

## ENFOQUE DE CUENCA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE CONTAMINACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE UN RÍO, VERACRUZ, MÉXICO

Beatriz TORRES BERISTÁIN<sup>1</sup>, Gloria GONZÁLEZ LÓPEZ<sup>2</sup>,  
Elena RUSTRIÁN PORTILLA<sup>3</sup> y Eric HOUBRON<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dirección General de Investigaciones, Universidad Veracruzana, Av. Luis Castelazo Anaya s/n, C.P. 91190, Xalapa Veracruz, México

<sup>2</sup> Instituto de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Av. S. S. Juan Pablo II S/N, Zona Universitaria, C.P. 91294, Boca del Río, Veracruz, México

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Prolongación Oriente 6 No. 1009, Col. Rafael Alvarado Orizaba, Veracruz, México

\*Autor responsable: torres.beristain@gmail.com

*(Recibido julio 2012, aceptado junio 2013)*

Palabras clave: calidad de agua, aguas superficiales, sistemas de información geográfica (SIG), microcuencas, aguas residuales

### RESUMEN

El río Seco se encuentra en el centro del estado de Veracruz. Se forma a partir de las aguas de deshielo del pico de Orizaba y en su camino al Golfo de México es contaminado por fuentes puntuales y no puntuales. El objetivo de este estudio fue analizar la calidad del agua del río Seco y evaluar el uso de un enfoque de cuenca usando un sistema de información geográfica para localizar las fuentes puntuales y no puntuales de contaminación relacionados con asentamientos humanos. La cuenca tiene una extensión de 43 816 ha, está compuesta por cuatro microcuencas, 12 municipios tienen parte de su territorio en ella y en 2010 la habitaban 204 255 personas. La determinación de la calidad de agua se realizó mensualmente durante los seis meses de la temporada de lluvias. Se construyó un sistema de información geográfica (SIG) en el que se ubicó el cauce del río Seco, los límites municipales e hidrográficos, los puntos de muestreo, así como los asentamientos humanos urbanos y rurales. El río Seco es utilizado para riego, actividades industriales y como fuente de agua potable, sin embargo se encontró una mala calidad de agua a nivel microbiológico. La evaluación de la demanda química de oxígeno (DQO) permite catalogarlo como contaminado y fuertemente contaminado, mientras las concentraciones de nitrógenos indican que es un río eutroficado.

Key words: water quality, surface water, geographic information system (GIS), watershed, wastewater

### ABSTRACT

The Seco river is located at the center of the state of Veracruz, Mexico. This river originates from the melting waters of the Pico de Orizaba and on its way to the Gulf of Mexico it is polluted by point and nonpoint sources. The aim of this study was to analyze the water quality of the Seco river and to use a watershed approach using a

geographic information system to locate point and non point sources of pollution related to human settlements. In this research our area of study was the Seco river sub-basin that has an extension of 43 816 ha., is constituted by four micro-basins, 12 municipalities and inhabited in 2010 by 204 255 persons. Water quality determination was carried out monthly during the six months of the rainy season. A geographic information system (GIS) was built to integrate the riverbed, the municipal and hydrographic limits, the sampling points and the urban and rural settlements. The Seco river is used for irrigation, industrial activities and as a drinking water source, even though this research determined the water quality at a microbiological level is bad. The chemical oxygen demand (COD) analysis determined the water is polluted or heavily polluted, while nitrogen concentrations indicate this is an eutrophic river.

## INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas son divisiones naturales del paisaje. Debido a la topografía y delimitación del parteaguas, el agua drena a través de corrientes superficiales a un punto común pudiendo desembocar en el mar, en un cuerpo de agua interior o infiltrarse antes de encontrar algún cuerpo o superficie colector (Cotler *et al.* 2007a, Maass y Cotler 2007).

El enfoque de cuenca es importante porque el agua constituye el eje integrador del territorio que vincula e interconecta los elementos naturales, sociales y económicos. Las cuencas hidrográficas constituyen las unidades territoriales idóneas para la planeación y gestión de los recursos naturales (Cotler *et al.* 2010). La dispersión de la contaminación va más allá de los límites administrativos, por ejemplo los municipales. Es por esto que la calidad del agua en una cuenca es un buen indicador del impacto de las actividades humanas en un determinado territorio.

El manejo integral de cuencas puede facilitar la transversalidad de políticas sectoriales permitiendo la gestión equilibrada de los recursos naturales y la integración de diversos actores (Cotler 2007b). Sin embargo en México se han llevado a cabo diferentes concepciones y delimitaciones de las cuencas por diversas instituciones, lo que es un reflejo de la diferente visión institucional sobre el manejo de un recurso natural de uso común como es el agua (Paré *et al.* 2008). En México existe un esfuerzo para transitar de un enfoque sectorial y centralista hacia uno integral, descentralizado y de mayor participación social a través del manejo de cuencas (Cotler 2007b).

En la República Mexicana sigue sin existir una gestión real por cuencas. En el país hay diferentes delimitaciones territoriales en relación al agua: 37 regiones hidrológicas, 25 Consejos de Cuenca y 13 Regiones hidráulico administrativas. Además las regiones delimitadas a nivel de cuencas se cortan,

entrecruzan y superponen con las jurisdicciones político administrativas (estados, municipios o regiones) así como también con los 653 acuíferos (CONAGUA 2003). Toda esta complejidad crea confusiones acerca de quién tiene las competencias y qué nivel de gobierno es responsable de la gestión de una u otra cuenca (Vera 2005). Existe un desconocimiento por parte de los gobiernos municipales de a qué cuencas, subcuencas y microcuencas pertenecen sus municipios, por tanto las delimitaciones hidrográficas no han tenido sentido en términos de administración del agua ni para el uso, manejo y protección de los recursos naturales. En la práctica la gestión del territorio (incluyendo los recursos naturales y actividades humanas) se lleva a cabo con base en las divisiones políticas sin tomar en cuenta las delimitaciones hidrográficas (Vera 2005).

En México existen 1471 cuencas hidrográficas las cuales fueron delimitadas utilizando criterios naturales, topográficos e hidrográficos (Cotler *et al.* 2007a). Debido a su gran tamaño la cuenca se suele subdividir utilizando los ríos tributarios principales agrupando el territorio en subcuencas y estas últimas se pueden subdividir en microcuencas (CONAGUA 1992). La división cuencas, subcuencas y microcuencas es una división jerárquica y anidada en donde, debido a la escala, cada división tiene distintos alcances. La cuenca nos da un esquema general que permite la planeación y la identificación de áreas prioritarias, la subcuenca permite la definición de estrategias para la planeación y gestión. La microcuenca por ser la de menor escala permite la identificación de los usuarios e intereses involucrados así como la vinculación de la calidad ambiental con las problemáticas locales por lo que es una buena unidad de gestión (Cotler y Caire 2009).

El estado de Veracruz se caracteriza por disponer abundantes recursos hídricos en comparación con otras entidades del país. La precipitación media anual representa casi el doble de la media nacional y

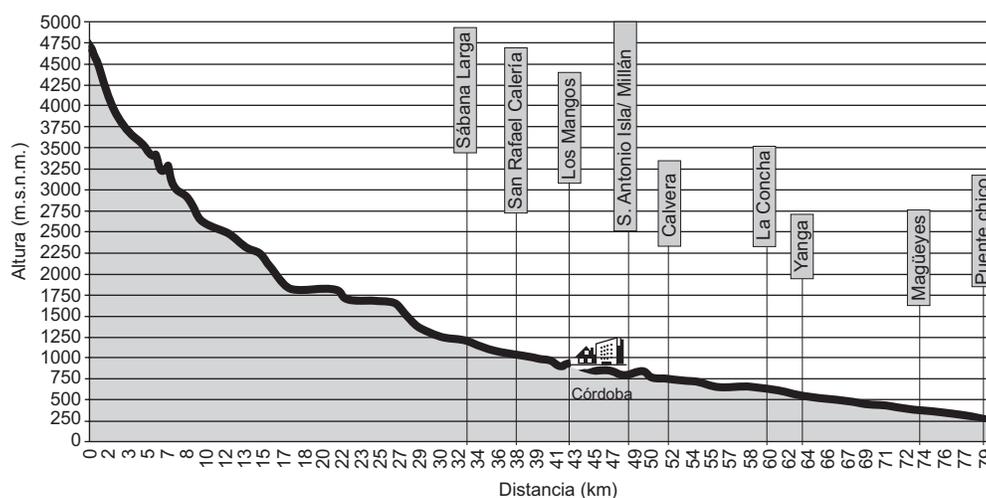


Fig. 1. Corte longitudinal del río Seco

por sus cauces fluye un tercio del escurrimiento total del país (CSVA 2004). El estado de Veracruz representa el 3.7% del territorio nacional y su población es de 7 643 194 habitantes, de los cuales el 61% vive en zonas urbanas y el otro 39% está asentado en las áreas rurales (INEGI 2010). A pesar de esta relativa abundancia de agua, en el estado la distribución no es equitativa para todos los habitantes. Existe una gran diferencia entre la cobertura de agua potable y saneamiento entre el mundo rural y el urbano, siendo uno de los estados con mayor rezago, ocupando el cuarto lugar en déficit de cobertura (Domínguez 2008). Además uno de los problemas medulares de los cuerpos de agua en el estado de Veracruz es su alto grado de contaminación (CSVA 2004).

La mayoría de los ríos que cruzan por los principales centros de población del estado reciben descargas de aguas residuales municipales, descargas industriales y diversos tipos de contaminación de fuentes no puntuales. Los 14 ríos veracruzanos más importantes registran niveles importantes de contaminación lo que implica graves consecuencias a la salud humana, limita las actividades productivas y deteriora el ambiente (CSVA 2004). Los nutrientes y contaminantes se reciclan en los ecosistemas acuáticos y terrestres de manera natural, sin embargo la influencia antrópica ha alterado estos ciclos incrementado la cantidad de nutrientes y contaminantes que terminan en los cuerpos de agua, provocando problemas de eutrofización y disrupción de ecosistemas naturales y daños a la salud humana (Camargo y Alonso 2007, Scholes *et al.* 2007).

El objetivo de este estudio es analizar la calidad del agua del río Seco y evaluar el uso de un enfoque de cuenca usando un sistema de información geográ-

fica (SIG) para localizar las fuentes puntuales y no puntuales de contaminación, estimando las cargas orgánicas y de nitrógeno de los asentamientos urbanos.

## METODOLOGÍA

### Delimitación del área de estudio y determinación de puntos de muestreo

La zona de estudio es la subcuenca del río Seco, la cual se encuentra ubicada en la parte central del estado de Veracruz en la República Mexicana. La subcuenca es parte de la Región Hidrológica X Golfo Centro y de la cuenca del río Jamapa la cual descarga en el Golfo de México (Cotler *et al.* 2007a, CONAGUA 2007). La subcuenca del río Seco nace de las aguas provenientes del Pico de Orizaba, el volcán más alto de México, en el municipio de Coscomatepec (carta topográfica E14B46 INEGI). Este trabajo retoma la delimitación por microcuencas realizada por el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO-UAQ 2005) identificando cuatro microcuencas cuyos afluentes alimentan el río Seco. Se realizaron pequeños ajustes de los límites utilizando un mapa topográfico con curvas de nivel cada 20 m. Se entiende por microcuenca hidrográfica el área natural donde el agua es captada, desalojada o depositada en un almacenamiento natural, por un sistema de drenaje, definido por líneas divisorias, topográficamente llamadas parteaguas (FIRCO 2004).

En este estudio se monitoreó el río Seco durante los meses de la temporada de lluvias, de mayo a octubre, del año 2009. Se seleccionaron 10 puntos de muestreo (Fig. 1), siendo *Sabana Larga* el punto de muestreo más cercano al nacimiento del río, cerca de

los límites del municipio de Tomatlán. Río abajo, a aproximadamente 7.3 km se ubicó el segundo punto de muestreo, *San Rafael Calería*, el siguiente punto de muestreo es *Los Mangos* a 3.3 km río abajo del anterior sitio. La estación llamada *San Antonio* se encuentra ubicada donde confluye el río urbano, con el mismo nombre, el cual se encuentra fuertemente contaminado por descargas de la ciudad de Córdoba. Se tomaron muestras del río Seco antes del aporte del río San Antonio nombrando este punto *Millán*. Estos dos puntos en el mapa aparentan estar sobrepuestos por estar muy cerca. Río abajo, a 3.6 km, se estableció el punto llamado *Calvera*. El siguiente punto es *La Concha* el cual se encuentra en una zona rural con poca población. Posteriormente el río Seco pasa al lado del centro urbano por lo que se decidió ubicar ahí el punto de muestreo *Yanga*. El siguiente punto de muestreo es el llamado *Magueyes*, antes de la cabecera de Cuitláhuac. El último punto de muestreo es *Puente Chico que se encuentra ubicado después de Cuitláhuac y es el más cercano a la unión del río Seco con el río Atoyac.*

#### Datos de campo y análisis realizados

Las muestras se tomaron a nivel superficial, utilizando envases de polipropileno y transportándose a 4° C en una hielera hasta su posterior análisis en el laboratorio. Se analizaron los parámetros de campo: oxígeno, pH, temperatura y conductividad, utilizando un equipo multiparámetro (HatchHQd 40). Se utilizaron los datos de la estación meteorológica automática de Córdoba para determinar la precipitación en la zona (SMN-CNA 2009).

Siguiendo técnicas estandarizadas se cuantificó la demanda química de oxígeno (DQO) a través del desarrollo de color por un proceso de oxidación de la muestra y su posterior observación en un espectrofotómetro (APHA 1995). La calidad del agua superficial se clasifica según el valor de la DQO. El agua con valores menores o iguales a 10 se considera excelente, con valores entre 10 y 20 de buena calidad, con valores entre 20 y 40 aceptable, se considera contaminada en el rango de 40 o igual o menor a 200 y fuertemente contaminada cuando los valores de DQO son mayores a 200 (CONAGUA 2011). Se cuantificó el nitrógeno total (NT), el cual se calculó a través de la suma de nitrógeno Kjeldahl (NTK) (APHA 1995) más la cantidad de nitrógeno contenido en nitratos y nitritos, los cuales fueron cuantificados a través de cromatografía iónica utilizando el equipo DIONEX ICS-90. La calidad microbiológica se determinó midiendo coliformes fecales (CF) por el método de filtración a través de membrana en medios selectivos

(APHA 1995). Todas las muestras se analizaron por triplicado reportándose el valor promedio.

Para identificar si existían diferencias significativas entre puntos o mes de muestreo se realizó un análisis de varianza de una vía utilizando la prueba de Tukey con un límite de confianza de 95 % y una significancia de  $\alpha = 0.05$ , utilizando el programa SPSS (Statistical Product and Service Solutions).

#### Estimación de carga orgánica y nitrógeno de fuentes urbanas por microcuenca

Se calculó la población por microcuenca determinando geográficamente las localidades rurales y urbanas que son parte de las microcuencas y utilizando la información de los censos 2000 y 2010 correspondientes a esas localidades. Se determinó que los asentamientos humanos son fuente tanto de contaminación puntual como dispersa. Se consideró que los asentamientos urbanos (con más de 2500 habitantes) producen contaminación puntual debido a la canalización de sus descargas a través de drenajes, mientras que la población rural en esta zona no tiene servicio de drenaje conectado a una red por lo que se considera generan contaminación dispersa (**Cuadro I, Fig. 2**). Se utilizaron los datos de población urbana para estimar el volumen de aguas residuales producidas y que se canalizan a través de drenajes convirtiéndose en contaminación puntual. La estimación de carga orgánica y nitrógeno se hizo solamente para las localidades urbanas. Para hacer la estimación de la carga orgánica se revisó en la literatura que los datos promedio reportados para DQO y nitrógeno total (NT) fueron de 500 mg/L y 40 mg/L respectivamente (Metcalf y Eddy 1991). En este trabajo se decidió utilizar los valores de DQO y NT que se midieron en las aguas residuales urbanas de la ciudad de Córdoba en 2010 donde la DQO total promedio fue de 583 mg/L (máximo 945, mínimo 128), y el contenido de nitrógeno total medido como NTK fue de 44 mg/L (Tejeda 2010).

Se ha estimado que un habitante urbano produce entre 200-250 L/día de aguas residuales (Metcalf y Eddy 1991). Para el caso de México se ha estimado que la producción per cápita promedio de aguas residuales está entre 292 y 234 L/día (de Anda y Shear 2008). Para los cálculos de producción de aguas residuales por microcuenca se tomó el valor de 200 L/día ya que en promedio el agua que al final es colectada en sistemas municipales en México se ha reportado entre 200 y 205 L/día (de Anda y Shear 2008).

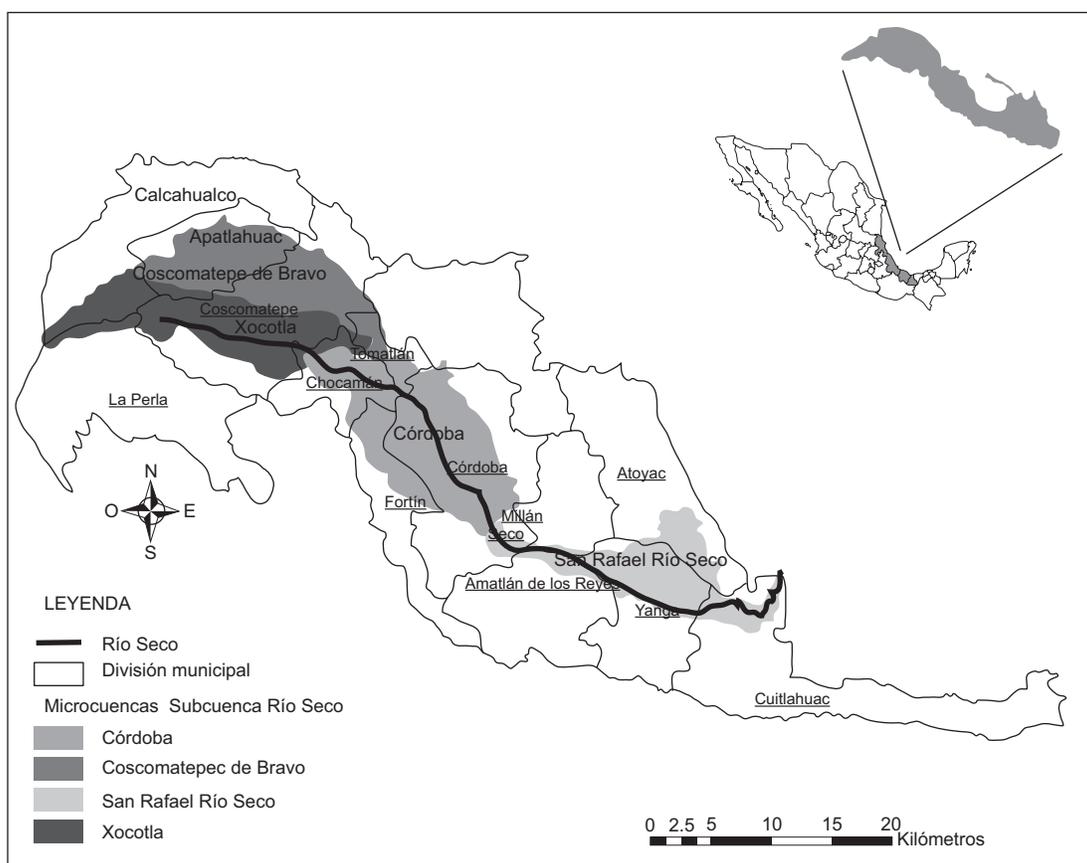
#### Integración de la información en un sistema de información geográfica

Se integró toda la información en un sistema

**CUADRO I. INFORMACIÓN POBLACIONAL POR MICROCUENCAS DE LA ZONA DE ESTUDIO (ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE INEGI 2000 Y 2010)**

Microcuencas	Municipios asociados	Área (ha)	Población urbana		Población rural		Población total		Densidad poblacional (habitante/km <sup>2</sup> )	
			2000	2010	2000	2010	2000	2010	2000	2010
Xocotla	Calcahualco, La Perla, Coscomatepec, Chocamán	10.547	12.540	16.121	7.316	9.394	19.856	25.515	188	242
Coscomatepec	Alpatláhuac, Coscomatepec	10.313	13.684	16.433	10.872	15.376	24.556	31.809	238	308
Cordoba*	Chocamán, Fortín, Tomatlán, Córdoba	13.800	86.324	91.444	21.299	27.886	107.623	119.330	780	865
San Rafael Río Seco	Córdoba, Amatlán, Yanga, Atoyac, Cuitláhuac	9.156	17.256	19.249	7.739	8.352	24.995	27.601	273	301
<b>Total</b>		<b>43.816</b>	<b>129.804</b>	<b>143.247</b>	<b>47.226</b>	<b>61.008</b>	<b>177.030</b>	<b>204.255</b>	<b>365</b>	<b>432</b>

\*La población total de la cabecera Municipal de Córdoba según el censo, 2000 y 2010 es 133,807 y 140,896 habitantes respectivamente, sin embargo, para este estudio se contabiliza sólo la mitad de la población porque la mancha urbana de la ciudad está dividida por el parteaguas de la microcuenca de Córdoba



**Fig. 2.** Microcuencas de la subcuenca del río Seco y delimitaciones municipales

de información geográfica (SIG) utilizando el programa ArcMap10. Se utilizó la división por microcuencas hidrográficas propuesta por el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO-UAQ 2005) a una escala de 1:20 000. Se utilizó la delimitación

municipal generada por INEGI, ubicándose las localidades urbanas y rurales a partir de la información censal (INEGI 2010). Los puntos de muestreo seleccionados se geoposicionaron y se integraron a este sistema.

## RESULTADOS

La longitud aproximada del río Seco desde su nacimiento hasta su entronque con el río Atoyac es de 70 kilómetros, y la longitud que abarca este estudio desde el primero al último punto de muestreo es de 47 kilómetros. En la **figura 1** se observa el perfil longitudinal del río seco con la ubicación de los puntos de muestreo. Se da un abrupto descenso en la altitud desde el inicio del río, cerca de la comunidad de Tetezingo hasta el primer punto de muestreo *Sabana Larga*, es decir en 22.6 km hay una diferencia de 3500 m de altitud. Posteriormente es más suave el descenso en altitud habiendo una diferencia de 1250 m entre el primer y el último punto de muestreo.

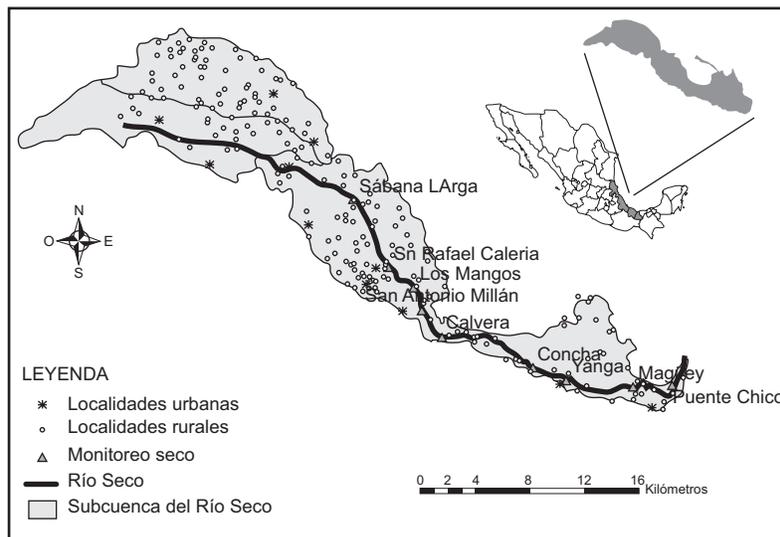
La precipitación total en el área de estudio durante la temporada de lluvias fue de 1426 mm, ocho veces mayor que en la temporada de secas donde llovió un total de 171 mm. En mayo, el primer mes de la temporada de lluvias, la precipitación fue de 135 mm, mientras que en junio aumentó a 312 mm. En los dos meses siguientes las precipitaciones decrecieron a 239 mm en julio y en agosto a 92 mm. Septiembre fue el mes más lluvioso de la época con 460 mm, mientras que octubre, el último mes de la temporada de lluvias registró una precipitación mensual de 188 mm (SMN-CNA 2009).

El área comprendida por la subcuenca del río Seco es de 43 816 ha. La vinculación de las divisiones hidrográficas a nivel microcuenca con los límites políticos administrativos se puede observar en la **figura 2**. Doce municipios tienen parte de su territorio en

la subcuenca del río Seco. Estos son: La Perla, Calcahualco, Alpatlahuac, Coscomatepec, Chocamán, Tomatlán, Fortín, Córdoba, Amatlán de los Reyes, Yanga, Atoyac y Cuitláhuac. Las microcuencas que forman parte de la subcuenca del río Seco son cuatro: Xocotla, Coscomatepec, Córdoba y San Rafael Río Seco. La ubicación y dispersión de las localidades urbanas y rurales dentro de las microcuencas así como los puntos de muestreo se pueden observar en la **figura 3**.

Según el Censo de 2000 la población total de las cuatro microcuencas era de 177 030 habitantes con un porcentaje de población urbana del 73 % y de población rural del 27 %. Una década después, en 2010, la población se incrementó en un 15% con una población total de 204 255 habitantes siendo el 70 % población urbana y el 30 % rural. La densidad poblacional de toda la subcuenca del río Seco pasó de 365 a 432 habitantes/km<sup>2</sup> de 2000 a 2010. La microcuenca más poblada fue la de Córdoba, concentrando el 64% de la población urbana y el 46 % de la población rural de la subcuenca del río Seco. La información sobre el área y población de cada una de las microcuencas para los años 2000 y 2010 se muestra en el **cuadro I**.

La producción de aguas residuales de localidades con más de 2500 habitantes en la subcuenca del río Seco para el año 2000 se estimó en 25 960 m<sup>3</sup> por día, y para 2010 en 28 649 m<sup>3</sup> por día, esto es un incremento del 10.4 % en una década (**Cuadro II**). La microcuenca que más aguas residuales produjo fue Córdoba. La generación de DQO para el año 2010 por los habitantes urbanos en la subcuenca del río



**Fig. 3.** Localidades urbanas y rurales en las subcuenca del río Seco y puntos de muestreo

**CUADRO II.** ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE AGUAS RESIDUALES POR MICROCUENCA DE LAS POBLACIONES URBANAS, CARGA ORGÁNICA EXPRESADA COMO DQO Y NITRÓGENO TOTAL PARA LOS AÑOS 2000 Y 2010

Microcuencas	Aguas residuales producidas (m <sup>3</sup> /día)		DQO total (kg/día)		Nitrógeno NTK (g/día)	
	2000	2010	2000	2010	2000	2010
Xocotla	2 508	3 224	1 462	1 880	110	142
Coscomatepec	2 737	3 287	1 596	1 916	120	145
Córdoba	17 265	18 289	10 065	10 662	760	805
San Rafael Río Seco	3 451	3 850	2 012	2 244	152	169
Total	25 961	28 649	15 135	16 703	1 142	1 261

Seco fue de 16 703 kg por día, mientras el nitrógeno estimado fue de 1261 g/día (**Cuadro II**).

Los datos de campo recabados muestran que la temperatura del agua de este río tropical fue en promedio 24.6° C, registrándose el valor más alto en mayo (31.7 °C) y la temperatura más baja en septiembre 19.3 °C. La estación *San Antonio* mostró en promedio los valores más bajos de oxígeno disuelto y valores más altos en conductividad. Los datos promedio por estación de muestreo de temperatura, conductividad, oxígeno disuelto y pH se muestran en el **cuadro III**.

El río tuvo presencia de coliformes fecales en todas las estaciones de monitoreo. Los órdenes de magnitud variaron de 10<sup>3</sup> a 10<sup>9</sup>, es decir fuertemente contaminado por materia fecal. Se determinaron valores altos de nitrógeno que variaron entre 1.8 y 9.8 mg/L. El punto de muestreo *San Antonio* presentó valores de DQO siempre por arriba de los 200 mg/L, llegando a alcanzar valores superiores a los 500 mg/L. Cuatro kilómetros aguas abajo, en la estación *Calvera*, no mejora la calidad del agua encontrándose valores incluso más altos que en *San Antonio*, lo que indica que en este trayecto el río es continuamente contaminado por

fuentes puntuales y no puntuales. Río abajo la estación de la *Concha* tiene poca influencia de localidades rurales y urbanas bajando levemente la DQO. La estación de *Yanga* tiene influencia de la localidad del mismo nombre y posteriormente se encuentra la estación *Magueyes* que tiene poca influencia de asentamientos humanos rurales y urbanos, sin embargo no se ve una mejoría significativa en la calidad del agua. El último punto de muestreo, *Puente Chico*, tiene influencia de la localidad de Cuitláhuac. Este es el último punto antes de alimentar al río Atoyac y en todos los meses se detectó presencia de contaminación fecal, materia orgánica y nitrógeno total.

## DISCUSIÓN

La subcuenca del río Seco, ubicada en el centro del estado de Veracruz en México, comprende un área de 43 816 ha donde viven aproximadamente 204 255 personas (cálculos propios a partir de INEGI 2010). La identificación de los 12 municipios que integran la subcuenca del río Seco así como la ubicación de las localidades rurales y urbanas (**Cuadro I**), da un

**CUADRO III.** DATOS DE CAMPO PROMEDIO DE LAS ESTACIONES DE MUESTREO (MAYO-OCTUBRE), LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR SE MUESTRA ENTRE PARÉNTESIS

	Oxígeno disuelto mg/L	pH	Conductividad (µ Siemens/cm)	Temperatura °C
Sabana Larga	7.7 (0.3)	8.2 (0.2)	226 (33)	21.9 (2.2)
San Rafael Caleria	7.1 (0.5)	8.3 (0.3)	254 (66)	23.6 (2.2)
Los Mangos	7.5 (0.1)	8.3 (0.4)	220 (32)	23.1 (1.5)
Millán	7.3 (0.3)	8.3 (0.2)	253 (79)	25.5 (2.6)
San Antonio	5.0 (2.1)	7.9 (0.2)	354 (104)	25.2 (1.8)
Calvera	7.4 (0.3)	8.1 (0.2)	271 (73)	25.6 (3.2)
La Concha	7.3 (0.5)	8.3 (0.2)	248 (53)	25.6 (2.0)
Yanga	7.6 (0.4)	8.2 (0.2)	244 (43)	25.2 (1.8)
Maguay	8.1 (0.6)	8.0 (0.)	247 (36)	24.8 (1.2)
Cuitláhuac	7.5 (0.5)	8.2 (0.3)	262 (37)	25.6 (1.7)

panorama general de la distribución de la población en el territorio. Esta información es importante para la planeación de acciones de restauración, control de la contaminación y pago de servicios ambientales que servirían para un programa integral para la recuperación de la subcuenca.

La población de la subcuenca del río Seco se incrementó en un 15.4 % en la última década y aunque la población rural aumentó más que la población urbana (29 y 10 % respectivamente) muchos de los nuevos crecimientos a pesar de ser considerados como rurales por su tamaño, son asentamientos periurbanos, generalmente sin dotación de servicios públicos, en especial alrededor de la ciudad de Córdoba que es la localidad urbana más densamente poblada de toda el área de estudio.

La subcuenca del río Seco es contaminada por fuentes puntuales como son las descargas de los principales centros urbanos identificados en el área de estudio (Chocamán, Coscomatepec, Tomatlán, Córdoba, Yanga y Cuitláhuac). La zona metropolitana de Córdoba concentra el 50% de toda la población urbana de la subcuenca. Existen en la zona metropolitana algunas plantas de tratamiento de aguas residuales, tratándose un promedio de 17 litros por habitante por día (Vera *et al.* en prensa), es decir aproximadamente sólo el 8.5% de la producción diaria es sometida a algún tipo de tratamiento.

La parte alta de la subcuenca del río Seco es la menos habitada, con condiciones más conservadas y menor influencia antrópica. Las dos microcuencas (Coscomatepec y Xocotla) que la componen tienen sólo el 28 % de la población total de la subcuenca del 23 % de la población urbana (INEGI 2010). Inicialmente este estudio no iba a incluir estas dos microcuencas pues se esperaba encontrar una buena calidad en la parte alta, ya que los primeros aportes sustanciales de contaminación se tenían localizados en el río San Antonio con las aguas residuales de la Ciudad de Córdoba. Sin embargo, al analizar los resultados y ver que existía una mala calidad en los primeros puntos de muestreo se decidió incluir la información poblacional relacionada con la parte alta de la subcuenca del río Seco (**Cuadro I**).

Como se mencionó, se esperaba encontrar buena calidad del agua en los primeros tres puntos de muestreo, sin embargo fueron catalogados como contaminados y fuertemente contaminados según la escala de DQO (CONAGUA 2011). Estos tres puntos presentaron valores de coliformes fecales entre  $10^3$  y  $10^4$  órdenes de magnitud, es decir fuertemente contaminados con materia fecal. Asimismo, los elevados valores de nitrógeno total variaron de 2.9 a 9.8

mg/L (**Cuadro IV**). Los también elevados valores de contaminantes microbiológicos, materia orgánica y nitrógeno indican que a pesar de su baja densidad poblacional, las microcuencas de Coscomatepec (242 habitantes/km<sup>2</sup>) y Xocotla (308 habitantes/km<sup>2</sup>), tienen una fuerte influencia en la calidad del río.

En las cuatro microcuencas estudiadas la población rural varió del 19 al 66 % del total de la población. Existe una gran cantidad de comunidades rurales sin servicios de drenaje y disposición a cielo abierto de sus desechos sólidos. En toda la zona de estudio no existe ningún relleno sanitario así que la disposición de residuos tanto en zonas rurales como urbanas se hace a cielo abierto o se quema (Vera *et al.* en prensa). Tanto los desechos sólidos como los líquidos son una fuente no puntual de contaminación que puede ser una de las causas de la deteriorada calidad del agua en los primeros puntos de muestreo. Las fuentes no puntuales de contaminación por su temporalidad y dispersión son muy difíciles de detectar y evaluar.

En el punto de afluencia del río San Antonio se observó una diferencia significativa con el resto de los puntos en relación con los parámetros de oxígeno disuelto y conductividad (**Cuadro II**), sin embargo no existieron diferencias significativas en relación con los parámetros de DQO, NT y CF (**Cuadro IV**). También se esperaba ver la influencia de los centros urbanos de Yanga y Cuitláhuac, sin embargo, con base en la escala de DQO todos los puntos de muestreo del río Seco fueron clasificados como contaminados o fuertemente contaminados. El 33 % de todas las muestras analizadas presentó valores de DQO entre 40 y 200 mg/L mientras el 67% restante presentó valores de DQO superiores a los 200 mg/L (CONAGUA 2011). En varios puntos de muestreo se encontraron valores alrededor de los 500 mg/L de DQO, es decir comparables a los encontrados en aguas residuales crudas (Metcalf y Eddy 1991).

Los valores de nitrógeno total variaron según los meses y las estaciones de muestreo sin encontrarse un patrón definido, donde el valor más alto fue 9.8 mg/L en el mes de junio en la estación *San Rafael Calería* y el menor 1.7 mg/L en el mes de septiembre en la estación de *Puente Chico* (**Cuadro IV**). Las concentraciones de nitrógeno son bastante altas considerando que el muestreo se realizó en el lecho del río. El rango permisible de nitrógeno total en las descargas de aguas residuales a ríos para la protección de la vida acuática es de 15 a 25 mg/L de NT según la NOM-001-ECOL-1996 (SEMARNAT 1996). Esta norma no especifica el límite permisible de NT para el agua del río después que la descarga se ha diluido. Dodds *et al.* (1998) realizaron una clasificación

trófica de ríos templados, y determinaron que un río con concentraciones mayores a 1.5 mg/L de NT se considera como eutrófico. El río Seco en todas las estaciones estuvo por encima de este límite por lo que se podría considerar eutrófico. Si tomamos en cuenta que este río sirve como fuente de agua potable se tendrían que tomar en cuenta los parámetros que marca la NOM-127-SSA1-1994 que señala los límites permisibles del nitrógeno proveniente del nitrito (0.05 mg/L), nitrato (10 mg/L) y amonio (0.5 mg/L).

La lluvia es un factor muy significativo que puede explicar la variación en las concentraciones de contaminantes en los ríos debido a su efecto en el arrastre, dispersión y dilución de contaminantes. En mayo y junio, los primeros meses de lluvias, se puede apreciar que las concentraciones de DQO y NT fueron más altas que en los siguientes meses (**Cuadro IV**). Esto podría estar relacionado con el arrastre, por las primeras lluvias, de nutrientes y contaminantes que se acumularon durante la temporada de secas, sin embargo las diferencias no fueron estadísticamente significativas. Existieron fuertes diferencias en la cantidad de lluvia distribuida en los diferentes meses, el mes con menor precipitación fue agosto con 92 mm, mientras septiembre fue el más lluvioso de la época con 460 mm (SMN-CNA 2009). Sin embargo no fue posible apreciar el factor de dilución en la concentración de los contaminantes (CF, DQO y NT) a pesar de las diferencias en la precipitación en los diversos meses (**Cuadro IV**). Existen muchos factores que se encuentran relacionados con la concentración de nutrientes o contaminantes de un río. Es necesario tomar en cuenta las lluvias puntuales torrenciales, la saturación del suelo e identificar las fuentes de contaminación no puntual para tratar identificar los posibles aportes.

Existen fuentes no puntuales de contaminación que no se incluyeron en este trabajo, por ejemplo los campos de cultivo agrícola y las pequeñas agroindustrias. Las dos microcuencas de la parte alta, Coscomatepec y Xocotla, tienen cultivos de caña, existen actividades de pequeñas y medianas agroindustrias, granjas para la cría de pollos y cerdos, así como trapiches y beneficios de café artesanales. En la microcuenca de Córdoba se cultiva café, caña de azúcar y existe una fuerte actividad industrial y agroindustrial. En la microcuenca San Rafael río Seco existen algunas actividades agroindustriales y los principales cultivos con importancia económica son la caña de azúcar y el limón.

El estado de Veracruz es, desde hace más de una década, el que mayor producción de caña de azúcar registra en el país, uno de cada siete veracruzanos

**CUADRO IV.** CONCENTRACIONES DE LA CARGA ORGÁNICA EXPRESADA COMO DQO, NITRÓGENO TOTAL (NT) Y COLIFORMES FECALES (CF) MEDIDOS EN EL RÍO SECO DE MAYO A OCTUBRE DE 2009

	Mayo			Junio			Julio			Agosto			Septiembre			Octubre		
	DQO total (mg/L)	NT (mg/L)	CT (UFC/mL)	DQO total (mg/L)	NT (mg/L)	CT (UFC/mL)	DQO total (mg/L)	NT (mg/L)	CT (UFC/mL)	DQO total (mg/L)	NT (mg/L)	CT (UFC/mL)	DQO total (mg/L)	NT (mg/L)	CT (UFC/mL)	DQO total (mg/L)	NT (mg/L)	CT (UFC/mL)
Sabana Larga	1186*	7.2	6.4E+04	586*	8.5	2.4E+03	267*	4.8	3.3E+04	278*	5.2	2.2E+04	174	4.8	8.2E+02	183	2.9	2.0E+04
San Rafael	1776*	7.7	7.4E+04	782*	9.8	3.5E+04	431*	3.5	3.3E+04	370*	3.6	2.4E+04	174	3.8	6.4E+02	338*	5.3	2.0E+04
Caleria	60	5.1	2.6E+05	690*	7.9	3.5E+04	175	3.2	3.5E+04	351*	2.6	9.2E+04	48	3.5	7.0E+03	334*	3.5	3.0E+03
Los Mangos	103	4.3	5.8E+09	88	4.0	7.2E+07	113	3.0	8.7E+08	113	3.1	7.8E+09	339*	2.2	8.7E+06	424*	6.7	3.4E+08
Millán	288*	7.6	2.7E+04	249*	8.6	2.7E+04	231*	6.5	7.6E+04	231*	9.2	3.2E+04	293*	3.6	6.2E+03	599*	4.3	4.5E+04
San Antonio	302*	7.5	2.7E+06	264*	9.4	9.0E+03	159	5.3	6.4E+04	486*	2.6	2.4E+05	114	6.2	4.5E+03	390*	3.5	3.3E+05
Calvera	145	7.8	8.7E+04	91	7.2	1.2E+04	83	3.2	4.5E+04	83	2.4	1.2E+06	263*	2.6	8.2E+03	353*	2.6	7.8E+04
La Concha	168	7.2	6.2E+04	157	3.8	2.8E+03	119	3.2	7.6E+03	119	3.2	3.4E+04	228*	4.0	7.4E+02	451*	1.8	4.6E+04
Yanga	234*	7.5	2.8E+04	220*	5.6	2.0E+03	211*	2.3	4.5E+04	211*	2.7	6.7E+04	273*	2.2	7.3E+02	414*	3.0	3.2E+04
Maguayes	331*	8.1	6.7E+04	312*	7.7	4.4E+03	201*	2.6	6.7E+04	201*	4.1	7.9E+04	495*	1.7	6.6E+03	501*	2.6	1.3E+04

depende directa o indirectamente de su cultivo o transformación (Aguilar *et al.* 2009). En el cultivo de la caña de azúcar se usan grandes cantidades de fertilizantes y plaguicidas que pueden llegar a los cuerpos de agua. Las precipitaciones arrastran importantes cantidades de sedimentos y agroquímicos de los campos de caña de azúcar, que es el cultivo más común en la zona de estudio. Un estudio en el ingenio La Gloria, en Veracruz, identificó que de los 200 kg de nitrógeno por hectárea que se aplican, se pierde el 43 % (Landeros *et al.* 2002). Sin embargo, no se tienen identificadas por cuenca o microcuenca las hectáreas que son cultivadas con caña de azúcar.

El río Seco y sus tributarios son, según el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), utilizados en al menos 33 puntos como fuente de agua para diversos usos (consumo humano, agrícola o industrial) y en al menos 18 puntos son receptores de aguas residuales tratadas o sin tratamiento, de origen municipal, industrial o agrícola (CONAGUA 2009). El río Seco se utiliza al menos en dos puntos, *Sabana Larga* y *San Rafael Calería*, como lugar de captación de agua para consumo humano para la ciudad de Córdoba. También durante la época de estiaje es común el llenado de pipas de agua en varios puntos del río para suministrar este líquido a la población. Sin embargo, lo que podemos ver es que los parámetros de contaminación son muy altos para que este río sea utilizado como fuente de agua para consumo humano y que se requeriría de un estricto tratamiento con los costos asociados que esto implicara. Además, la elevada carga orgánica y la concentración de nitrógeno disminuyen los servicios ecosistémicos que presta este río, así como la sobrevivencia y la salud de las plantas y los animales relacionados con el ambiente ribereño.

## CONCLUSIONES

La subcuenca del río Seco alberga a más de 200 000 personas de las cuales el 70% vive en ambientes urbanos y el 30% restante en rurales. El río Seco es utilizado para usos agrícolas, industriales y para provisión de agua potable, además de ser sustento del ambiente natural brindando humedad a su paso. Sin embargo este río se encuentra fuertemente contaminado por materia orgánica, nitrógeno y materia fecal, lo que limita sus usos y deteriora el ambiente.

La determinación de la calidad de agua del río Seco cobra mayor trascendencia al vincularse con el territorio delimitado por la subcuenca y sus microcuencas. La clasificación de los asentamientos humanos como fuentes puntuales (urbanos) y no

puntuales (rurales) es de utilidad para hacer una estimación del impacto de esos asentamientos. Es evidente que en la subcuenca del río Seco, debido al bajo porcentaje de tratamiento de las aguas residuales, los asentamientos urbanos se convierten en fuentes puntuales de contaminación. Sin embargo, los asentamientos rurales dispersos también tienen un fuerte efecto ya que el agua del río proveniente de la parte alta de la cuenca, donde habita menos población urbana, presentó igualmente niveles elevados de contaminación.

Es necesario hacer un análisis más detallado del uso del territorio a nivel de microcuenca para poder incluir todas las fuentes de contaminación así como para estimar su dimensión y temporalidad. Es necesario incluir las diversas actividades humanas y definir si son puntuales o no puntuales, con el fin de tener más elementos para un diagnóstico de mayor precisión. En el caso del río Seco dentro de estas actividades hay que incluir las agrícolas, en especial si existen cultivos como la caña de azúcar, que utiliza grandes cargas de agroquímicos.

Para poder identificar de manera precisa el origen de la contaminación sería deseable poder hacer análisis de calidad de agua más completos que incluyan, además de los reportados en esta investigación, la identificación de metales pesados y plaguicidas para tener una idea más clara de la influencia de la zona industrial, la agrícola y la de los asentamientos humanos.

Es de especial trascendencia que los gobiernos municipales tomen en cuenta las delimitaciones de cuenca para la gestión de los recursos hídricos, así como para la detección y cuantificación de las diversas fuentes de contaminación con el fin de dirigir estrategias en relación con la prevención, el saneamiento o la restauración de las aguas superficiales. La integración de información ambiental, poblacional y socioeconómica a través de sistemas de información geográfica utilizando a las cuencas como el marco de delimitación es una herramienta útil para el diagnóstico, la planeación y el seguimiento de programas para el desarrollo sustentable de las poblaciones urbanas y rurales, así como de sus actividades productivas teniendo como eje los recursos hídricos.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al “Programa para el Fomento, Desarrollo y Consolidación de Científicos y Tecnólogos” del CONACyT (MOD-ORD-1-09-PCI-1054-03-09) por el apoyo para la realización de esta investigación.

## REFERENCIAS

- Aguilar R. N., Galindo G. M., Fortanelli J.M. y Contreras C.S. (2009). Porque diversificar la agroindustria en Mexico?. GCG-Georgetown University, Universia 3, 62-75.
- APHA (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 19a ed. American Public Health Association. Washington, EUA. 1325 pp.
- 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* 16, 98-110.
- CONAGUA (1992). Ley de Aguas Nacionales. Comisión Nacional del Agua. Diario Oficial de la Federación. 01 de diciembre de 1992. México.
- CONAGUA (2003). Programa Hidráulico Regional 2002-2006. Gerencia Regional X Golfo Centro. Comisión Nacional del Agua. Reporte. México, D.F. 102 pp.
- CONAGUA (2009). Registro Público de Derechos de Agua. Comisión Nacional del Agua, México [en línea]: <http://www.conagua.gob.mx/REPDA/ConsultaRepda.aspx?Id=Consulta+a+la+base+de+datos+del+REPDA%7cRegistro+P%u00fablico+de+Derechos+de+Agua+%28REPDA%29%7c0%7c104%7c0%7c0%7c0>. 10/01/2010.
- CONAGUA (2011). Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del Agua. Reporte. México, D.F. 181 pp.
- Cotler H., Garrido A., Mondragón R. y Díaz A. (2007a). Delimitación de las cuencas hidrográficas de México a escala 1: 250 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Instituto Nacional de Ecología y Comisión Nacional del Agua. Documento técnico. México D.F. 35 pp.
- Cotler H. (2007b). *El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F., México. 264 pp.
- Cotler H. y Caire G. (2009). *Lecciones aprendidas del manejo de cuencas en México*. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F., México. 380 pp.
- Cotler H., Garrido A., Bunge V. y Cuevas M.L. (2010). Las cuencas hidrográficas de México: Priorización y toma de decisiones. En: *Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización* (H. Cotler, Ed.). Instituto Nacional de Ecología-Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. México D.F., México. pp. 210-215.
- CSVA (2004). Proyecto de Programa Hidráulico del Estado de Veracruz. Consejo del Sistema Veracruzano del Agua. Resumen Ejecutivo. Veracruz. 40 pp.
- de Anda J. y Shear H. (2008). Challenges facing municipal wastewater treatment in Mexico. *Public Works Management & Policy* 12, 590-598.
- Dodds W.K., Jones J.R. y Welch E.B. (1998). Suggested classification of stream trophic state: Distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen, and phosphorus. *Water Res.* 32, 1455-1462.
- Domínguez J. (2008). Cobertura del servicio público de agua en el estado de Veracruz. Colegio de México. Reporte, México D.F., 186 pp.
- FIRCO (2004). Manual de Procedimientos Operativos. Fideicomiso de Riesgo Compartido, Programa Nacional de Microcuencas, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Manual. México D.F., 35 pp.
- FIRCO-UAQ (2005). Delimitación Nacional de Microcuencas. Cartografía 1:20 000. Fideicomiso de Riesgo Compartido-Universidad Autónoma de Querétaro. Cartografía en shapefile, México D.F.
- INEGI (2000). Censo de Población y Vivienda 2000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía [en línea]: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/ccpv/cpv2000/default.aspx> 15/12/2009
- INEGI (2010). XII Censo General de Población y Vivienda 2010. Resultados Preliminares. Instituto Nacional de Estadística y Geografía [en línea]: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/principales2010.aspx> 20/04/2010
- Landeros S.C., Hernández R.S.L., López V.M.C. y Ortega L.A. (2002). Pérdidas de nitrógeno (N-NO<sub>3</sub>) proveniente de fertilizantes en los ingenios La Gloria y El Modelo del estado de Veracruz. [en línea]: <http://www.cepis.org.pe/esww/proyectos/repidise%20publica/repinex/rep046.html> 01/02/2010
- Maass J.M. y Cotler H. (2007). Protocolo para el manejo de ecosistemas en cuencas hidrográficas. En: *El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental* (H. Cotler, Ed.). Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F., México, pp. 41-58.
- Metcalf y Eddy (1991). *Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización*. 3ª ed. McGraw-Hill. Madrid, España. 480 pp.
- Paré L., González M.A. y Robinson D. (2008). *Gestión de cuencas y servicios ambientales hidrológicos: perspectivas ciudadanas y comunitarias*. INE, Itaca, Raíces, SENDAS, WWF, Gaia. México D.F., México. 303 pp.

- SEMARNAT (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en agua y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 1 de junio de 1997. México.
- Scholes M.C., de Villiers S., Scholes R.J. y Feig G (2007). Integrated approach to nutrient cycling monitoring. *S. Afr. J. Sci.* 103, 323-328.
- SMN-CONAGUA (2009). Datos crudos cada diez minutos del año 2009 de la Estación Meteorológica Automática (Córdoba). Subgerencia de Redes de Observación, Sistema Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua. México. Tabla Excel.
- Tejeda R.S. (2010). Evaluación de la eficiencia de operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la ciudad de Córdoba, Veracruz y su impacto en el medio receptor. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana. Orizaba, Veracruz, México. 87 pp.
- Vera C.J. (2005). *Stakeholder participation in Mexican water policy*. Environmental Sociology Series, Wageningen University. Wageningen, Holanda. 150 pp.
- Vera C.J., Torres B.B., Acevedo T.R. y Vázquez G.U. (En prensa). *Desarrollo de las Metrópolis Veracruzanas 2000-2010*. Biblioteca Digital de Humanidades, Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz, México. 820 pp.