	6
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.0476	0.0022	0.8983	0.0022	0.2433
Fondos	Sequía	1	4.46	20.2	8.91	286	184
		2	1.86	19	8.65	300	154
		3	0.14	18	7.59	302	609
		4	0.1	17.6	7.79	296	>800
		5	2.07	17.9	8.22	300	677
		6	2.83	18.7	8.20	293	23
		7	2.08	18.7	8.74	295	189
	Posterior a las lluvias	1	6.68	20.2	8.57	262	25
		2	1.83	19	7.59	270	>800
		3	0.14	18	7.56	273	>800
		4	0.10	17.6	7.63	279	>800
		5	2.07	17.9	7.65	259	>800
		6	2.83	18.7	7.89	221	>800
		7	2.08	18.7	8.03	262	427
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			1.000	1.000	0.0842	0.0845	0.1102
Límite de detección				0.1	0.1	0.1	

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Materia orgánica		Sólidos		
			DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	STT (mg/L)	SDT (mg/L)	SST (mg/L)
Columna de agua	Sequía	1	35	112	210	166	44
		2	18	90	317	295	22
		3	27	109	238	217	21
		4	18	83	315	261	54
		5	22	77	348	297	51
		6	21	77	260	203	57
		7	32	117	340	279	61
	Posterior a las lluvias	1	5	65	280	272	8
		2	5	57	320	314	6
		3	10	99	200	168	32
		4	5	76	200	190	10
		5	5	71	260	230	30
		6	5	57	320	316	4
		7	5	81	300	294	6
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.0014	0.0405	0.7983	0.5259	0.0106
Fondos	Sequía	1	36	120	1250	650	600
		2	58	269	630	138.6	491.4
		3	102	252	990	217.8	772.2
		4	68	168	3530	529.5	3000.5
		5	102	327	1480	473.6	1006.4
		6	21	88	445	338.2	106.8
		7	77	405	1160	1078.8	81.2
	Posterior a las lluvias	1	25	130	240	180	60
		2	5	92	1700	480	1220
		3	135	968	7260	2927	4333
		4	60	608	2260	560	1700
		5	54	568	9860	660	9200
		6	12	136	2300	500	1800
		7	17	242	1120	187	933
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.1599	0.6093	0.2013	0.7015	0.1252
Límite de detección			0.5	0.2	0.1	0.1	0.1

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Nutrientes		Tóxicos Orgánicos		
			Pt (mgPO ₄ /L)	Nt (mg/L)	Fenoles (mg/L)	Anilinas (mg/L)	SAAM (mg/L)
Columna de agua	Sequía	1	0.44	5	nd	3.93	0.11
		2	0.46	21	0.026	3.52	0.12
		3	0.40	8	0.024	3.60	0.15
		4	0.35	14	nd	2.23	0.10
		5	0.44	14	nd	3.24	0.06
		6	0.53	6	nd	3.42	0.08
		7	0.48	21	nd	3.48	0.18
	Posterior a las lluvias	1	0.19	1	nd	nd	nd
		2	0.28	2	nd	nd	nd
		3	0.26	3	nd	2.5	nd
		4	0.27	2	nd	nd	nd
		5	0.25	1	nd	nd	nd
		6	0.20	2	nd	nd	nd
		7	0.02	3	nd	2.32	nd
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.0022	0.0020	-	0.0017	-
Fondos	Sequía	1	1.6	6	nd	1.01	0.09
		2	4.25	16	0.038	1.79	0.05
		3	4.1	18	0.051	2.68	0.17
		4	2.63	8	0.127	5.46	0.11
		5	6.05	26	0.681	10.69	0.09
		6	2.3	26	nd	5.48	0.09
		7	5.65	32	0.003	4.51	0.09
	Posterior a las lluvias	1	0.41	3	nd	2.3	nd
		2	0.73	14	nd	10.58	nd
		3	5.35	120	nd	53	nd
		4	6.10	166	nd	64	nd
		5	3.70	72	nd	40.6	nd
		6	0.58	11	nd	10.33	nd
		7	0.78	23	nd	10.15	nd
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.2502	0.6093	-	0.0409	-
Límite de detección			0.06	2	0.001		0.05

	Campaña de muestreo	E. C.	Metales							
			As (µg/L)	Hg (µg/L)	Cu (mg/L)	Cr (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Zn (mg/L)	Al (mg/L)
Columna de agua	Sequía	1	3.66	0.34	nd	nd	0.15	0.09	nd	nd
		2	4.38	0.32	nd	nd	0.15	0.10	nd	nd
		3	3.88	0.29	nd	nd	0.10	0.11	nd	nd
		4	4.13	0.42	nd	nd	0.12	0.10	nd	nd
		5	3.84	0.31	nd	nd	0.13	0.09	nd	nd
		6	4.13	0.21	nd	nd	0.41	0.12	nd	0.43
		7	3.72	0.25	nd	nd	0.11	0.08	nd	0.55
	Posterior a las lluvias	1	3.6	0.54	nd	nd	0.14	0.10	nd	nd
		2	3.7	0.57	nd	nd	0.13	0.10	nd	nd
		3	4.2	1.56	nd	nd	0.16	0.12	nd	nd
		4	3.8	0.42	nd	nd	0.14	0.11	nd	nd
		5	3.2	0.63	nd	nd	0.13	0.11	nd	nd
		6	3.7	0.42	nd	nd	2.16	0.13	nd	nd
		7	4.1	0.43	nd	nd	2.35	0.12	nd	0.16
Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)			0.6093	0.0073	-	-	0.2502	0.0213	-	0.4770
Fondos	Sequía	1	10.20	0.31	nd	nd	12.8	0.95	0.05	14.59
		2	3.75	nd	nd	nd	0.17	0.13	nd	0.09
		3	10.03	0.37	nd	nd	12.55	1.67	0.03	12.86
		4	9.20	0.43	nd	nd	5.75	1.03	0.03	8.60
		5	19.77	0.37	nd	nd	42.6	2.53	0.14	47.45
		6	5.13	nd	nd	nd	0.97	0.03	nd	1.12
		7	36.07	0.47	nd	nd	29.12	4.85	0.06	0.64
	Posterior a las lluvias	1	4.5	0.36	nd	nd	0.54	0.20	nd	1.24
		2	7.1	0.36	nd	nd	5.27	0.06	0.01	9.60
		3	8.1	0.51	nd	nd	5.75	0.22	0.01	8.21
		4	33.9	0.97	nd	nd	52.3	4.10	0.14	87.63
		5	79.7	0.88	0.07	0.07	107	14.30	0.37	250.47
		6	7.6	0.57	nd	nd	4.72	0.58	0.01	7.94
		7	12.2	0.39	nd	nd	2.1	3	0.02	10.70
Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)			1.000	0.0732	-	-	0.9491	0.8993	0.7983	0.4433
Límite de detección			0.3	0.3	0.023	0.024	0.025	0.012	0.005	0.13

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Coliformes	
			Totales (NMP/100ml)	Fecales (NMP/100ml)
Columna de agua	Sequía	1	2.1	nd
		2	9.3	nd
		3	3.6	nd
		4	0.36	nd
		5	0.91	0.36
		6	0.91	0.36
		7	9.3	2.3
	Posterior a las lluvias	1	1500	140
		2	2400	110
		3	930	230
		4	930	230
		5	15	15
		6	15	15
		7	11	7
	Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)		0.0021	0.0019
Fondos	Sequía	1		
		2		
		3	15	0.91
		4		
		5	15	7.3
		6		
		7	240	9.1
	Posterior a las lluvias	1		
		2		
		3	1500	1100
		4		
		5	160	160
		6		
		7	150	150
	Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)		0.3827	0.0809
	Límite de detección			

Presa “El Niágara”

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Parámetros de campo				
			OD (mg/L)	Temp (°C)	pH	Cond (µS)	Turb (NTU)
Columna de agua	Sequía	1	1.59	15.1	7.93	977	26
		2	2.85	15.8	7.88	2241	26
		3	7.59	18.1	8.06	986	25
		4	11.82	18.5	8.02	962	32
		5	4.45	16.4	8.05	971	37
		6	0.15	18.2	8.28	993	50
		7	0.17	19.5	7.44	3300	33
	Posterior a las lluvias	1	1.60	16.9	7.64	1011	28
		2	1.93	16.7	7.65	1006	21
		3	1.18	16.3	7.57	1000	25
		4	1.53	16.6	7.70	1062	25
		5	1.13	16.2	7.65	1040	31
		6	1.30	16.4	7.63	1079	38
		7	0.64	16.5	7.67	1185	30
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.3067	0.4817	0.0298	0.2013	0.5640
Fondos	Sequía	1	-	19	7.71	980	>800
		2	-	17.5	7.77	971	>800
		3	-	22	7.80	991	>800
		4	-	22.8	7.51	985	>800
		5	-	24.3	7.84	1003	>800
		6	-	24.8	8.08	998	>800
		7	-	27.9	7.50	1026	>800
	Posterior a las lluvias	1	0.76	16.8	7.59	1007	>800
		2	1.18	16.6	7.52	1008	>800
		3	0.32	15.9	7.08	989	>800
		4	0.69	16.0	7.41	1016	>800
		5	0.49	16.0	7.63	1079	>800
		6	0.72	16.2	7.54	1078	>800
		7	0.38	17.2	7.58	1189	>800
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			-	0.0022	0.736	0.0298	-
Límite de detección				0.1	0.1	0.1	

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Materia orgánica		Sólidos		
			DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	STT (mg/L)	SDT (mg/L)	SST (mg/L)
Columna de agua	Sequía	1	48	199	728	643	85
		2	52	247	708	648	60
		3	53	311	715	648	67
		4	83	333	655	593	62
		5	50	192	700	578	122
		6	50	322	690	649	41
		7	91	280	800	720	80
	Posterior a las lluvias	1	28	104	720	657	63
		2	33	202	940	650	290
		3	21	87	770	645	125
		4	24	94	660	580	80
		5	20	121	760	676	84
		6	12	100	560	500	60
		7	47	137	690	610	80
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.0022	0.0049			
Fondos	Sequía	1	142	816	1640	1542	98
		2	223	1876	1570	377	1193
		3	376	2912	1420	14	1406
		4	395	1900	1990	259	1731
		5	263	4300	2590	622	1968
		6	216	1440	1000	500	500
		7	144	3420	3440	206	3234
	Posterior a las lluvias	1	208	1468	920	655	265
		2	118	429	2580	655	1925
		3	2254	9232	14080	643	13437
		4	513	2230	2080	661	1419
		5	84	219	1480	701	779
		6	263	1116	6170	770	5400
		7	437	2112	1860	771	1089
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.7494	0.4433			
Límite de detección			0.5	0.2	0.1	0.1	0.1

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Nutrientes		Tóxicos Orgánicos		
			Pt (mgPO ₄ /L)	Nt (mg/L)	Fenoles (mg/L)	Anilinas (mg/L)	SAAM (mg/L)
Columna de agua	Sequía	1	32.8	106	0.028	6.3	1.10
		2	29	97	0.019	3.7	1.40
		3	26.9	70	0.020	13.1	1.57
		4	29.1	96	0.062	6.4	1.50
		5	30.8	162	0.047	5.5	1.05
		6	27.7	106	0.023	4.7	2.27
		7	23.8	118	0.031	16.3	18.10
	Posterior a las lluvias	1	6.2	70	nd	5.2	1.19
		2	6.9	80	0.044	6.5	0.65
		3	6.3	74	0.008	5.4	1.09
		4	6.4	73	0.027	nd	0.82
		5	6.3	73	0.013	5.6	1.25
		6	6.8	75	0.023	5.9	1.89
		7	7.2	86	0.039	7.9	2.59
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.0021	0.0219	0.2774	0.6093	0.2013
Fondos	Sequía	1	68	250	0.897	19.3	4.07
		2	61	280	1.878	21.1	2.78
		3	68	370	5.203	120	0.96
		4	51	430	2.627	43.7	10.59
		5	129	710	3.497	91	0.96
		6	60	320	2.902	36.5	2.78
		7	65	550	2.589	73	23.29
	Posterior a las lluvias	1	74	270	0.002	13.69	0.59
		2	13	195	4.03	9.26	1.03
		3	104	1420	0.53	144.84	2.55
		4	21	345	1.87	17.20	1.07
		5	6.5	82	0.051	15.47	3.55
		6	18	123	0.08	11.66	1.25
		7	24	335	1.30	25.41	0.85
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.1248	0.2013	0.0409	0.0553	0.1252
Límite de detección			0.06	2	0.001		0.05

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Metales				
			As (µg/L)	Hg (µg/L)	Cu (mg/L)	Cr (mg/L)	Fe (mg/L)
Columna de agua	Sequía	1	6.79	0.90	nd	nd	0.76
		2	8.48	0.86	nd	nd	0.58
		3	8.34	0.32	nd	nd	0.09
		4	9.30	1.99	nd	nd	0.29
		5	7.83	0.96	nd	nd	0.05
		6	8.66	0.69	nd	nd	0.10
		7	10.26	0.88	nd	nd	0.40
	Posterior a las lluvias	1	6.29	2.10	nd	nd	0.08
		2	9.97	nd	nd	nd	2.72
		3	5.52	nd	nd	nd	0.38
		4	7.13	nd	nd	nd	0.18
		5	6.29	nd	nd	nd	0.25
		6	5.06	0.48	nd	nd	0.09
		7	7.52	nd	nd	nd	0.08
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.0409	0.0365	-	-	0.7015
Fondos	Sequía	1	53.21	2.13	0.17	0.16	63.4
		2	37.96	3.15	0.19	0.17	60.6
		3	34.62	2.94	0.08	0.06	18.3
		4	137.56	4.04	0.32	0.16	32.5
		5	14.57	1.48	nd	nd	2.9
		6	28.08	1.76	0.09	0.06	26.3
		7	74.17	1.92	0.76	0.25	63.0
	Posterior a las lluvias	1	398.36	5.98	1.12	0.68	300
		2	88.90	nd	0.21	0.13	76
		3	108.80	1.52	0.27	0.18	67
		4	70.40	5.43	0.73	0.11	44.3
		5	34.06	0.51	0.06	0.04	11.8
		6	297.70	1.52	0.54	0.26	114.5
		7	73.06	2.45	0.22	0.15	69.3
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.0967	0.6093	0.2013	0.5229	0.0553
Límite de detección			0.3	0.3	0.023	0.024	0.025

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Metales			
			Mn (mg/L)	Zn (mg/L)	Pb (mg/L)	Al (mg/L)
Columna de agua	Sequía	1	0.05	nd	nd	nd
		2	0.07	nd	nd	0.21
		3	0.04	nd	nd	nd
		4	0.05	nd	nd	0.36
		5	0.05	nd	nd	nd
		6	0.05	nd	nd	nd
		7	0.04	nd	nd	0.60
	Posterior a las lluvias	1	0.06	0.005	nd	nd
		2	0.08	0.047	nd	4.19
		3	0.68	nd	nd	0.85
		4	0.05	nd	nd	1.86
		5	0.06	nd	nd	0.22
		6	0.06	nd	nd	nd
		7	0.04	0.007	nd	nd
Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)			0.2003	-	-	0.3395
Fondos	Sequía	1	1.84	1.165	0.180	11.96
		2	1.61	1.020	0.188	156.67
		3	0.47	0.615	nd	30.19
		4	0.29	2.325	0.225	76.20
		5	0.13	0.095	nd	15.67
		6	0.51	0.740	nd	43.15
		7	0.96	3.630	0.345	115.93
	Posterior a las lluvias	1	5.58	4.2	nd	431.88
		2	1.27	1.31	nd	104.37
		3	1.49	1.66	nd	90.7
		4	0.89	1.44	nd	49.67
		5	0.12	0.39	nd	15.09
		6	2.45	2	nd	135.61
		7	0.99	1.44	nd	104.84
Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)			0.3067	0.3065	-	0.3067
Límite de detección			0.012	0.005	0.135	0.13

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Coliformes	
			Totales (NMP/100ml)	Fecales (NMP/100ml)
Columna de agua	Sequía	1	150	36
		2	15	3.6
		3	39	9.1
		4	93	43
		5	1500	1100
		6	24000	24000
		7	24000	24000
	Posterior a las lluvias	1	460	460
		2	460	460
		3	150	150
		4	150	150
		5	2400	930
		6	2400	930
		7	9300	9300
Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)			0.5236	0.5193
Fondos	Sequía	1	150	43
		2		
		3		
		4	290	290
		5	1100	240
		6		
		7	2300	2300
	Posterior a las lluvias	1		
		2		
		3		
		4		
		5		
		6		
		7		
Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)			-	-
Límite de detección				

Cuerpo de agua “El Sabinal”

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Parámetros de campo				
			OD (mg/L)	Temp (°C)	pH	Cond (µS)	Turb (NTU)
Columna de agua	Sequía	1	1.60	19.2	7.74	1333	7
		2	1.22	18.3	7.70	1308	7
		3	1.83	19.5	7.77	1261	7
	Posterior a las lluvias	1	4.19	15.5	7.99	1220	32
		2	2.54	16.6	7.90	1183	22
		3	2.57	15.4	7.88	1177	17
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.0809				
Fondos	Sequía	1	nd	17.9	7.35	1333	>800
		2	0.93	17.6	7.29	1350	>800
		3	0.16	17.6	7.47	1316	>800
	Posterior a las lluvias	1	2.64	14.6	7.92	1235	>800
		2	0.24	15.2	7.32	1107	>800
		3	1.16	15.2	7.77	1175	>800
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)							
Límite de detección				0.1	0.1	0.1	

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Materia orgánica		Sólidos		
			DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	STT (mg/L)	SDT (mg/L)	SST (mg/L)
Columna de agua	Sequía	1	51	155	1010	798	212
		2	51	166	915	765	150
		3	106	337	1060	827	233
	Posterior a las lluvias	1	51	121	640	583	57
		2	38	84	725	658	67
		3	41	114	635	605	30
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.2752	0.0809			
Fondos	Sequía	1	74	648	2100	462	1638
		2	118	822	1830	348	1482
		3	162	850	1590	239	1351
	Posterior a las lluvias	1	198	1136	890	680	210
		2	87	480	2270	670	1600
		3	258	1214	1970	860	1110
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.3827	0.6025			
Límite de detección			0.5	0.2	0.1	0.1	0.1

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Nutrientes		Tóxicos Orgánicos		
			Pt (mgPO ₄ /L)	Nt (mg/L)	Fenoles (mg/L)	Anilinas (mg/L)	SAAM (mg/L)
Columna de agua	Sequía	1	38	80	0.689	4.50	0.11
		2	30.3	57	0.362	6.55	1.01
		3	42	320	0.621	9.60	3.80
	Posterior a las lluvias	1	9.2	59	0.039	5.91	0.16
		2	9.8	60	nd	2.84	0.14
		3	10.3	62	0.020	2.34	nd
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.0809	0.6625	0.0809	0.1904	0.3827
Fondos	Sequía	1	49.5	350	1.621	39.8	5.44
		2	28	440	1.892	45.6	1.24
		3	59.5	520	1.081	79	8.37
	Posterior a las lluvias	1	15	180	0.069	8.99	1.11
		2	19	290	0.036	17	0.90
		3	15	460	0.058	11.3	0.51
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			0.0809	0.3827	0.0809	0.0809	0.0809
Límite de detección			0.06	2	0.001		0.05

	Campaña de muestreo	E. C.	Metales							Zn (mg/L)	Al (mg/L)
			As (µg/L)	Hg (µg/L)	Cu (mg/L)	Cr (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)			
Columna de	Sequía	1	13.363	nd	nd	nd	0.126	0.227	0.007	nd	
		2	15.432	nd	nd	nd	0.094	0.194	nd	nd	
		3	13.769	nd	nd	nd	0.094	0.238	0.006	0.749	
	Posterior a las lluvias	1	17.35	0.629	nd	nd	0.325	0.430	0.030	nd	
		2	5.44	0.227	nd	nd	0.128	0.265	0.011	nd	
		3	12.58	0.227	nd	0.068	0.148	0.310	nd	nd	
Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)			0.6625	-	-	-	0.0809	0.0809	0.5127	-	
Fondos	Sequía	1	33.870	0.507	0.459	0.041	42.7	2.35	0.950	90.044	
		2	17.756	nd	0.214	0.027	23.6	1.07	0.349	44.356	
		3	81.036	0.412	0.279	0.028	38.4	1.20	0.454	78.559	
	Posterior a las lluvias	1	21.94	0.277	nd	0.031	11.8	0.93	0.139	17.82	
		2	35.46	0.327	0.178	0.081	71	2.20	0.458	92.31	
		3	65.08	0.865	0.271	0.083	68	2.50	0.930	110.08	
Valor de p (Prueba de Mann-Whitney)			1	1	0.1904	0.1904	0.6625	1	1	0.6025	
Límite de detección			0.3	0.3	0.023	0.024	0.025	0.012	0.005	0.13	

	Campaña de muestreo	Estaciones de colecta	Coliformes	
			Totales (NMP/100ml)	Fecales (NMP/100ml)
Columna de agua	Sequía	1	4600	4600
		2	4600	4600
		3	4600	4600
	Posterior a las lluvias	1	430	430
		2	460	240
		3	93	23
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)				
Fondos	Sequía	1	4600	4600
		2	4600	4600
		3		
	Posterior a las lluvias	1	1100	1100
		2		
		3	460	460
Valor de <i>p</i> (Prueba de Mann-Whitney)			-	-
Límite de detección				

ANEXO 4. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS EN EL CAUCE DE LOS RÍOS SAN PEDRO Y EL CHICALOTE.

Muestras de agua

Análisis descriptivo de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos determinados en las muestras de agua del cauce del río **San Pedro** en las dos épocas de muestreo.

Parámetro (mg/L)	EM	Mínimo	Q1 (25%)	Media	Mediana	Q3 (75%)	Máximo	Dev. Std.
DQO	S	64.00	367.00	948.44	660.00	881.00	13550.00	2054.68
	L	38.00	215.00	663.59	553.00	760.00	4750.00	766.90
DBO	S	2.00	56.00	295.95	108.00	203.00	5901.00	910.29
	L	3.00	36.00	212.41	112.00	264.00	2153.00	354.19
N_t	S	0.00	100.00	151.61	132.00	194.00	410.00	77.00
	L	11.00	88.00	173.29	129.00	164.00	1050.00	189.64
N-NH₃	S	0.00	27.00	46.10	31.00	49.00	460.00	68.93
	L	0.01	23.00	42.43	30.00	45.00	210.00	43.04
P_t	S	9.00	13.00	16.17	15.00	17.00	40.00	6.30
	L	4.00	12.00	17.42	17.00	21.00	47.00	8.05
G y A	S	3.00	18.00	64.54	57.00	85.00	258.00	61.63
	L	0.44	26.00	66.16	52.00	89.00	315.00	59.93
STT	S	565.00	920.00	1463.90	1090.00	1480.00	7695.00	1452.48
	L	480.00	745.00	1100.41	1095.00	1345.00	2850.00	442.31
SDT	S	457.00	703.00	969.29	881.00	1093.00	4095.00	573.90
	L	445.00	720.00	859.76	895.00	1025.00	1525.00	232.28
SST	S	18.00	108.00	494.61	200.00	345.00	6988.00	1172.45
	L	12.00	64.00	242.00	148.00	325.00	1863.00	318.06
Anilina	S	1.00	18.00	44.93	30.00	38.00	660.00	100.72
	L	6.00	21.00	36.80	28.50	43.50	154.00	32.40
SAAM	S	0.00	21.00	37.20	35.00	53.00	91.00	24.16
	L	1.00	17.00	39.53	32.50	63.00	101.00	28.44
Fenoles	S	0.000	0.140	0.370	0.330	0.430	2.57	0.441
	L	0.000	0.000	0.134	0.000	0.030	2.14	0.383
CF (Log NMP/100mL)	S	1.36	4.66	5.91	6.18	7.18	8.45	1.736
	L	0.00	5.66	5.72	6.18	7.04	9.04	2.054
pH	S	6.60	7.30	7.55	7.60	7.80	8.00	0.32
	L	7.20	7.49	7.71	7.75	7.90	8.30	0.29
OD (mg/L)	S	0.04	0.17	0.69	0.28	0.48	3.56	0.99
	L	0.00	0.13	0.85	0.42	1.05	5.00	1.14
Cond (μS/cm ²)	S	481.00	1172.00	1679.27	1516.00	1732.00	5000.00	998.21
	L	483.00	948.00	1339.65	1220.00	1577.00	4500.00	679.55

EM: Época de muestreo. S: Sequía. L: Lluvia

Análisis descriptivo de Metales pesados determinados en las muestras de agua del cauce del río San Pedro en las dos épocas de muestreo.

Metal (mg/L)	EM	Mínimo	Q1 (25%)	Media	Mediana	Q3 (75%)	Máximo	Dev. Std.
Al	S	0.000	0.140	2.919	0.780	2.050	54.000	8.599
	L	0.000	0.000	0.568	0.000	0.680	4.780	1.141
As	S	0.000	0.010	0.012	0.010	0.010	0.070	0.012
	L	0.000	0.000	0.004	0.000	0.010	0.020	0.006
Cr	S	0.000	0.000	0.071	0.010	0.010	2.100	0.333
	L	0.000	0.000	0.005	0.000	0.010	0.060	0.010
Cu	S	0.000	0.004	0.072	0.020	0.040	1.900	0.294
	L	0.000	0.000	0.013	0.000	0.014	0.110	0.026
Fe	S	0.070	0.390	1.976	0.840	1.790	18.600	3.375
	L	0.000	0.000	0.553	0.000	0.580	3.790	0.919
Hg	S	0.000	0.000	0.003	0.001	0.001	0.036	0.008
	L	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.010	0.002
Mn	S	0.010	0.040	0.141	0.060	0.140	1.010	0.206
	L	0.000	0.000	0.062	0.000	0.060	0.440	0.119
Zn	S	0.010	0.050	0.227	0.110	0.160	3.350	0.528
	L	0.000	0.000	0.067	0.000	0.090	0.460	0.113

EM: Época de muestreo. S: Sequía. L: Lluvia

Análisis descriptivo de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos determinados en las muestras de agua del cauce del río El Chicalote en las dos épocas de muestreo.

Parámetro (mg/L)	EM	Mínimo	Q1 (25%)	Media	Mediana	Q3 (75%)	Máximo	Dev. Std.
DQO	S	405.00	788.00	3246.39	1224.00	1752.00	33225.00	7582.27
	L	497.00	783.00	2602.82	1204.00	1593.00	19325.00	4587.74
DBO	S	19.00	104.00	1286.28	253.00	564.00	15766.00	3676.79
	L	85.00	200.00	1080.76	416.00	669.00	9122.00	2195.09
N _t	S	50.00	129.00	294.39	164.50	228.00	1200.00	334.54
	L	83.00	140.00	297.29	240.00	294.00	1150.00	275.50
N-NH ₃	S	8.00	23.00	43.56	27.00	40.00	300.00	65.04
	L	8.00	28.00	69.41	54.00	77.00	365.00	81.78
P _t	S	10.00	16.00	33.56	21.00	39.00	170.00	36.44
	L	6.00	20.00	34.59	25.00	31.00	128.00	32.31
G y A	S	5.00	30.00	190.61	103.50	156.00	1470.00	332.98
	L	14.00	42.00	148.06	75.00	138.00	803.00	209.25
STT	S	820.00	1315.00	3743.44	1612.50	4340.00	20715.00	5220.52
	L	670.00	1025.00	2016.76	1205.00	1505.00	11445.00	2527.27
SDT	S	693.00	805.00	2054.50	947.00	1235.00	16580.00	3721.68
	L	447.00	770.00	1515.47	825.00	1292.00	9170.00	2034.27
SST	S	62.00	340.00	1688.94	636.00	1719.00	13197.00	3103.59
	L	83.00	248.00	509.53	350.00	555.00	2275.00	518.55
Anilina	S	28.00	39.00	140.39	56.50	131.00	956.00	223.01
	L	24.00	33.00	59.94	45.00	58.00	170.00	41.83
SAAM	S	0.00	21.00	55.67	50.50	81.00	170.00	43.67
	L	0.00	23.00	46.76	45.00	68.00	112.00	31.33
Fenoles	S	0.080	0.230	0.644	0.490	0.740	2.800	0.654
	L	0.000	0.000	0.159	0.000	0.000	1.230	0.337
CF (Log NMP/100mL)	S	0.130	0.240	1.063	0.595	0.900	4.080	1.253
	L	0.000	0.080	0.966	0.265	0.860	9.240	2.141
pH	S	4.10	7.30	7.58	7.70	7.80	10.50	1.17
	L	0.00	7.30	7.26	7.80	8.00	9.40	2.12
OD (mg/L)	S	0.13	0.24	1.06	0.60	0.90	4.08	1.25
	L	0.00	0.08	0.97	0.27	0.86	9.24	2.14
Cond (μS/cm ²)	S	720.00	1078.00	1844.61	1377.00	1920.00	5140.00	1254.76
	L	0.00	1181.00	1730.39	1399.00	1926.00	3950.00	1001.63

EM: Época de muestreo. S: Sequía. L: Lluvia

Análisis descriptivo de Metales pesados determinados en las muestras de agua del cauce del río **El Chicalote** en las dos épocas de muestreo.

Metal (mg/L)	EM	Mínimo	Q1 (25%)	Media	Mediana	Q3 (75%)	Máximo	Dev. Std.
Al	S	0.060	0.830	18.134	1.830	4.780	213.000	50.791
	L	0.000	0.000	1.298	0.730	1.620	5.850	1.736
As	S	0.000	0.010	0.013	0.010	0.010	0.060	0.014
	L	0.000	0.000	0.006	0.010	0.010	0.010	0.005
Cr	S	0.000	0.000	0.188	0.000	0.020	3.260	0.767
	L	0.000	0.000	0.021	0.010	0.020	0.150	0.036
Cu	S	0.000	0.020	0.056	0.035	0.070	0.280	0.066
	L	0.000	0.000	0.018	0.010	0.030	0.080	0.021
Fe	S	0.200	0.610	4.068	1.580	2.660	22.600	7.018
	L	0.000	0.000	0.994	0.560	1.220	4.810	1.350
Hg	S	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001
	L	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.006	0.001
Mn	S	0.020	0.050	0.417	0.065	0.080	4.400	1.063
	L	0.000	0.000	0.077	0.030	0.070	0.410	0.114
Zn	S	0.040	0.110	0.758	0.170	0.290	10.300	2.385
	L	0.000	0.000	0.140	0.090	0.240	0.500	0.155

EM: Época de muestreo. S: Sequía. L: Lluvia

Muestras de Sedimentos

Análisis descriptivo de las concentraciones de materias orgánicas, nutrientes y tóxicos orgánicos, encontradas en las dos campañas de muestreo de los sedimentos del cauce del río San Pedro.

Parámetro (mg/Kg)	EM	Mínimo	Q1 (25%)	Media	Mediana	Q3 (75%)	Máximo	Dev. Std
DQO	S	2868	6283	15804	7921	69812	15821	17416.34
	L	2063	5593	19565	7001	180651	15083	36515.37
N_t	S	0.00	159.83	538.11	319.34	3339.60	480.00	655.41
	L	0.00	318.56	1885.24	476.04	30444.80	954.73	5981.80
N-NH₃	S	0.00	19.33	83.82	38.19	303.40	129.17	85.91
	L	1.75	34.55	124.65	65.86	511.60	174.55	137.88
P_t	S	47.99	89.42	214.27	137.44	795.10	238.97	187.09
	L	59.04	111.88	1237.05	148.09	16661.70	314.62	3369.60
Anilinas	S	231.89	429.46	862.65	496.29	3184.20	933.12	810.57
	L	179.30	449.10	991.83	803.06	3780.50	1323.65	790.65
Fenoles	S	0.00	0.87	9.27	2.99	51.00	9.43	13.35
	L	0.00	1.10	7.25	3.38	54.70	8.93	11.88
SAAM	S	24.01	93.75	481.36	124.93	2658.80	554.67	669.83
	L	20.85	49.94	243.97	105.59	2683.80	160.86	536.16
pH	S	5.70	7.20	7.58	7.70	8.20	8.70	0.72
	L	5.50	7.00	7.39	7.50	7.90	9.20	0.83

EM: Época de muestreo. S: Sequía. L: Lluvia

Análisis descriptivo de las concentraciones de Metales Pesados, encontradas en las dos campañas de muestreo de los sedimentos del cauce del río San Pedro.

Parámetro (mg/Kg)	EM	Mínimo	Q1 (25%)	Media	Mediana	Q3 (75%)	Máximo	Dev. Std
Al	S	3474.57	4573.43	10612.51	6071.03	11533.17	44610.78	10176.69
	L	1233.11	3736.70	5747.21	4611.47	6430.50	19525.80	3577.65
As	S	0.29	4.11	15.57	13.70	24.33	43.79	12.45
	L	4.68	7.63	18.15	13.04	23.50	86.79	17.95
Cd	S	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00	3.01	0.78
	L	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.30	0.10
Cr	S	3.22	6.75	12.31	9.92	16.77	32.58	7.54
	L	2.40	4.20	8.83	6.90	8.99	29.32	6.67
Cu	S	4.81	12.87	38.30	23.98	44.92	167.58	40.04
	L	5.71	9.58	31.77	23.94	41.92	116.64	27.61
Fe	S	4157.80	4962.52	9225.34	7911.10	11598.40	23614.99	4931.28
	L	1794.97	4850.30	6675.71	6403.35	8034.38	14518.06	2588.31
Hg	S	0.11	0.27	0.62	0.44	0.62	4.87	0.87
	L	0.16	0.32	0.43	0.36	0.53	0.94	0.20
Mn	S	53.95	152.74	216.66	188.62	252.38	517.86	111.91
	L	59.82	137.74	204.94	188.79	221.47	531.53	105.65
Pb	S	5.67	12.99	30.26	24.55	30.28	126.27	26.64
	L	3.59	15.28	25.70	21.55	28.69	91.75	18.26
Zn	S	6.00	43.06	219.51	121.15	284.69	903.74	249.06
	L	29.04	64.02	185.04	127.44	260.48	745.58	175.44

EM: Época de muestreo. S: Sequía. L: Lluvia

Análisis descriptivo de las concentraciones de materias orgánicas, nutrientes y tóxicos orgánicos, encontradas en las dos campañas de muestreo de los sedimentos del cauce del río **El Chicalote**.

Parámetro (mg/Kg)	EM	Mínimo	Q1 (25%)	Media	Mediana	Q3 (75%)	Máximo	Dev. Std
DQO	S	5435.11	8632.58	15123.12	8632.58	11842.26	17057.23	13694.11
	L	4293.89	11108.91	20379.14	11108.91	15278.72	22974.75	15761.88
N_t	S	159.53	316.14	574.40	316.14	477.96	799.54	413.56
	L	318.72	476.10	571.93	476.10	477.46	637.56	252.71
N-NH₃	S	73.54	100.90	199.76	100.90	181.40	286.91	119.25
	L	5.58	28.38	87.85	28.38	74.75	122.43	75.74
P_t	S	41.44	94.74	598.72	94.74	162.93	277.58	1606.11
	L	71.53	82.79	325.04	82.79	139.92	177.76	707.11
Anilinas	S	378.14	462.83	769.66	462.83	650.57	733.96	498.88
	L	440.70	512.37	870.86	512.37	714.49	1096.36	439.59
Fenoles	S	1.23	2.39	8.25	2.39	2.76	6.03	15.70
	L	1.01	2.02	11.66	2.02	5.86	16.89	13.52
SAAM	S	190.24	393.05	1001.75	393.05	530.88	929.34	1338.83
	L	19.30	84.89	951.44	84.89	176.58	1322.21	1385.66
pH	S	7.30	7.80	7.95	7.90	8.00	8.80	0.37
	L	7.00	7.10	7.55	7.50	8.00	8.70	0.51

EM: Época de muestreo. S: Sequía. L: Lluvia

Análisis descriptivo de las concentraciones de Metales Pesados, encontradas en las dos campañas de muestreo de los sedimentos del cauce del **río El Chicalote**.

Parámetro (mg/Kg)	EM	Mínimo	Q1 (25%)	Media	Mediana	Q3 (75%)	Máximo	Dev. Std
Al	S	2218.42	4200.18	6503.27	5465.47	9768.95	14328.91	3789.90
	L	2166.37	4891.43	9211.85	7220.72	14919.16	24857.66	6336.47
As	S	0.29	1.95	8.19	8.10	12.10	21.19	6.56
	L	5.10	6.77	9.55	8.43	10.57	22.86	4.33
Cd	S	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.86	0.26
	L	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	1.20	0.34
Cr	S	0.90	4.18	15.74	7.85	19.76	71.89	19.05
	L	2.99	7.79	50.32	14.09	86.67	165.07	58.66
Cu	S	2.70	11.73	33.33	26.28	46.70	89.86	27.36
	L	5.99	19.49	54.28	58.18	64.72	174.07	40.35
Fe	S	589.70	4691.15	7419.76	7214.13	8963.80	17794.59	4335.00
	L	3504.04	4672.52	7593.61	7373.36	10645.74	13248.08	3116.09
Hg	S	0.05	0.22	0.38	0.33	0.42	1.02	0.25
	L	0.22	0.31	0.41	0.39	0.50	0.69	0.13
Mn	S	31.88	93.13	130.74	122.83	168.08	242.83	61.17
	L	60.58	119.94	278.17	176.89	278.17	1556.06	365.39
Pb	S	0.00	6.64	15.75	14.48	20.39	40.35	11.99
	L	11.07	12.90	23.89	23.63	26.94	48.47	11.80
Zn	S	5.70	42.64	217.61	102.25	127.24	1113.55	335.19
	L	16.47	96.39	267.10	200.68	446.60	842.24	232.49

EM: Época de muestreo. S: Sequía. L: Lluvia

Matriz de correlación de los parámetros fisicoquímicos en agua y sedimentos del cauce del río San Pedro.

Agua Sed	DQO 1	DQO 2	N _t 1	N _t 2	N-NH ₃ 1	N-NH ₃ 2	P _t 1	P _t 2
DQO 1	-0.08	-0.03	-0.11	-0.04	0.09	0.14	-0.12	-0.01
DQO 2	0.06	0.25	0.25	0.30	0.56	0.44	0.44	0.05
N _t 1	0.25	0.25	0.32	0.19	-0.14	-0.20	0.21	0.35
N _t 2	-0.07	0.03	0.07	0.07	0.53	0.35	0.22	-0.05
N-NH ₃ 1	0.29	0.22	0.33	0.25	-0.36	0.04	-0.03	-0.29
N-NH ₃ 2	-0.11	-0.06	-0.02	0.00	0.56	0.28	0.21	-0.01
P _t 1	-0.11	0.00	-0.07	-0.01	0.08	-0.15	0.00	0.27
P _t 2	-0.21	-0.09	-0.07	-0.08	0.36	0.13	0.04	0.29

1: Época de Sequía. 2: Época posterior a las lluvias

Continuación... Matriz de correlación de los parámetros fisicoquímicos en agua y sedimentos del cauce del río San Pedro.

Agua Sed	Anilinas 1	Anilinas 2	Fenoles 1	Fenoles 2	SAAM 1	SAAM 2
Anilinas 1	-0.05	0.14	0.19	-0.21	-0.15	-0.07
Anilinas 2	-0.09	-0.01	-0.13	-0.13	-0.17	-0.07
SAAM 1	0.04	0.08	0.03	-0.05	-0.07	-0.24
SAAM 2	0.09	-0.03	0.01	-0.08	-0.03	-0.11
Fenoles 1	0.31	0.10	0.04	0.02	0.08	0.05
Fenoles 2	-0.10	0.19	0.13	-0.12	-0.16	-0.14

1: Época de Sequía. 2: Época posterior a las lluvias

Matriz de correlación de los metales pesados en agua y sedimentos del cauce del río San Pedro.

Agua Sed	Al 1	Al 2	As 1	As 2	Cr 1	Cr 2	Cu 1	Cu 2
Al 1	-0.20	-0.19	-0.10	0.27	0.01	0.10	-0.10	0.06
Al 2	0.32	0.03	0.07	-0.08	0.06	-0.05	-0.10	-0.16
As 1	0.11	-0.29	0.35	-0.15	0.28	-0.06	0.14	-0.04
As 2	0.05	0.25	-0.11	-0.03	0.09	-0.23	-0.10	-0.21
Cr 1	-0.06	0.01	-0.10	-0.13	-0.23	-0.12	-0.15	-0.16
Cr 2	0.04	-0.10	0.04	0.17	0.09	-0.03	-0.23	-0.21
Cu 1	-0.31	-0.21	-0.54	0.03	0.19	0.26	-0.09	-0.02
Cu 2	-0.09	-0.02	0.05	0.37	-0.10	-0.18	-0.07	-0.02

1: Época de Sequía. 2: Época posterior a las lluvias.

Continuación...Matriz de correlación de los metales pesados en agua y sedimentos del cauce del río San Pedro.

Agua Sed	Fe 1	Fe 2	Hg 1	Hg 2	Mn 1	Mn 2	Zn 1	Zn 2
Fe 1	-0.17	-0.12	-0.07	-0.37	-0.03	-0.14	-0.15	-0.18
Fe 2	0.08	-0.02	-0.16	-0.27	0.38	-0.09	-0.20	-0.25
Hg 1	-0.36	0.35	-0.04	-0.15	-0.19	0.30	0.07	-0.26
Hg 2	-0.28	-0.04	-0.09	-0.26	-0.14	0.07	0.30	-0.22
Mn 1	0.12	-0.07	-0.07	0.10	-0.20	-0.06	-0.24	0.22
Mn 2	0.10	0.03	-0.08	-0.13	0.33	-0.07	-0.22	-0.16
Zn 1	-0.13	0.09	-0.09	0.02	0.57	0.11	-0.15	-0.14
Zn 2	0.06	0.02	-0.18	-0.30	0.45	-0.05	-0.20	-0.26

1: Época de Sequía. 2: Época posterior a las lluvias

Matriz de correlación de los parámetros fisicoquímicos en agua y sedimentos del cauce del río El Chicalote.

Agua Sed	DQO 1	DQO 2	N _t 1	N _t 2	N-NH ₃ 1	N-NH ₃ 2	Pt 1	Pt 2
DQO 1	-0.01	0.55	0.28	-0.13	-0.18	0.12	-0.06	-0.05
DQO 2	0.00	0.53	0.25	-0.18	-0.11	0.05	-0.11	-0.08
N _t 1	-0.05	0.30	0.12	-0.22	-0.06	0.08	-0.11	-0.08
N _t 2	-0.15	0.27	-0.08	-0.15	-0.20	0.14	-0.10	-0.10
N-NH ₃ 1	-0.08	-0.10	-0.17	-0.16	-0.07	0.09	-0.09	-0.10
N-NH ₃ 2	-0.14	-0.08	-0.25	-0.08	-0.09	0.09	-0.05	-0.06
P _t 1	-0.01	0.52	0.24	-0.19	-0.17	0.06	-0.12	-0.10
P _t 2	-0.01	0.36	0.21	-0.16	0.03	-0.08	-0.12	-0.05

1: Época de Sequía. 2: Época posterior a las lluvias.

Continuación... Matriz de correlación de los parámetros fisicoquímicos en agua y sedimentos del cauce del río El Chicalote.

Agua Sed	Anilinas 1	Anilinas 2	Fenoles 1	Fenoles 2	SAAM 1	SAAM 2
Anilinas 1	0.02	-0.30	0.18	0.10	-0.06	-0.27
Anilinas 2	0.46	-0.12	0.50	-0.28	0.10	-0.31
Fenoles 1	-0.11	0.26	-0.29	0.45	-0.23	0.04
Fenoles 2	-0.23	0.12	-0.17	0.43	-0.22	0.07
SAAM 1	-0.12	-0.01	-0.20	0.15	0.00	-0.08
SAAM 2	-0.11	0.31	-0.40	0.57	0.03	0.16

1: Época de Sequía. 2: Época posterior a las lluvias.

Matriz de correlación de metales pesados en agua y sedimentos del cauce del río El Chicalote.

Agua Sed	Al 1	Al 2	As 1	As 2	Cr 1	Cr 2	Cu 1	Cu 2
Al 1	-0.23	-0.34	-0.05	-0.09	-0.07	0.15	-0.06	-0.19
Al 2	-0.44	-0.27	0.20	-0.11	0.30	0.47	0.53	-0.22
As 1	0.09	-0.20	0.23	0.18	0.36	0.61	0.55	-0.04
As 2	-0.67	-0.25	-0.21	-0.29	0.16	0.42	0.56	-0.17
Cr 1	-0.05	-0.02	0.48	0.09	0.40	0.60	0.57	-0.03
Cr 2	-0.28	-0.02	0.37	-0.02	0.44	0.59	0.62	-0.12
Cu 1	-0.25	-0.17	0.30	0.00	0.36	0.74	0.61	0.08
Cu 2	-0.38	-0.12	0.24	0.03	0.32	0.60	0.71	-0.18

1: Época de Sequía. 2: Época posterior a las lluvias.

Continuación... Matriz de correlación de metales pesados en agua y sedimentos del cauce del río El Chicalote.

Agua Sed	Fe 1	Fe 2	Hg 1	Hg 2	Mn 1	Mn 2	Zn 1	Zn 2
Fe 1	-0.40	-0.44	-0.01	0.11	-0.20	-0.14	0.58	0.37
Fe 2	-0.48	-0.20	0.54	-0.14	-0.31	-0.03	0.60	0.20
Hg 1	0.46	0.11	-0.07	0.07	-0.38	0.00	0.09	0.47
Hg 2	-0.39	0.04	0.34	-0.13	-0.04	0.19	0.31	-0.10
Mn 1	-0.38	-0.40	-0.13	0.46	-0.21	-0.06	0.13	0.10
Mn 2	-0.49	-0.39	-0.17	0.37	-0.22	0.36	0.14	-0.04
Zn 1	-0.19	-0.29	0.02	-0.43	-0.08	-0.02	0.92	0.55
Zn 2	-0.42	-0.15	0.11	0.38	-0.41	0.56	0.37	0.32

1: Época de Sequía. 2: Época posterior a las lluvias.

ANEXO 5. CARTAS DE ACEPTACIÓN Y MANUSCRITOS DE LOS ARTÍCULOS.

31/03/2011 Fwd: Centro de Ciencias de la Atmós...

YAHOO! CORREO
MÉXICO Clásico

Fwd: Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM miércoles, 16 de marzo de 2011, 9:20

De: "Dr. Francisco Javier Avelar González" <fjavelar@correo.uaa.mx>
 Para: guildagc@yahoo.com.mx, guildagc@hotmail.com, fjavelar@yahoo.com, alguem@correo.uaa.mx
 2 Archivos (2475KB)

 
 Art. 2a ver Comentarli

Hola Guilda:

Respondieron ya de la revista de la UNAM... el artículo está aceptado, sólo falta hacer algunos ajustes de redacción, los cuales debemos de hacer de inmediato...
 Le reenvío el correo a Conso, espero que esta respuesta sí alcance para que te puedas graduar también de inmediato...

Saludos cordiales,

Javier Avelar

----- Mensaje original -----
 Asunto: Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
 Fecha: Tue, 15 Mar 2011 22:44:31 -0500
 De: Diana Franco <df Franco@atmosfera.unam.mx>
 Para: fjavelar@correo.uaa.mx
 CC: claudio.amescua@atmosfera.unam.mx, acosta@atmosfera.unam.mx

Estimado Dr. Francisco Javier Avelar González:

Mos es grato informarle que su artículo "Evaluación espacio-temporal de la calidad del agua del río San Pedro en el estado de Aguascalientes, México" ha sido aceptado para su publicación en la Revista Internacional de Contaminación Ambiental.

Es necesario hacer unas últimas correcciones y enviar el artículo en su versión final a la brevedad. Desde el punto de vista científico su trabajo ha sido aceptado, los comentarios a considerar son:

- Incluir los comentarios del revisor (documentos adjuntos).
- Revisar la redacción final del trabajo.

Cumpliendo con lo anterior con gusto recibiremos su trabajo y les será enviada su Carta Aceptación.

Le solicitamos acuse de recibo de este mensaje.

Atentamente,

...yahoo.com/mc/showMessage?sMid...

1/2

31/03/2011

FWD: RE: ENVIO VERSIÓN FINAL DE ARTICULO...

YAHOO! CORREO
MÉXICO Clásico

Fwd: Re: Envío versión final de Artículo

viernes, 25 de marzo de 2011, 16:28

De: "Dr. Francisco Javier Avelar Gonzalez" <fjavelar@correo.uaa.mx>
 Para: "gilda guzman" <gildago@yahoo.com.mx>, gildago@hotmail.com, "Ma. Consolación Martínez Saldaña" <mcmtzsal@correo.uaa.mx>, alguere@correo.uaa.mx

Hola Gilda:

Creo que ahora sí podrás titularle...

Saludos afectuosos,

Javier Avelar

----- Mensaje original -----

Asunto: Re: Envío versión final de Artículo

Fecha: Fri, 25 Mar 2011 09:23:14 -0500

De: Diana Franco <dfranco@atmosfera.unam.mx>Para: Dr. Francisco Javier Avelar Gonzalez <fjavelar@correo.uaa.mx>CC: claudio.amescua@atmosfera.unam.mx, acosta@atmosfera.unam.mx

Estimado Dr. Francisco Javier Avelar González:

Reciba un cordial saludo, hemos recibido la versión final de su artículo EVALUACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO SAN PEDRO EN EL ESTADO DE AGUASCALIENTES, MÉXICO. Estaremos en contact para dar continuidad al proceso de formación y revisión de galeras.

Buen día.

Diana Franco

--
 Este mensaje ha sido analizado por MailScanner en busca de virus y otros contenidos peligrosos, y se considera que está limpio.

--
 Este mensaje ha sido analizado por MailScanner en busca de virus y otros contenidos peligrosos, y se considera que está limpio.

...yahoo.com/mc/showMessage?sMid...

1/1

EVALUACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO SAN PEDRO EN EL ESTADO DE AGUASCALIENTES, MÉXICO.

RESUMEN

El presente estudio evaluó la variación espacial y temporal de las concentraciones de materia orgánica, nutrientes, tóxicos orgánicos, organismos coliformes y metales pesados en el río San Pedro, principal corriente del Estado de Aguascalientes. En su recorrido de aproximadamente 90 km por la entidad, recibe el aporte de 24 cursos de agua y cerca del 96% de las aguas residuales tratadas y crudas generadas por los diversos sectores (aproximadamente 120 Mm³/año). Se tomaron muestras de agua en 43 estaciones de colecta en las épocas de sequía y de lluvias, y se analizaron 23 parámetros. En ninguno de los parámetros evaluados se observó una tendencia espacial definida. A excepción de los metales pesados, los contaminantes estudiados presentaron concentraciones elevadas en el 95% de las estaciones de colecta en ambas campañas de muestreo (sin mostrar variación temporal significativa). Destacan especialmente los altos niveles de contaminación por materia orgánica, nitrógeno total, detergentes y coliformes fecales.

Para evaluar de forma integral la calidad del agua se utilizó un índice global de la calidad del agua (IGCA), basado en la metodología desarrollada por el Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME) para el río Alberta. De acuerdo con las categorías del índice propuesto, la calidad global del agua del río San Pedro es en general *pobre*, apartándose usualmente de su condición natural o conveniente para uso agrícola. El IGCA mostró un ligero incremento en los sitios de muestreo cercanos a las descargas de plantas de tratamiento de aguas residuales, situándose en la categoría de *marginal*.

Palabras clave: contaminación del agua, índice de calidad, variación espacial, río San Pedro

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the spatial and temporal variations in the concentrations of organic matter, nutrients, organic pollutants, coliforms and heavy metals from the San Pedro River, which is the main superficial water body of Aguascalientes State. In the course of the river, approximately 90 km through the State, it receives the contribution of 23 water currents and about 96% of treated and untreated wastewater generated by domestic and industrial sectors (approximately 120 Mm³/year). Water samples were taken from 43 stations, collected during two sampling campaigns, one in the dry season and other after the rainy season; and 23 parameters were analyzed. Defined spatial trends were not observed in any of the parameters evaluated. Except for heavy metals, the studied pollutants showed high concentrations in 95% of the collection stations in both sampling campaigns (significant temporal variation was not observed). The high

levels of organic matter, total nitrogen, detergents and fecal coliforms were especially remarkable. To globally assess the water quality, a global index of water quality (IGCA), based on the methodology developed by the Canadian Council of Minister of the Environment (CCME) for the Alberta River, was used. According to the IGCA categories, the global quality of the water in the San Pedro River all along the State is generally *poor*, usually away from their natural condition or desirable characteristics for agricultural use. The IGCA showed a slight increase in sampling sites near the wastewater treatment plant discharges, raising the *marginal* category.

Key words: water pollution, quality index, spatial variation, San Pedro river

INTRODUCCIÓN

Los ríos son corrientes naturales sometidas a los cambios climáticos y a las características propias de la cuenca, la calidad de su agua varía naturalmente a lo largo del tiempo y de su curso debido a la combinación de factores ambientales. Sin embargo, las actividades humanas alteran, a veces de manera irreversible, las características físicas, químicas y biológicas del agua (Chapman 1996, Castañé *et al.* 1998). Las principales fuentes de contaminación de estos sistemas son las descargas de tipo municipal e industrial, así como los flujos de retorno generados por las actividades agropecuarias. La contaminación de las aguas superficiales en México es un problema que ha sido objeto de estudio en los últimos años (Graniel y Carrillo 2006, Jáuregui-Medina *et al.* 2007, Rivera-Vázquez *et al.* 2007). Sin embargo, uno de los inconvenientes que presenta la valoración de la calidad del agua es precisamente la naturaleza multidimensional del concepto de "calidad del agua". La interpretación y el manejo de los datos obtenidos en el monitoreo suele ser un trabajo complicado y en muchas ocasiones de difícil entendimiento para el público en general (Samboni *et al.* 2007). El problema se complica aún más, cuando se trata de evaluar la calidad global, particularmente cuando son aplicados los distintos criterios para los diferentes usos del agua (Sedeño-Díaz y López-López 2007). Para facilitar la integración e interpretación de los datos de calidad del agua, diferentes países han desarrollado diversos índices de calidad, en función de sus necesidades y facilidad de manejo. Dichos índices agrupan de uno a varios parámetros, en su mayoría fisicoquímicos y en algunos casos microbiológicos, de tal manera que permite reducir la información a una expresión sencilla y fácil de interpretar (Samboni *et al.* 2007).

La hidrología superficial del Estado de Aguascalientes en su mayoría está conformada por cauces secos que sólo conducen aguas pluviales por corto tiempo después de las acometidas. El río San Pedro es la corriente principal de la entidad, su cauce recibe el aporte de varias corrientes y las aguas residuales crudas y tratadas de los diferentes sectores de la población. Estas aguas son empleadas para riego agrícola, principalmente en la zona sur de la entidad (López 2007). En sus márgenes se asienta cerca del 80% de la población total de la entidad (1, 065,416 habitantes), distribuida en 50

comunidades y seis cabeceras municipales, incluyendo la capital del Estado (INEGI 2006). Se ubican también los principales parques industriales del Estado (municipios de San Francisco de los Rómos y Aguascalientes, **Fig. 1**) con empresas textiles, procesadoras de alimentos, metal-mecánica, galvanoplastia y electrónicas (López 2007). El 60% de las descargas industriales vertidas al río son previamente tratadas en sistemas de lodos activados, con eficiencias adecuadas para remoción de materia orgánica y el 40% restante se vierte al cauce sin tratamiento previo. La capacidad instalada en el Estado para depurar aguas residuales es cercana a los 3,500 L/s; sin embargo, el caudal tratado es apenas de 1,700 L/s (López 2007).

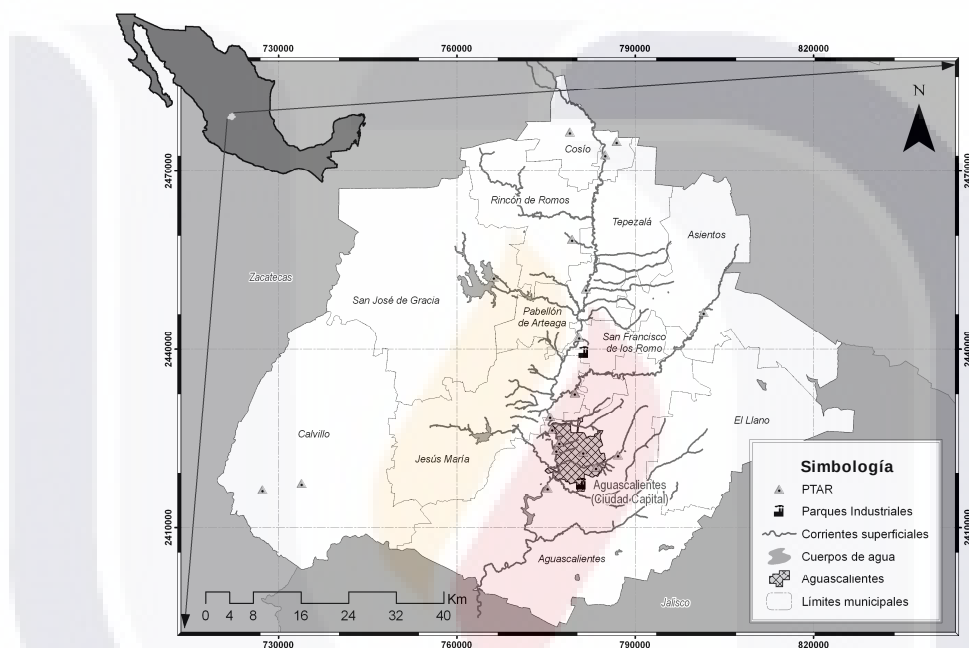


Fig. 1. Ubicación de los Parque Industriales y Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en el Estado de Aguascalientes.

El crecimiento poblacional de los últimos 60 años (500%), aunado al desarrollo económico del Estado de Aguascalientes, ha causado fuertes presiones sobre los recursos hídricos. Las grandes cantidades de contaminantes que han sido descargados durante décadas a ríos, arroyos, presas y bordos han producido una severa afectación en la calidad del agua de los principales cuerpos de agua superficial de la entidad (Avelar-González *et al.* 2009). Por otra parte, los cinco acuíferos que abastecen el 80% del agua potable al Estado, actualmente se encuentran con un nivel de sobreexplotación cercano al 100% (CONAGUA 2007). Estudios previos han reportado la presencia de compuestos orgánicos persistentes, altas concentraciones de materia orgánica, nutrientes, y toxicidad aguda en el cauce del río San Pedro y varios de sus afluentes (Rico-Martínez *et al.* 2000, López 2007, Avelar-González *et al.* 2009). Sin embargo, estos estudios no ofrecen un panorama global de la calidad del agua del río en toda la entidad y tampoco evalúan el

comportamiento espacial de las concentraciones de los principales contaminantes, ni su variación temporal, particularmente en las épocas más relevantes que se presentan en el Estado de Aguascalientes (lluvia y sequía).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la variabilidad espacial y temporal de los contaminantes presentes en el agua del río San Pedro, en el Estado de Aguascalientes. El estudio propone además el empleo de un índice global de la calidad del agua (IGCA), basado en el índice desarrollado por el Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME) para el río Alberta (Alberta Environment 1995). Dicho índice se calculó a partir de la determinación de subíndices independientes que agrupan a contaminantes relacionados. El IGCA propuesto es el resultado del promedio de seis subíndices, los cuales incluyeron los 23 parámetros evaluados en el presente estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El río San Pedro en el Estado de Aguascalientes está situado entre las coordenadas geográficas 21° 68' a 22° 31' de latitud norte (2470000 a 2400000 coordenadas UTM, región 13) y 102° 68' a 102° 23' de longitud oeste (760000 a 780000 coordenadas UTM, región 13), dentro de la Región Hidrológica N° 12 Lerma-Santiago-Pacífico y su cuenca tiene una superficie de 2,821 Km² (CONAGUA 2007). Este río se origina en la Sierra de San Pedro, localizada en el municipio de Ciudad Cuauhtémoc en el Estado de Zacatecas, e ingresa al Estado de Aguascalientes por el municipio de Cosío. Su cauce, de aproximadamente 90 km, recorre en dirección norte-sur la parte central de la entidad, para abandonarla finalmente en la confluencia del río Santiago, por el poblado de Chilarillo en el Estado de Jalisco (CONAGUA 2007). El clima predominante en la entidad es semiseco templado. La temperatura promedio durante los meses de estiaje (abril a junio) fue de 21.3 °C, con valores máximos de 32°C. En el periodo posterior a las lluvias (septiembre a noviembre) la temperatura promedio fue de 17.2 °C. Los meses de mayor actividad pluvial fueron julio y agosto, con precipitaciones de 158.7 y 166.7 mm, respectivamente; la precipitación anual fue de 509.3 mm (CONAGUA 2007). Actualmente el río no presenta flujo base, recibe el aporte de 24 cursos de agua y cerca del 96% (aproximadamente 120 Mm³/año) de las aguas residuales tratadas y crudas generadas por los diversos sectores del Estado (CONAGUA 2007).

La selección de los sitios de muestreo se realizó con la colaboración del Instituto del Medio Ambiente del Estado de Aguascalientes (IMAE), el Instituto del Agua del Estado (INAGUA) y la delegación estatal de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Se establecieron 43 sitios de muestreo a lo largo del cauce del río San Pedro, considerando factores topográficos, geológicos e hidrológicos, y los puntos más relevantes de descarga de contaminantes al río (**Fig. 2**). Todas las estaciones de colecta se ubicaron dentro del cauce, en sitios próximos a descargas importantes (**Cuadro I**), y su posición geográfica fue determinada con un GPS MAP 60c (GARMIN).

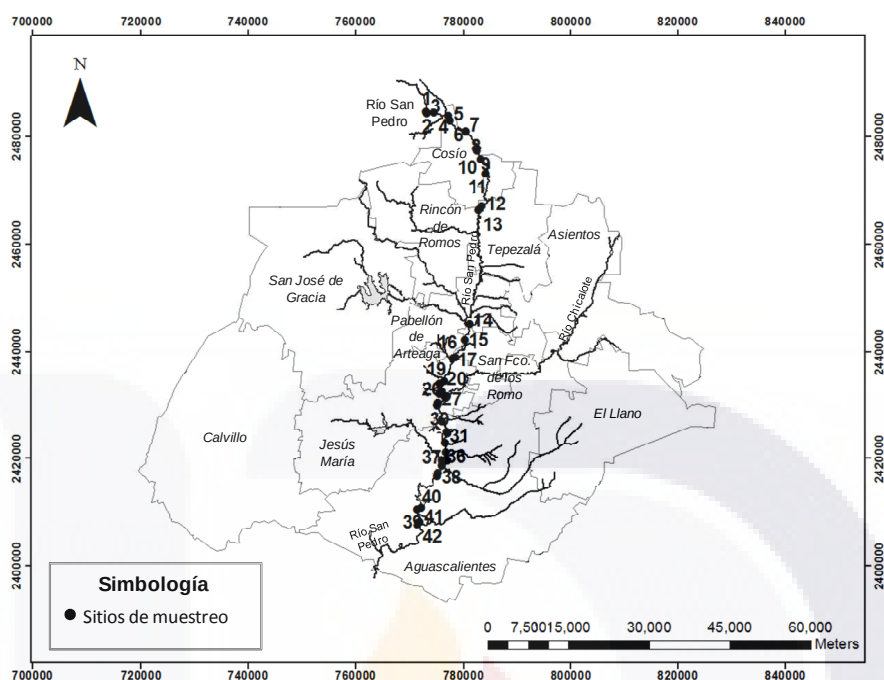


Fig. 2. Ubicación de los sitios de muestreo seleccionados en el cauce del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes.

CUADRO I. TIPOS DE DESCARGAS CERCANAS A LAS ESTACIONES DE MUESTREO

Sitio de Muestreo	Tipo de Descarga	Sitio de Muestreo	Tipo de descarga	Sitio de Muestreo	Tipo de descarga	Sitio de Muestreo	Tipo de descarga
1	M	12	M	23	M, I	34	M
2	M	13	M	24	M	35	I
3	I	14	M	25	M	36	M
4	M	15	M	26	M	37	M, I
5	M	16	M*	27	M	38	A
6	M	17	RM	28	M	39	M**
7	M	18	M	29	M	40	M*
8	M	19	M	30	M	41	M*
9	M	20	M	31	M	42	M*
10	M	21	P	32	M	43	M*
11	M	22	M	33	M		

A: Agrícola. I: Industrial. M: Municipal. P: Pecuaria. RM: Rastro municipal *Tratada. ** Cruda y tratada.

Muestreos y determinaciones analíticas

Se tomaron muestras puntuales de agua superficial en cada sitio de colecta durante dos campañas de muestreo, la primera durante el estiaje (abril-junio, 2005) y la segunda después de la temporada de lluvias (septiembre-noviembre, 2005). La toma, preservación y análisis de las muestras se llevaron a cabo respetando los criterios internacionales recomendados por los Métodos Normalizados (APHA 1998), en el **cuadro II** se muestran los parámetros determinados y el método analítico empleado.

Los metales fueron cuantificados por medio de espectrofotometría de absorción atómica, utilizando un equipo Perkin Elmer Analyst 100. Dependiendo de la sensibilidad requerida se empleó la modalidad de horno de grafito (3113 B) o flama (método 3111 B) para determinar Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn. En las determinaciones por flama, a fin de incrementar la sensibilidad del método, las muestras fueron concentradas 10 veces durante el proceso de digestión. El As fue medido por la modalidad de generación de hidruros (método 3114 B), y Hg por vapor frío (método 3112 B). Las determinaciones se realizaron por triplicado, en cada lote se utilizó una muestra fortificada al azar (porcentaje de recuperación entre 85 y 115%), y duplicados al azar (coeficiente de variación menor al 15%). Los métodos se validaron empleando el material de referencia SRM 1643d del US National Institute of Standards and Technology (NIST).

CUADRO II. PARÁMETROS EVALUADOS Y DETERMINACIÓN ANALÍTICA

Parámetro	Método analítico	Parámetro	Método analítico*
pH	4500-H+ B (equipo EC10, HACH)	Nitrógeno total (N _T)	4500-Norg B
Oxígeno disuelto (OD)	4500-O G (DO175, HACH)	Fósforo total (P _T)	4500-P E
Conductividad	2510 B (CO150, HACH)	Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	5540 C
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	5210 B	Fenoles	5530 C
Demanda química de oxígeno (DQO)	5220 D	anilinas	Hess <i>et al.</i> (1993)
Grasas y aceites	5520 D	Coliformes totales y fecales	NMP, 9221 C
Metales pesados	3111 B, 3112 B, 3113 B, 3114 B		

* Standard methods for the examination of water and wastewater, APHA (1998).

A fin de estudiar la existencia de variación temporal en los contaminantes evaluados en el cauce del río San Pedro, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) empleando el programa STATISTICA 7 (Kim y Cardone 2005). En el análisis se consideraron todos los parámetros evaluados, incluyendo la campaña de muestreo como variable. Para evaluar la variación espacial del nivel de contaminación se propuso el empleo de un índice global de la calidad del agua (IGCA), basado en el índice desarrollado para el río Alberta (RWQI); el cual constituye una forma de resumir los datos físicos, químicos y biológicos complejos en un indicador compuesto simple de la calidad del agua (Alberta Environment 1995).

El IGCA es el resultado del promedio de seis subíndices, en los cuales se agrupan los parámetros de campo, fisicoquímicos, microbiológicos y metales pesados evaluados en las muestras de agua (**Cuadro III**).

$$IGCA = \frac{\sum \text{Valor del subíndice}}{\text{Número de subíndices}}$$

Cada uno de los subíndices fue calculado mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Valor del Subíndice} = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right)$$

Donde:

F_1 representa el número de variables (parámetros) que no cumplieron con el nivel deseable (definido en función del uso del agua) al menos una vez durante el periodo considerado (un año).

$$F_1 = \left(\frac{\text{Número de variables que no cumplieron con los niveles deseables}}{\text{Número total de variables}} \right) * 100$$

F_2 representa la proporción del número de pruebas individuales que no cumplieron con el nivel deseable, con respecto al número total de las pruebas realizadas durante el periodo considerado (un año).

$$F_2 = \left(\frac{\text{Número de pruebas que no cumplieron con los niveles deseables}}{\text{Número total de pruebas}} \right) * 100$$

F_3 representa la magnitud con la cual los valores de las pruebas se desviaron de los niveles deseables.

$$F_3 = \left(\frac{cfc}{0.01 \text{ } cfc + 0.01} \right) * 100$$

La variable *cfc* representa la magnitud con la cual la calidad del agua se desvía de los criterios de conformidad. Se calcula dividiendo la sumatoria de la magnitud de cada una de las desviaciones observadas en las pruebas que estuvieron fuera de conformidad (*Nfc*), entre el número total de pruebas:

$$cfc = \frac{\sum_{i=1}^n Nfc_i}{\text{Número total de pruebas}}$$

Para los casos en que los valores de las pruebas no deben exceder el nivel deseable:

$$Nfc_i = \left(\frac{\text{Valor de la prueba fuera de conformidad}_i}{\text{Nivel deseable}_j} \right) - 1$$

Para los casos en que el valor de la prueba no debe estar por debajo del nivel deseable:

$$Nfc_i = \left(\frac{\text{Nivel deseable}_j}{\text{Valor de la prueba fuera de conformidad}_i} \right) - 1$$

Para los casos en los cuales el nivel es cero:

$$Nfc_i = \text{Valor de prueba fuera de conformidad}_i$$

El nivel deseable de cada uno de los parámetros evaluados se determinó considerando la calidad del agua apropiada para uso agrícola. Debido a que los criterios ecológicos de la calidad del agua CE-CCA-001-89 (SEDUE 1989) no cuentan con límites máximos permisibles (LMP) para la mayoría de los parámetros analizados, se realizó una revisión de criterios de referencias internacionales que apliquen para el uso del agua señalado y valores típicos en cuerpos de agua. Dicha revisión incluyó las Guías Canadienses de Calidad del Agua (CCME 1999), la Ley General de Aguas de Perú DL N°17752 (IPROGA 1969), criterios chilenos específicos para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales (CONAMA 2004), valores típicos de cuerpos de aguas superficial (Chapman 1996), y límites de nutrientes para diferentes condiciones en cuerpos de agua dulce señalados por Camargo y Alonso (2007). En el **cuadro III** se muestra el nivel o intervalo deseable de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y metales, así como su agrupación en los subíndices. Para asignarle una categoría a la calidad del agua, los valores de los subíndices y del IGCA obtenidos para cada sitio de muestreo, fueron comparados con la escala establecida para el RWQI (**Cuadro IV**).

CUADRO III. PARÁMETROS QUE INCLUYEN CADA UNO DE LOS SUBÍNDICES DEL IGCA Y VALORES DEL NIVEL DESEABLE DE CADA PARÁMETRO EN EL AGUA PARA USO EN RIEGO AGRÍCOLA

Subíndice	Parámetros	Nivel o Intervalo Deseable
Campo (sIC)	pH	6.5-8.5
	OD	5.5-8.0 mg/L
	Conductividad	2000 μ S/cm
Materia Orgánica (sIMO)	DBO ₅	15 mg/L
	DQO	20 mg/L
	Grasas y Aceites	10 mg/L
Nutrientes (sIN)	Fósforo total	0.1 mg/L
	Nitrógeno total	1 mg/L
Tóxicos Orgánicos (sITO)	SAAM	0.5 mg/L
	Fenoles	0.010 mg/L
	Anilinas	0.002 mg/L
Contaminación Fecal (sIF)	Coliformes totales	1000 NMP/100 mL
	Coliformes fecales	100 NMP/100 mL
Metales Pesados (sIMP)	Al	5.0 mg/L
	As	0.05 mg/L
	Cd	0.01 mg/L
	Cr	0.05 mg/L
	Cu	0.5 mg/L
	Fe	5.0 mg/L
	Hg	0.003 mg/L
	Mn	0.2 mg/L
	Pb	0.1 mg/L
	Zn	5.0 mg/L

CUADRO IV. CATEGORÍAS DE LA CALIDAD DEL AGUA (RWQI)

Categoría	Intervalo de Valores	Descripción
Excelente	100-95	La calidad del agua está protegida, ausencia de amenaza o daño, su condición está muy cercana a los niveles naturales o deseables
Buena	94-80	La calidad del agua está frecuentemente protegida, bajo grado de amenaza o daño, su condición rara vez se aparta de los niveles naturales o deseables
Aceptable	79-65	La calidad del agua está usualmente protegida, pero ocasionalmente es amenazada o dañada, su condición algunas veces se aparta de los niveles naturales o deseables
Marginal	64-45	La calidad del agua está frecuentemente amenazada o dañada, su condición frecuentemente se aparta de los niveles naturales o deseables
Pobre	44-0	La calidad del agua está casi siempre amenazada o dañada, su condición casi siempre se aparta de los niveles naturales o deseables

RESULTADOS

Los parámetros de campo no mostraron variaciones temporales ni espaciales a lo largo del cauce del río San Pedro (**Fig. 3**). Los valores de pH se ubicaron dentro del intervalo de 6.0 a 8.5 unidades, datos en su mayoría acordes con los valores de referencia (6.5 a 8.5). La concentración de oxígeno disuelto (OD) estuvo por debajo de 1.0 mg/L en la mayoría de los sitios estudiados, salvo los que se ubicaron cerca de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales (sitios 16 y 39), los cuales presentaron altos niveles de OD y una carga orgánica baja. En estos sitios la concentración de OD se incrementó hasta 5.0 mg/L, nivel aún por debajo de los valores de referencia (5.5-8.0 mg/L) para asegurar la sobrevivencia de la fauna acuática. Los datos de conductividad en el 88% de los sitios de muestreo estuvieron entre 1000 y 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; es decir, acordes con el nivel deseable (2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). El valor máximo (4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) se observó en cinco estaciones de colecta distribuidas en todo el cauce (1, 7, 17, 23 y 41), durante la campaña de sequía (**Fig. 3**).

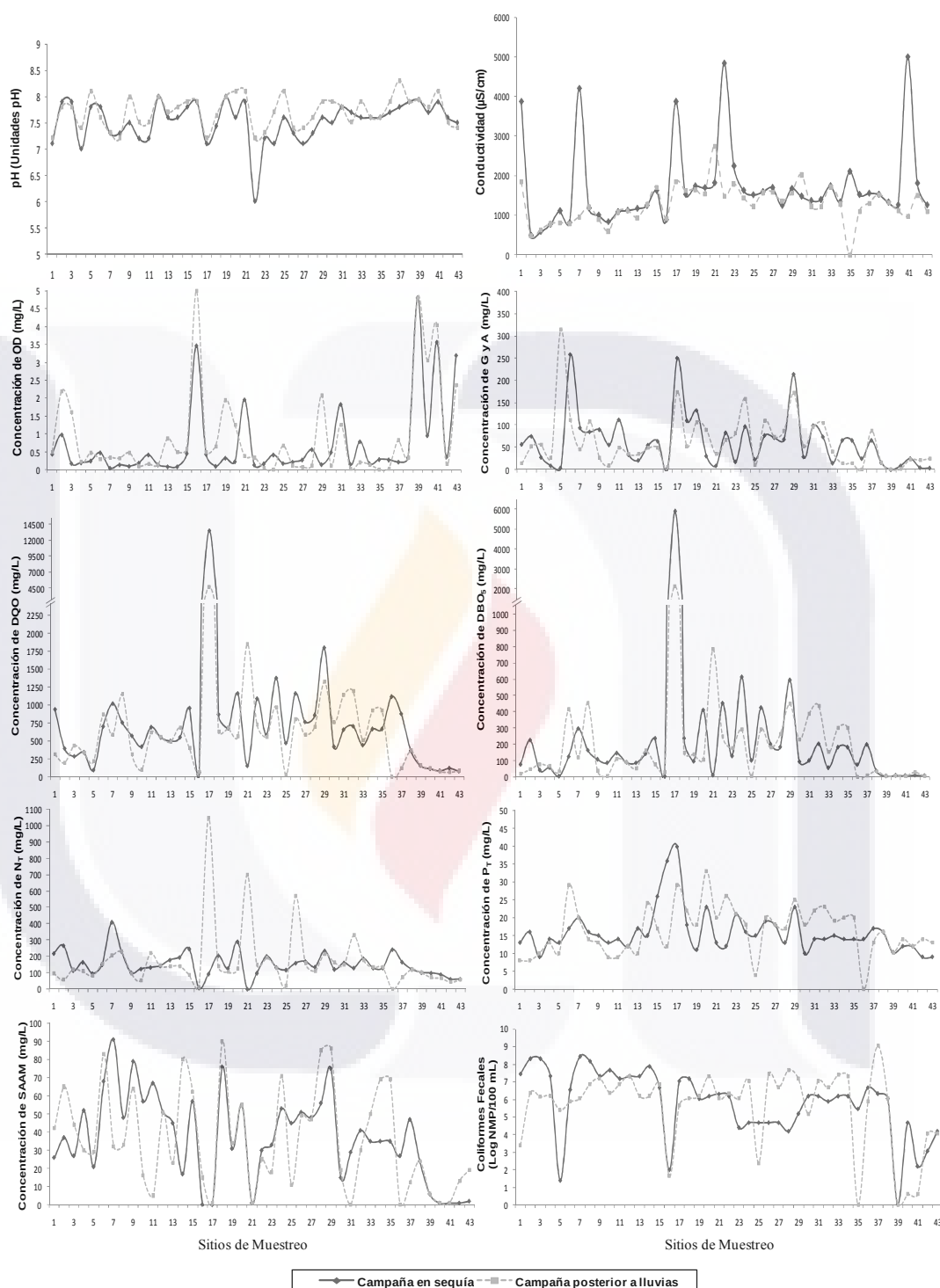


Fig. 3. Variación espacial de los principales parámetros determinados en las campañas de sequía y posterior a las lluvias.

Las concentraciones de materia orgánica (DQO, DBO₅ y GyA) fueron en general elevadas a lo largo del cauce, y no mostraron diferencias significativas entre las campañas de muestreo (**Fig. 3**). En todos los casos sobrepasó entre 285 y 685% los niveles adecuados para uso agrícola (20, 15 y 10 mg/L para DQO, DBO₅ y GyA, respectivamente). Los valores más altos se observaron en la zona centro del Estado (sitios del 14 al 30), con picos mayores a 4500 mg/L de DQO, 2000 mg/L de DBO₅ y 250 mg/L de GyA. Las concentraciones más bajas de estos contaminantes fueron observadas en los últimos cinco sitios de colecta (39 a 43), ubicados en la zona sur de la entidad, aguas abajo del efluente de la planta de tratamiento de la ciudad de Aguascalientes. El contenido de SAAM mostró un comportamiento muy irregular en ambas épocas de muestreo (de 0.6 a 90 mg/L), superando en todos los casos el nivel deseable (0.5 mg/L). Los niveles de N_t y P_t fueron elevados en la mayoría de las estaciones de colecta (50 a 400 mg/L de N_t y 0.05 a 40 mg/L de P_t), sobrepasando en más del 95% de los sitios estudiados los niveles deseados (1.0 y 0.1 mg/L para N_t y P_t, respectivamente). Estos parámetros presentaron una mayor variabilidad en la campaña posterior a las lluvias, alcanzando picos de hasta 1000 mg/L de N_t y 35 mg/L de P_t (zona centro). Las cargas de coliformes totales y fecales fueron muy altas y ambos parámetros presentaron valores prácticamente iguales en todos los sitios. El 93% de estos sitios superaron entre tres y seis órdenes de magnitud (100,000 a 100, 000,000 NMP/100 mL) el criterio para coliformes totales (1000 NMP/100 mL) y fecales (100 NMP/100 mL).

Con respecto a las concentraciones de metales pesados, en casi todos los casos estuvieron acordes con los niveles deseables (**Cuadro III**), únicamente se observaron algunos sitios con valores elevados de estos xenobióticos. En términos globales, las concentraciones de metales mostraron una disminución en la campaña posterior a las lluvias (**Cuadro V**) y no presentaron una tendencia espacial definida. Las concentraciones de Al y Fe fueron en general las más altas con relación al resto de los metales. Sin embargo, el contenido de Al superó el nivel deseable (5.0 mg/L) en sólo dos estaciones de colecta ubicadas en la zonas centro de la entidad (20 y 29). En el caso del Fe, únicamente sobrepasó el nivel de referencia (5 mg/L) en cuatro sitios cercanos a las descargas del Parque Industrial del Valle de Aguascalientes (17, 19, 20 y 29), también ubicado en la zona centro. En esta misma zona, el Hg mostró concentraciones hasta 10 veces superiores al criterio de referencia (0.003 mg/L) en cuatro sitios (16, 25, 28 y 29), y el Cr superó el nivel deseable (0.05 mg/L) en tres estaciones de muestreo (19, 23, 29). Estos resultados son consistentes con la presencia de descargas industriales en la zona centro. El Mn presentó niveles hasta cuatro veces superiores al valor de referencia (0.2 mg/L) en ocho estaciones de colecta, dispersas en todo el cauce (sitios 5, 15, 17, 21, 29, 39, 42 y 43). El As, el Cu y el Zn únicamente sobrepasaron el nivel deseable en el sitio 29. Con respecto al Cd y Pb, ningún sitio mostró concentraciones superiores a los criterios de referencia (0.01 y 0.1 mg/L, respectivamente).

El sitio de colecta 29 presentó la problemática más severa de contenido de metales pesados. Durante el estiaje mostró los valores máximos observados de Al (54 mg/L), Fe (18.6 mg/L), As (0.07 mg/L), Cu (1.9 mg/L) y Zn (3.35 mg/L), además de una elevada concentración de Hg (0.022 mg/L) y Mn (0.72 mg/L). Estas concentraciones superaron

entre 0.4 y 10 veces los niveles deseables. Sin embargo, después de las lluvias ningún metal superó el valor de referencia. No se identificaron las causas de las elevadas concentraciones de metales observadas en este sitio durante el estiaje; probablemente se deba a descargas clandestinas intermitentes, lo cual ocurre con frecuencia en todo el cauce.

CUADRO V. RESULTADOS DEL CONTENIDO DE METALES PESADOS EN EL RÍO SAN PEDRO

Sitio de Muestreo	Concentración de metales pesados (mg/L)															
	Al		As		Cr		Cu		Fe		Hg		Mn		Zn	
	S	L	S	L	S	L	S	L	S	L	S	L	S	L	S	L
1	0.38	<0.11	0.01	<0.0003	0.02	<0.008	<0.008	<0.008	0.53	<0.011	<0.0003	<0.0003	0.03	<0.005	0.08	<0.002
2	1.05	<0.11	0.01	<0.0003	0.01	<0.008	0.02	<0.008	1.79	<0.011	0.001	<0.0003	0.04	<0.005	0.15	<0.002
3	0.27	<0.11	0.01	<0.0003	<0.008	<0.008	0.004	<0.008	0.41	<0.011	0.001	<0.0003	0.02	<0.005	0.07	<0.002
4	0	<0.11	0.01	<0.0003	0.01	<0.008	<0.008	<0.008	0.27	<0.011	0.001	<0.0003	0.09	<0.005	0.02	<0.002
5	0.002	<0.11	0.01	<0.0003	0.01	<0.008	<0.008	<0.008	0.48	<0.011	0.0004	<0.0003	1.01	<0.005	0.02	<0.002
6	1.63	4.78	0.02	0.01	0.01	0.01	0.014	0.03	1.29	3.79	0.001	0.002	0.05	0.12	0.16	0.37
7	2.23	<0.11	0.03	<0.0003	0.01	<0.008	0.024	<0.008	2.19	<0.011	<0.0003	<0.0003	0.05	<0.005	0.1	<0.002
8	0.93	<0.11	0.03	<0.0003	0.01	<0.008	0.02	<0.008	0.73	<0.011	<0.0003	<0.0003	0.03	<0.005	0.11	<0.002
9	1.99	<0.11	0.02	<0.0003	0.01	<0.008	0.01	<0.008	2.39	<0.011	<0.0003	<0.0003	0.05	<0.005	0.15	<0.002
10	0.75	<0.11	0.01	<0.0003	0.01	<0.008	<0.008	<0.008	0.6	<0.011	0.001	<0.0003	0.02	<0.005	0.06	<0.002
11	2.2	0.49	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	<0.008	2.19	0.58	0.001	<0.0003	0.14	0.11	0.39	0.09
12	0.94	0.94	0.01	0.01	0.01	0.01	<0.008	<0.008	2.8	2.8	<0.0003	<0.0003	0.05	0.05	0.032	0.32
13	<0.11	0.38	0.004	0.01	0.01	0.01	<0.008	0.008	0.23	0.27	<0.0003	<0.0003	0.04	0.05	0.05	0.09
14	<0.11	<0.11	0.004	<0.0003	0.01	<0.008	<0.008	<0.008	0.19	<0.011	<0.0003	<0.0003	0.02	<0.005	0.04	<0.002
15	0.75	<0.11	0.01	<0.0003	0.01	<0.008	0.012	<0.008	1.2	<0.011	0.002	<0.0003	0.22	<0.005	0.08	<0.002
16	0.14	<0.11	0.01	<0.0003	0.03	<0.008	<0.008	<0.008	0.09	<0.011	0.004	<0.0003	0.01	<0.005	0.03	<0.002
17	4.01	3.59	0.01	0.01	<0.008	0.01	0.09	0.1	8.86	1.21	0.001	0.001	0.48	0.44	0.47	0.46
18	0.14	0.68	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	0.82	1.81	<0.0003	0.001	0.07	0.04	0.16	0.01
19	0.77	1.2	0.01	<0.0003	0.46	0.01	0.06	<0.008	5.78	0.52	<0.0003	0.002	0.09	0.02	0.56	0.11
20	7.4	1.08	0.02	0.002	<0.008	0.01	0.11	0.014	6.64	0.89	0.001	0.001	0.13	0.03	0.5	0.18
21	4.42	<0.11	0.01	0.002	<0.008	0.01	0.01	0.05	3.24	2.19	<0.0003	<0.0003	0.6	0.42	0.06	0.13
22	0.77	<0.11	0.01	<0.0003	0.01	<0.008	0.05	<0.008	0.91	<0.011	0.001	<0.0003	0.04	<0.005	0.13	<0.002
23	2.1	0.21	<0.0003	0.002	2.1	0.02	0.01	<0.008	0.92	0.41	0.002	<0.0003	0.14	0.11	0.86	0.05
24	1.81	<0.11	0.01	<0.0003	<0.008	<0.008	0.06	<0.008	1.15	<0.011	0.002	<0.0003	0.06	<0.005	0.17	<0.002
25	0.36	0.2	0.01	0.01	<0.008	<0.008	0.01	0.01	0.22	0.1	0.036	0.002	0.06	0.03	0.05	0.03
26	2.96	1.08	0.01	0.01	0.01	0.01	0.07	0.04	1.56	1.04	0.001	0.002	0.11	0.06	0.17	0.11
27	1.03	<0.11	<0.0003	<0.0003	0.01	<0.008	0.05	<0.008	0.84	<0.011	0.0004	<0.0003	0.09	<0.005	0.12	<0.002
28	1.63	1.22	0.01	0.01	<0.008	<0.008	0.04	0.02	0.96	0.5	0.03	0.01	0.04	<0.005	0.12	0.06
29	54	4.14	0.07	0.01	0.07	0.01	1.9	0.06	18.6	2.19	0.022	0.003	0.72	0.07	3.35	0.07
30	2.05	<0.11	0.01	<0.0003	<0.008	<0.008	0.02	<0.008	1.05	<0.011	<0.0003	<0.0003	0.14	<0.005	0.11	<0.002
31	0.52	<0.11	<0.0003	<0.0003	<0.008	<0.008	0.03	<0.008	0.39	<0.011	0.001	<0.0003	0.03	<0.005	0.09	<0.002
32	1.45	<0.11	0.01	<0.0003	<0.008	<0.008	0.04	<0.008	1.05	<0.011	0.001	<0.0003	0.05	<0.005	0.15	<0.002
33	1.04	<0.11	<0.0003	<0.0003	<0.008	<0.008	0.02	<0.008	0.73	<0.011	0.002	<0.0003	0.1	<0.005	0.1	<0.002
34	0.78	<0.11	0.01	<0.0003	<0.008	<0.008	0.04	<0.008	0.62	<0.011	0.001	<0.0003	0.03	<0.005	0.15	<0.002
35	0.78	<0.11	0.01	<0.0003	<0.008	<0.008	0.04	<0.008	0.62	<0.011	0.001	<0.0003	0.03	<0.005	0.15	<0.002
36	0.17	<0.11	<0.0003	<0.0003	<0.008	<0.008	0.03	<0.008	0.17	<0.011	0.001	<0.0003	0.04	<0.005	0.05	<0.002
37	4.44	0.11	<0.0003	0.003	0.01	<0.008	0.06	<0.008	3.18	0.21	0.002	0.001	0.1	0.06	0.18	0.03
38	0.14	0.14	<0.0003	<0.0003	<0.008	<0.008	0.02	0.02	0.5	0.5	<0.0003	<0.0003	0.07	0.07	0.08	0.08
39	1.05	1.05	0.007	0.007	0.6	0.6	0.05	0.05	1.8	1.8	0.001	0.001	0.42	0.42	0.32	0.32
40	0.13	<0.11	0.02	<0.0003	0.01	<0.008	<0.008	<0.008	0.18	<0.011	<0.0003	<0.0003	0.04	<0.005	0.01	<0.002
41	<0.11	<0.11	0.01	<0.0003	0.01	<0.008	<0.008	<0.008	0.07	<0.011	0.001	<0.0003	0.05	<0.005	0.01	<0.002
42	<0.11	<0.11	0.01	0.02	0.01	0.01	<0.008	0.014	0.16	0.2	0.001	0.002	0.23	0.2	0.017	0.03
43	<0.11	<0.11	0.02	0.02	0.01	<0.008	<0.008	0.01	0.2	0.34	0.001	0.003	0.28	0.27	0.03	0.11

S: Muestreo realizado en la época de sequía. L: Muestreo realizado en la temporada posterior a las lluvias.

El ACP presentó una variabilidad acumulada en los dos primeros componentes de 53%, relativamente bajo considerando que lo ideal es un mínimo del 60% de variabilidad acumulada para que los eventos puedan ser explicados en los dos primeros componentes. No obstante, dada la naturaleza del estudio, este valor no resta validez al ACP. El análisis mostró claramente que los indicadores de contaminación municipal (DQO, DBO, GyA, Pt, Nt, Anilinas, SAAM, CT y CF) presentaron las concentraciones más altas (ubicándose dentro del cuadrante positivo del primer y segundo componente, **Fig. 4**). Por otra parte el ACP muestra que la contaminación municipal estuvo poco correlacionada con la campaña de muestreo (CM), dado que ambos se presentan en cuadrantes distintos de la parte positiva del componente 2. En contraste, este mismo tipo de contaminación presentó una correlación inversa con el OD y el pH (dado que se encuentran en cuadrantes opuestos), lo cual se corresponde con lo esperado, debido a que la degradación microbiana de la materia orgánica presente en los residuos municipales provoca la disminución del OD y del pH.

Salvo los sitios de colecta previamente señalados, las concentraciones de metales fueron en general bajas. El ACP reveló que las concentraciones observadas de estos metales están inversamente correlacionadas con la campaña de muestreo (CM), dado que se ubican en cuadrantes opuestos. Esto confirma que se observaron diferencias significativas en las concentraciones de metales pesados entre las campañas de muestreo.

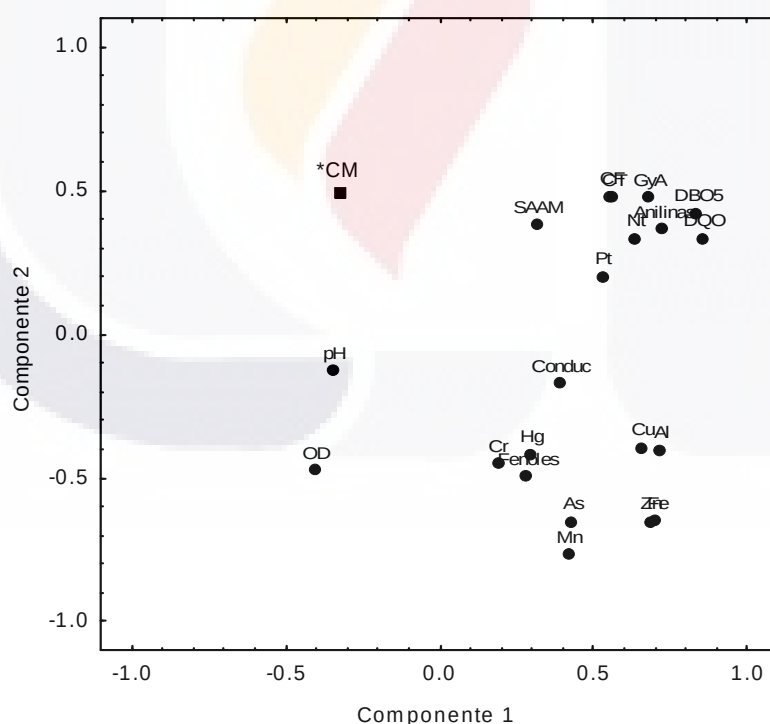


Fig. 4. Análisis de Componentes Principales (ACP) de los parámetros evaluados en el cauce del río San Pedro.

La evaluación espacial de la calidad del agua del río San Pedro, a partir del comportamiento de los diferentes subíndices del IGCA (**Fig. 5A**), mostró que prácticamente en todo el cauce la calidad del agua fue *pobre* con respecto a los parámetros de campo (subíndice sIC: pH, OD y conductividad), el contenido de materia orgánica (subíndice sIMO: DBO₅, DQO y GyA), la concentración de nutrientes (subíndice sIN: Nt y P_i), los niveles de tóxicos orgánicos (subíndice sITO: SAAM, fenoles y anilinas) y la contaminación fecal (subíndice sIF: coliformes totales y fecales). En casi todo el cauce del río, los valores de estos subíndices fueron entre 0 y 44, indicando que la calidad del agua estuvo *casi siempre amenazada o dañada* y se apartó siempre de los niveles deseables para su uso en riego agrícola.

Únicamente en las estaciones de colecta cercanas a las descargas de las plantas de tratamiento de aguas residuales, sitios 16 y 39 (San Francisco de los Romo y Ciudad de Aguascalientes), los subíndices sIC, sIMO y sIF mostraron una mejoría significativa, alcanzando valores entre 55 y 100 (calidad del agua entre *aceptable* y *excelente*); lo cual se explica por la depuración adecuada de materia orgánica y organismos coliformes en las plantas de tratamiento. En contraste, la depuración ineficiente en las plantas de tratamiento de nutrientes (sIN) y tóxicos orgánicos (sITO) derivó en un efecto poco significativo en la calidad del agua en relación con estos subíndices, los cuales conservaron valores inferiores a 44 (calidad *pobre*).

En las estaciones de colecta de las zonas norte y sur, el subíndice sIMP (metales pesados) estuvo dentro de las categorías de *buena a excelente* calidad (valores entre 88 y 100), indicando que la calidad del agua, relativa a estos contaminantes, presentó un *mínimo o ausencia de amenaza* y su condición rara vez se apartó o estuvo muy cercana a los niveles naturales o deseables. En contraste, en la zona centro de la entidad, donde se ubica la capital del Estado y se concentra la mayor parte de la actividad industrial, se observaron altibajos muy pronunciados de los valores de este subíndice (entre 100 y 45); indicando que la calidad del agua fue *marginal* y frecuentemente se apartó de los niveles naturales o deseables para uso agrícola.

El índice global de la calidad del agua (IGCA) presentó una tendencia prácticamente constante en todo el cauce del río San Pedro, mostrando valores entre 20 y 30; lo cual implica una calidad *pobre*, siempre alejada de las condiciones deseables para riego agrícola (**Fig. 5B**). Únicamente los sitios próximos a las descargas de plantas de tratamiento de aguas residuales (16 y 39) mostraron un incremento significativo en el IGCA, alcanzando valores cercanos a 50 (calidad del agua *marginal*). Sin embargo, la depuración de contaminantes en las plantas de tratamiento fue insuficiente, dado que la calidad del agua continuó siendo inadecuada para riego agrícola.

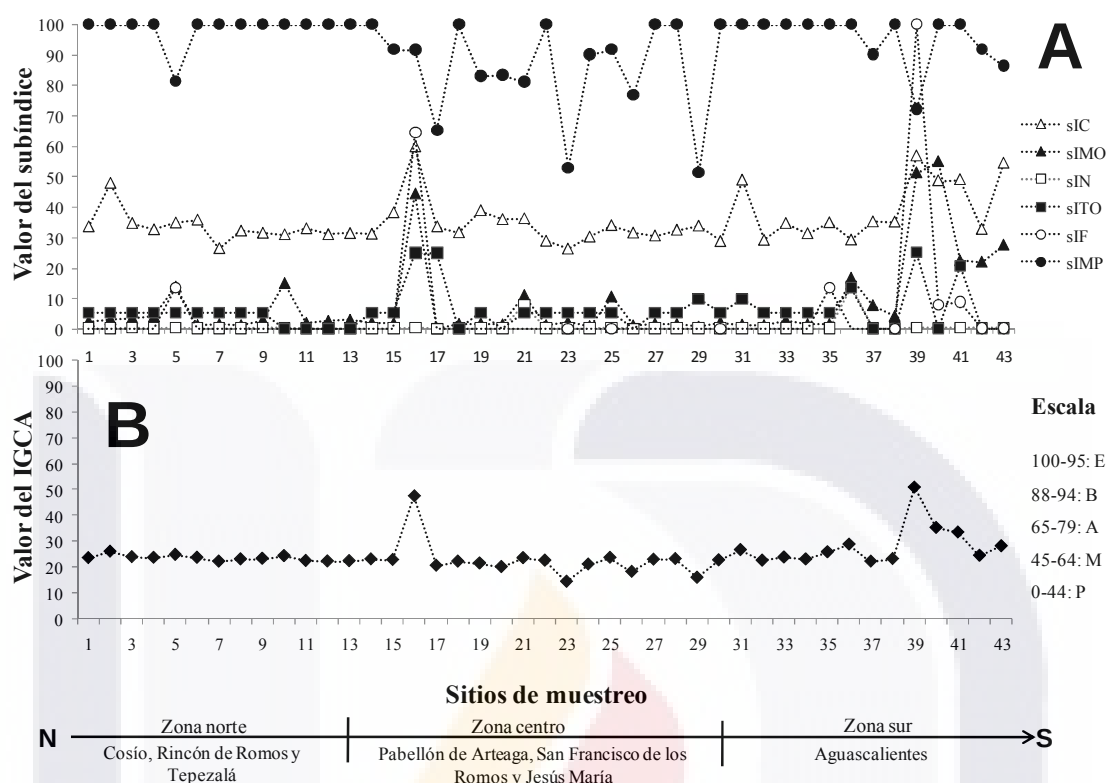


Fig. 5. Comportamiento espacial de la calidad del agua del río San Pedro a lo largo del Estado de Aguascalientes. El gráfico A muestra los valores de los subíndices de campo (sIC), materia orgánica (sIMO), nutrientes (sIN), tóxicos orgánicos (sTO), microbiológico (sIM) y de metales pesados (sIMP) en cada uno de los sitios de muestreo. El gráfico B muestra el índice global de la calidad del agua (IGCA) en cada sitio de colecta. Valores de 100 a 95 *excelente* (E), de 88 a 94 *bueno* (B), de 65 a 79 *aceptable* (A), de 45 a 64 *marginal* (M) y menor de 44 *pobre* (P).

DISCUSIÓN

La calidad del agua del río San Pedro se encontró seriamente contaminada por materia orgánica, nutrientes, tóxicos orgánicos y coliformes fecales. El pico de contaminación por materia orgánica (14,500 mg/L de DQO y 6,000 mg/L de DBO₅) observado en el sitio 17 (**Fig. 3**), coincide con la proximidad de descargas provenientes del rastro municipal de San Francisco de los Romos. Considerando los niveles deseables de calidad del agua para uso agrícola (cuadro III), todos los sitios sobrepasaron los criterios para DQO, DBO₅, P_t, N_t, anilinas y SAAM en ambas campañas de muestreo. Salvo los sitios 16 y 39, próximos a efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, el resto de las estaciones de colecta no cumplieron con los niveles deseables para oxígeno disuelto (OD) y organismos coliformes. En general, las concentraciones de

OD fueron al menos cuatro veces inferiores al valor deseable (5.0 mg/L), muy por debajo de los niveles requeridos para sostener la vida acuática. Los coliformes totales y fecales superaron en más de tres órdenes de magnitud los criterios para uso agrícola. Situación similar a otros ríos que reciben las descargas de grandes zonas urbanas (Rivera-Vázquez *et al.* 2007).

El alto contenido de materia orgánica deriva en bajas concentraciones de OD, lo cual coincide con el análisis de componentes principales (ACP), que mostró una correlación inversa entre el OD y las variables de materia orgánica (DBO₅, DQO y GyA). El ACP mostró una correlación significativa entre los coliformes, la materia orgánica y los nutrientes, todo ello acorde con descargas municipales. Por otra parte, mostró nula relación con la campaña de muestreo, indicando que los elevados niveles de contaminación de origen municipal no se modificaron con las lluvias. Únicamente se observó variación temporal en las concentraciones de metales pesados, mostrando concentraciones significativamente menores después de las lluvias. La causa más probable fue un efecto de dilución provocado por las lluvias. Dicho efecto no fue significativo en el resto de los parámetros debido a que la precipitación pluvial no fue suficiente para diluir las altas concentraciones de materia orgánica, nutrientes, organismos coliformes y tóxicos orgánicos (397 mm, 13% por debajo de la media anual estatal, SMN 2006). Adicionalmente, los escurrimientos provocados por las precipitaciones arrastran contaminantes al cauce del río, incrementando su concentración en el agua (Holguín *et al.* 2006).

El empleo del IGCA propuesto facilitó el manejo e interpretación de los datos obtenidos, permitiendo evaluar de forma sencilla las tendencias espaciales y la calidad global del agua del río San Pedro (Said *et al.* 2004, Sedeño-Díaz y López-López 2007). Los subíndices que lo conforman mostraron el comportamiento espacial independiente de los principales tipos de contaminantes; facilitando la comunicación de los resultados en un formato sencillo (Lumb *et al.* 2006). De acuerdo con el IGCA, la calidad del agua del río San Pedro en la entidad es en general *pobre*, debido fundamentalmente a desechos municipales, agrícolas y pecuarios. El esfuerzo del Gobierno del Estado por incrementar la infraestructura y capacidad de saneamiento de las aguas residuales, con la puesta en marcha en los últimos años de cinco nuevas plantas de tratamiento (López 2007), no generó efectos significativos sobre el estado general del río. Por otra parte, el comportamiento de los diferentes subíndices del IGCA implica que las plantas de tratamiento en operación sólo remueven en forma eficiente materia orgánica y organismos coliformes, en tanto que los nutrientes y los tóxicos orgánicos no son depurados en forma adecuada.

La falta de patrones espaciales en las concentraciones de los parámetros evaluados es consistente con la forma desordenada e intermitente en que son vertidas al cauce las descargas de aguas residuales crudas y tratadas (Castañé *et al.* 1998). Esta situación se deriva del gran número de descargas clandestinas localizadas a lo largo del río, y explica que únicamente se haya observado una mejoría significativa en la calidad del agua en los sitios de colecta próximos a descargas de aguas residuales tratadas. En la zona central del estado se observó contaminación de origen industrial, lo cual se

manifestó principalmente por las mayores concentraciones registradas de metales. En la temporada de sequía, la estación de colecta 29, ubicada en esta zona (municipio de Aguascalientes), presentó serios problemas de contaminación por Al, As, Fe, Cu, Mn, Hg y Cr. No obstante que el Al y Fe son los metales más abundantes en la naturaleza y su presencia puede deberse tanto a fuentes geogénicas como antropogénicas (Holguín *et al.* 2006), los niveles observados sugieren la existencia de descargas clandestinas intermitentes de origen industrial. La evaluación espacial de la calidad del agua del río San Pedro reflejó que el estado general de tres de sus principales afluentes es similar al del cauce principal, dado que no se apreciaron cambios significativos en el valor del IGCA en los sitios ubicados aguas abajo de las zonas de confluencia (sitio 27, Río Chicalote; sitio 37, Río Morcinique; sitio 41, Río San Francisco).

Puede concluirse que, en general, la calidad del agua del río San Pedro a lo largo del Estado de Aguascalientes se encontró seriamente deteriorada, el IGCA mostró que casi siempre está alejada de los niveles adecuados para uso agrícola. La inexistencia de flujo base que presenta este río implica un mayor impacto de las descargas contaminantes; lo cual se refleja principalmente en las zonas centro y sur del Estado, donde se ubica la mayor parte de la población y la actividad industrial. Las concentraciones de contaminantes observadas reflejaron un fuerte impacto provocado principalmente por descargas de aguas residuales municipales, aunado a efluentes de retorno de campos agrícolas y descargas de granjas y ranchos.

La remediación y conservación de este importante cuerpo de agua del Estado de Aguascalientes requiere no sólo del incremento de la infraestructura de saneamiento de aguas residuales municipales e industriales, sino de implementar plantas de tratamiento que además de remover eficientemente materia orgánica y organismos coliformes, depuren las aguas residuales del contenido de nutrientes, tóxicos orgánicos y metales pesados que actualmente son vertidos al río. Es imprescindible controlar las descargas clandestinas y exigir el cumplimiento de las normas oficiales mexicanas a las empresas que descargan sus aguas al río San Pedro y cuerpos de agua relacionados a su cauce. Adicionalmente, es necesario un programa de monitoreo adecuado para dar seguimiento y controlar los efectos de las acciones realizadas sobre la calidad del agua, para lo cual se sugiere el uso del IGCA descrito en el presente trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Fondo SEMARNAT-CONACyT por la aportación de recursos para el proyecto “Estudio sobre los agentes, cargas contaminantes y toxicidad que afectan la cuenca del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes” (clave FOSEMARNAT-2004-01-78). A CONACyT por la beca otorgada para la realización de los estudios de Doctorado en Ciencias Biológicas de Guilda Guzmán Colis (clave 170010).

REFERENCIAS

- Alberta Environment (1995). Alberta River Water Quality Index [en línea]. <http://environment.alberta.ca/1777.html#Methodology>. 12/03/2008.
- APHA (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater. 20a ed. American Public Health Association. Washington, EUA. 1325 pp.
- Avelar-González F. J., Ramírez-López E. M., Martínez-Saldaña M. C., Guerrero-Barrera A. L., Jaramillo-Juárez F. y Reyes-Sánchez J. L. (2009). Calidad del agua en el estado de Aguascalientes y sus efectos en la salud de la población. Memorias. Primera Reunión Nacional de Investigación Sobre el Agua, Red Temática del Agua-CONACYT (RETAC). En proceso de publicación. Cocoyoc, Morelos. 21 al 23 de enero, 2009.
- Camargo J. A. y Alonso A. (2007). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático [en línea]. <http://www.revistaecosistemas.net/pdfs/486.pdf> 24/09/08.
- Castañé P. M., Loez C. R., Olguín F., Puig A., Rovedatti M. G., Topalián M. L. y Salibián A. (1998). Caracterización y variación especial de parámetros fisicoquímicos y del plancton en un río urbano contaminado (río Reconquista, Argentina). Rev. Int. Contam. Ambient. 14, 69-77.
- CCME (1999). Guías Canadienses de la Calidad del Agua. The Canadian Council of Ministers of the Environment [en línea]. <http://www.ec.gc.ca/ceqg-rcqe/English/ceqg/water/default.cfm#agr>. 19/09/08.
- Chapman D. (1996). *Water Quality Assessment. A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. Segunda Edición. UNESCO/WHO/UNEP. Champan & Hall. Londres, Reino Unido. 626 pp.
- CONAGUA (2007). *Estadísticas del agua en México*. Comisión Nacional del Agua. SEMARNAT. México D. F. 626 p.
- CONAMA (2004). Anteproyecto de normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las Aguas continentales superficiales de la Cuenca del río Aysén. Comisión Nacional del Medio Ambiente. Diario Oficial de la República de Chile. 16 de diciembre de 2004 [en línea]. http://www.sinia.cl/1292/articles-34169_Aysen.pdf 02/02/10.
- Graniel C. E. y Carrillo C. M. (2006). Calidad del agua del río Zanatenco en el Estado de Chiapas. Ingeniería. 10, 35-42.
- Hess T. F., Silverstein J. y Schmidt S. K. (1993). Effect of glucose on 2, 4-dinitrophenol degradation kinetics in sequencing batch reactors. Water Environ Res 65, 73-81.
- Holguín C., Rubio H., Olave M. E., Saucedo R., Gutiérrez M. y Bautista R. (2006). Calidad del agua del río Conchos en la región de Ojinaga, Chihuahua: Parámetros fisicoquímicos, Metales y Metaloides. Universidad y Ciencia 22, 51-63.
- INEGI (2006). *Estadísticas demográficas 2005*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México, D. F. 203 pp.
- IPROGA (1969), Reglamento de los títulos I, II Y III del D. L. N° 17752 sobre Ley General de Aguas. Instituto de promoción para la Gestión del agua [en línea].

- http://www.iproga.org.pe/index.php?option=com_content&view=article&id=70&Itemid=82. 10/06/09.
- Jáuregui-Medina C. S., Ramírez-Hernández M A., Espinoza-Rodríguez R., Tovar-Rodarte R., Quintero-Hernández B. y Rodríguez-Castañeda I. (2007). Impacto de la descarga de aguas residuales en la calidad del río Mololoa (Nayarit, México) y propuestas de solución. *Rev. Latin. Rec. Nat.* 3, 65-73.
- Kim A. G. y Cardone C. R. (2005). Scatterscore: A Reconnaissance Method to Evaluate Changes in Water Quality. *Environ. Monit. Assess.* 111, 277-295.
- López J. (2007). Estudio sobre la concentración de contaminantes en el agua del cauce del río San Pedro. Tesis de Maestría. Centro de Ciencias Básicas. Universidad Autónoma de Aguascalientes. Aguascalientes, México, 126 pp.
- Lumb A., Halliwell D. y Sharman T. (2006). Application of CCME water quality index to monitor water quality: a case of the Mackenzie river basin, Canada. *Environ. Monit. Assess.* 113, 411-429.
- Rico-Martínez R., Velázquez-Rojas C. A., Pérez-Legaspi I. A. y Santos-Medrano G. E. (2000). The use of aquatic invertebrate toxicity test and invertebrate enzyme biomarkers to assess toxicity in the states of Aguascalientes and Jalisco. En: *Biomonitoring and Biomarkers as indicators of environmental change*. (F. M. Butterworth, A. Gunatilake y M. E. Gonshebbatt, Eds.). Plenum Press, New York, Vol. 2, pp. 427-438.
- Rivera-Vázquez R., Palacios-Vélez O. L., Chávez-Morales J., Belmont M. A., Nikolski-Gravilov I., De la Isla de Bauer M. L., Guzmán-Quintero A., Terrazas-Onofre L. y Carrillo-González R. (2007). Contaminación por coliformes y helmintos en los ríos Texcoco, Chapingo y San Bernardino tributarios de la parte oriental de la cuenca del Valle de México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 23, 69-77.
- Said A., Stevens D. K. y Sehlke G. (2004). An Innovative Index for Evaluating Water Quality in Streams. *Environ. Manage.* 34, 406-414.
- Samboni N. E., Carvajal Y. y Escobar J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e Investigación* 27, 172-181.
- Sedeño-Díaz J. E. y López-López E. (2007). Water Quality in the Rio Lerma, Mexico: An Overview of the Last Quarter of the Twentieth Century. *Water Resour Manage* 21, 1797-1812.
- SEDUE (1989). Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua CE-CCA-001-1989. Secretaría Desarrollo Urbano y Ecología. Diario Oficial de la Federación. 02 de diciembre de 1989.
- SMN (2006). Datos de temperatura y precipitación. Sistema Meteorológico Nacional [en línea]. <http://smn.cna.gob.mx>. 13/10/2007.

UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
Trópico Húmedo
 Dirección de Investigación y Posgrado
 Secretaría de Servicios Académicos
ciencia.dip@ujat.mx
 Teléfono/fax: 01.993.3127210



Dictamen

Villahermosa, Tab., a 3 de febrero de 2011

Artículo en extenso --- **EVALUACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS, MICROBIOLÓGICOS Y METALES PESADOS EN AGUA Y SEDIMENTOS DEL RÍO SAN PEDRO EN EL ESTADO DE AGUASCALIENTES**

Registra --- 544 UC

Autores --- Guilda Guzmán-Colis, Elsa M. Ramírez-López, Frédéric Thalasso, Silvia Rodríguez-Narciso, Alma L. Guerrero-Barrera, Francisco J. Avelar-González

Dictamen --- Aceptado con correcciones menores

Comentarios --- Los resultados son de interés para la revista y sus lectores, sin embargo los árbitros indican que el documento presenta deficiencias en cuanto a la introducción, resultados y la discusión. Se les pide a los autores revisar las normas de la revista para realizar las observaciones pertinentes. Se anexan dictámenes y observaciones de los árbitros.

Plazo para recibir la versión corregida --- 20 de febrero.

Reciban un saludo respetuoso.

Dr. Maximiano Estrada Botello
 Editor Asociado



c.c.p. Archivo

EVALUACIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA Y SEDIMENTOS DEL RÍO SAN PEDRO EN EL ESTADO DE AGUASCALIENTES

EVALUATION OF POLLUTANTS IN WATER AND SEDIMENTS OF THE SAN PEDRO RIVER IN THE STATE OF AGUASCALIENTES

RESUMEN

El río San Pedro es el principal cuerpo de agua superficial del Estado de Aguascalientes. Cruza la entidad en dirección norte-sur, cubriendo una distancia en línea recta de aproximadamente 90 km, hasta su confluencia con el río Santiago en el Estado de Jalisco. Con la finalidad de estudiar el nivel de contaminación del río y la probable infiltración de contaminantes al acuífero del Valle de Aguascalientes, se tomaron muestras de agua y sedimentos de 50 sitios seleccionados a lo largo del río. Se evaluaron además 17 pozos aledaños al río (a menos de 300 m). Se realizaron dos campañas de muestreo, una en temporada de sequía y otra posterior a las lluvias. Se determinó pH, oxígeno disuelto, DBO₅, DQO, P-total, N-total, fenoles, anilinas, detergentes (SAAM), coliformes fecales y metales pesados (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb y Zn). El agua del río San Pedro presentó elevadas concentraciones de materia orgánica, P-total, N-total, detergentes y coliformes fecales. Algunos sitios mostraron contaminación moderada por Al y Fe. De acuerdo con los criterios de la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos, todos los sedimentos presentaron contaminación por As; el 50 % de los mismos por Pb y Zn, el 25 % con Cu y aproximadamente el 13 % con Mn y Cr. Tres sedimentos presentaron contaminación moderada por Fe y otros tres por Hg. Los resultados obtenidos en los pozos de agua no mostraron evidencia concluyente de contaminación del acuífero por aguas superficiales.

Palabras clave: Contaminación agua, metales pesados, sedimentos, río, acuífero

ABSTRACT

The San Pedro River is the main surface water body of Aguascalientes State. It crosses the State from north-south covering a distance of 90 km until its confluence with the Santiago River in Jalisco State. The aim of this study was to evaluate the pollution of the river and potential pollutants infiltration into the aquifers. With that purpose, both water and sediments samples were taken from 50 sites selected along the river. Samples were also taken from 17 wells located close to the San Pedro river (less than 300 m). Two sampling campaigns were carried out, one during the dry season and the other after the rainy season. pH, dissolved oxygen, BOD₅, COD, total-P, total-N, phenols, anilines, detergents (MBAS), fecal coliforms and heavy metals (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, P and Zn) were determined. The results showed that the water from the river is highly polluted with organic matter, P-total, N-total, detergents and fecal coliforms. Some locations showed moderate Al and Fe pollution. According to United State Environmental Protection Agency criteria, all sediments samples showed As pollution, 50 % of sediments samples showed high levels

of Pb and Zn pollution, 25 % was polluted with Cu and approximately 13 % of the samples were polluted with Mn and Cr. Three sediments were moderately polluted with Fe and other three sites with Hg. The results obtained in water wells did not show conclusive evidence of pollutants infiltration to the aquifer from superficial water.

Key words: Water pollution, heavy metals, sediments, river, aquifer

INTRODUCCIÓN

El Estado de Aguascalientes se localiza en el centro de la República Mexicana, entre las coordenadas geográficas 21° 37' a 22° 28' de latitud norte y 101° 50' a 103° 00' de longitud oeste, cuenta con una superficie de 5 589 km² (0.28 % del territorio nacional) y una población total de 1 065 416 habitantes (Anónimo 2006). El principal sistema hidrológico de la entidad es el río San Pedro, el cual se circunscribe dentro de la Región Hidrológica N° 12 Lerma-Santiago-Pacífico (Anónimo 2007). Esta región es una de las reservas de agua más importantes de México, con una superficie aproximada de 77 000 km², de la cual el 7.2 % está localizada dentro del Estado de Aguascalientes (Santos-Medrano *et al.* 2007). El río San Pedro nace en la sierra de San Pedro, localizada en el municipio de Ciudad Cuauhtémoc en el Estado de Zacatecas, e ingresa al Estado de Aguascalientes por el municipio de Cosío. Recorre la entidad en dirección norte-sur (aproximadamente 90 km en línea recta) y la abandona por el poblado de Chilarillo en el Estado de Jalisco (Ramírez *et al.* 2007, Santos-Medrano *et al.* 2007). De acuerdo con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el río se asienta en una falla geológica con una profundidad promedio de 50 cm, y presenta sedimentos principalmente de tipo arcilloso. En sus márgenes se asientan 50 comunidades y seis cabeceras municipales (incluyendo la capital del Estado), que en conjunto albergan al 80 % de la población del Estado; así como industrias textiles, del vestido, procesadoras de alimentos, automotriz y electrónica (Anónimo 1997).

El crecimiento poblacional (500 % en los últimos 60 años), aunado al desarrollo económico del Estado de Aguascalientes, ha causado fuertes presiones sobre los recursos hídricos (Ramírez *et al.* 2007). De acuerdo a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la disponibilidad total de agua superficial sólo satisface el 35 % de las necesidades del sector agropecuario, el resto de la demanda de este sector (65 %), además del 100 % de las demandas de los sectores industrial y doméstico, se abastece con agua extraída de los cinco acuíferos de la entidad. Los cuales globalmente presentan un nivel de sobreexplotación cercano al 100 %, destacando el acuífero del Valle de Aguascalientes (Anónimo 2007). Este acuífero subyace al río San Pedro y su sobreexplotación ha provocado inversiones de flujo y agrietamiento por subsidencia, incrementando las posibilidades de infiltración de contaminantes al acuífero (González 2002). Este riesgo es latente, considerando que la CONAGUA señala que el río no presenta flujo base (Anónimo 2002) y en su cauce son vertidas aproximadamente el 96 % (cerca de 120 Mm³ por año) de las aguas residuales tratadas (aproximadamente 53.6 Mm³ al año) y crudas generadas por los diversos sectores del Estado (Anónimo 2007, Ramírez *et al.* 2007). Estudios previos realizados por el IMTA, han reportado la presencia de compuestos orgánicos persistentes en el cauce principal y varios de sus afluentes

(Anónimo 1997). Se ha reportado toxicidad aguda en los principales arroyos y ríos afluentes (Rico-Martínez *et al.* 2000). Ramírez *et al.* (2007), en un estudio circunscrito al municipio de Aguascalientes, reporta contaminación con materia orgánica, fósforo total (P_t), nitrógeno total (N_t), detergentes (SAAM) y metales pesados (Al, Cd, Cr, Fe, Hg, Pb y Zn); también observó toxicidad aguda en cerca del 60 % de las muestras de agua. Con respecto a la calidad del agua subterránea, se han observado niveles superiores a la Norma NOM-127-SSA1-1994 de fluoruros, arsénico (As), mercurio (Hg) y plomo (Pb); además de fenoles, SAAM y coliformes fecales (Avelar & Llamas 2000). La contaminación del río San Pedro no sólo constituye un probable riesgo para la salud pública de las comunidades aledañas, es una fuente potencial de contaminación del acuífero del Valle de Aguascalientes, principal suministro de agua potable del Estado. El objetivo del presente trabajo fue extender el estudio de la contaminación del cauce del río San Pedro a todo el estado de Aguascalientes, evaluar su variación temporal y estudiar la posible contaminación del acuífero del Valle de Aguascalientes por aguas superficiales provenientes de este cauce.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se establecieron 50 sitios de muestreo a lo largo del cauce del río San Pedro, considerando factores topográficos, geológicos e hidrológicos, además de puntos relevantes de descarga de contaminantes al río. Fueron seleccionados además 17 pozos de agua próximos al cauce del río San Pedro (a menos de 300 m de distancia), los cuales tienen una profundidad entre 200 y 300 m; salvo los dos últimos pozos ubicados al sur de la entidad, cuyas profundidades son de 429 y 90 m, respectivamente. La posición geográfica de todos los sitios de muestreo se determinó con un GPS marca GARMIN, modelo GPS MAP 60c. En la Figura 1 se muestra la localización de los pozos de agua seleccionados, así como la ubicación de las plantas de tratamiento de aguas residuales y los dos parques industriales con los que cuenta la entidad. En la Figura 2 se observan los sitios de muestreo ubicados en el cauce del río San Pedro. Del total de los sitios de muestreo estudiados, aproximadamente el 50% fueron estaciones próximas a descargas de origen municipal, 25 % cercanas a descargas de origen industrial y el otro 25% próximas a descargas de origen agrícola y pecuario. Se realizaron dos muestreos, el primero durante la época de sequía (Mayo-Junio) y el segundo después de la temporada de lluvias (Septiembre-Noviembre). En cada sitio de colecta del río San Pedro se tomaron muestras puntuales de agua (4.0 L) y muestras compuestas de sedimentos (500 g). La toma de muestras de sedimentos fue mediante una selección aleatoria simple, colectando muestras de superficie y a 10 cm de profundidad (Anónimo 1993). El agua de los pozos (4.0 L) se recolectó en las estaciones de bombeo, directamente de la llave de toma de muestra, después de desconectar el mecanismo de cloración y purgar el sistema por 15 minutos.

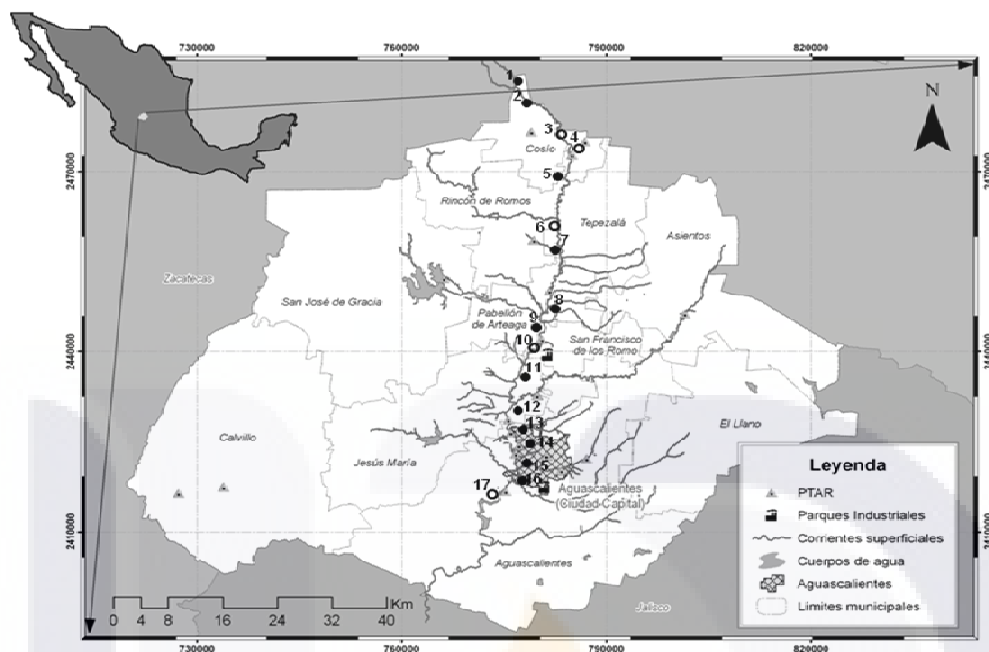


Figura 1. Ubicación de los pozos urbanos (●) y agrícolas (○) aledaños al cauce del río San Pedro.

Figure 1. Localization of urban (●) and agricultural (○) wells near San Pedro River basin.

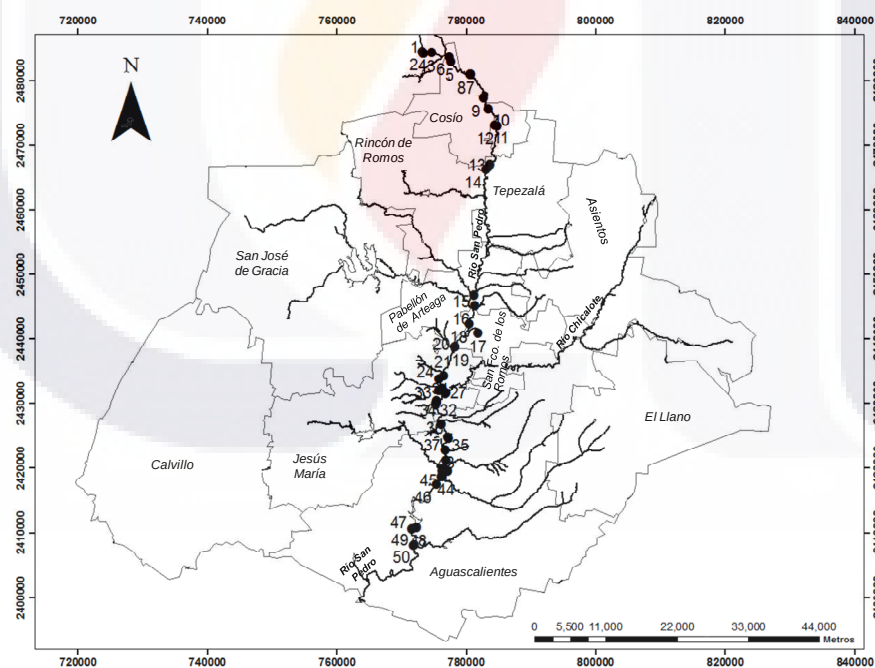


Figura 2. Mapa del Estado de Aguascalientes con la ubicación de los sitios de muestreo seleccionados en el cauce del Río San Pedro (●).

Figure 2. Aguascalientes State map. It shows the location of the selected sampling sites at the San Pedro's river (●).

La toma y preservación de las muestras de agua, así como todas las determinaciones analíticas empleadas, se desarrollaron bajo los controles de calidad recomendados por APHA- AWWA-WPCF en los Métodos Normalizados para el análisis de agua y agua residual (Anónimo 1998). A continuación se mencionan los métodos empleados para la determinación de cada uno de los parámetros evaluados, entre paréntesis se indica la clave del método de acuerdo a los Métodos Normalizados para el análisis de agua y agua residual (Anónimo 1998). En campo se determinó el pH (método 4500-H+ B, equipo marca HACH modelo EC10) y el oxígeno disuelto (método 4500-O G, equipo HACH modelo DO175). A las muestras de agua colectadas se les determinó DBO₅ (5210 B), DQO por el método de reflujo cerrado y colorimetría (5220 D), nitrógeno total (N_t) por microKjeldahl (4500-Norg B), fósforo total (P_t) por el método del ácido ascórbico (4500-P E), detergentes como sustancias activas al azul de metileno (SAAM, 5540 C), fenoles por el método de la 4-aminoantipirina y extracción clorofórmica (5530 C), anilinas por el método colorimétrico de Hess *et al.* (1993) y coliformes fecales por el método del NMP (9221 C). Los metales fueron cuantificados por medio de espectrofotometría de absorción atómica, utilizando un equipo Perkin Elmer Analyst 100. Dependiendo de la sensibilidad requerida, se empleó la modalidad de horno de grafito (3113 B) o flama (3111 B) para determinar Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn. En las determinaciones por flama, a fin de incrementar la sensibilidad del método, las muestras fueron concentradas 10 veces durante el proceso de digestión. El As fue cuantificado por la modalidad de generación de hidruros (3114 B) y Hg por vapor frío (3112 B). Las determinaciones se realizaron por triplicado, en cada lote se utilizó una muestra fortificada al azar (porcentaje de recuperación entre 85 y 115 %) y duplicados al azar (coeficiente de variación menor al 15 %). Los métodos se validaron empleando el material de referencia SRM 1643d del US National Institute of Standards and Technology (NIST).

Las muestras de sedimentos fueron sometidas a un tratamiento de lixiviometría, mediante una modificación del método propuesto por Robledo y Maldonado (1997). Los sedimentos fueron secados a 50 °C por 72 h, seguido de una homogenización en un mortero de porcelana con mazo de madera y posteriormente fueron tamizados en una malla de 1.0 mm. Para obtener los extractos se agregó 5.0 g de muestra tratada a 800 ml de agua destilada. La mezcla se mantuvo en agitación durante 24 h y finalmente fue filtrada. A partir de los extractos obtenidos se determinó pH, DQO, N_t, P_t y tóxicos orgánicos (fenoles, anilinas y SAAM), siguiendo los métodos antes mencionados. La determinación de metales pesados se realizó de acuerdo con los métodos propuestos por la USEPA (Anónimo 1991), empleando los controles de calidad recomendados y el material de referencia RM 8704 (Buffalo River Sediments) del US NIST.

Se realizó un análisis de estadística descriptiva a los resultados obtenidos del cauce del río (mediana, cuartiles y valores máximos) y un análisis de correlación entre agua y sedimentos. Ambos análisis se realizaron empleando el programa de STATISTICA v 7. Para determinar diferencias significativas entre las campañas de muestreo evaluadas, se realizó la prueba de Mann-Whitney ($\alpha < 0.05$) con MINITAB 14 (Silva *et al.* 2002). Para evaluar la calidad del agua del río San Pedro se emplearon los criterios ecológicos de la calidad del agua (CE-CCA-001-1989) en el rubro de riego agrícola (Anónimo 1989) y los

límites máximos permisibles (LMP) publicados en las normas oficiales mexicanas NOM-001-ECOL-1996 y NOM-003-ECOL-1997 (Anónimo 1996, 1997a). En el caso de los sedimentos fueron considerados como referencia los valores señalados por la Agencia de Protección al Ambiente de USA (Anónimo 1977) y las concentraciones de referencia totales (CR_T) indicadas en la norma mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (Anónimo 2004). Las muestras de agua de los pozos fueron valuadas a partir de los LMP publicados en la norma oficial para agua de consumo humano NOM-127-SSA1-1994 (Anónimo 1994). Los parámetros que no están incluidos en ninguna de las referencias anteriores fueron comparados de manera individual con valores de referencia de otros trabajos u organizaciones, y se comentan en el apartado de discusión.

RESULTADOS

Muestras de agua del Río San Pedro.

Todas las muestras de agua del río San Pedro presentaron valores de pH entre 6.0 y 8.5, dentro de los LMP (5.0 – 10) señalados en la NOM-001-ECOL-1996 (Anónimo 1996). Las concentraciones de materia orgánica (DQO y DBO_5) fueron en general elevadas a lo largo del cauce, su presencia se debe principalmente a las descargas residuales de origen municipal que son vertidas al río sin tratamiento previo (Ramírez *et al.* 2007). El 90 % de las estaciones de colecta tuvieron concentraciones de DQO por arriba del LMP (100 mg L^{-1}) señalado para descargas a ríos y embalses en la norma oficial mexicana 001-ECOL-1996 (Anónimo 1996); las medianas se encontraron entre 700 y 600 mg L^{-1} , con valores máximos que alcanzaron los 1 400 mg L^{-1} (estaciones de colecta de la 15 a la 19). De acuerdo con esta misma referencia, el 50 % de los sitios evaluados sobrepasaron los LMP de DBO_5 (150 mg L^{-1}) y P_t (20 mg L^{-1}). Los sitios más impactados por estos contaminantes se ubicaron en la zona centro de la entidad (del punto 15 hasta el 27) con concentraciones máximas de 500 y 40 mg L^{-1} para DBO_5 y P_t , respectivamente (Figura 3). En general, las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) fueron menores a 1.0 mg L^{-1} , en correspondencia con las elevadas concentraciones de materia orgánica. Únicamente los sitios ubicados cerca de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales (estaciones de colecta 16 y 44), presentan altas concentraciones de OD (aproximadamente 5 mg L^{-1}) y una carga orgánica baja (concentraciones de DBO_5 y DQO menores a 10 mg L^{-1}). En el 75 % de los puntos evaluados (localizados de forma irregular en todo el cauce), los valores de N_t sobrepasaron entre 2.5 y 6.5 veces el LMP (40 mg L^{-1}) señalado en la norma oficial mexicana 001-ECOL-1996 (Anónimo 1996); los valores máximos observados fueron cercanos a los 300 mg L^{-1} (sitios 7 y 19).

Los nutrientes N_t y P_t provienen principalmente de las aguas de retorno de los campos agrícolas y en segundo termino de descargas municipales. Se observaron también concentraciones elevadas en las estaciones de colecta próximas a descarga de rastros municipales, ubicados en San Francisco de los Romo y Jesús María. Las concentraciones de fenoles en todos los sitios fueron menores de 0.8 mg L^{-1} . Las concentraciones medianas de anilinas y SAAM fueron alrededor de 30 mg L^{-1} , con niveles máximos de anilinas cercanos a los 50 mg L^{-1} (sitios 17, 20 y 29) y niveles máximos de SAAM de 90 mg L^{-1} (sitios 18 y 29). Pese a que no existen valores de referencia mexicanos para estos compuestos, su origen es principalmente antropogénico y aportan evidencia sobre

contaminación de origen industrial. Esto coincide con la ubicación del Parque Industrial del Valle de Aguascalientes (sitio 17, Figura 1). El valor de las concentraciones medianas de coliformes fecales fue alrededor de 3.16×10^6 NMP/100 mL, sobrepasando por más de cuatro ordenes de magnitud el LMP (240 NMP/100 mL) para reuso en servicios al público con contacto directo, señalado en la NOM-003-ECOL-1997 (Anónimo 1997a). Únicamente las estaciones próximas a descargas de plantas de tratamiento (16 y 44) presentaron concentraciones de coliformes por debajo del LMP. El resto refleja descargas de aguas residuales municipales sin tratamiento, ya que los coliformes fecales son el principal indicador de descargas sanitarias. Los resultados de los parámetros fisicoquímicos antes mencionados se muestran en gráficas de cajas y bigotes o box-plot (Figura 3). Los valores de p obtenidos en la prueba de Mann-Whitney ($\alpha=0.05$) fueron mayores a 0.05 (Figura 3), indicando que las concentraciones de estos parámetros no mostraron cambios significativos entre la campaña de muestreo realizada en la época de sequía y la campaña realizada después del periodo de lluvias.

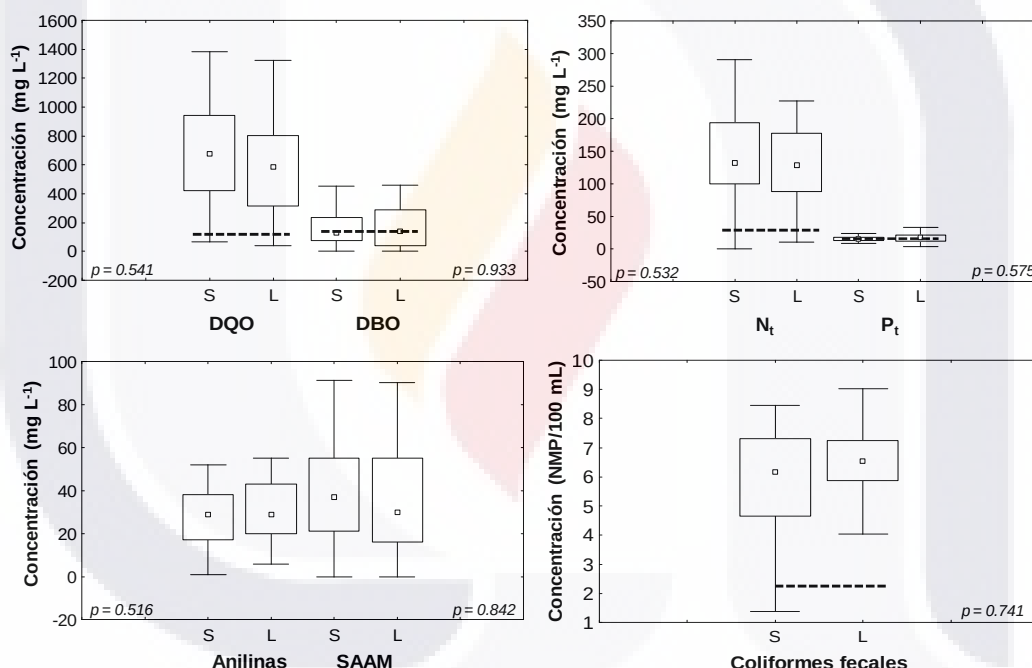


Figura 3. Análisis estadístico de las muestras de agua del cauce del río San Pedro en la época de sequía (S) y posterior a las lluvias (L). Se muestra la mediana ($\square$), los cuartiles Q1 y Q3 ($\square$) y el intervalo de concentraciones sin datos aberrantes ($|$). La línea punteada señala los LMP señalados en las normas oficiales mexicanas (Anónimo 1996; Anónimo 1997a). Los valores de $p > 0.05$ indican que no existe diferencia significativa entre las campañas de muestreo (Mann-Whitney, $p=5\%$).

Figure 3. Statistical analysis of the water samples of the San Pedro's river in the drought season (S) and after rainy seasons (L). It shows the medium values ($\square$), the Q1 and Q3 quartiles ($\square$) and non-outlier range ($|$). The dotted line indicates the PML of the official Mexican procedure (Anonymous 1996; Anonymous 1997a). The values of $p > 0.05$ indicate that do not exist significant difference among the sampling campaigns (Mann-Whitney, $p=5\%$).

En todas las muestras de agua, las concentraciones de Cd y Pb fueron inferiores al límite de detección (0.003 y 0.045 mg L⁻¹ respectivamente). Las concentraciones de As, Cr, Cu, Hg y Zn fueron menores a los LMP señalados en la NOM-001-ECOL-1996 (Anónimo 1996) en todos los sitios de muestreo (Tabla 1). Los valores máximos de Al y Fe fueron 7.40 y 8.86 mg L⁻¹ respectivamente, sobrepasando los LMP (5 mg L⁻¹ para ambos metales) de los criterios ecológicos de la calidad del agua (Anónimo 1989) en dos (17 y 29) y cuatro (17, 19, 20 y 36) de los sitios evaluados, respectivamente. Estos sitios se ubican aguas abajo y próximos del parque industrial del Valle de Aguascalientes. Las concentraciones medianas de Mn fueron de 0.05 mg L⁻¹, con máximos hasta de 1.01 mg L⁻¹ (sitios 5 y 29). No se cuenta normas de referencia mexicanas para este metal; sin embargo, el valor de referencia de acuerdo a la OMS es de 0.4 mg L⁻¹ y valores superiores habitualmente están asociados a contaminación industrial (Anónimo 2003). En general, las concentraciones más altas de metales pesados fueron observadas en la zona centro de la entidad (parte de los municipios de Pabellón de Arteaga, San Francisco de los Romo, Jesús María y la zona norte de la Ciudad de Aguascalientes), donde se ubica la mayor actividad industrial. El contenido de metales en el agua fue mayor en la época de sequía (mayo-junio), mostrando diferencias significativas entre la campaña de muestreo posterior a las lluvias (Mann-Whitney; $p < 0.05$). Lo cual se explica por un efecto de dilución derivado de las lluvias (promedio mensual de 162.7 mm, Anónimo 2007).

Tabla 1. Análisis estadístico de las concentraciones de metales pesados en las muestras de agua del río San Pedro y comparación con los valores de referencia.

Table 1. Statistical analysis of the heavy metal concentrations in the water samples of the San Pedro's river and comparison with the reference values.

Metal	Campaña de muestreo	Q1 (mg L ⁻¹)	Mediana (mg L ⁻¹)	Q3 (mg L ⁻¹)	Máximo (mg L ⁻¹)	Valor de referencia ¹ (mg L ⁻¹)
Al	S*	0.138	0.770	2.088	7.400	5.0 ^{ce}
	L	ND	ND	0.103	4.780	
As	S*	0.010	0.010	0.013	0.030	0.2
	L	ND	ND	0.002	0.020	
Cr	S*	ND	0.010	0.010	0.460	1.0
	L	ND	ND	0.010	0.010	
Cu	S*	ND	0.013	0.040	0.110	4.0
	L	ND	ND	0.006	0.100	
Fe	S*	0.260	0.765	2.240	8.860	5.0 ^{ce}
	L	ND	ND	0.288	3.790	
Hg	S*	ND	0.001	0.001	0.004	0.01
	L	ND	ND	0.002	0.003	
Mn	S*	0.030	0.050	0.133	1.010	----
	L	ND	ND	0.042	0.440	
Zn	S*	0.478	0.100	0.152	0.560	10.0
	L	ND	0.002	0.045	0.460	

¹ LMP señalado en la NOM-001-ECOL-1996 (Anónimo 1996). ^{ce} LMP de los criterio ecológicos para uso agrícola (Anónimo 1989). ND: No Detectable. S: Sequía. L: Lluvia. *Diferencia significativa entre campañas de muestreo (Mann-Whitney; $\alpha = 0.05$). En negritas las concentraciones que sobrepasan los valores de referencia.

De acuerdo con los resultados anteriores, se observó contaminación del agua por materia orgánica, nutrientes (N_t y P_t), tóxicos orgánicos (anilinas y SAAM) y coliformes fecales, en todo el cauce del río San Pedro. Los niveles más elevados de contaminación, incluyendo los metales pesados, se observaron en la zona centro de la entidad (Figura 4), coincidiendo con la ubicación de la mayor parte de la población y la actividad industrial.

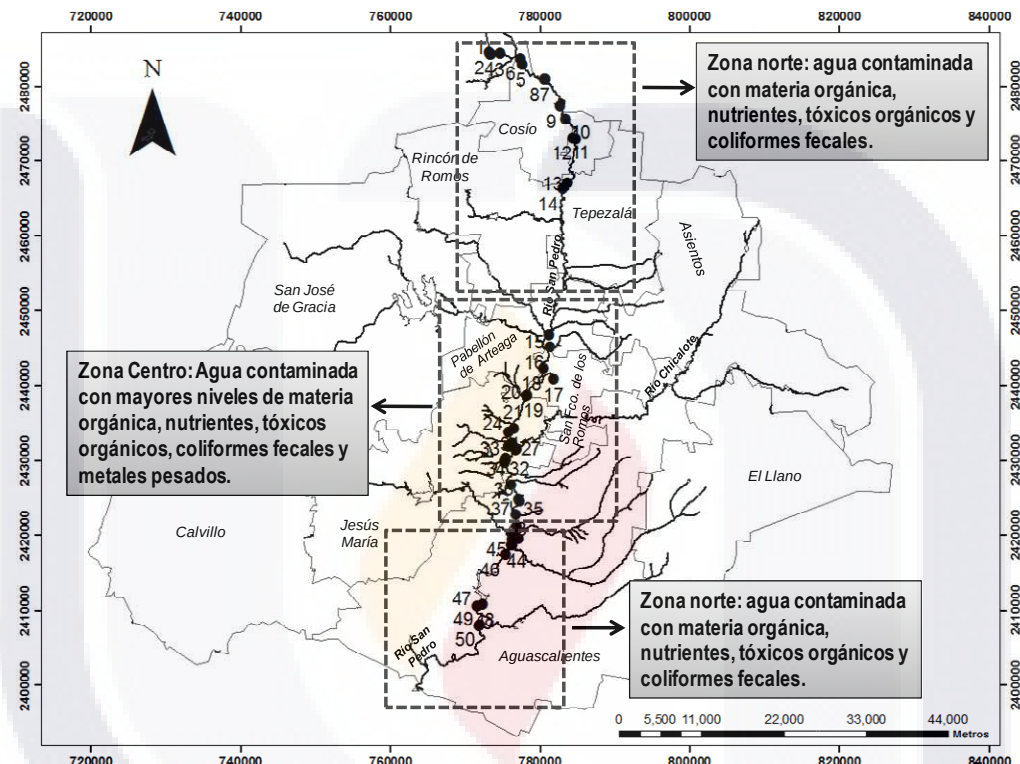


Figura 4. Distribución de los principales contaminantes observados en el agua del río San Pedro. El Estado de Aguascalientes se dividió en tres Zonas. Sitios de muestreo (●).

Figure 4. Distribution of the main pollutants observed in water from San Pedro River. The Aguascalientes State was divided in three Zones. Sample sites (●).

Muestras de sedimentos del Río San Pedro.

En los sedimentos, el pH osciló entre 7.0 y 8.5, con medianas alrededor de 7.7. Las concentraciones medianas de DQO fueron aproximadamente de $8\,000\text{ mg kg}^{-1}$, con máximos de $60\,000\text{ mg kg}^{-1}$ (observados en la zona norte de la entidad). Las medianas de las concentraciones de P_t , anilinas y SAAM (Figura 5) estuvieron aproximadamente en 130, 600 y 100 mg kg^{-1} respectivamente. Los valores máximos observados de P_t (hasta 500 mg kg^{-1}) y anilinas (hasta $2\,200\text{ mg kg}^{-1}$) se presentaron en la zona centro. Los valores más altos de SAAM ($1\,200\text{ mg kg}^{-1}$) fueron observados aguas abajo de la ciudad de Aguascalientes (zona sur). Pese a no contar con valores de referencia de estos

compuestos, el P_t suele provenir de desechos municipales y agrícolas, la presencia de SAAM implica contaminación antropogénica y las anilinas provienen principalmente de la actividad industrial, lo cual aporta evidencia sobre el nivel de alteración por actividades humanas. Las concentraciones medianas de N_t fueron alrededor de 400 mg kg⁻¹ (Figura 5). De acuerdo con los criterios señalados por la USEPA (Anónimo 1977), únicamente el sitio 27 se encontró “moderadamente contaminado” con este nutriente (1 000 – 2 000 mg kg⁻¹). Este sitio corresponde a la confluencia del río San Pedro con su principal afluente, el río Chicalote, en cuyos márgenes se ubican importantes industrias agropecuarias, lo cual explica los elevados niveles de N_t en la zona (Figura 6).

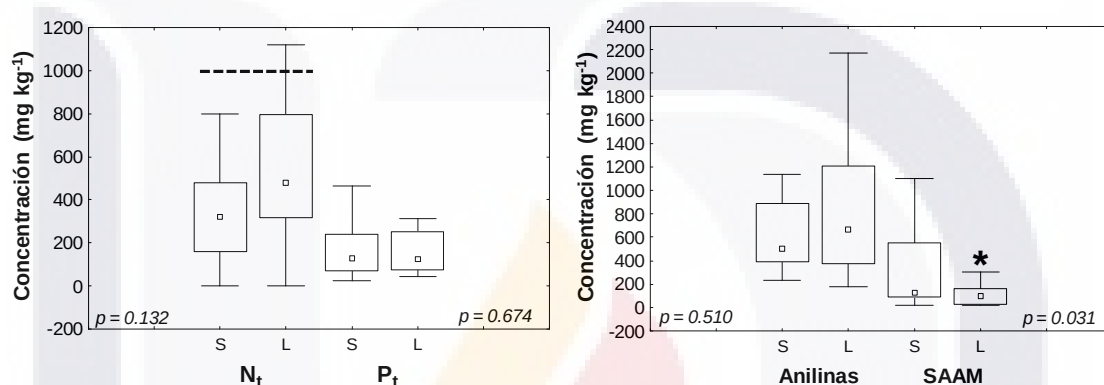


Figura 5. Análisis estadístico de las muestras de sedimentos del cauce del río San Pedro en la época de sequía (S) y posterior a las lluvias (L). Se muestra la mediana ($\square$), los cuartiles Q1 y Q3 ($\square$) y el intervalo de concentraciones sin datos aberrantes ($\square$). La línea punteada señala el límite inferior para considerarlo “moderadamente contaminado” de acuerdo a la agencia norteamericana (Anónimo 1977). Los valores de $p > 0.05$ indican que no existe diferencia significativa entre las campañas de muestreo (Mann-Whitney, $\square = 5\%$). * Diferencia significativa.

Figure 5. Statistical analysis of the sediment samples of the San Pedro's river in the drought season (S) and after rainy seasons (L). It shows the medium values ($\square$), the Q1 and Q3 quartiles ($\square$) and non-outlier range ($\square$). The dotted line indicates the low limit to consider the value “moderately contaminated” according to the USEPA (Anonymous 1977). The values of $p > 0.05$ indicate that not exist significant difference among the sampling campaigns (Mann-Whitney, $\square = 5\%$). * Significant difference.

Al igual que en las muestras de agua, tampoco se detectó Cd en ninguna de las muestras de sedimentos. Las concentraciones medianas de Al fueron aproximadamente de 6 000 y 4 000 mg kg⁻¹ (Tabla 2), y el valor máximo fue 45 000 mg kg⁻¹ en un punto de la zona centro (sitio 21), inferior al criterio (71 000 mg kg⁻¹) señalado por Lindsay (1979) para considerar a los sedimentos contaminados por este metal. Más del 50 % de los sedimentos (Tabla 2) presentaron concentraciones de As entre 0.5 a 10 veces superiores al criterio establecido por la USEPA (Anónimo 1977) como “muy contaminado” (> 8.0 mg kg⁻¹); estos sitios se encontraron dispersos en todo el cauce. En el resto de los sedimentos se observaron concentraciones en el nivel de “moderadamente contaminado” (2.0 a 8.0 mg kg⁻¹). Con respecto al Cu y Zn, el 25 % de los sitios se encontraron

“moderadamente contaminados” (25 a 50 mg kg⁻¹ para Cu y 90 a 200 mg kg⁻¹ para Zn) y “muy contaminados” (más de 50 mg kg⁻¹ para Cu y más de 200 mg kg⁻¹ para Zn). También estos sitios se encontraron dispersos por todo el cauce. El 13 % de los sedimentos estuvieron “moderadamente contaminados” por Cr (de 25 a 75 mg kg⁻¹) y Fe (de 17 000 a 25 000 mg kg⁻¹); en ambos casos los sitios se ubicaron en la zona centro del estado. El 10 % de los sitios se observaron “muy contaminados” con Hg (>1 mg kg⁻¹), Mn (>500 mg kg⁻¹) y Pb (>60 mg kg⁻¹). Los sitios muy contaminados por Hg y Mn se presentaron en la zona norte, mientras que los muy contaminados por Pb se observaron en la zona centro.

Tabla 2. Análisis estadístico de las concentraciones de metales pesados en las muestras de sedimentos del río San Pedro y comparación con los valores de referencia.

Table 2. Statistical analysis of the heavy metal concentrations in the sediment samples of the San Pedro's river and comparison with the reference values.

Metal	Campaña de muestreo	Q1 (mg kg ⁻¹)	Mediana (mg kg ⁻¹)	Q3 (mg kg ⁻¹)	Máximo (mg kg ⁻¹)	Valor de referencia ¹ (mg kg ⁻¹)		CR _T ² (mg kg ⁻¹)
						Moderadamente contaminado	Muy contaminado	
Al	S	3836	5969	11696	44611	---	---	---
	L	3466	4445	6431	39136	---	---	---
As	S	7.141	17.460	32.212	56.803	2 - 8	> 8	22
	L	6.790	12.391	23.505	86.808	2 - 8	> 8	22
Cd	S	ND	ND	ND	3.000	---	> 6	37
	L	ND	ND	ND	0.300	---	> 6	37
Cr	S	4.231	9.890	14.406	32.606	25 - 75	> 75	280
	L	4.194	6.902	10.164	31.405	25 - 75	> 75	280
Cu	S	8.372	17.961	41.381	167.600	25 - 50	> 50	---
	L	8.985	20.525	37.955	116.607	25 - 50	> 50	---
Fe	S	4695	7827	11598	23615	17000 - 25000	> 25000	---
	L	4589	6318	8034	16311	17000 - 25000	> 25000	---
Hg	S	0.230	0.333	0.615	4.900	---	1	23
	L	0.311	0.367	0.483	0.909	---	1	23
Mn	S	125.570	181.931	246.022	517.904	300 - 500	> 500	---
	L	131.742	185.654	221.078	759.900	300 - 500	> 500	---
Pb	S	11.253	22.155	27.843	126.300	40 - 60	> 60	400
	L	14.681	19.448	27.832	91.805	40 - 60	> 60	400
Zn	S	38.634	97.811	284.691	903.701	90 - 200	> 200	---
	L	50.623	88.753	260.326	745.609	90 - 200	> 200	---

¹Límite señalado por la USEPA (Anónimo 1977). ² Concentración de referencia total de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (Anónimo 2004). ND: No Detectable. S: Sequía. L: Lluvia. En negritas las concentraciones que sobrepasan los valores de referencia.

En la Figura 6 se muestra la distribución de la contaminación de sedimentos por estos metales en la entidad. Considerando las concentraciones de referencia totales (CR_T), señaladas para remediación de suelo para uso agrícola/residencial en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (Anónimo 2004), únicamente el 25 % de los sitios sobrepasaron

la concentración de referencia de As (22 mg kg^{-1}). En todos los sitios, los metales Cd, Cr, Hg y Pb estuvieron por debajo de las CR_T (37, 280, 23 y 400 mg kg^{-1} , respectivamente).

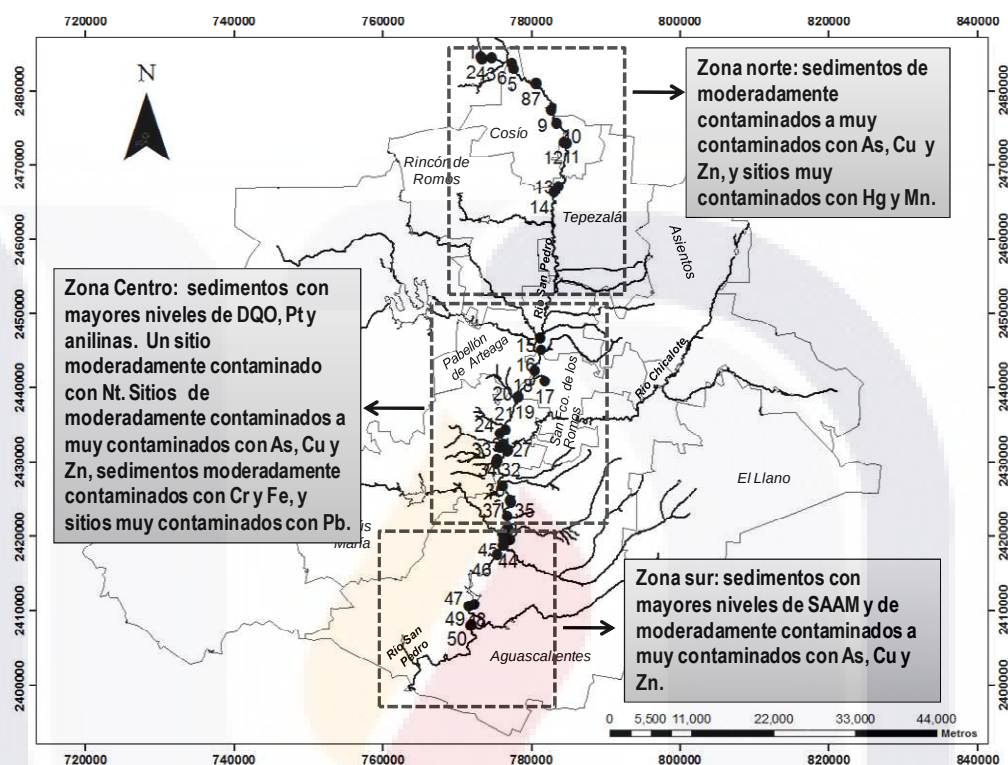


Figura 6. Distribución de los principales contaminantes observados en los sedimentos del río San Pedro. El Estado de Aguascalientes se dividió en tres Zonas. Sitios de muestreo (●).

Figura 6. Distribution of the main pollutants observed in sediments from San Pedro River. The Aguascalientes State was divided in three Zones. Sample sites (●).

En las muestras de sedimentos, únicamente las concentraciones de SAAM mostraron diferencias significativas entre las campañas de muestreo evaluadas (Mann-Whitney; $p < 0.05$). El análisis de correlación entre las concentraciones de los contaminantes en agua y sedimentos mostró coeficientes de correlación (r^2) por debajo de 0.35 en todos los casos (Tabla 3). Lo cual indica que la correlación de contaminantes encontrados en agua y sedimentos no es significativa.

Tabla 3. Coeficientes de correlación (r^2) de los parámetros fisicoquímicos y metales pesados entre las concentraciones observadas en agua y sedimentos del cauce del río San Pedro.

Table 3. Correlation coefficients (r^2) between the concentrations observed of the physicochemical parameters and heavy metals in water and sediments of the San Pedro's river.

Campaña de Muestreo								
Parámetros fisicoquímicos								
DQO	DBO	PT	NT	Anilinas	SAAM	Fenoles		
Sequía	-0.082	0.122	0.004	0.327	-0.051	0.083	0.033	
Lluvia	0.251	0.295	0.293	0.072	-0.011	-0.142	-0.086	
Campaña de Muestreo								
Metales Pesados								
Al	As	Cu	Cr	Fe	Hg	Mn	Zn	
Sequía	-0.200	0.352	-0.091	-0.236	-0.171	-0.042	-0.204	-0.157
Lluvia	0.034	-0.032	-0.025	-0.032	-0.029	-0.260	-0.073	-0.261

Pozos de agua.

Todos los pozos evaluados fueron pozos profundos, las muestras de agua se obtuvieron directamente de la llave de muestreo. Las muestras no presentaron concentraciones de materia orgánica ni tóxicos orgánicos por arriba del límite de detección de las técnicas empleadas (0.2 mg L^{-1} de DQO, 0.5 mg L^{-1} de DBO, $1 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ de fenoles y $50 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ de SAAM). Únicamente en dos pozos agrícolas (10 y 17) se observaron concentraciones de P_i cercanas a 3.0 mg L^{-1} , y en estos mismos pozos el contenido de N_t fue alrededor de 6.0 mg L^{-1} . Además, en el pozo 10, la concentración de coliformes fecales fue $1\ 100 \text{ NMP}/100 \text{ mL}$, 10 % superior al LMP establecido en los criterios ecológicos de la calidad del agua (Anónimo 1989) para agua de uso agrícola ($1\ 000 \text{ NMP}/100 \text{ mL}$). Con respecto a los metales pesados (Tabla 4), dos pozos agrícolas (3 y 4) y un pozo urbano (7) sobrepasaron hasta 2.0 veces el LMP (0.025 mg L^{-1}) para As en la norma mexicana para agua de consumo humano (Anónimo 1994). Sin embargo, en ninguno de estos pozos la concentración de As sobrepasó el LMP (0.1 mg L^{-1}) señalado en los criterios ecológicos de la calidad del agua (Anónimo 1989). Dos pozos (pozo urbano 9 y agrícola 10) mostraron concentraciones de Fe hasta un 70 % mayor que el LMP (0.3 mg L^{-1}) señalado en la norma mexicana NOM-127-SSA1-1994 (Anónimo 1994). De acuerdo con la referencia anterior, dos pozos de suministro a la población (pozos 12 y 14) duplicaron el LMP para Hg (0.001 mg L^{-1}). La concentración máxima (0.004 mg L^{-1}) de este metal se observó en un pozo agrícola (pozo 17). Los niveles de Mn en los pozos urbanos no sobrepasaron el LMP (0.15 mg L^{-1}) de la norma para agua de consumo humano (Anónimo 1994). Sin embargo, el pozo agrícola número 10 presentó concentraciones de Mn hasta cuatro veces superiores al LMP.

Tabla 4. Análisis estadístico de las concentraciones de metales pesados en los pozos de agua y comparación con los valores de referencia.

Table 4. Statistical analysis of the heavy metals concentrations observed in the water wells and comparison with the reference values.

Metal	Campaña de muestreo	Mínimo (mg L ⁻¹)	Mediana (mg L ⁻¹)	Máximo (mg L ⁻¹)	Valor de referencia ¹ (mg L ⁻¹)
As	S	0.001	0.014	0.051	0.025
	L	ND	0.013	0.042	0.100 ^{ce}
Fe	S	ND	ND	0.872	1.000
	L	ND	ND	1.700	
Hg	S	ND	ND	0.004	0.001
	L	ND	ND	0.002	
Mn	S	ND	ND	0.731	0.150
	L	ND	ND	0.602	
Zn	S	ND	ND	0.016	5.000
	L	ND	ND	0.600	

¹LMP señalado en la NOM-127-SSA1-1994 (Anónimo 1994). ^{ce} LMP para uso agrícola indicado en los criterios ecológicos (Anónimo 1989). ND: No Detectable. S: Sequía. L: Lluvia. *Diferencia significativa entre campañas de muestreo (Mann-Whitney, $\alpha = 0.05$). En negritas las concentraciones que sobrepasan los valores de referencia.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el presente trabajo en todo el cauce del Río San Pedro coinciden con el estudio realizado por Ramírez *et al.* (2007) en tramo del río comprendido en el municipio de Aguascalientes. Se observó un marcado deterioro de la calidad del agua, provocado principalmente por las descargas de aguas residuales sin tratar, de origen municipal, agropecuario e industrial (Jáuregui-Medina *et al.* 2007). El 50 % de las muestras de agua sobrepasaron el LMP de referencia para dos o más parámetros de materia orgánica, nutrientes, tóxicos orgánicos y coliformes fecales. Las concentraciones máximas de DBO₅, P_t y N_t fueron hasta 7.5 veces superiores a los LMP establecidos en la NOM-001-ECOL-1996 (150, 20 y 40 mg L⁻¹, respectivamente) para uso público urbano (Anónimo 1996), mientras que los valores de DQO fueron hasta 14 veces superiores al LMP señalado para descargas a ríos y embalses en la misma norma (100 mg L⁻¹). Estos elevados niveles de materia orgánica son congruentes con las bajas concentraciones de OD (menores a 1.0 mg L⁻¹) observadas en el 94 % de las estaciones de colecta, dado que la disminución del OD está asociada a su consumo por parte de los organismos heterótrofos aerobios durante el proceso de oxidación de la materia orgánica (Martínez *et al.* 2001). Los altos niveles de nutrientes también contribuyen a la disminución del OD, dado que inducen la eutrofización de los cuerpos de agua y la proliferación, muerte y descomposición de los productores primarios, lo cual conduce a una marcada disminución del OD (Camargo & Alonso 2007).

Las altas concentraciones de coliformes fecales en todo el cauce, hasta 40 veces superiores al LMP por la NOM-003-ECOL-1997 para uso público con contacto directo (240 NMP/100 mL), se explican por la importante presencia de aguas residuales de origen municipal y pecuario sin tratamiento. Estos resultados implican un evidente riesgo sanitario, situación frecuente en ríos que reciben descargas de grandes zonas urbanas (Rivera-Vázquez *et al.* 2007). A pesar de no disponer de valores de referencia para SAAM, el origen antropogénico de estos detergentes y el hecho de que son los principales surfactantes de uso doméstico, sus niveles aportan evidencia sobre la contaminación de origen municipal. De acuerdo con el IMTA, las concentraciones típicas de SAAM en los efluentes municipales son de 12 a 16 mg L⁻¹ (Anónimo 1997); en contraste, las concentraciones medianas en el río San Pedro fueron dos veces mayores (30 mg L⁻¹), con máximos de 90 mg L⁻¹. Estos resultados muestran un alto grado de contaminación por SAAM y al igual que los indicadores de materia orgánica, nutrientes y coliformes fecales, son congruentes con la presencia de descargas municipales sin tratar. De acuerdo con Metcalf & Eddy, las concentraciones típicas de anilinas y fenoles en aguas residuales municipales son 10 y 3.5 mg L⁻¹, respectivamente (Anónimo 1995). Se observaron concentraciones medianas de anilinas superiores a los 30 mg L⁻¹ y valores máximos cercanos a 60 mg L⁻¹, coincidiendo las concentraciones más altas en la zona centro del estado, donde se ubican las zonas industriales.

La presencia en la zona de industrias del teñido, las cuales emplean colorantes a base de anilina, permite explicar estos resultados. En el caso de los fenoles, no se observó una problemática de contaminación relevante. Tampoco se observó una problemática significativa de contaminación por metales en el agua del río San Pedro. En general, a lo largo de todo el cauce, las concentraciones de As, Cr, Cu, Hg y Zn fueron inferiores a los LMP para agua de uso agrícola, señalados en la norma mexicana 001-ECOL -1996 (Anónimo 1996). Las concentraciones más elevadas correspondieron a Al y Fe, con valores 50 % superiores a los LMP señalados en los criterios ecológicos de la calidad del agua (Anónimo 1989), en dos y cuatro sitios respectivamente. De acuerdo con la prueba de Mann-Whitney, la comparación entre las campaña de muestreo en temporada de sequía y la realizada posterior a las lluvias no mostró diferencias significativas ($p > 0.05$) en los parámetros analizados, salvo el caso de los metales pesados que presentaron concentraciones menores después de las lluvias. El esperado efecto de dilución derivado de las lluvias únicamente se observó en los metales. En el resto de los parámetros, fundamentalmente de origen municipal, el arrastre hacia el cauce del río de contaminantes acumulados en suelo y sedimentos durante las lluvias puede compensar la dilución derivada de las precipitaciones (Holguín *et al.* 2006). La ausencia de flujo base en el río San Pedro implica una capacidad de auto purificación muy inferior a los ríos con flujo permanente, lo cual deriva en una mayor susceptibilidad al efecto de las descargas contaminantes (Longe & Omole 2008). Esta situación se hace aún más patente en la zona Centro del Estado, donde confluyen las descargas de los dos parques industriales de la entidad y descargas Municipales de Pabellón de Arteaga, San Francisco de los Romo, Jesús María y Aguascalientes.

Las altas concentraciones de materia orgánica observadas en los sedimentos del río San Pedro (hasta 60 000 mg kg⁻¹ de DQO), no representan por si mismas un indicador concluyente de contaminación, dado que en condiciones naturales los sedimentos de ríos o lagos pueden contener grandes cantidades de materia orgánica (Jian-feng *et al.* 2009). En general, las concentraciones de N_t en los sedimentos no sobrepasaron el criterio de referencia de USEPA (Anónimo 1977); únicamente un sitio presentó niveles catalogados como “moderadamente contaminado” (1 000 a 2 000 mg kg⁻¹). No obstante, la presencia de concentraciones significativas de N_t (medianas del orden de 400 mg kg⁻¹), aunado al elevado contenido de materia orgánica presente en los sedimentos, favorece la acumulación de aminas y nitritos, que a su vez conducen a la formación de nitrosaminas, las cuales son sustancias cancerígenas (Seoanez 1999). Devesa-Rey *et al.* (2008) señala que el fósforo ejerce una influencia significativa sobre la geoquímica del As, compitiendo con este metaloide por sitios de adsorción en los sedimentos; lo cual favorece la liberación de As a la columna de agua. Considerando los altos niveles de As en los sedimentos (entre 7 y 86 mg kg⁻¹) y las significativas concentraciones de P_t (medianas cercanas a 100 mg kg⁻¹) implican un mayor riesgo de liberación de As hacia la columna de agua. Pese a no existir criterios de referencia, dada la naturaleza antropogénica de los detergentes medidos como SAAM y del origen principalmente industrial de las anilinas, las significativas concentraciones de estos compuestos en suelo y sedimentos del ríos San Pedro (de 100 a 1 200 mg kg⁻¹ para SAAM y 200 a 2 200 mg kg⁻¹) demuestran un claro efecto adverso de las actividades humanas sobre el cauce y la acumulación de compuestos tóxicos en los sedimentos. Los detergentes pueden estabilizarse en los sedimentos por periodos de hasta tres ó cuatro años sin descomponerse (Seoanez 1999).

La principal problemática de contaminación por metales en los sedimentos fue por As, Cu y Zn; seguido de Pb y Cr, y por último Fe y Hg con apenas tres sitios contaminados. De acuerdo con los límites señalados por la USEPA (Tabla 2, Anónimo 1977), el 75 % de los sedimentos estuvieron “muy contaminados” por As (concentraciones por arriba de 8.0 mg kg⁻¹) y el 25 % restante en el nivel de “moderadamente contaminado” (niveles entre 2.0 y 8.0 mg kg⁻¹). Su elevado contenido en todos los sedimentos y su distribución irregular a lo largo del cauce sugieren que el origen principal del As es geogénico (Avelar & Llamas 2000). De acuerdo con los criterios de la procuraduría mexicana para la protección del ambiente (PROFEPA), el 50 % de los sitios presentaron niveles que implican riesgo para la salud humana y riesgo ecológico (20 mg kg⁻¹, Anónimo 2000). En el 75 % de los casos el Cu mostró niveles de “moderadamente contaminados” (25 a 50 mg kg⁻¹) a “muy contaminados” (> 50 mg kg⁻¹); su probable origen también es geogénico. De acuerdo con Moreno (2003), el Zn se encuentra de forma natural en el medio ambiente y puede presentar niveles significativos en el medio acuático debido a las deyecciones de animales y personas. Esto se refleja en el 50 % de los sitios, los cuales se encontraron “muy contaminados” por Zn (> 200 mg kg⁻¹), y distribuidos de manera irregular a lo largo del cauce. Dos sitios superaron 800 mg kg⁻¹ de Zn, considerado por la PROFEPA como riesgo ecológico (Anónimo 2000). El 25 % de los sedimentos estuvieron “moderadamente contaminados” con Cr (25 a 75 mg kg⁻¹). Su presencia suele ser de origen industrial

(Hernández *et al.* 2000); lo cual concuerda con la ubicación de dos industrias dedicadas a la galvanoplastia y otras tres empresas de teñidos textiles en el parque industrial del Valle de Aguascalientes. El Pb es ampliamente utilizado en diferentes procesos industriales, llega a los ríos en descargas de aguas residuales y escurrimientos urbanos (Lima *et al.* 2005). De acuerdo con Navarro *et al.* (1998), este metal tiende a absorberse por el material arcillosos y la materia orgánica. Lo cual se reflejó en el 25 % de los sedimentos, con concentraciones en el nivel de “muy contaminado” ($> 60 \text{ mg kg}^{-1}$). Un sitio presentó riesgo ecológico (100 mg kg^{-1} de Pb) de acuerdo con la PROFEPA (Anónimo 2000). Tres sedimentos alcanzaron un nivel de “muy contaminado” (más de 1.0 mg kg^{-1}) con Hg. Las altas concentraciones de este metal observadas por Avelar & Llamas (2000) en agua de pozos profundos (hasta 0.005 mg L^{-1}) sugieren un probable origen geogénico. Otros tres sedimentos mostraron niveles de “moderadamente contaminados” (de 17 000 a 25 000 mg kg^{-1}) por Fe, y de acuerdo con la PROFEPA (Anónimo 2000), uno de ellos presenta riesgo a la salud humana (más de 23 000 mg kg^{-1}). No se observaron correlaciones significativas entre las concentraciones de los contaminantes evaluados en muestras de agua y sedimentos del cauce del río San Pedro. No obstante, los niveles de materia orgánica, N_t , P_t SAAM y anilinas fueron en general acordes en ambas matrices (Figuras 2 y 4). Con respecto a los metales, la problemática de contaminación observada en los sedimentos fue muy superior a la observada en el agua. Las condiciones observadas en los sedimentos, pH superiores a 6.0 y altos niveles de materia orgánica y detergentes, favorecen la acumulación de metales en los sedimentos (Petrovich *et al.* 1999, Jian-feng *et al.* 2009); lo cual permite explicar la disparidad encontrada en la problemática de contaminación por metales en el agua y sedimentos del río.

En lo que respecta a las muestras de agua subterránea, no se encontró evidencia concluyente de infiltración de contaminantes del cauce del río al acuífero. No obstante que en dos pozos se observaron niveles elevados de N_t (6.0 mg L^{-1}), P_t (3.0 mg L^{-1}) y coliformes fecales (1100 NMP/100 mL), se trata de pozos agrícolas con sello en muy mal estado, lo cual no permite descartar que la contaminación de dichos pozos se deba al deficiente estado del sello. Sin embargo, considerando el elevado nivel de contaminación del agua del río San Pedro y el fenómeno de subsidencia (Anónimo 2002), existe un riesgo permanente de contaminación del acuífero por infiltración de agua del cauce del río.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el río San Pedro está fuertemente contaminado por descargas municipales e industriales. Presenta altas concentraciones de materia orgánica, N_t , P_t , coliformes fecales, SAAM y anilinas. Lo anterior, pese al incremento de la infraestructura de saneamiento de aguas residuales en el Estado, con una capacidad instalada de $3\,500 \text{ L s}^{-1}$ (Ramírez *et al.* 2007). Los sedimentos reflejaron el efecto adverso que las actividades humanas han provocado al cauce durante décadas de ser utilizado como reservorio de residuos. Presentaron altos contenidos de SAAM y anilinas, y niveles de contaminación por Cr, Cu, Pb y Zn. Se observó además una importante contaminación de origen natural por As. Las características de los sedimentos implican un alto nivel de inmovilización de metales pesados en los sedimentos. No se encontraron evidencias concluyentes de contaminación del acuífero por aguas

superficiales provenientes del río San Pedro. Las prioridades de remediación del cauce del río San Pedro incluyen el control efectivo de las descargas municipales e industriales que vierten sus residuos sin tratamiento alguno. El tratamiento adecuado de estos efluentes reduciría significativamente la problemática de contaminación por coliformes fecales, materia orgánica, nutrientes y tóxicos orgánicos en agua y sedimentos. A fin de atender la problemática de contaminación de los sedimentos por metales, se requiere verificar el potencial de lixiviación de estas sustancias de los sedimentos del río San Pedro. En los sitios donde el potencial de lixiviación sea alto, deberán aplicarse tecnologías de remediación apropiadas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Fondo SEMARNAT-CONACyT por la aportación de recursos para el proyecto “Estudio sobre los agentes, cargas contaminantes y toxicidad que afectan la cuenca del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes” (clave FOSEMARNAT-2004-01-78). A CONACyT por la beca otorgada para la realización de los estudios de Doctorado en Ciencias Biológicas de Guilda Guzmán Colis (clave 170010). A la M. en C. Jennifer López Baltazar, la M. en C. Mónica Mora Silva y el MIA José Luis Carrasco, por su valiosa aportación al presente trabajo.

LITERATURA CITADA

- Anónimo (1977) United States Environmental Protection Agency (USEPA). Guidelines for Pollution Classification of Great Lakes Harbor Sediments. USEPA Region V, Great Lakes Surveillance Branch, Chicago IL. 8 pp.
- Anónimo (1989) Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua CE-CCA-001-1989. Instituto Nacional de Ecología. Diario Oficial de la Federación el 13 de diciembre de 1989.
- Anónimo (1991) Environmental Protection Agency (EPA). Methods for the determination of metals in environmental samples. Environmental Monitoring System Laboratory. Cincinnati. USA. EPA/600-4-91-010. 281 pp.
- Anónimo (1993) United States Environmental Protection Agency (USEPA). Subsurface Characterization and monitoring techniques. A Desk Reference Guide, Vol 1: Solids and Ground Water. EPA/625/R-93/003a. Office of Research and Development, Washington D.C. Pp 48-50.
- Anónimo (1994) Norma Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial de la Federación el 18 de enero de 1996.
- Anónimo (1995) Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización. Metcalf & Eddy. McGraw Hill/Interamericana de España. 1485 pp.
- Anónimo (1996) Norma Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación el 24 de junio de 1996.

- Anónimo (1997) Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua (IMTA). Recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. Informe final. Aguascalientes, México. 67 pp.
- Anónimo (1997a) Norma Mexicana NOM-003-ECOL-1997. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. Diario Oficial de la Federación el 14 de enero de 1998.
- Anónimo (1998) Standard Methods for Water and Wastewater. 20th Edition. Edit. APHA-AWWA-WPCF. Washington D. C. 1585 pp.
- Anónimo (2000) Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA). Disposiciones y procedimientos para la caracterización y restauración de suelos contaminados. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, DF. 225 pp.
- Anónimo (2002) Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero valle de Aguascalientes, estado de Aguascalientes. www.conagua.gob.mx.
- Anónimo (2003) Manganese in drinking-water. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable. Ginebra (Suiza), Organización Mundial de la Salud (WHO/SDE/WSH/03.04/104). Pág. 3
- Anónimo (2004) Norma Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Diario Oficial de la Federación del 02 de marzo de 2007.
- Anónimo (2006) Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Resultados definitivos del 11 conteo de población y vivienda 2005 para el Estado de Aguascalientes. www.inegi.gob.mx
- Anónimo (2007) Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Estadísticas del agua en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, DF. 626 pp.
- Avelar FJ, Llamas J (2000) Monitoreo de pesticidas orgánoclorados, metales pesados, cianuros y fluoruros en agua potable de pozos considerados de alto riesgo en 10 municipios de Estado de Aguascalientes. Informe final. Centro de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma de Aguascalientes. Ags, México. 155 pp.
- Barceló Q, Ávila PP, López RC, Zarazúa OG, Torres R, Frías PH (2000) Biodisponibilidad de Cr y Hg en agua y niveles de concentración en el sedimento en la presa de José Antonio Alzate en el Estado de México. I Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, La Paz Baja California Sur. www.bvsde.paho.org
- Camargo JA, Alonso A (2007) Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de la calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. Ecosistemas vol. XVI (2):1-12.
- Devesa-Rey R, Iglesias ML, Díaz-Fierros F, Barral MT (2008) Total phosphorous distribution and bioavailability in the bed sediments of an atlantic basin (Galicia, NW Spain): spatial distribution and vertical profiles. Water Air Soil Pollut. Pp 341-352.
- González L (2002) Hidrogeología del Valle de Aguascalientes, México. En: Bocanegra E, Martínez D, Massone H (eds.). Groundwater and Human Development. 1157-1164 Pp.

- Hernández SG, Solorio MG, Vasallo ML, Flores DL, Maples VM, Hernández SD, Alcalá MR (2000) Dispersión de Ni y Cr en sedimentos y suelos superficiales derivados de piroxenitas, serpentinitas y basaltos de la cuenca de San Juan de Otates, Estado de Guanajuato, México. *Ciencias Geológicas* 17(2):125-136.
- Hess TF, Silverstein J, Schmidt SK (1993) Effect of glucose on 2, 4-dinitrophenol degradation kinetics in sequencing batch reactors. *Water Environment Res.* 65: 73-81.
- Holguín C, Rubio H, Olave ME, Saucedo R, Gutiérrez M, Bautista R (2006) Calidad del agua del río Conchos en la región de Ojinaga, Chihuahua: Parámetros fisicoquímicos, Metales y Metaloides. *Universidad y Ciencia. Res* 22 (1): 51-63.
- Jáuregui-Medina C, Ramírez-Hernández S, Espinoza-Rodríguez MA, Tovar-Rodarte R, Quintero- Hernández B, Rodríguez-Castañeda I (2007) Impacto de la descarga de aguas residuales en la calidad del río Mololoa (Nayarit, México) y propuestas de solución. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 3 (1): 65-73.
- Jian-feng P, Yong-hui S, Peng Y, Xiao-yu C, Guang-lei Q (2009) The remediation of heavy metals contaminated sediment. *Journal of Hazardous Materials* 161:633-640.
- Lima CL, Olivares RS, Columbie I, De la Rosa MD, Gil CR (2005) Niveles de Plomo, Zinc, Cadmio y Cobre en el río Almendares, Ciudad Habana, Cuba. *Contaminación Ambiental* 21(3):115-124.
- Lindsay WL (1979) *Chemical equilibria in soils*. John Wiley and Sons. New York. 449 pp.
- Longe EO, Omole DO (2008) Analysis of pollution status of river Illo, Ota, Nigeria. *Environmentalist* 28:451-457.
- Martínez G, Alvarado J, Senior W (2001) Estudio Físico-químico de las aguas superficiales de la cuenca baja y pluma del río Manzanares. *Interciencia* 26 (008):342-351.
- Moreno GM (2003) *Toxicología Ambiental. Evaluación del riesgo para la salud humana*. Editorial McGraw Hill. España. 348 pp.
- Navarro A, Collado D, Font X (1998) Movilidad de los Metales Pesados en el Acuífero Deltaico del Río Almazora (Almería). *Tecnología del agua*. 172, 33-45
- Petrovich M, Kastelan-Macan M, Hovart AJ (1999) Interactive sorption of metal ions and humic acids onto mineral particles. *Water, Air & Soil Pollution* 111(1-4): 43-56.
- Ramírez EM, Avelar FJ, Zaragoza J, Rico R (2007) Estudio sobre los agentes, cargas contaminantes y toxicidad que afectan el cauce del río San Pedro en el municipio de Aguascalientes y zonas aledañas. Informe final. Centro de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma de Aguascalientes. Aguascalientes, México. 218 pp.
- Rico-Martínez R, Velázquez-Rojas CA, Pérez-Legaspi IA, Santos-Medrano GE (2000) The use of aquatic invertebrate toxicity test and invertebrate enzyme biomarkers to assess toxicity in the states of Aguascalientes and Jalisco. In: Butterworth FM, Gunatilake A, Gonshebbatt ME (eds.). *Biomonitoring and Biomarkers as indicators of environmental change* Vol. 2. Plenum Press. New York. Pp. 427-438.
- Rivera-Vázquez R, Palacios-Vélez OL, Chávez-Morales J, Belmont MA, Nikolski-Gravilov I, De la Isla de Bauer ML, Guzmán-Quintero A, Terrazas-Onofre L, Carrillo-González

- R (2007) Contaminación por coliformes y helmintos en los ríos Texcoco, Chapingo y San Bernardino tributarios de la parte oriental de la cuenca del Valle de México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 23, 69-77.
- Robledo SE, Maldonado TR (1997) Manual de procedimientos para el análisis de suelos. Universidad Autónoma de Chapingo. Estado de México. 124 pp.
- Santos-Medrano GE, Ramírez-López EM, Hernández-Flores S, Azuara-Medina PM, Rico-Martínez R (2007) Determination of toxicity levels in the San Pedro River Watershed, Aguascalientes, Mexico. *Journal of Environmental Science and Health Part A* 42, 1403-1410
- Schuling R, Geiger G, Furrer G (1995) Biogeodynamics of pollutants in soils and sediments. In: Salomons W, Stigliani WM (eds.). *Heavy metals retention by soil organic matter under changing environmental conditions*. Springer-Verlag. New York. Pp. 53-85.
- Seoanez C (1999) Ingeniería del medio ambiente, aplicada al medio natural continental. Segunda edición. Mundi-Prensa. España. 701 pp.
- Silva SM, Muñoz A, De la Isla de Bauer ML, Infante S (2002) Contaminación Ambiental en la Región de Atlixco: 1. Agua. *Terra Latinoamericana* 20 (003): 243-251.

8. GLOSARIO

- **Ácidos fúlvicos.** Son parte del complejo de compuestos orgánicos del suelo, de naturaleza muy particular y distinta a la de cualquier sustancia vegetal. En términos generales, es posible considerar estos ácidos como los representantes “menos maduros” del grupo de los ácidos húmicos. Respecto a los ácidos húmicos, los ácidos fúlvicos poseen un porcentaje de carbono significativamente más bajo y el de hidrógeno es superior al de los ácidos húmicos.
- **Ácidos húmicos.** Son parte del complejo de compuestos orgánicos del suelo, de naturaleza muy particular y distinta a la de cualquier sustancia vegetal. Poseen mayor porcentaje de carbono que los ácidos fúlvicos y menor porcentaje de hidrógeno que los ácidos fúlvicos.
- **Acuífero.** Cuerpo formado por una roca saturada de agua y lo suficientemente permeable como para conducir agua subterránea y proporcionar caudales económicamente significativos.
- **Acuífero no confinado.** Es un acuífero que contiene agua subterránea no confinada (agua freática). Se denomina también acuífero freático o acuífero libre.
- **Afluente.** Corresponde a un curso de agua, también llamado **tributario**, que no desemboca en el mar sino en otro río más importante con el cual se une en un lugar llamado confluencia.
- **Agua dulce.** Es agua que contiene cantidades mínimas de sales disueltas, especialmente cloruro sódico. El ser humano, con un proceso, la puede purificar y beberla lo que se llama proceso de potabilización y el agua obtenida se denomina agua potable.
- **Agua subterránea.** El agua subterránea es la que se encuentra bajo la superficie terrestre y ocupa los poros y las fisuras de las rocas más sólidas. En general,

mantiene una temperatura muy similar al promedio anual en la zona, por ello, en las regiones árticas, puede helarse. El agua subterránea más profunda puede permanecer oculta durante miles o millones de años. No obstante, la mayor parte de los yacimientos están a poca profundidad y desempeñan un papel discreto pero constante dentro del ciclo hidrológico.

- **Aguas residuales.** Son materiales derivados de residuos domésticos o de procesos industriales, los cuales por razones de salud pública y por consideraciones de recreación económica y estética, no pueden desecharse vertiéndolas sin tratamiento en lagos o corrientes convencionales.
- **Aguas Superficiales.** El Recurso Hídrico Superficial se corresponde principalmente con los ríos y arroyos que escurren en superficie y configuran una de las fuentes principales de vida y desarrollo. No es solamente un productor de agua potable sino también vía de navegación, producción ictícola, generación de hidroelectricidad, centro turístico u otros tantos usos para los cuales conviene preservarlo.
- **Bifenilo Policlorado.** Se refiere a un grupo de 209 isómeros obtenidos mediante la cloración de los bifenilos y se caracteriza por el contenido de clorina. Son considerados productos peligrosos debido a su persistencia en el medio ambiente, por su capacidad de bioacumularse en las cadenas alimenticias, no degradar en el ambiente y causar efectos adversos o tóxicos en organismos expuestos a estas sustancias.
- **Bioensayo.** Prueba en la cual la naturaleza peligrosa de una sustancia es determinada por su reacción con un tejido o un organismo vivo.
- **Biomasa.** Materia total de los seres que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o de volumen.
- **Calidad del agua.** Se refiere a las características físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Estas características afectan la

capacidad del agua para sustentar tanto a las comunidades humanas como la vida vegetal y animal.

- **Cambio climático.** Se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.
- **Compuestos orgánicos volátiles.** Son sustancias químicas orgánicas cuya base es el carbono y se evaporan a temperatura y presión ambiental generando vapores, que pueden ser precursores del ozono en la atmósfera. Además del carbono es posible hallar en su composición hidrógeno, flúor, oxígeno, cloro, bromo, nitrógeno o azufre. Poseen propiedades volátiles, liposolubles, tóxicas e inflamables (en sus acepciones de riesgos).
- **Conductividad hidráulica (K).** Es un coeficiente de proporcionalidad que describe la velocidad a la que el agua se mueve a través del medio permeable. Depende de la densidad y la viscosidad del fluido. Posee dimensiones de velocidad. Con frecuencia se denomina permeabilidad.
- **Confluencia.** Es la reunión en uno solo de dos o más cursos de agua, glaciares, o corrientes marinas, así como el punto donde esto ocurre.
- **Conglomerado.** Es una roca sedimentaria de tipo detrítico formada por cantos redondeados de otras rocas unidos por un cemento. Se distingue de las brechas en que éstas consisten en fragmentos angulares. Ambas se caracterizan porque sus fragmentos constitutivos son mayores que los de la arena (>2 mm).
- **Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO.** Es la cantidad de oxígeno en mg/l necesaria para descomponer la materia orgánica presente mediante acción de los microorganismos aerobios presentes en el agua. Normalmente se emplea la DBO₅, que mide el oxígeno consumido por los microorganismos en cinco días. Resulta el parámetro de contaminación orgánica más ampliamente empleado. La determinación del mismo está relacionada con la medición del oxígeno disuelto

que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica.

- **Demanda Química de Oxígeno, DQO.** Es la cantidad de oxígeno en mg/l consumido en la oxidación de las sustancias reductoras que están en un agua. Se emplean oxidantes químicos, como el dicromato potásico. El ensayo de la DQO se emplea para medir el contenido de materia orgánica tanto de las aguas naturales como de las residuales. En el ensayo, se emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse.
- **Dispersión hidrodinámica.** Constituye un proceso transiente y de mezcla irreversible. La dispersión hidrodinámica es el resultado macroscópico del movimiento del soluto debido a efectos microscópicos, macroscópicos y megascópicos.
- **El oxígeno disuelto.** Es otra de las características del agua. La solubilidad de oxígeno en el agua varía según la temperatura, presión atmosférica y salinidad. El valor de oxígeno disuelto es distinto según el tipo de agua, siendo muy bajo en aguas contaminadas y de pozos profundos, y alta en aguas superficiales y aireadas.
- **El potencial Redox.** Únicamente se emplea cuando se quiere saber el estado de oxidación de las especies que contiene el agua. En análisis de agua no se suele emplear el potencial redox, pues para evaluar la calidad se utilizan otros parámetros indicadores. Únicamente se emplea cuando se quiere saber el estado de oxidación de las especies que contiene el agua.
- **Fuentes de contaminación.** Toda organización, empresa o actividad industrial afecta el Medio Ambiente a través de sus actividades, productos o servicios. Esto incluye no sólo la extracción y explotación de los recursos naturales que el ambiente nos provee, sino la eliminación al mismo de aquellos residuos o desechos que resultan de tales actividades y que, dependiendo de las condiciones y lugares en que sean eliminados, pueden ocasionar un mayor o menor grado de daño o impacto ambiental.

- **Falla.** Fractura del terreno con desplazamiento relativo de las partes separadas.
- **Graben (Fosa tectónica).** Área deprimida que corresponde a un bloque hundido por fallas normales paralelas a los lados largos.
- **Infiltración.** Es la penetración del agua en el suelo.
- **Mantos freáticos.** depósito de aguas subterráneas que se forma donde el agua de lluvia se filtra.
- **Patógeno.** (del griego *pathos*, enfermedad y *gainein*, engendrar) Es toda aquella entidad biológica capaz de producir enfermedad o daño en la biología de un huésped (humano, animal, vegetal, etc.) sensiblemente predispuesto.
- **Pruebas de toxicidad.** Es obtener información útil para lograr la protección de los organismos acuáticos de una especie determinada o, de todas las comunidades que integran la biota de un ecosistema, de los peligros ocasionados por las sustancias peligrosas arrojadas al ambiente por el hombre.
- **Recarga artificial.** Recarga de agua subterránea con un caudal superior al natural como resultado de las actividades del hombre por medio de perforaciones, pozos excavados o la infiltración de agua a través de la superficie del terreno.
- **Recarga inducida.** Extracción de aguas subterráneas en un lugar adyacente a un curso de agua o masa de agua superficial, de forma que el descenso del nivel de las aguas subterráneas provoque un flujo de aguas superficiales hacia el subsuelo.
- **Recursos hídricos.** se constituyen en uno de los recursos naturales renovables más importante para la vida.
- **Robusto.** Se dice que una prueba estadística es robusta si se pueden violar sus supuestos sin que ello repercuta sustancialmente en las conclusiones.

- **Rocas ígneas.** Se forman cuando la roca derretida se enfría y se solidifica. A la roca derretida se le llama magma, cuando está por debajo de la superficie de la Tierra; y se le llama lava, cuando está sobre la superficie.
- **Sedimento.** Es un material sólido, acumulado sobre la superficie terrestre (litosfera) derivado de las acciones de fenómenos y procesos que actúan en la atmósfera, en la hidrósfera y en la biosfera (vientos, variaciones de temperatura, precipitaciones meteorológicas, circulación de aguas superficiales o subterráneas, desplazamiento de masas de agua en ambiente marino o lacustre, acciones de agentes químicos, acciones de organismos vivos).
- **Sistemas dulceacuícolas.** También conocidos como ambientes de aguas interiores. Incluyen sistemas riparios (ríos y arroyos), sistemas lacustres (lagos, presas y pozas) y humedales (marismas de agua dulce, pantanos, turberas, praderas húmedas, ciénegas, playas, tulares, popales y oasis).
- **Subsidencia.** En geología e ingeniería describe el movimiento de una superficie (usualmente, la superficie de la Tierra) hacia abajo respecto al nivel del mar. La subsidencia es, junto con la contaminación de acuíferos profundos, uno de los dos principales problemas de la minería subterránea.
- **Turbiedad.** Se debe a la presencia de partículas suspendidas y disueltas. Materia en suspensión como arcilla, cieno o materia orgánica e inorgánica finamente dividida, así como compuestos solubles coloridos, plancton y diversos microorganismos.
- **Uso del agua.** Se relaciona directamente con una variedad de necesidades humanas y ecológicas: agrícolas, industriales, nacionales y ambientales. El desarrollo humano y el medio ambiente dependen de los suministros adecuados de agua limpia.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar V. (2003). Aguas Continentales y Diversidad Biológica de México: Un recuento Actual. *Biodiversitas*. Año 8. Num 48. <http://www.conabio>. 16 p
- APHA – AWWA – WPCF (1998). Standard Methods for Water and Wastewater. 20th edition. American Public Health Association. Washington D. C. Folio variado.
- Arellano J. (2002). Introducción a la ingeniería ambiental. 1^{ra} edición. Alfaomega. México.
- Armienta M. A. y Segovia N. (2008). Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico. *Environ Geochem Health* 30:345-353.
- Avelar F. J. y Llamas J. (2000). Informe final: Monitoreo de pesticidas orgánoclorados, metales pesados, cianuros y fluoruros en agua potable de pozos considerados de alto riesgo en 10 municipios de Estado de Aguascalientes. Centro de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma de Aguascalientes. Pp 156.
- Avelar F. J. (2003). Problemática del agua en Estado de Aguascalientes. *Vertiente* 5:51-57.
- Baptista C. B. (2002). Contaminación de Aguas y Suelos. II Curso Internacional de Aspectos Geológicos de Protección Ambiental. <http://www.unesco.org.uy/geo/campinaspdf/14contaminacion.pdf>. 209-223 p
- Bartram J. y Ballance R. (1996). Water quality monitoring: a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes. PNUMA/OMS. 299 p.
- Bordalo A. A., Texeira R. y Wiebe W. J. (2006). A water quality index applied to an international shared river basin: The case of the Douro River. *Environ Manage* 38:910-920.

- Bucher E., Castro G. y Floris V. (1997). Conservación de ecosistemas de agua dulce: Hacia una estrategia de manejo integrado de recursos hídricos. <http://www.ladb.org/sds/doc/1080spa.pdf>. 42 p.
- Cabrera-Vique C., Ruíz-López M. D. y Javier F. (2007). Mercurio en aguas del sureste de España: posibles fuentes de contaminación. *Ars Pharm* 48 (1):37-53.
- Camargo J. A. y Alonso A. (2007). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Ecosistemas*, 2. 13 p.
- Campoblanco H. y Gomero J. (2000). Importancia de los ríos en el entorno ambiental. *Rev. Inst. investig. Fac. minas metal cienc. geogr* 3 (5):57-63.
- Carrasco J. L. (2007). Tesis de Maestría: Caracterización de agentes patógenos entéricos en la cuenca del Río San Pedro, Estado de Aguascalientes. Centro de Ciencias Básicas, Universidad de Aguascalientes.
- Castañé P. M., Loez C. R., Olguín F., Puig A., Rovedatti M. G., Topalián M. L. y Salibián A. (1998). Caracterización y variación especial de parámetros fisicoquímicos y del plancton en un río urbano contaminado (río Reconquista, Argentina). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 14 (2) 69-77.
- Castañeda J. A. (2001). Diagnóstico de la situación que guarda la contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos en la región Santiago y propuesta de Programa de Saneamiento. Consejo de la cuenca del río Santiago.
- Castillo D. J. (2003). Tesis de Maestría: Calidad del agua subterránea en el municipio de Aguascalientes y su relación con el abatimiento del acuífero. Centro de Ciencias del Diseño y la Construcción, Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Castro M. L. (2006). Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública. www.cepis.ops-oms.org/bvsacd/cd51/arsenico-agua.pdf. 14 p.

- CE-CCA-001-1989. Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua. Instituto Nacional de Ecología. Diario Oficial de la Federación el 13 de diciembre de 1989.
- CENMA (2006.) Centro Nacional del Medio Ambiente. Manual de Evaluación de la Calidad del Agua. <http://www.cenma.d/cenma/descargas/manualcalidadagua.pdf>. 104 p.
- CETESB (1991). Companhia de Saneamento Ambiental. Agua-Test de toxicidade con *D. similis* Clauss1987 (Cladocera-Crustacea). Método de ensaio, L5.018.
- CETESB (1991a) Companhia de Saneamento Ambiental.- Água e teste de toxicidade crônica utilizando *Ceriodaphnia dubia* Richard, 1894. (Cladocera, Crustacea). Norma Técnica L5.022.
- Chapman D. (Ed.) (1996). Water Quality Assessment. A guide to the use water and environmental monitoring. 2d edición. UNESCO/WHO/UNEP. Pp 365-399.
- CIECCA (1978). Centro de Investigación y Entrenamientos para el Control de la Calidad del Agua. Métodos de análisis de agua y agua residuales. SARH. México.
- Colin F. y Quevauviller Ph. (1998) Monitoring of Water Quality-The Contribution of Advanced Technologies. Elsevier, Amsterdam. The Netherlands.
- CONAGUA (1999). Comisión Nacional del Agua. Plan de emergencia río Aguascalientes. Brigada estatal de protección a la infraestructura y atención de emergencias.
- CONAGUA (2000). Comisión Nacional del Agua. Programa hidráulico de gran visión del Estado de Aguascalientes 2000-2005. Pp 120
- CONAGUA (2002). Comisión Nacional del Agua. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero del Valle de Aguascalientes, Estado de Aguascalientes. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. 30 p.

- CONAGUA (2003). Comisión Nacional del agua. Programa del reuso del agua en el Estado de Aguascalientes. Subdirección regional técnica
- CONAGUA (2007). Comisión Nacional del Agua. Estadísticas del agua en México. SEMARNAT. México D. F. 626 p.
- CONAGUA (2007a). Gerencia Regional de la Comisión Nacional del Agua. Comunicación personal.
- CONAGUA (2008). Comisión Nacional del Agua. Estadísticas del agua en México. SEMARNAT. México D. F. 228 p.
- Dávila J. L. (2002). Tesis de Maestría: Enriquecimiento con bioflóculos de lagunas de estabilización facultativas y evaluación de su capacidad altas cargas de materia orgánica común y mezclas de fenol-anilina. Departamento de Fisiología y Farmacología. Centro de Ciencias Básicas. Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Devesa-Rey R., Iglesias M. L., Díaz-Fierros F. y Barral M. T. (2008). Total phosphorous distribution and bioavailability in the bed sediments of an atlantic basin (Galicia, NW Spain): spatial distribution and vertical profiles. *Water Air Soil Pollut.* Páginas sin número.
- Dodds W. K., Jones J. R. y Welch E. B. (1998). Suggested classification of stream trophic state: distribution of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen and phosphorus, *Water Res.* 32:1455-1462.
- Escalante V. (1998). Metodología y parámetros de muestreo. En: Evaluación de lagunas de estabilización. IMTA. México. 31 p.
- Esteller M. V. (2002). Vulnerabilidad de acuíferos frente al uso de aguas residuales y lodos en agricultura. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología.* 2:103-113.
- Fernández N. J. y Solano F. (2005). Índices de Calidad y Contaminación de Agua. Universidad de Pamplona. 1ra. Edición. Pp. 25-38.

- Figueroa R., Valdovinos C. y Araya E. (2003). Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de la calidad de agua de ríos del sur de Chile. *Rev. Chil. Hist. Nat.* 76 (2) 275-285.
- Flores-Tena F. J. (1992). Ecocidio en la Presa El Niágara. Centro de Ciencia Básicas, Universidad Autónoma de Aguascalientes. 48 p.
- Flores-Tena F. J. y Silva –Briano M. (1995). A note on El Niagara, a polluted reservoir in Aguascalientes, Mexico. *Hidrobiología* 308:235-241. Kluwer Academia Publisher.
- Foster S., Garduño H., Tuinhof A., Kemper K. y Nanni M. (2006). Recarga del Agua Subterránea con Aguas Residuales Urbanas, evaluación y manejo de los riesgos y beneficios 2002-2006. Serie de Notas Informativas, nota 12. Gestión Sustentable del Agua Subterránea. Banco Mundial. GW.MATE. 6 p.
- García J. A., Díaz C., Quentin E., Ávila P., Tejeda S. y Zarazúa G. (2007). Caracterización de la contaminación por metales pesados y reducción de la capacidad de almacenamiento hidráulico por azolve en un embalse mexicano. *Hidrobiológica* 17 (2): 127-138.
- Giljanovik N. (2003). Comparison of Dalmatian water evaluation indices. *Water Environment Research: a research publication of the water Environment Federation.* 75 (5): 338.
- Godin J., Ménard J. F., Hains S., Deschênes L. y Samson R. (2004). Combined use of life cycle assessment and groundwater transport modeling to support contaminated site management. *Human and ecological risk assessment* 10: 1099-1116.
- Goitía C., Torres W., Suárez E. y Guevara V. (2002). Evaluación de la calidad del agua del lago Maracaibo utilizando imágenes de satélite. Centro de procesamiento digital de imágenes. Fundación Instituto de Ingeniería para el Desarrollo Tecnológico.

- González L. (2002). Hidrogeología del Valle de Aguascalientes, México. En Bocanegra E., Martínez D. y Massone H. (Eds.) Groundwater and Human Developmente. 1157-1164 p.
- Graniel C .E. y Carrillo C. M. (2006). Calidad del agua del río Zanatenco en el Estado de Chiapas. Ingeniería 10 (3): 35-42.
- Guzmán G. (2005). Remoción de materia orgánica común y tóxicos orgánicos empleando lagunas de estabilización escala real enriquecidas con bioflóculos. Tesis de Maestría en el área de Toxicología. Centro de Ciencias Básicas. Departamento de Fisiología y Farmacología. Universidad Autónoma de Aguascalientes. Pp 135.
- Guzmán M. (1997). Las Aguas Superficiales – Diagnóstico. Programa de Ordenamiento Ecológico y Territorial del Estado de Jalisco. Instituto de Limnología. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. Jal., México. 18-20 pp.
- Hadas O., Corradini M. G. y Peleg M. (2004). Statical analysis of the fluctuating counts of fecal bacteria in the water of lake Kinneret. *Water Research*. 38 (1): 79.
- Harrington J., Shicebe F. y Nix J. (1992). Remote sensing of lake Chicot, Arkansas: Monitoring suspended sediment, turbidity and secchi depth with Landsat MSS data. *Remote Sens. Environ.* 10 (15) 15-27.
- Heinke G. (1996). Abastecimiento de agua. En: Henry J. y Heinke G. (Eds.) Ingeniería ambiental. 2^{da} edición. Prentice Hall Pearson. EUA.
- Hess T. F., Silverstein J. y Schmidt S. K. (1993). Effect of glucose on 2, 4-dinitrophenol degradation kinetics in sequencing batch reactors. *Water Environment Res.* 65: 73-81.
- Holguín C., Rubio H., Olave M. E., Saucedo R., Gutiérrez M. y Bautista R. (2006). Calidad del agua del río Conchos en la región de Ojinaga, Chihuahua: Parámetros fisicoquímicos, Metales y Metaloides. *Universidad y Ciencia*. Res 22 (1): 51-63.

- IMTA (1997). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. Informe final. Aqs., México. 67p.
- INAGUA (2007). Instituto del Agua del Estado de Aguascalientes. Departamento de Tecnología del Agua. Dirección de Planeación, calidad y nuevos proyectos. Comunicación Personal
- INEGI (2006). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Resultados definitivos del 11 conteo de población y vivienda 2005 para el Estado de Aguascalientes.
- Isaaks E. H. y Srivastava R. M. (1989). Applied Geostatistics. Oxford University Press. New York.
- Jáuregui-Medina C., Ramírez-Hernández S., Espinoza-Rodríguez M. A., Tovar-Rodarte R., Quintero- Hernández B. y Rodríguez-Castañeda I. (2007). Impacto de la descarga de aguas residuales en la calidad del río Mololoa (Nayarit, México) y propuestas de solución. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 3 (1): 65-73.
- Jian-feng P., Yong-hui S., Peng Y., Xiao-yu C. y Guang-lei Q. (2009). The remediation of heavy metals contaminated sediment. *Journal of Hazardous Materials* 161:633-640.
- Kannel P. R., Lee S., Lee Y. S., Kanel S. R. y Khan S. P. (2007). Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicator for river water classification and urban impact assessment. *Environ Monit Assess* 132:93-110.
- Kelderman P. y Batima P. (2006). Water quality assessment of river in Mongolia. *Water Science & Technology* 53 (10):111-119.
- Kim A. G. y Cardone C. R. (2005). Scatterscore: A Reconnaissance Method to Evaluate Changes in Water Quality. *Environmental Monitoring and Assessment* 111:277-295.

- Lathrop R. G. y Lillesand T. M. (1986) Use of thematic mapper data to asses water quality in Green Bay and central Lake Michigan. *PE&S* 52 (3): 671-680.
- Longe E .O., Omole D. O. (2008). Analysis of pollution status of river Illo, Ota, Nigeria. *Environmentalist* 28:451-457.
- López J. (2007). Estudio sobre la concentración de contaminantes en el agua del cauce del río san Pedro. Tesis de Maestría en Ciencias en el área de Toxicología Centro de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma de Aguascalientes. 135 p.
- Lumb A., Halliwell D. y Sharman T. (2006). Application of CCME water quality index to monitor water quality: a case of the Mackenzie river basin, Canada. *Environmental Monitoring and Assessment* 113:411-429.
- Martínez A. C. (2006). Distribución de las concentraciones de arsénico en el agua de pozos que abastecen las poblaciones cercanas al límite interestatal de Aguascalientes y Zacatecas. Tesis de Maestría en Ciencias (Toxicología), Centro de Ciencias Básicas. Universidad Autónoma de Aguascalientes. Ags, México. 62 p.
- Martínez A. y Valdivia A. G. (2007). Calidad del agua en la presa Plutarco Elías Calles durante la engorda de bagre (*Ictalurus punctatus*). Revista *Idea Investigación, Docencia y Extensión Agropecuaria*. No 22, 14-18 pp. Centro de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Mora M. (2007). Tesis de Maestría: Determinación de parámetros fisicoquímicos y metales pesados en suelo y sedimentos del cauce del río san Pedro. Centro de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma de Aguascalientes. 121 p.
- Morales-Hernández F., Soto-Jiménez M. F. y Páez-Osuna F. (2003). Heavy metals in Sediments and Lobster (*Panilinus gracilis*) from the discharges area of the submarine sewage outfall in Mazatlán bay (SE Gulf of California). *Archiv. Environ. Contam. Toxicol.* 46, 485-491.

- Muñoz-Riveaux S., Naranjo-López C., Garcés-González G., González-Lazo D. D. y Cordero M. (2005). Macroinvertebrados bioindicadores de la calidad del agua en Cuba. ISBN 959-250-156-4. www.dama.gov.co
- NHWQM (1996). National Water Quality Handbook. United States Department of Agriculture & Natural Resources Conservation Service. http://www.wsi.nrcs.usda.gov/products/W2Q/water_qual/docs/wqm1.pdf. 229 p
- Norma Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación el 24 de junio de 1996.
- Norma Mexicana NOM-003-ECOL-1997. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. Diario Oficial de la Federación el 14 de enero de 1998.
- Norma Mexicana NMX-AA-087-1995-SCFI. Análisis de agua – evaluación de toxicidad aguda con *Daphnia magna* Status (Crustacea – Cladecera) – método de prueba. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.
- Norris R. y Hawkins C. (2000). Monitoring river health. *Hydrobiología* 435: 5-17.
- Oller C. y Goitia E. (2005). Macroinvertebrados bentónicos y metales pesados en el río Pilcomayo (Tarija, Bolivia). *Rev. Bol. Ecol.* 18:17-32.
- O'Neill H. J., McKim M., Allen J. y Choate J. (1994). Monitoring surface water quality. A guide for citizen, students and communities in Atlantic Canada. Canada-New Brunswick Water/Economy Arrangement. 13 p
- Ongley E. D. (1997). Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Estudio FAO Riego y Drenaje-55. <http://www.fao.org/docrep/W2598S/W2598S00.htm>.

- Ortiz G. S., Hernández Ll. A. y Ortega R. A. (2005). Diseño, construcción y aplicabilidad del índice de evaluación ambiental de ecosistemas acuáticos (IEAEA). *INTERCIENCIA* 30 (3): 126-133.
- Ortiz M. (2009). Hidrogeología de la Cuenca de Aguascalientes. Doctorado en Ciencias de la Tierra en el área de Agua Subterránea. Instituto de Geofísica de la Universidad Autónoma de México. Comunicación personal.
- Petrovich M., Kastelan-Macan M. y Hovart A. J. (1999). Interactive sorption of metal ions and humic acids onto mineral particles. *Water, Air & Soil Pollution* 111(1-4): 43-56.
- Qadir A., Malik R. N. y Husain S. Z. (2008). Spatio-temporal variations in water quality of Nullah Aik-tributary of the river Chenab, Pakistan. *Environ Monit Assess* 140:43-59.
- Ramírez E. M., Avelar F. J., Zaragoza J y Rico R. (2007). Informe final: Estudio sobre los agentes, cargas contaminantes y toxicidad que afectan el cauce del río San Pedro en el municipio de Aguascalientes y zonas aledañas. Centro de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma de Aguascalientes. 218 p.
- República de Chile (2008). Normas de Calidad para La Protección de las Aguas Continentales Superficiales. Consultado en: <http://www.sofofa.cl/ambiente/Agenda/ESTABLECE%20NORMAS%20DE%20CALIDAD%20PARA%20LA%20PROTECCION%20DE%20LAS%20AGUAS%20CONTINENTALES%20SUPERFICIALES.pdf>. 18 p.
- Rickwood C. J. y Carr G. M. (2008). Development and sensitivity analysis of a global drinking water quality index. *Environ Monit Assess*. DOI 10.1007/s10661-008-0464-6.
- Rico-Martínez R., Velázquez-Rojas C. A., Pérez-Legaspi I. A. y Santos-Medrano G. E. (2000). The use of aquatic invertebrate toxicity test and invertebrate enzyme biomarkers to assess toxicity in the states of Aguascalientes and Jalisco. En: Butterworth F. M., Gunatilake A. y Gonshebbatt M. E. (Eds.). *Biomonitoring and*

Biomarkers as indicators of environmental change Vol. 2. Plenum Press. New York. Pp. 427-438.

- Rivera-Vázquez R., Palacios-Vélez O. L., Chávez-Morales J., Belmont M. A., Nikolski-Gravilov I., De la Isla De Bauer M. L., Guzmán-Quintero A., Terrazas-Onofre L. y Carrillo-González R. (2007). Contaminación por coliformes y helmintos en los ríos Texcoco, Chapingo y San Bernardino tributarios de la parte oriental de la cuenca del Valle de México. *Rev. Int. Contam. Ambient* 23 (2) 69-67.
- Rodríguez R., Hernández G., González T., Cortes A., Godínez M. A. y Margain R. (1997). Definición del uso regional del agua subterránea, su potencialidad y uso en la zona de la ciudad de Aguascalientes. Instituto de geofísica. Departamento de recursos naturales. UNAM.
- Rodríguez S. (1995). Tesis: Análisis de componentes principales robustos. Facultad de Matemáticas, Universidad de Guanajuato. 70 p.
- Romero J. A. (1999). Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización. 3^{ra} edición. Limusa. México.
- Rosemond S. de, Duro D. C. y Dubé M. (2007). Comparative analysis of regional water quality in Canada using Water Quality Index. *Environ Monit Assess*. DOI 10.1007/s10661-008-0480-6.
- Salas J. F. (2004). Tesis: Diagnostico y clasificación de la calidad del agua en la cuenca del río Baker, según objetivos de calidad. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil. Santiago de Chile. 178 p.
- Samboni N. E., Carvajal Y. y Escobar J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Revista Ingeniería e Investigación* 27 (3): 172-181.
- SCT (2006). Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Mapa del Estado de Aguascalientes.

- Sedeño-Díaz J. E. y López-López E. (2007). Water Quality in the Río Lerma, Mexico: An Overview on the Last Quarter of the Twentieth Century. *Water Resour Manage* 21:1797-1812.
- SEDUE (1999). Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Proyecto de regeneración de río San Pedro.
- Shiou-Mey L., Shang-Lien L. y Shan-Hsien W. (2004). A generalized water quality index for Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment* 96:35-53.
- Silva S. M., Muñoz A., De la Isla de Bauer M.L. e Infante S. (2002). Contaminación Ambiental en la Región de Atlixco: 1. Agua. *Terra Latinoamericana* 20 (003): 243-251.
- Seoanez C. (1999). Ingeniería del medio ambiente, aplicada al medio natural continental. Segunda edición. Mundi-Prensa. España. 701 pp.
- SRH (1976). Presas construidas en México. Secretaría de Recursos Hidráulicos. México.
- Timmermar J. G., Ottens J. J. y Ward R. C. (2000). The information cycle as a framework for defining information goals for water quality. *Environmental Management*, Vol. 25 (3) 229-239.
- Toledo A. (2002). El Agua en México y en el Mundo. *Gaceta Ecológica*. Núm. 064, pp. 9-18.
- Torres F. (2008). Tesis Doctoral: Estudio de la toxicidad en muestras de agua, suelo y sedimentos de la cuenca del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes empleando pruebas de toxicidad: integración de estudios de campo y laboratorio. Centro de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma de Aguascalientes. Comunicación Personal

- Tortajada J. A. (2002). Tesis Doctoral: Soluciones quimiométricas para optimizar el análisis de parámetros químicos en aguas. Facultad de Química, Universidad de Valencia. España. 327 p.
- Treviño B. y Cázares E. (1999). Contaminación del agua. En: México desconocido S. A. de C. V. (Eds.) Uso sustentable del agua en México – reto de nuestro tiempo. 1^{ra} edición. México.
- Valencia J. L. (2007). Tesis Doctoral: Estudio estadístico de la calidad de las aguas en la cuenca hidrográfica del río Ebro. Departamento de Edafología, Universidad Politécnica de Madrid. España. 246 p.
- Vandenberghe V., van Greisnven A., Bauwens W. y Vanrolleghem P. A. (2006). Effect of different river quality model concepts used for river basin management decisions. *Water Science & Technology* 53 (10): 277-284.
- Ward R. C., Loftis J. C. y McBride G. B. (1990). Design of water quality monitoring system. USA. John Wiley & Sons, Inc. 231 p.

Páginas web

- Alberta Environment (2008). Alberta River Water Quality Index. Consultado en: <http://environment.alberta.ca/1777.html#Methodology>.
- ATSDR (2006). Agency for Toxic Substances and Disease Registry. <http://www.atsdr.cdc.gov>
- CEPIS (2009). El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. <http://www.cepis.org.pe/eswww/fulltext/publica/manueval/anecap05.html>
- CONAGUA (2004). Comisión Nacional del Agua. Estadísticas de agua en México. <http://www.cna.gob.mx>

- CONAGUA (2005). Comisión Nacional del Agua. Gerencia de saneamiento y calidad del agua. SGT. <http://www.cna.gob.mx>
- Gallardo A. (2006). Geoestadística. ECOSISTEMAS. Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente. <http://www.revistaecosistemas.net/articulo>.
- Gobierno de Perú (2008). Reglamento de los títulos I, II Y III del D. L. N° 17752 sobre Ley General de Aguas. Consultado en <http://www.inrena.gob.pe/irh/blegal/ds/ds>
- IUCN (2000). International Union for the Conservation and Natural Resources. Vision for water and nature. A world strategy for conservation and sustainable management of water resources in the 21th Century-Compilation of all project documents. Cambrige. <http://www.unesco.org>
- PNUMA (2004). Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente. El estado del medio ambiente y la contribución del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente al tratamiento de los principales problemas ambientales. <http://www.unep.org/gc/GC23/documents/GC23-3-Add5-Spanish>.
- SEMARNAP (1999). Secretaría de Marina, Recursos Naturales y Pesca. Índice de calidad del agua. <http://www.semarnap.gov.mx>.
- SMN (2006). Sistema Meteorológico Nacional del la Comisión Nacional del Agua. <http://smn.cna.gob.mx>.
- Toro J., Schuster J. P., Kurosawa J., Araya E. y Contreras M. (2003). Diagnostico de la calidad del agua en sistemas lóticos utilizando diatomeas y macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores Río Maipo (Santiago: Chile). <http://www.conama.d/rm/568/articles>.
- UNESCO/WWAP (2003). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/World Water Assessment Programme. Resumen del Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. <http://www.unesco.org>.