

Calidad del agua del río Nexapa: Tendencias espacio-temporales y sus implicaciones

Amado Navarro, Jorge Herrera, Luis Caso y José Marrugo

A. Navarro, J. Herrera, L. Caso y J. Marrugo.

Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, Prolongación Reforma 168, Santiago Mihuacan, 74420
Izúcar de Matamoros, Puebla

Universidad de Córdoba, México Veracruz 290, Córdoba Centro, 94500 Córdoba, Veracruz-Llave
navarro48_99@yahoo.com

M. Ramos., V. Aguilera., (eds.) .Ciencias Naturales y Exactas, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago,
Guanajuato, 2013.

Abstract

This study covers the assessment of spatial and temporal variations of water quality of the Nexapariver and some surface water flows associated with it, by sampling and analysis campaigns conducted between 1999 and 2013. The main physical, chemical and microbiological parameters were evaluated, besides the presence of organic pollutants analyzed by gas chromatography coupled to mass spectrometry, in samples from 11 stations located along 80 km in the river upper course. The river is heavily impacted by the polluted water transfer from the Atoyac River to meet irrigation needs, which leads to the deterioration of its water quality at the point of impact and its subsequent course until the city of Izúcar de Matamoros. Using analysis of variance and factor analysis was demonstrated the influence on the quality parameters and concentration levels of contaminants of the dilution processes during the dry and diffuse pollution in the rainy seasons. The Water Quality Index shows a negative trend from 1995 to 2013. We demonstrate the possibility of using organic micropollutants in water as indicators to assess anthropogenic inputs.

8 Introducción

El agua constituye no sólo un factor condicionante del desarrollo que puede alcanzar cualquier colectividad humana, sino también se ha proclamado como un derecho humano esencial. Es conocido que el ingreso guarda relación con la disponibilidad de agua entre países y dentro de un mismo país. Modulada por el cambio climático, la carencia de fuentes de agua seguras y adecuadas en cuanto a su volumen puede convertir en fuente de conflictos tanto al interior de cualquier nación como en el plano internacional. La solución a estos problemas tiene que pasar de ser impulsada por factores tecnológicos a la gestión de procesos con las personas involucradas en la toma de decisiones incluyendo de abajo hacia arriba (WWAP, 2012). La contaminación del agua, que puede definirse como la alteración de sus condiciones naturales por la introducción de sustancias, formas de energía o combinación de ellas que cause desequilibrio ecológico (Cámara de Diputados, 2013), por causas naturales o derivadas de la actividad humana, representa severos riesgos para los ecosistemas, la salud humana e incluso la economía. Más de 1.9 millones de muertes y 4.2% de la carga global de enfermedades se pueden atribuir cada año a los efectos relacionados con el agua y el saneamiento (OMS, 2009). En México, los últimos datos publicados por la OMS señalan 4.36 muertes y 197.26 años perdidos de vida completamente sana por 100,000 habitantes en el año 2004 (OMS, 2013). Asimismo, en el año 2011, los costos atribuibles a la contaminación del agua (por agotamiento y degradación), ascendieron a un 0.7% del Producto Interno Bruto, equivalentes a 92,688.9 millones de pesos (INEGI, 2013).

Los ríos siempre han sido los más importantes recursos de agua dulce, y la mayoría de las actividades de desarrollo siguen siendo dependientes de ellos.

Como ecosistemas son intensamente modificados y contaminados por la actividad humana y los problemas de la calidad de sus aguas se han intensificado por el crecimiento y concentración de la población y la industria además de cambios indiscriminados en el uso del suelo y la deforestación de sus riberas. Esto último incrementa la contaminación difusa, con la pérdida de la capa útil del suelo y la incorporación de fertilizantes químicos a las corrientes (Baskar *et al.*, 2013; Essien-Ibok y Umoh, 2013; Fella *et al.*, 2013; Harnisz, 2013; Khalik *et al.*, 2013; Vaishali y Punita, 2013). El agua contaminada es un vehículo importante para el transporte de patógenos, cada vez más resistentes a los antibióticos por el uso indiscriminado de estos y su presencia en el medio acuático. Además de los contaminantes orgánicos persistentes, la presencia de todos los productos que utilizamos en nuestra vida diaria, los contaminantes emergentes, pone en la atención de académicos, políticos y público en general, la seguridad química indisolublemente ligado al desarrollo sostenible (USEPA, 2012). Un factor clave para alcanzar cualquier meta en este aspecto es la información disponible para la sociedad y las autoridades responsables. México no es ajeno a estos problemas, existiendo un desbalance entre la demanda, la disponibilidad y la distribución del agua, con una infraestructura que no se ha renovado a la par del crecimiento demográfico y económico y factores sociales que no coadyuvan al cuidado de este recurso (López-Hernández *et al.*, 2012). La gestión sostenible del agua superficial en la Subcuenca del río Nexapa (SCN), tiene su punto de partida en la identificación de su calidad y la evaluación de los principales problemas ambientales que la afectan, aspectos que se abordan en el presente trabajo.

8.1 Métodos

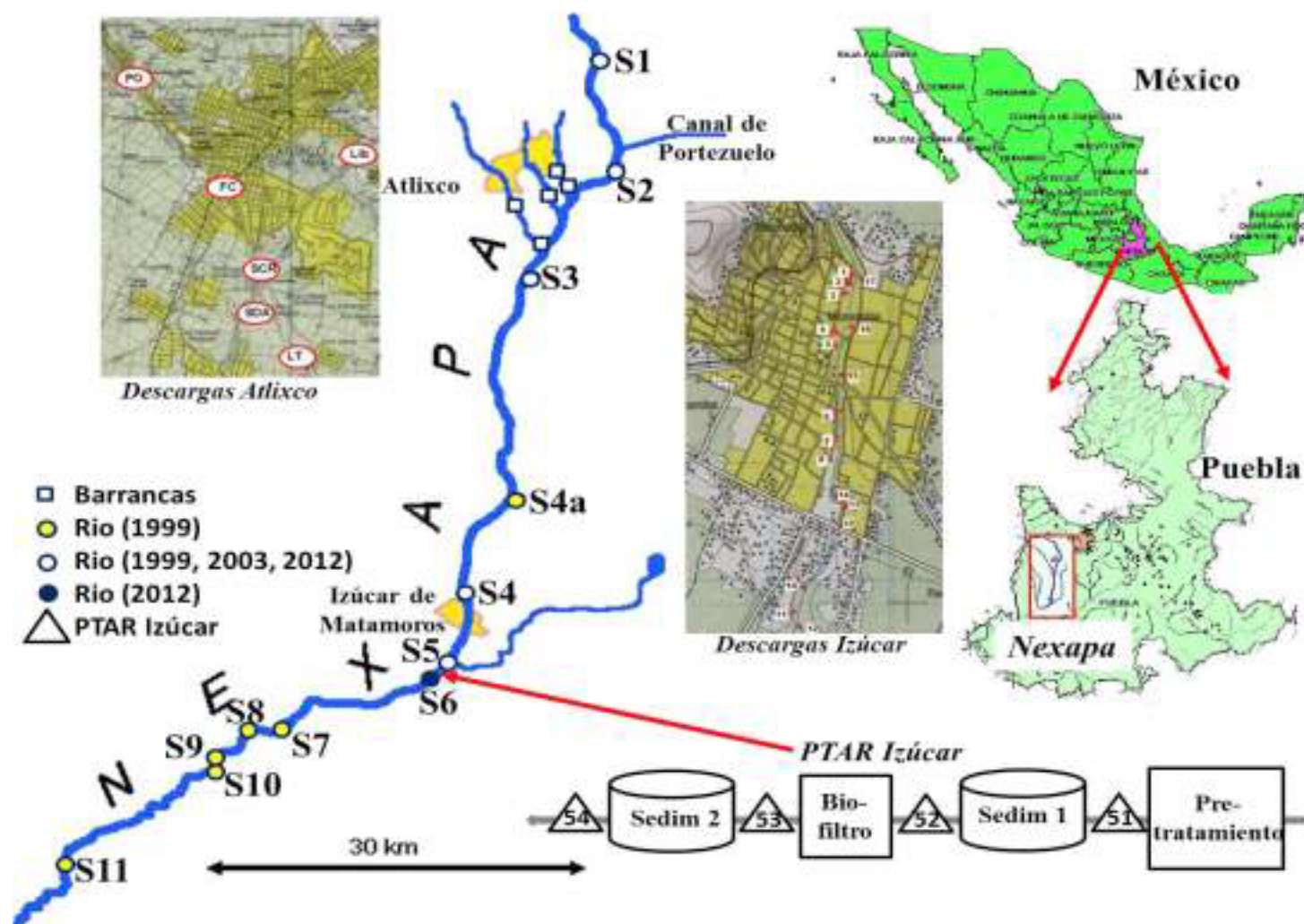
Región de estudio: La SCN, se encuentra ubicada en la Región Hidrológica N° 18, río Balsas (alto Balsas), cuenca del Atoyac. La corriente superficial más importante es el río Nexapa que nace en la falda oriental del Popocatepetl a unos 20 km al norte de la ciudad de Atlixco y tiene como afluentes a los ríos Atotonilco y Atila. El río Nexapa, es de régimen permanente alimentado en su porción alta por los deshielos del volcán. Sobre su porción occidental, recibe aportaciones del río Cantarranas y de las barrancas.

La Leona y Cuescomate. A través del canal de Portezuelo, llega un caudal aproximado de $4 \text{ m}^3/\text{s}$ de aguas trasvasadas del río Atoyac, receptor de descargas de la ciudad de Puebla. Mayores detalles de las características de la SCN se pueden encontrar en (CNA, 2005; Navarro *et al.*, 2007).

Aspectos generales del muestreo y análisis químico: Los trabajos experimentales se guiaron por lo establecido en los procedimientos de muestreo, conservación de muestras y análisis más aceptados: las normas ISO 5667-1, -3 y -6, los Standard Methods (SM) de la APHA-AWWA, los métodos de la EPA y las Normas NMX-AA concordantes con ellos (Navarro, 2000, 2005), con la actualización de las mismas en el transcurso de los años.

Consecuentemente sólo se describen los cambios más importantes realizados en el período 2012-2013. Muestras: La selección de los puntos de muestreo se realizó tomando en cuenta los utilizados por CONAGUA y la ubicación de puntos de impacto antropogénico. La ubicación de los principales se muestra esquemáticamente en la figura 8. Para el estudio 2012-2013, las estaciones en el río fueron: 1 – LM, Los Molinos; 2 – SD, Santo Domingo; 3 – LF, Las Fajanas; 4 – Al, Alchichica; 5 – P1, Puclta1 (antes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – PTAR) y 6 – P2, Puclta2 (después de la PTAR). Todas las muestras fueron compuestas de 24h. También se tomaron muestras de agua en distintos puntos de la PTAR, indicados en la propia figura.

Figura 8 Sitios de toma de muestras



Métodos de análisis: En el período 2012-2013 la determinación de nitratos se realizó por el método del electrodo selectivo (SM-4500-NO₃⁻). Se analizaron los índices físicos, químicos y microbiológicos (Ifqm): temperatura (T, °C); pH (unidades de pH); conductividad eléctrica (C ⁻¹); turbidez (Tur, UNT), sólidos sedimentables (SS, mL L⁻¹), coliformes totales y fecales (Col_{FEC} y Col_{TOT} respectivamente, UFC 100 mL⁻¹) y en mg L⁻¹ sólidos totales, volátiles totales, suspendidos totales y disueltos totales (ST, SVT, SST y SDT); oxígeno disuelto (O_D); sulfatos (SO₄); nitritos (NO₂); nitratos (NO₃); amonio (NH₄); cloruros (Cl); alcalinidad (Alc); dureza (Dur); demanda bioquímica y química de oxígeno (DBO₅ y DQO, respectivamente).

Para el análisis de compuestos orgánicos las muestras fueron filtradas y se utilizó la extracción en fase sólida para la extracción/concentración de los compuestos orgánicos de la fase acuosa (Matamoros *et al.*, 2010), la asistida por ultrasonido de la fase particulada de las muestras de agua (Zhang *et al.*, 2006) y se realizó una limpieza por cromatografía en columna (Yeasmin *et al.*, 2011).

Las muestras fueron previamente salpicadas con una mezcla de surrogados para evaluar recobrados.

Los extractos se trasvasaron y llevaron casi a sequedad con un flujo suave de nitrógeno y se reconstituyeron con 80 μL de acetato de etilo/metanol/isooctano (2:2:1 v/v), almacenándose a -4°C hasta su análisis.

Justo antes del análisis se añadieron a las muestras 20 μL de una solución de d-pireno y trifenilamina (estándares internos, para la corrección de inestabilidades del equipo), para su análisis por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG/EM). Antes de la inyección se realizó la derivatización de los extractos con hidróxido de trimetilsulfonio (TMSH, 2:1 v/v).

Se utilizó un sistema CG/EMClarus 680/SQ8 (Perkin Elmer), con una columna capilar AB-5MS de 30 mx 0.25 mm x 0.25 μm . La inyección se realizó en el modo split/splitless (relación de Split 20:1), con el inyector a 295°C . Como gas portador se utilizó helio (1.3 ml min^{-1}).

Programa del horno: temperatura inicial de 100°C 1 min; rampa de $20^{\circ}\text{C min}^{-1}$ hasta 290°C , seguida de una segunda rampa de $4^{\circ}\text{C min}^{-1}$ hasta 310°C y una tercera rampa de $8^{\circ}\text{C min}^{-1}$ hasta 330°C , permaneciendo ahí hasta completar 24min de corrida. El espectrómetro de masas fue operado en modo de impacto electrónico, con una temperatura de la interfase con el cromatógrafo de 280°C , una temperatura similar de la fuente y barrido de 35 a 450 m/z.

Los aspectos básicos del aseguramiento de la calidad se describen en (Navarro *et al.*, 2011).

Análisis estadístico: Para el análisis estadístico se utilizó el paquete Statistica v. 10.0 (Statsoft, USA). Las diferencias entre medias fueron evaluadas mediante ANOVA de efectos principales (ANOVA-EP) y ANOVA factorial (ANOVA-P), utilizando la prueba HSD de Tukey y un valor de $p < 0.05$ para considerarlas significativas.

La regresión lineal fue evaluada mediante ANOVA y análisis de falta de ajuste. Para reducir la dimensionalidad de la data se utilizó el análisis factorial con el análisis de componentes principales (PCA), como método de extracción y rotación Varimax normalizada.

8.2 Resultados y su discusión

Tendencias espacio-temporales de los Ifqm: En la Tabla 8 se muestran las medias y errores estándar de la media (EEM), para los Ifqm en las diferentes estaciones de muestreo para las campañas de los años 2012 y 2013.

Tabla 8 Estadística descriptiva de las estaciones de muestreo (2012-2013)

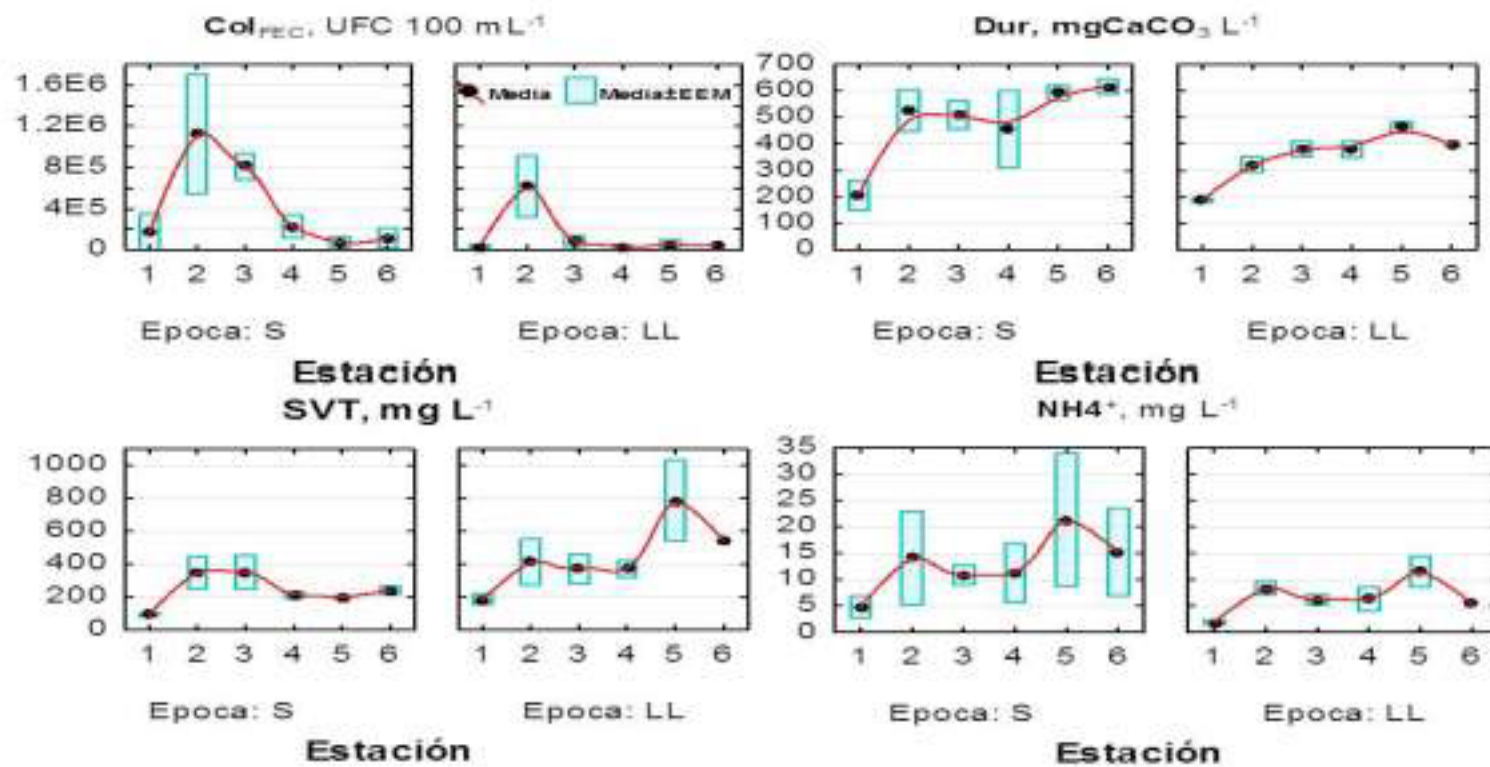
Estación	LM	SD	LF	AI	PI	P2
Parámetro	Media±EEM					
T	17.2±0.5	21.2±0.7	20.5±0.5	21.6±0.6	23.2±0.7	23.3±0.7
pH	7.16±0.10	6.96±0.19	6.94±0.24	6.98±0.30	7.03±0.26	7.08±0.72
CE	407±164	1111±200	1047±163	907±190	1102±167	1187±301
O _D	5.5±0.4	3.4±1.0	4.5±0.2	4.3±0.8	3.4±0.5	1.0±0.5
Tur	170±98	263±103	222±62	184±89	252±155	364±350
SS	0.8±0.5	2.6±0.8	2.6±0.7	3.5±1.1	3.2±1.9	2.1±1.6
ST	538±204	1871±574	1751±516	1667±415	2922±1550	1480±449
SVT	131±26	374±73	360±64	279±43	435±163	345±103
SST	296±210	1152±625	1079±572	688±401	1857±1366	767±715
SDT	242±15	719±105	672±134	959±136	1068±195	856±128
SO ₄	36±12	163±33	168±44	204±89	170±36	275±97
NO ₂	1.34±0.18	2.37±1.00	1.84±0.35	2.89±0.31	2.68±0.39	2.59±0.95
NO ₃	14.86±4.90	22.51±6.30	24.84±7.37	30.95±9.59	24.49±6.44	28.55±5.56
NH ₄	3.43±1.15	11.23±4.20	8.58±1.40	8.83±2.89	16.46±6.18	12.04±5.82
Cl	73.1±9.0	181.7±50.6	170.1±47.4	246.9±92.6	159.4±38.3	211.3±69.9
Alc	258±91	713±229	657±194	630±181	649±170	785±333
Dur	196±26	425±59	445±40	418±68	528±33	544±76
DBO	30±11	107±24	143±38	44±5	46±12	40±2
DQO	78±11	217±61	359±51	242±50	207±52	198±
Col _{FEC} ×10 ⁻⁵	0.12±10	9.21±3.57	5.22±1.92	1.49±0.78	0.66±0.35	0.90±0.60
Col _{TOT} ×10 ⁻⁶	0.45±0.38	3.03±1.78	2.97±1,35	0.82±0.44	0.33±0.15	0.71±0.26

Lo anterior se refleja en 4 patrones de comportamiento que se ilustran en la figura 2. Los Ifqm DBO₅, DQO, Col_{FEC} y Col_{TOT}, presentan un máximo en SD, con valores inferiores en la época de lluvia. La Dur, CE, Cl y alcalinidad muestran un incremento a lo largo del trayecto estudiado, con valores superiores en época de seca.

Todos los índices de sólidos y la Tur, reflejan la influencia predominante del arrastre de material en la época de lluvia con un incremento a lo largo del curso del río.

Por último, el NH_4 , NO_2 , NO_3 y SO_4 , no muestran tendencias definidas en cuanto al espacio o la época del año.

Grafico 8 Patrones de comportamiento de los índices evaluados



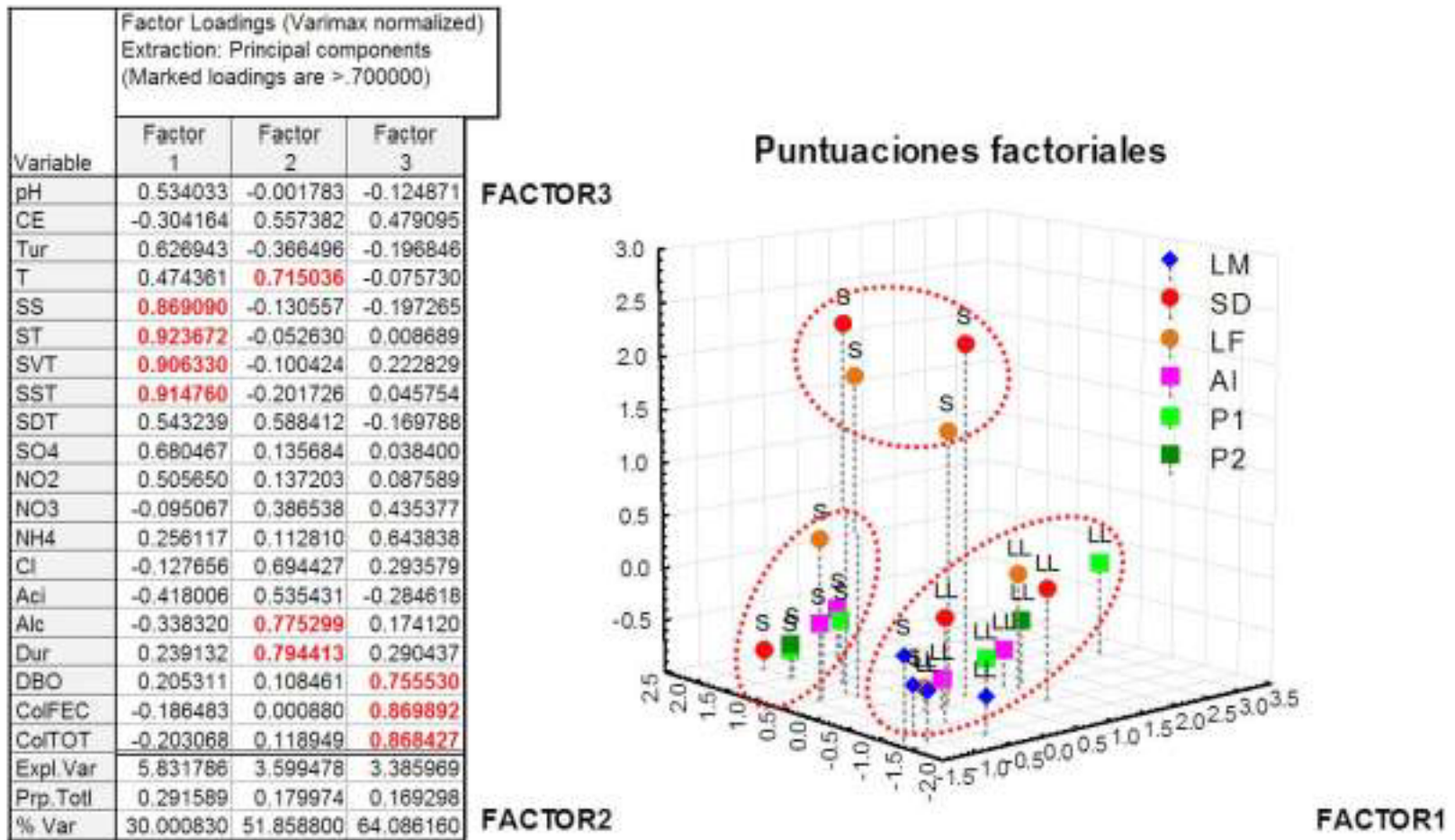
Análisis factorial: En el grafico se muestran las proyecciones de las variables en los 3 primeros componentes principales (CP), así como las puntuaciones factoriales de las muestras en el espacio determinado por los mismos.

Como se observa el CP1 está correlacionado con los arrastres de materia en la época de lluvia, el CP2 con la variación de las características hidrogeoquímicas a lo largo del trayecto estudiado y el CP3 con la carga de DBO y fecal en las aguas.

De acuerdo a ello se pueden apreciar 3 agrupaciones de las muestras, donde las estaciones de SD y LF en época de seca se destacan en el CP3 y se distinguen la época de seca y lluvia en las otras dos agrupaciones.

Se visualiza además que las muestras de LM, sea en época de lluvia o seca, presentan los valores inferiores en los 3 CP.

Grafico 8.1 Resultados del análisis factorial



Comparación con otros ríos y con estándares de calidad: Para comparar los resultados obtenidos entre estaciones, con los reportados para otros ríos y con lo establecido en diferentes estándares, se utilizaron el coeficiente de divergencia, CD (Kong et al., 2011), la distancia euclidiana, DE y el ángulo entre el vector definido en un espacio n-dimensional definido por los p valores comunes de las propiedades del conjunto de datos a comparar (C_{ij}) y el obtenido en este estudio (C_k), definidos por las fórmulas:

$$CD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_{ij} - C_k}{C_{ij} + C_k} \quad (8)$$

$$DE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{C_{ij}^2 + C_k^2} \quad (8.1)$$

$$\cos \theta = \frac{\sum_{i=1}^n C_{ij} C_k}{\sqrt{\sum_{i=1}^n C_{ij}^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n C_k^2}} \quad (8.2)$$

En la tabla 8.1 se muestran los resultados obtenidos al utilizar los valores medios de Ifqm reportados en diferentes trabajos y los valores medios del río Nexapa. Se destacan en **negrita** los menores valores para cada uno de los parámetros calculados.

En el caso específico de las 7 cuencas agrícolas de Estados Unidos (McCarthy *et al.*, 2008), se procesaron los datos de los ríos seleccionados publicados en el apéndice 1 del reporte.

Tabla 8.1 Comparación de los Ifqm del río Nexapa con otros ríos y estándares de México

Río, Localidad, País, Fecha; Referencia	p	CD	DE		ColFEC
Merced, CA,USA, 2002-2003; 8	11	0.77	4.56E+02	34	
San Joaquín, CA,USA, 2002-2003; 8	11	0.59	3.50E+02	36	
Iowa, IA, USA, 2006-2008; 8	11	0.61	2.95E+02	22	
Iowa, IA, USA, 2006-2008; 8	10	0.63	3.13E+02	26	
Sugar Creek, IN, USA, 2002-2003; 8	11	0.61	3.41E+02	24	
White, IN, USA, 2002-2004; 8	8	0.71	3.94E+02	78	
Morgan Creek, MD, USA, 2002-2004; 8	10	0.74	4.50E+02	16	
Bogue Phalia, MS, USA, 2006-2008; 8	11	0.68	3.78E+02	14	
Tributary Clear Creek, MS, USA, 2008; 8	10	0.62	3.24E+02	24	
Maple Creek, NE, USA, 2003-2004; 8	11	0.54	3.10E+02	32	
Yakima, WA, USA, 2002-2004; 8	9	0.82	4.42E+02	39	
Bertam, Cameron, Malasia, 2012, lluvia; 2	9	0.74	4.47E+02	11	
Chiffa, Blida, Argelia, 2006; 3	5	0.32	1.83E+02	22	
Cauveri, Thanjavur, India, 2012 (Abr); 4	5	0.64	9.03E+01	35	
Mini, Vadodara, India, 2011 (Mar); 5	11	0.52	1.60E+03	28	
Lerma, Gto, México, 2009 (Ago); 6	6	0.36	7.70E+01	14	
Atoyac, est. 7, Pue, México, 2007 (seca); 7	8	0.51	1.08E+07	0	3.08E+07
Atoyac, est. 8, Pue, México, 2008 (seca); 7	8	0.49	7.95E+05	0	2.53E+06
Sinú, Córdoba, Colombia, 9/2009, 11	4	0.32	7.78E+01	14	
LFD, Uso Pub. Urbano (UPU), México, 2012; 9	11	0.57	8.42E+04	36	1.00E+03
LFD, Riego Agrícola (RA), México, 2012; 9	6	0.56	1.14E+05	30	1.00E+03
LFD, Prot. Vida Acuática (PVA), México, 2012; 9	6	0.70	1.14E+05	68	1.00E+02
NOM-001, RA, Prom. Diario (PD), México, 1996; 10	4	0.64	1.40E+05	16	1.00E+03
NOM-001, UPU, PD, México, 1996; 10	3	0.49	5.00E+02	46	
NOM-001, PVA, PD, México, 1996; 10	3	0.52	5.36E+02	41	

2.Khaliket *et al.*, 2013; 3.Fellaet *et al.*, 2013; 4.Baskaret *et al.*, 2013; 5.Vaishali y Punita, 2013; 6. López-Hernández *et al.*, 2012; 7.Sandoval-Villasana *et al.*, 2009; 8.McCarthy *et al.*, 2008; 9. LFD, 2013; 10. NOM-001-ECOL-1996. 11. Feria, 2009

Considerando que en el caso del Lerma coinciden dos de los valores, se puede concluir que el Nexapa tiene similitudes con este río tan contaminado.

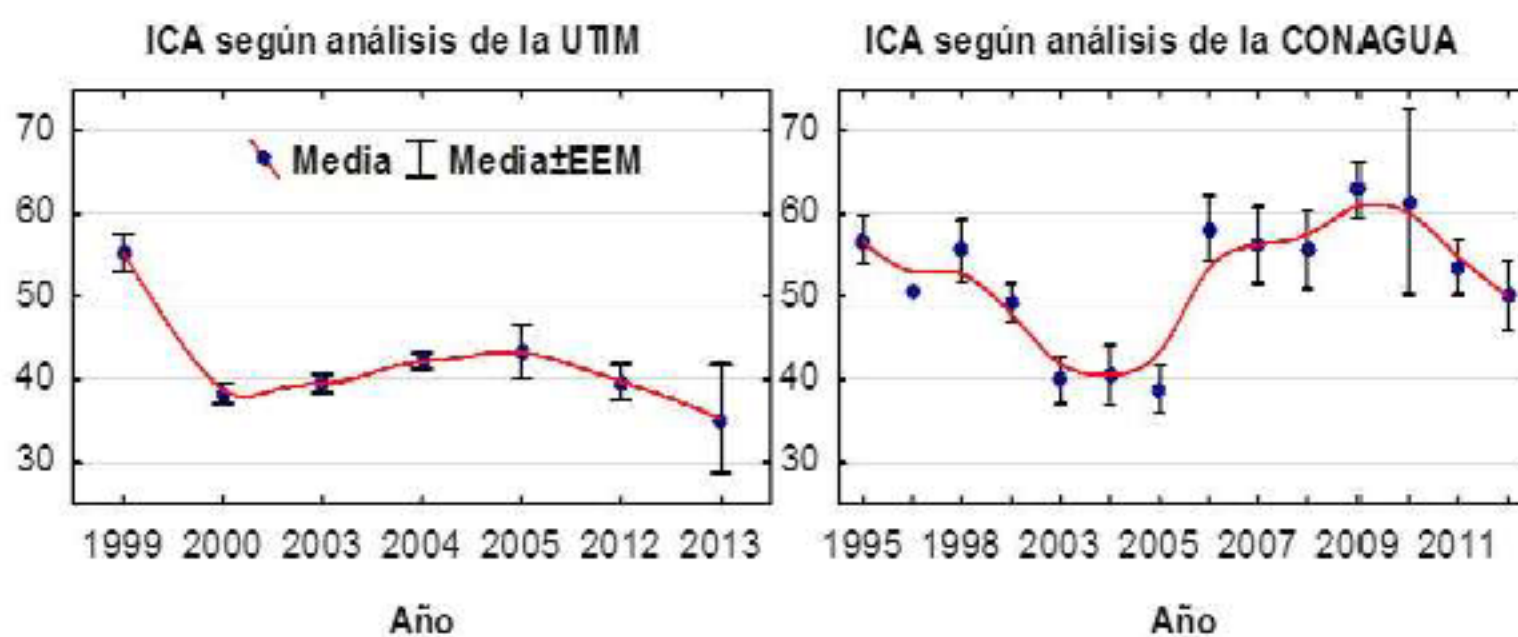
Por otra parte es interesante el hecho de que el ángulo con el río Atoyac es de 0 grados, lo cual resulta explicable precisamente por ser aguas de este río la que impactan al Nexapa a la altura de Portezuelo. En los casos del río Sinú, el Cauverí y el Chiffa, el número de Ifqm es pequeño ($p < 6$).

Para comprender las diferencias con los estándares establecidos en la LFD y la NOM-001-Ecol, se incluye el dato de Col_{FEC}, (para el Nexapa el valor medio resultó 2.80E+05), pues es el que más contribuye a las diferencias en la DE con las muestras del río Atoyac y lo establecido en las ley o normatividad de México.

Tomando esto en cuenta, la mayor similitud se presenta con lo establecido para aguas de riego.

Evolución histórica de la calidad del agua: Aunque ya no se encuentra en uso el Índice de Calidad del Agua (ICA) utilizado durante varios años por la CONAGUA, utilizando los datos de los tres estudios realizados por la Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros (UTIM), así como la información suministrada por el Laboratorio Estatal de la entidad (LCNA) en el marco de los mismos, se calculó el ICA y en la figura 4 se muestran los resultados medios por año.

Figura 8.2 Valores del ICA



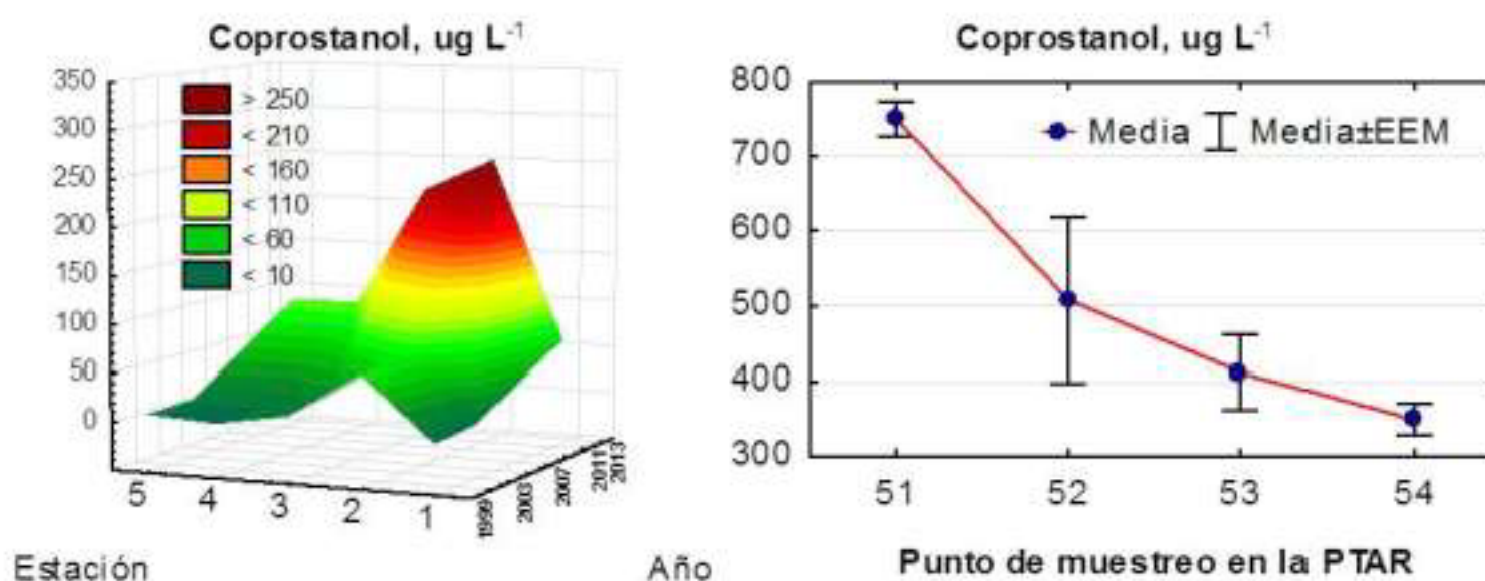
Se puede observar una tendencia coincidente en ambos casos, aunque con valores mayores para los resultados del LCNA. Es de resaltar la tendencia negativa para los valores de 2009 a 2013.

Esteroles en el río Nexapa: Como se aprecia en la evidencia mostrada, el principal problema del Nexapa radica en su alto grado de contaminación fecal.

Es un hecho conocido que la identificación de las fuentes de la contaminación fecal sólo mediante la densidad de indicadores bacterianos en general no se logra, siendo necesario recurrir a marcadores moleculares como los esteroides fecales y en específico al coprostanol (COP), ampliamente utilizado para valorar el impacto antropogénico en aguas y sedimentos (Sojinuet *et al.*, 2012).

En la figura 8.3 se muestran las concentraciones de este compuesto en las estaciones 1-5, encontradas en los estudios de la UTIM así como la evaluación de los mismos en las distintas etapas de la PTAR de Izúcar.

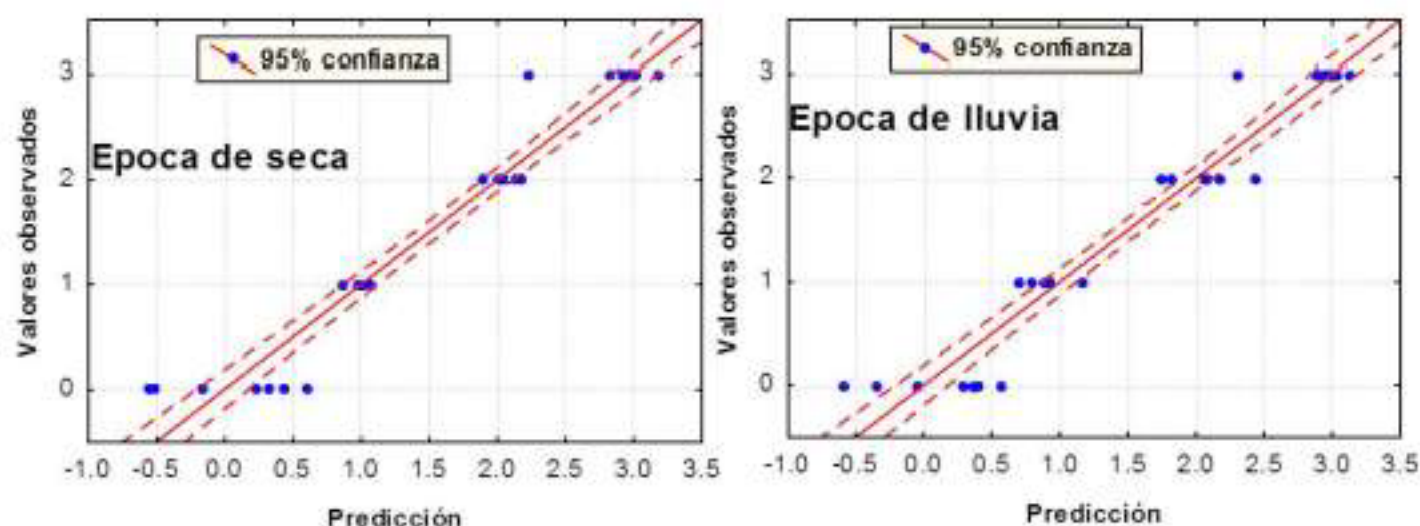
Figura 8.3 Concentraciones de coprostanol en el río y la PTAR



Se puede apreciar que la concentración de coprostanol se ha incrementado desde el año 1999, especialmente en la estación SD donde impacta el trasvase de aguas del Atoyac. En la PTAR, aunque disminuye la concentración de coprostanol, debido principalmente a los procesos de sedimentación, los niveles en el efluente siguen siendo elevados, lo que se refleja en la estación del río ubicada después de dicha planta (tabla 8).

Trazadores químicos y nivel de urbanización: La identificación de las fuentes de la contaminación de las aguas superficiales es muy importante, para autoridades y población en general, tanto en la determinación de responsabilidades como en la adopción de medidas de mitigación. La utilización de trazadores químicos para evaluar las fuentes de contaminantes antropogénicos puede ser útil para ello. Uno de los impactos importantes es la urbanización, que no solo cambia el uso del suelo sino que ejerce una influencia importante en la calidad del agua en las cuencas hidrográficas (Carle, 2005). Varios autores han relacionado la calidad del agua (pH, sólidos, nitratos y otros índices físico-químicos), con variables como uso del suelo, densidad de viviendas, densidad de población, desarrollo de los servicios de saneamiento, etc., desarrollando, para los efectos de correlación, índices de urbanización que consideran dichas variables (Gallo *et al.*, 2007). Para evaluar la factibilidad de emplear las concentraciones de microcontaminantes químicos con este fin se realizó un análisis de regresión, utilizando como variables independientes las concentraciones de cafeína, galaxolide, Parsol, Sunscreen, Dowanol-EP, BHT, alquilbencenos lineales, nonilfenolesetoxilados, diclorofenol, los ácidos grasos entre C10 y C18, coprostanol, vainillina y la suma de los hidrocarburos entre C24 y C30. Como variable dependiente se utilizó un índice de urbanización, que con base en la inspección visual y la información de las autoridades del agua, clasificó a los sitios de muestreo (descargas, barrancas y estaciones en el río de la campaña 2002-2005), como sigue: 0 – ningún desarrollo urbano; 1 – viviendas aisladas; 2 – periferia de las dos ciudades; 3 – zona netamente urbana.

Figura 8.4 Resultados del análisis de regresión



Se puede apreciar que se obtiene una correlación muy satisfactoria, tanto para la época de seca como para la época de lluvia, ligeramente mejor para la primera, siendo factible utilizar a estos compuestos para evaluar impactos antropogénicos en el río.

8.3 Conclusiones

El trasvase de agua del Atoyac que impacta al río en la hidroeléctrica Portezuelo 2, cerca de la estación de muestreo 2 (SD), altera completamente los Ifqm del Nexapa y aporta una cantidad sustancial de compuestos orgánicos de diversa índole. Posteriormente, la turbulencia de las aguas y los procesos naturales de degradación, atenúan esto en cierto grado. La variación espacio-temporal de los Ifqm muestra la contraposición de los procesos de concentración de los contaminantes en época de seca y el aporte por los procesos de escorrentía en época de lluvia (contaminación difusa), lo que se desprende del análisis de varianza y factorial de los datos.

El principal problema del río y lo que distingue de otros con los cuáles se comparó, es la contaminación fecal lo que se refleja en el incremento de los niveles de coprostanos desde 1999 al 2013. Este problema tiene serias implicaciones para la salud humana y la inocuidad de los vegetales que se riegan con el agua del río. Se halló una correlación satisfactoria entre el desarrollo urbano y la presencia de trazadores químicos de impactos antropogénicos que incluyen fragancias, surfactantes, aditivos para alimentos y otros productos de uso doméstico e industrial.

8.4 Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo financiero entre los años 1999 y 2005. A la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo AECID, por el apoyo financiero en el marco del Proyecto 11-CAP2-1756 (2011-2013). A la UTIM por los recursos financieros y humanos que aportó en todos los años.

A la Asociación de Usuarios del Nexapa por el apoyo en los trabajos del período 2012-2013. Al conjunto de estudiantes e investigadores que contribuyeron a este esfuerzo.

8.5 Referencias

Baskar, S., Narasimhan, N., Swamidass, G., Ravichelvan R., Sukumaran, M., Anandaraj, T. (2013). Seasonal Variations in physico-chemical parameters of river Cauveri, Thanjavur, Tamil Nadu, India. *Intl J Res BiolSci.* 3(1), 8-11.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, (2013). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Últims Reformas DOF 24-05-2013. <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148.pdf>. Consultada en junio del 2013.

Carle, M.V., Halpin, P.N., Stow, C.A., (2005). Patterns of Watershed Urbanization and Impacts on Water Quality. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(3), 693-708.

CNA 2005. Diagnóstico Preliminar de la cuenca del río Nexapa (Estado de Puebla), Comisión Nacional del Agua, Delegación Regional Puebla, 2005.

Fella, H. C., Mohamed, B.E., Fatouma, B., Mohand, S.H. (2013). Preliminary Study on Physico-Chemical Parameters and Phytoplankton of Chiffa River (Blida, Algeria). *Journal of Ecosystems*, Article ID 148793, 9 pages, doi:10.1155/2013/148793.

Feria Díaz J.J., 2009. *Modelación de la calidad del agua y distribución espacial de metales pesados en los sedimentos del río Sinú*. Tesis de Maestría. Universidad de Córdoba. Montería, Colombia.

Gallo, E.L., Snyder, M.A., Deiwakh, N.R., Lohse, K., Brooks, P.D., McLain, J.E., McIntosh, J., Meixner, T., (2007). Quantifying Land Use and Land Cover Effects on Urban Runoff Water Quality. American Geophysical Union, Fall Meeting 2007, abstract #H43D-1619.

Harnisz, M. (2013). Total resistance of native bacteria as an indicator of changes in the water environment. *Environmental Pollution* 174, 85-92.

INEGI (2013). Sistema de Cuentas Nacionales de México. Cuentas económicas y ecológicas de México 2007-2011. Instituto Nacional de Geografía y Estadística (México), 159 p.

Khalik, W.M., Abdullah, M.P., Amerudin, N.P., Padli N. (2013). Physicochemical analysis on water quality status of Bertam River in Cameron Highlands, Malaysia. *J Mater Environ Sci.* 4(4), 488-495.

Kong, S.F., Shi, J.W., Lu, B., Qiu, W.G., Zhang, B.S., Peng, Y., Bai, Z.P. (2011). Characterization of PAHs within PM10 fraction for ashes from coke production, iron smelt, heating station and power plant stacks in Liaoning Province, China. *Atm Env.* 45, 3777-3785.

LFD (2013). Ley Federal de Derechos. Texto vigente. Última Reforma DOF 09-04-2012. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.

López-Hernández, M., Ramos-Espinosa, M.G., Guzmán-Arroyo, M., Payán-Zelaya F. (2012). Quantity and Quality of Water in the River Lerma—Lake Chapala Watershed, Mexico. *Journal of Environmental Science and Engineering A* 1(9), 1231-1242.

Matamoros, V., Jove, r E., Bayona, J. (2010). Part-per-Trillion Determination of Pharmaceuticals, Pesticides, and Related Organic Contaminants in River Water by Solid-Phase Extraction Followed by Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatography Time-of-Flight Mass Spectrometry *Anal Chem.* (82), 699-706.

McCarthy, K.A., Lampe, D.C., Capel, P.D. (2011). Discrete and continuous water-quality data and hydrologic parameters from seven agricultural watersheds in the United States, 2002–09: U.S. Geological Survey Data Series 603.

Navarro, A.E. (2000). Resumen del informe final del Proyecto Evaluación de la contaminación ambiental de las aguas superficiales de la región de Izúcar de Matamoros. Disponible en <http://navarrof.orgfree.com/Investigacion/ResumenNexapa1.pdf>.

Navarro, A.E. (2005). Resumen del informe final del Proyecto Estudio y solución de problemas ambientales relacionados con las aguas superficiales y el aire en la subcuenca del río Nexapa. Cuadernillos del SIR Ignacio Zaragoza, CONACyT. Disponible en <http://navarrof.orgfree.com/Investigacion/ResumenSCNexapa.pdf>.

Navarro A., Cid S., Rincón C., Rosas E., Aguilar A., Contreras S., Caso L., Bayona J., Velasco F., Sánchez A., Vázquez A., Martínez C., Díaz M, Pérez A., Malajevich A., Cuellar I., Navarrete D. (2007). El agua en la Subcuenca del Nexapa, México: necesidad de una gestión integral, Memorias de Latinosan 2007, Cali, Colombia. Disponible: en <http://navarrof.orgfree.com/Investigacion/Latinosan2007Cali.pdf>.

Navarro, A., Hernández, M.E., Bayona, J.M., Morales, L., Ruiz, P. (2011). Removal of selected organic pollutants and coliforms in pilot constructed wetlands in southeastern Mexico, *Int J Env Anal Chem.* 91(7&8), 680-692.

OMS, (2009). Global health risks: Mortality and burden of diseases attributable to selected major risks. Geneva, World Health Organization.

OMS, (2013). Global Health Observatory Data Repository. Water, sanitation and hygiene: Burden of disease by country. Recuperado de :<http://apps.who.int/gho/data/>.

Ozanne, R., Scott Wilson S. (2013). Kakanui River Water Quality Report. Dunedin: Otago Regional Council.

Sandoval-Villasana, A.M., Pulido-Flores, G., Monks, S., Gordillo-Martínez, A. J., Villegas-Villarreal, E.C. (2009). Evaluación fisicoquímica, microbiológica y toxicológica de la degradación ambiental del río Atoyac, México. *Interciencia* 34(12), 880-887.

Sojnu, S.O., Sonibare, O.O., Ekundayo, O., Zeng E.Y. (2012). Assessing anthropogenic contamination in surface sediments of Niger Delta, Nigeria with fecal sterols and n-alkanes as indicators. *Sci Tot Env.* 441, 89-96.

USEPA (2012). Chemical Safety for Sustainability. Strategic Research Action Plan 2012-2016. Documento EPA 601/R-12/006.

Vaishali, P., Punita, P. (2013). Assessment of seasonal variation in water quality of River Mini, at Sindhrot, Vadodara. *Int J Env Sci.* 3(5), 1424-1436.

WWAP (World Water Assessment Programme) (2012). The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk. Paris, UNESCO.

Yeasmin, F., Rahman, S., Rana, S., Fatema, K., Hossain, M., (2011), Determination of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), anthracene in different variety of fish samples in the Bangsai river of Bangladesh. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development* 11(2), 4664-4672.

Zhang, S., Zhang, Q., Darisaw, S., Ehie, O., Wang, G. (2006). Simultaneous quantification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs), and pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Mississippi river water, in New Orleans, Louisiana, USA. *Chemosphere*, (66), 1057-1069.

