

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y DE LA RIBERA EN DOS CUENCAS TRIBUTARIAS DEL RÍO TUXCACUESCO, JALISCO, MÉXICO

Water and riverbank quality assessment in two tributary basins of the Tuxcacuesco river, Jalisco, Mexico

Omar HERNÁNDEZ VARGAS¹, Óscar Raúl MANCILLA VILLA^{1*}, Carlos PALOMERA GARCÍA¹, José Luis OLGUÍN LÓPEZ¹, Héctor FLORES MAGDALENO², Álvaro CAN CHULIM, Héctor Manuel ORTEGA ESCOBAR² y Edgar Iván SÁNCHEZ BERNAL³

¹ Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara, Avenida Independencia Nacional 151, 48900 Autlán, Jalisco, México

² Colegio de Postgraduados, Hidrociencias, km. 36.5 carretera México-Texcoco, 56230 Montecillo, Estado de México, México

³ Universidad Autónoma de Nayarit, Unidad Académica de Agricultura, Boulevard Tepic-Xalisco 325, Ciudad de la Cultura “Amado Nervo”, 63155 Tepic, Nayarit, México

*Autor para correspondencia: oscar.mancilla@academicos.udg.mx

(Recibido: abril 2019; aceptado: septiembre 2019)

Palabras clave: índices, contaminación, macroinvertebrados, nutrientes, nitrógeno

RESUMEN

Se ha documentado que en México 80% de los ecosistemas acuáticos, entre ellos cuerpos de agua como los ríos, se encuentran bajo algún grado de contaminación. Así se ha detectado que los principales contaminantes son materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fósforo) y microorganismos (coliformes fecales). Atender esta problemática es de vital importancia para la conservación de los ecosistemas acuáticos y para mejorar la calidad de vida los pobladores aledaños. En este sentido la información sobre el estado de calidad de los ecosistemas acuáticos en la cuenca del río Tuxcacuesco, Jalisco es muy escasa e inexistente para sus cuencas tributarias. Por ende, en el presente estudio el objetivo fue inferir la calidad de los ecosistemas acuáticos de dos cuencas tributarias (Tonaya y Apulco) del Río Tuxcacuesco, Jalisco, México mediante la utilización de dos índices. El primero un índice de integridad biótica basado en la presencia o ausencia de familias de macroinvertebrados acuáticos y el segundo un índice para valorar el estado ecológico y la calidad de las riberas fluviales, el índice de calidad de riberas (RQI, por sus siglas en inglés). Se realizaron dos muestreos en cuatro sitios, en el mes de octubre del año 2015 (final de la temporada lluviosa) y febrero del año 2016 (inicio de la temporada seca), en los cuales se recolectaron macroinvertebrados acuáticos y se aplicó el índice RQI. Además, se evaluaron parámetros físicos y químicos (pH, conductividad eléctrica y caudal) y se determinó el contenido de nitrógeno total en cada sitio. Mediante un análisis de correspondencia canónica, se evidenció que el caudal y la conductividad eléctrica son las variables ambientales que tienen mayor relación con el ordenamiento de las familias de macroinvertebrados encontradas. En general, el estado ecológico de las riberas es pobre en las dos cuencas tributarias y el contenido de nitrógeno en las aguas rebasa los límites permisibles para uso potable y riego agrícola. En cuanto a la aplicación del índice de integridad biótica se encontró que en la mayoría de los sitios existe presencia de contaminación orgánica.

Key words: indices, pollution, macroinvertebrates, nutrients, nitrogen

ABSTRACT

It has been documented that in Mexico 80% of aquatic ecosystems, including water bodies such as rivers, are under some degree of contamination. It has been detected that the main pollutants are organic matter, nutrients (nitrogen and phosphorous) and microorganisms (faecal coliforms). Addressing this problem is of vital importance for the conservation of aquatic ecosystems and for improving the quality of life of the inhabitants of the surroundings. In this sense the lack information on the quality status of aquatic ecosystems in the Tuxcacuesco river basin, in the state of Jalisco, is very scarce and non-existent for its tributary basins. Therefore, in the present study the objective was to infer the quality of the aquatic ecosystems of two tributary basins (Tonaya and Apulco) of the Tuxcacuesco river, in Jalisco, Mexico, by using two indices. The first an index of biotic integrity based on the presence or absence of families of aquatic macroinvertebrates, and the second an index to assess the ecological status and quality of riverbanks, the riverbank quality index (RQI). Two samplings were carried out at four sites, in the month of October 2015 (end of the rainy season) and February of the year 2016 (beginning of the dry season), in which aquatic macroinvertebrates were collected and the RQI index was applied. In addition, physical and chemical parameters (pH, electrical conductivity and flow rate) were evaluated and the total nitrogen content was determined in each site. By means of a canonical correspondence analysis, it was evidenced that the flow and the electrical conductivity are the environmental variables that have the greater relation with the order of the families of macroinvertebrates found. In general, the ecological status of the banks is poor in the two tributary basins, and the nitrogen content in the waters exceeds the permissible limits for potable use and agricultural irrigation. Regarding the application of the biotic integrity index, it was found that in most of the sites there is the presence of organic contamination.

INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento esencial para la vida, sin ella el ser humano no puede sobrevivir, toda población ha buscado establecerse cerca de una fuente de este recurso (lagos, ríos, lagunas, ciénagas). Estas fuentes son las que el ser humano utiliza para desarrollar sus funciones básicas (abastecimiento de agua potable, alimentación, recreación, economía), además, este recurso es útil para el funcionamiento de los ecosistemas del planeta y uno de los factores críticos para el desarrollo sustentable de las naciones (SEMARNAT 2008, Sierra 2011). Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA 2007), la superficie del planeta está cubierta por un 70 % de agua, de esta el 97.5 % corresponde a agua salada (océanos y mares) y el restante es agua dulce; de esta última, únicamente el 0.4% es agua superficial (ríos y lagos principalmente). Para el caso de México y particularmente en lo que respecta al estado de Jalisco, se ha propiciado el deterioro de estos recursos hídricos, situación que se refleja en la calidad del agua de diversos escurrimientos superficiales; lo anterior debido a la creciente industrialización, el desarrollo de los centros urbanos (aguas residuales sin tratamiento) y la intensificación

de actividades agropecuarias (Guzmán 1997, CONAGUA 2008, Sierra 2011).

El enfoque de cuenca en la investigación sobre el agua es importante porque aquella constituye el eje integrador del territorio que vincula e interconecta los elementos naturales, sociales y económicos, constituyendo unidades territoriales idóneas para la planeación y la gestión de los recursos naturales (Cotler et al. 2010); este enfoque integra los escurrimientos superficiales por arroyos, que según su posición dentro de la cuenca tienen regímenes hídricos determinados (Aguirre 2007). En este sentido, la dispersión de la contaminación va más allá de los límites administrativos (municipales), por lo que los estudios sobre la calidad de los ecosistemas acuáticos en una cuenca son un buen indicador del impacto de las actividades humanas en un determinado territorio (Torres et al. 2013).

En la cuenca del río Tuxcacuesco, los ecosistemas acuáticos se encuentran contaminados con aguas residuales y desechos industriales que ocasionan la presencia de contaminantes orgánicos, metales pesados, nutrientes, sales en dilución y microorganismos peligrosos para la salud humana (Guzmán 1997, Martínez-Rivera et al. 2000, CONAGUA 2008). El río Tuxcacuesco tiene dos cuencas tributarias, Tonaya

y Apulco, donde desafortunadamente no se han realizado valoraciones sobre la calidad de sus ecosistemas acuáticos. Debido a lo anterior, en el presente trabajo de investigación se plantea inferir el estado de la calidad de los ecosistemas acuáticos en las cuencas tributarias mencionadas, mediante la utilización de diferentes índices de calidad, los cuales en la actualidad son reconocidos como una herramienta práctica, confiable y de bajo costo para deducir la calidad de los ecosistemas acuáticos y sus riberas (Merritt y Cummins 1996; Henne et al. 2002, González del Tanago y García de Jalón 2011). En particular, se utilizaron el índice de integridad biótica basado en familias de macroinvertebrados acuáticos y el índice de calidad de riberas (RQI, por sus siglas en inglés), aunado a esto se determinaron parámetros físicos y químicos en el agua de los sitios seleccionados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La zona de estudio está constituida por las cuencas tributarias de Tonaya y Apulco, localizadas entre las coordenadas geográficas de 19°35'00.71”

a 20°02'31.82” N y 103°34'00.61” a 103°49'17.76” W. Estas cuencas tributarias están constituidas principalmente por rocas ígneas y calizas, así como suelos regosoles y litosoles (Fig. 1). La precipitación media anual es de 1646.5 mm y la temperatura media anual de 22.4 °C, valores que clasifican al clima como cálido subhúmedo (Meza 2010). El río Tuxcacuesco nace en Tapalpa, poco antes de ingresar al estado de Colima toma el nombre de río Armería y desemboca en el estero Boca de Pascuales en Colima (Cotler et al. 2010). Es uno de los 15 ríos más importantes de los 100 existentes en la vertiente del Pacífico y se encuentra entre los 43 ríos más importantes a nivel nacional (Santana et al. 1993, Rodríguez 2009). La cuenca es clasificada por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) como una región hidrológica prioritaria donde se sitúan tres grandes presas (Tacotán, Trigomil y Basilio Badillo) que irrigan más de 60 000 ha de cultivos en Jalisco y Colima (SEMARNAT 2008). Los sitios puntuales seleccionados fueron Tonaya, Apulco, Tuxcacuesco y Paso Real, los muestreos se llevaron a cabo en el final de la temporada de lluvia (octubre) en el año 2015 y en el inicio de la temporada seca (febrero) en el año 2016.

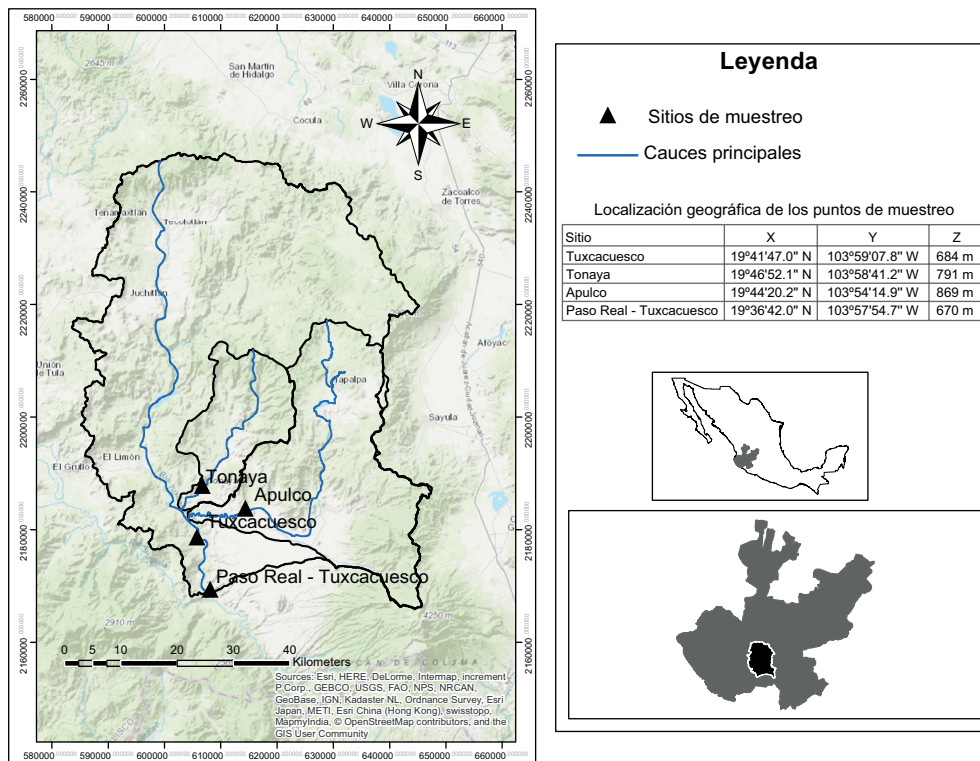


Fig 1. Localización geográfica del área de estudio y los puntos de muestreo

Índice de integridad biótica

La importancia de utilizar un índice biótico basado en la composición de macroinvertebrados acuáticos reside en varias razones que son señaladas por Reece y Richardson (2000): 1) son relativamente sedentarios y por lo tanto representativos del área donde son colectados; 2) tienen ciclos de vida relativamente cortos comparados con los peces y reflejan con mayor rapidez las alteraciones del ambiente mediante cambios en la estructura de sus poblaciones y comunidades; 3) viven y se alimentan en o sobre los sedimentos donde tienden a acumularse contaminantes como los metales pesados o los plaguicidas, los cuales se incorporan a la cadena trófica a través de ellos; 4) son sensibles a los factores de perturbación y responden a las sustancias contaminantes presentes tanto en el agua como en los sedimentos, y 5) son fuente primaria como alimento de muchos peces y participan de manera importante en la degradación de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes.

Índice de calidad de ribera para la valoración de las riberas fluviales

Uno de los elementos más importantes de una cuenca es la vegetación que se encuentra a las orillas de arroyos y ríos, llamada vegetación ripiara, que se caracteriza por su vinculación a la ribera de un río o entidad hidrológica equivalente (Olcina y Gómez 2001). Según Rappole et al. (1993), puede servir como hábitat y corredor para una gran cantidad de fauna silvestre, principalmente aves, poblaciones de insectos, flores y frutos que proveen recursos alimentarios importantes. Estos sitios son hábitats amenazados por la deforestación para uso agrícola y pecuario, ganadería extensiva, construcción de caminos, incendios y dragados (Saunders 1991). Su valoración ambiental, parte importante de la gestión para la protección de los recursos hídricos, depende de su estado ecológico, posteriormente a estas evaluaciones se pueden proponer medidas de restauración y conservación (González del Tánago et al. 2011).

El índice de calidad de riberas (RQI) está diseñado siguiendo los principios de la Directiva Marco del agua de la Unión Europea (CE 2000), según los cuales las condiciones óptimas o de mayor valor ecológico se refieren a las de mayor naturalidad o similitud con las definidas como de referencia. Los conceptos teóricos en que se basa el RQI han sido expuestos con anterioridad por González del Tánago et al. (2006). Su aplicación permite conocer el estado de conservación de las riberas fluviales y reflejar dicho estado en cartografías de calidad y relacionar el estado de cada tramo con las presiones e impactos

existentes, a escala de cuenca vertiente, tramo de río o hábitat fluvial; también facilita el diagnóstico de los principales problemas de las riberas, mediante el reconocimiento explícito de los distintos efectos producidos en su estructura o funcionamiento, contribuyendo de forma significativa al diseño de estrategias para su restauración y conservación.

El RQI debe aplicarse a escala de tramo o segmento fluvial, con una longitud de río en la que se mantengan unas condiciones homogéneas de los atributos considerados. Atendiendo al factor de continuidad longitudinal, se recomienda que su aplicación se refiera a un tramo suficientemente largo donde pueda estimarse dicha continuidad, el cual podría corresponder de forma estandarizada a una longitud entre 100 y 500 m (González del Tánago et al. 2006).

Muestreo y análisis

Parámetros físicos y químicos

Las muestras de agua se obtuvieron en cada uno de los puntos de muestreo, colectando tres muestras en cada sitio en ambas temporadas (lluviosa y seca), utilizando recipientes de polietileno de alta densidad de 0.2 L, a los que se les agregó ácido nítrico concentrado a $\text{pH} < 2$; se colocaron en hieleras que se transportaron con base en los lineamientos de USEPA (1983) y APHA (1995). A cada envase se le colocó una etiqueta con su respectiva fecha, nombre y localización del sitio, posteriormente en el laboratorio se determinó pH, conductividad eléctrica y salinidad, además de nitrógeno total (N_{total}) (Richards 1990, Eaton et al. 1995). Las determinaciones se realizaron en el laboratorio de suelos del Centro Universitario de la Costa Sur (CUCSUR) de la Universidad de Guadalajara. Para la estimación del caudal en los sitios muestreados se empleó la siguiente fórmula, tomando como base la metodología de Sabater y Elosegui (2009):

$$Q = A * V$$

Donde: Q = Caudal (m^3 / s) A = Área del canal (m^2)
V = Velocidad (m/s)

Para la determinación del área del canal y la velocidad del cauce, en cada sitio se utilizó un tramo de 25 metros en forma recta. Se utilizó un flujómetro para medir la velocidad de la corriente y se tomaron medidas de profundidad cada dos metros en la lámina de agua para poder aplicar la fórmula.

Macroinvertebrados acuáticos

Se realizaron dos muestreos dirigidos dentro de las cuencas tributarias. Las colectas de macroinvertebrados se llevaron a cabo en dos épocas del año,

lluviosa (octubre de 2015), y seca (febrero de 2016). Los organismos se clasificaron en grupos funcionales de acuerdo con Merrit y Cummins (1996). La estructura de la comunidad por cada sitio (Tuxcacuesco, Paso Real, Tonaya y Apulco) se consideró calculando la abundancia total, riqueza taxonómica, número de grupos funcionales y su tolerancia a la contaminación orgánica usando el índice de integridad biótica (IIB). El análisis se realizó al nivel de familia (Merrit y Cummins 1996, Henne et al. 2002, Weigel et al. 2002).

1. Se colectaron los macroinvertebrados con una red de pateo de apertura de red de 600 μm en las dos orillas del río y en dos muestreos en el centro del cauce para un total de 4 m^2 por sitio, hasta coleccionar 120 individuos (Merrit y Cummins 1996, Henne et al. 2002, Weigel et al. 2002).

2. Se identificaron los macroinvertebrados por grupo funcional (raspadores, filtradores, colectores, desmenuzadores y depredadores).

3. Se estimó la diversidad biológica y la riqueza de especies mediante el índice de Shannon-Wiener.

Índice de calidad de riberas (RQI)

En cada sitio de muestreo seleccionado se llevaron a cabo dos valoraciones de la vegetación riparia, mediante el RQI en un tramo de 100 m para determinar la condición y las características de las riberas. La estructura y funcionamiento dinámico de las riberas pueden evaluarse a través de siete atributos fácilmente observables y cuantificables, tomando en cuenta que los valores de puntuación van de 1 a 12, siendo los valores del 1 al 3 los correspondientes a un estado malo y los valores de 10 a 12 a un estado óptimo (González del Tánago et al. 2011).

1. Continuidad longitudinal del bosque ripario. Se realizó la ponderación de cada margen por separado.

2. Dimensiones del espacio ocupado por vegetación riparia. Se realizó la ponderación de cada margen por separado, dentro de cada estado se eligen los valores más altos cuanto mayor sea el grado de cobertura vegetal existente.

3. Composición y estructura de la vegetación de las riberas. En cada margen se realizó la ponderación.

4. Regeneración natural de la vegetación riparia nativa. Se valoró la regeneración natural en función de la disponibilidad de espacios abiertos y la intensidad de la regeneración en los mismos.

5. Condiciones de las riberas. Se ponderó el nivel de erosión de origen antrópico en función de la frecuencia e intensidad de los síntomas de inestabilidad de las orillas (acumulación de sedimentos en la base de las orillas, presencia de grietas, desmoronamientos,

descalzamiento de raíces, etc.) y del porcentaje de suelo desnudo en contacto con la lámina de agua, sin ningún tipo de cobertura vegetal.

6. Conectividad lateral del cauce con las riberas. Se ponderó en función de la altura de las orillas sobre el lecho del cauce, se relaciona la facilidad para el desbordamiento, y de la proximidad respecto a las orillas del cauce de las motas o infraestructuras de canalización, que supongan barreras físicas al desbordamiento.

7. Permeabilidad y grado de alteración del material edáfico. En este apartado se valoró conjuntamente la calidad de los materiales de los suelos riparios en relación con el mantenimiento de su capacidad de infiltración y permeabilidad y el grado de alteración del relieve.

Con base en la información anterior se valoraron las dimensiones de anchura actuales del espacio ripario en relación con las que se consideran óptimas o de referencia. Cada atributo ripario se valoró de forma independiente, según el cuadro de valoración del índice (**Cuadro I**). Los atributos relativos a la estructura de la ribera se valoraron en cada margen por separado, ya que las condiciones pueden ser muy diferentes entre los márgenes (ej. anchura del espacio ripario con vegetación), con diferentes causas de degradación y alternativas para su mejora. Los atributos relativos al funcionamiento dinámico de las riberas se valoraron de forma conjunta en ambos márgenes, considerando que las funciones riparias quedan aseguradas con tal de que tengan lugar al menos en una de las dos márgenes (ej. regeneración natural), y que de forma natural a menudo se producen de forma alternativa en una y otra orilla según el trazado y dinámica del cauce. La valoración del estado de las riberas se obtuvo sumando las valoraciones asignadas a cada atributo. Dicha valoración oscila entre 120 puntos, correspondiente al mejor estado de conservación, y 10 puntos, relativo al estado más degradado.

RESULTADOS

Parámetros físicos y químicos

Los valores obtenidos en lo referente al pH para la temporada de octubre de 2015 están considerados como ligeramente alcalinos (8.07-8.11). En el muestreo de 2016 los valores no distan mucho y se consideran también como aguas ligeramente alcalinas (8.01-8.12), el valor de la desviación estándar (0.17) (**Cuadro II**) señala que hay poca variabilidad en los datos obtenidos de pH. La conductividad eléctrica (CE) presenta un valor promedio (0.390 $\mu\text{S}/\text{cm}$)

CUADRO I. VALORES DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE RIBERA (RQI, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS; GONZÁLEZ DEL TÁNAGO et al. 2006).

Valor del RQI	Estado de la ribera	Condición ecológica	Estrategias de gestión
120-100	Muy bueno	Los atributos de las riberas no presentan amenazas en su funcionamiento, encontrándose en un estado de elevada naturalidad (máximo 3 atributos con una puntuación inferior al óptimo, correspondiente al estado “bueno”)	Gran interés de conservación para mantener el estado actual y prevenir la alteración de las funciones riparias
99-80	Bueno	Al menos dos o tres atributos de las riberas están amenazados en su funcionamiento (máximo 3 atributos con una puntuación inferior, correspondiente al estado “regular”)	Interés de protección para prevenir la alteración y mejorar la integridad de las funciones riparias
79-60	Regular	Al menos dos o tres atributos de las riberas están degradados en su funcionamiento y el resto tiene amenazas de degradación (máximo 3 atributos con una puntuación inferior, correspondiente al estado “malo”).	Necesidad de restauración para asegurar la funcionalidad hidrológica y ecológica de las riberas
59-40	Pobre	Más de tres atributos de las riberas están seriamente alterados en su funcionamiento y el resto también se encuentra degradado	Necesidad de rehabilitación y restauración para recuperar la funcionalidad hidrológica y ecológica de las riberas
39-10	Muy pobre	Más de tres atributos de las riberas están muy degradados en su funcionamiento y el resto está también degradado	Necesidad de rehabilitación y restauración para reintroducir la funcionalidad hidrológica y ecológica de las riberas o mejorar su situación actual respecto a su estado de máximo potencial.

CUADRO II. VALORES PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS

Parámetros	pH		C.E.		Caudal		N _{total}	
	Lluviosa	Seca	Lluviosa	Seca	Lluviosa	Seca	Lluviosa	Seca
Tuxcacuesco	8.11	8.12	0.419	0.423	9.5	8.9	28	32
Tonaya	8.44	8.28	0.504	0.513	1.45	0.63	39.3	23
Apulco	8.43	8.41	0.235	0.246	0.73	0.10	38	58
Paso Real	8.07	8.01	0.432	0.427	8.2	6.4	32	41
Promedio	8.23		0.39		36.41		4.48	
Desviación estándar	0.17		0.10		10.60		4.13	

(Cuadro II) que indica salinidad baja (0.235-0.504 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en las aguas, según la clasificación de Richards (1973). La desviación estándar presenta un valor (0.10) que exhibe una dispersión de los datos respecto de la media debido a que algunas muestras presentan valores más altos y bajos que la mayoría.

El nitrógeno total (N_{total}) y sus diferentes formas se utilizan principalmente como fuente de nitrógeno inorgánico en la fabricación de fertilizantes. El nitrógeno aplicado como abono puede estar en forma de urea, amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-), el nitrógeno también se integra de forma natural a los suelos por procesos de reacción, donde el nitrógeno es liberado al ambiente a través de los procesos biogeoquímicos

(Pacheco et al. 2002). En el muestreo de la temporada lluviosa (2015) el sitio de Tuxcacuesco presenta una concentración de 28 mg/L de N_{total} , lo que puede implicar que el agua presente una restricción moderada para el uso en riego agrícola según los valores propuestos por Ayers y Westcot (1987) (5-30 mg/L). Los otros tres sitios muestreados se clasifican dentro de la restricción severa (> 30 mg/L), siendo el sitio de Tonaya el que contiene la concentración más alta con 39.3 mg/L de N_{total} , seguido por el sitio de Apulco con 38 mg/L de N_{total} y Paso Real con 32 mg/L de N_{total} . En el muestreo de la temporada seca (2016) el sitio de Tonaya presenta restricción moderada (5-30 mg/L), en cuanto a su uso con una concentración

de 23 mg/L de N_{total} . Los otros tres sitios presentan restricción severa (> 30 mg/L), siendo el sitio de Apulco el que contiene los valores más altos con 58 mg/L de N_{total} , seguido por Paso Real con 41 mg/L de N_{total} y Tuxcacuesco con 32 mg/L de N_{total} . (**Fig. 2**).

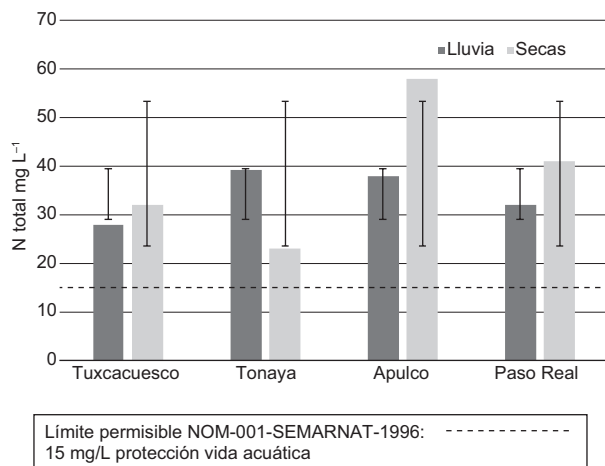


Fig 2. Concentración de nitrógeno total (N_{total}) en los sitios de las cuencas tributarias del río Tuxcacuesco ($n = 3$), valores por temporada de muestreo y límite máximo permisible. Las barras representan una desviación estándar de 95 %

Los caudales tienen una enorme importancia por conectar las cuencas terrestres con la atmósfera y con el mar, funcionando como los auténticos riñones de la Tierra. De esta forma, además de agua, transportan sales, sedimentos y organismos, y las complejas reacciones químicas y biológicas que se producen en los cauces fluviales son responsables en parte de las características químicas del agua retenida en los grandes reservorios, como lagos y océanos (Sabater

y Elosegui 2009). Para las cuencas tributarias del río Tuxcacuesco, en Tonaya se registró un caudal de 1.45 m^3 mientras que en Apulco de 0.73 m^3 , para los otros dos sitios muestreados, Paso Real presentó 8.2 m^3 y Tuxcacuesco 9.5 m^3 . Por lo anterior y con base en lo que menciona Sabater et al. (2009), al reducirse el caudal disminuye la velocidad del agua y se favorece la colonización de macrófitas; éstas incrementan la sedimentación y reducen aún más la velocidad del agua llegando a modificar la morfología del cauce. Las concentraciones de los solutos en los ríos cambian con el caudal y con el origen de las aguas que llegan al río. A medida que aumenta el caudal, las concentraciones disminuyen, puesto que una proporción cada vez mayor del agua proviene de la lluvia, que suele ser pobre en nutrientes.

Índice de calidad de riberas (RQI)

Se encontró que las condiciones varían de pobres a regulares en los cuatro sitios muestreados (Tuxcacuesco, Paso Real, Apulco y Tonaya). La calificación más baja es del sitio de Apulco con 32 puntos, le sigue Tonaya con 34 puntos y posteriormente Tuxcacuesco con 58 puntos. El único sitio con condiciones de ribera regulares fue Paso Real con 70 puntos (**Cuadro III**), tomando en cuenta que el puntaje máximo es de 120 puntos.

En Paso Real en el río Tuxcacuesco el RQI demostró que el estado general de la ribera fue regular (**Cuadro III**) con una valoración de 70 puntos, obteniendo las puntuaciones más bajas en los atributos de composición y estructura de la vegetación riparia y diversidad de edades y regeneración natural. Ya que, aunque hay presencia de sauces (*Salix humboldtiana*), en el sitio se encuentran también una gran cantidad de especies invasoras como la higuera (*Ricinus communis*), el pasto de Guinea (*Urochloa*

CUADRO III. RESULTADOS DE LA VALORACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE RIBERAS, PUNTUACIÓN DE AMBOS MÁRGENES DE LOS CAUCES

Atributos	Puntuación de ambos márgenes			
	Apulco	Tonaya	Tuxcacuesco	Paso Real
Continuidad longitudinal y cobertura del corredor ripario	3	4	7	8
Dimensiones del espacio con vegetación riparia	3	3	6	7
Composición y estructura de la vegetación riparia	3	3	5	6
Diversidad de edades y regeneración natural	3	3	5	6
Condición de las orillas	3	3	4	7
Inundaciones y conectividad lateral	4	4	7	8
Permeabilidad y grado de alteración del relieve y suelo ripario	4	4	5	7
Estado general de la ribera	32	34	58	70

maxima) y no se apreció regeneración natural de sauces. Cabe mencionar que en este sitio la agricultura se desarrolla en terrenos muy cercanos al cauce del río e incluso sobre la franja ribereña.

En el sitio de muestreo en Tuxcacuesco el RQI arrojó un resultado de 58 puntos, lo cual nos sugiere que en general la ribera tiene una condición pobre (**Cuadro III**). Los atributos con puntuación más baja resultan ser la composición y estructura de la vegetación riparia, la diversidad de edades y la regeneración natural, la condición de las orillas en ambos márgenes, así como la permeabilidad y el grado de alteración del relieve y suelo ripario. Al igual que en el sitio anterior se observó presencia de sauces (*Salix humboldtiana*) y de especies invasoras como la higuera (*R. communis*), el pasto de Guinea (*U. máxima*) y el carrizo (*Arundo donax*). No hay regeneración natural y existe una gran cantidad de basura y desechos urbanos, se observó que el cauce ha sido dragado.

El sitio de Tonaya tiene un estado en general muy pobre con 34 puntos (**Cuadro III**). Este sitio tiene malas condiciones en cuanto a la ribera se refiere. No existe una continuidad longitudinal en la cobertura del corredor ripario, es decir, se encuentra poca vegetación y dispersa. El espacio de la vegetación riparia es muy corto, aproximadamente de 4 m, en comparación con el espacio óptimo de 25 a 30 m (González del Tánago y García de Jalón 2011) y en su mayoría está ocupado por especies invasoras. Existen muy pocos árboles, aproximadamente 10 % de la cobertura del espacio ripario en comparación con el óptimo de 60 % especificado en el índice. En su mayoría se encuentran arbustos y pastos y por

ende no se apreció regeneración de las especies de árboles. La vegetación predominante está compuesta por especies invasoras tales como la higuera (*R. communis*) y el pasto de Guinea (*U. máxima*).

El sitio de Apulco fue el que obtuvo la valoración más baja en cuanto al RQI con una puntuación de 32 puntos (**Cuadro III**) con una condición de ribera muy pobre. En general los siete atributos presentan valoraciones de malas a regulares, no existe continuidad ni regeneración en cuanto a la vegetación riparia, la condición de las orillas en ambos márgenes es mala. Se apreció que el cauce ha sido dragado y además se utiliza como vado para tránsito de vehículos; asimismo se desarrolla la agricultura y la ganadería en la ribera. La vegetación está dominada por especies invasoras como la higuera (*R. communis*) y el pasto de Guinea (*U. máxima*).

Índice de integridad biótica y diversidad (IIB)

En total se colectaron 928 individuos de macroinvertebrados correspondientes a ocho órdenes y 13 familias, 505 individuos fueron colectados en el muestreo de la temporada lluviosa y 423 en la temporada seca. De las 13 familias, cinco corresponden al grupo funcional de depredadores y ocho al de colectores. La familia con más individuos colectados fue la Hydropsychidae con 431 individuos, le sigue la familia Tricorythidae con 114 individuos y Leptopheibidae con 78 individuos colectados (**Fig. 3**).

En cuanto al IIB por sitios, los cálculos indican que el sitio con la mejor calidad es el de Tonaya, seguido por Tuxcacuesco, Apulco y Paso Real (**Fig. 4**). Por lo tanto, con base en este parámetro la cuenca tributaria del río Tonaya presenta mejor calidad del

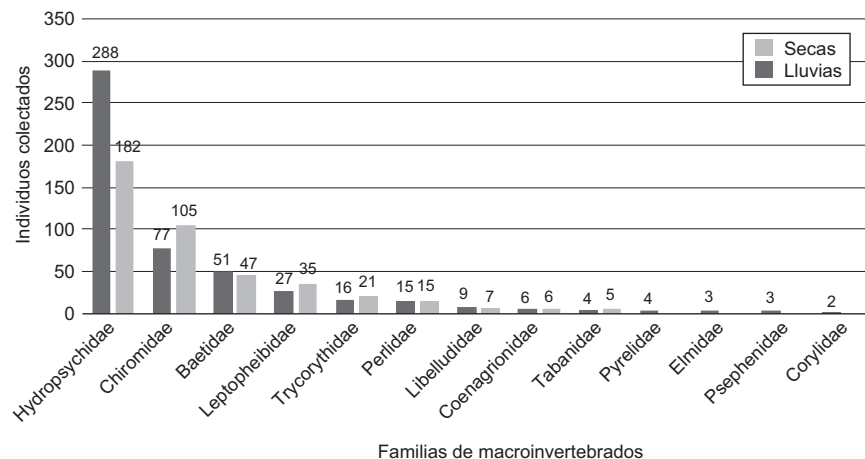


Fig. 3. Individuos de macroinvertebrados colectados por familia en temporada lluviosa y seca

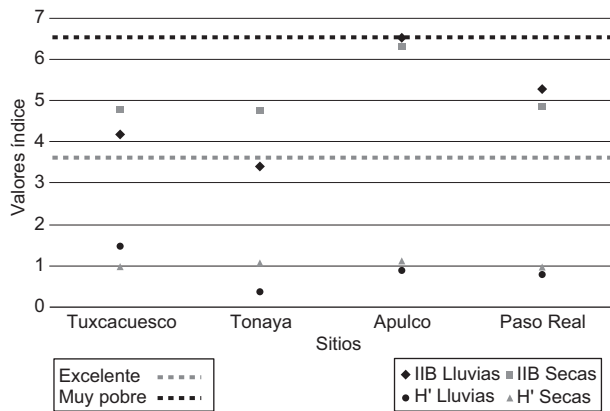


Fig 4. Índices de integridad biótica y diversidad por temporadas de muestreo (IIB índice de integridad biótica, H' índice de Shannon-Wiener) y su comparación con los valores de clasificación optima y muy pobre

agua, mientras que en la cuenca de Apulco los IIB obtenidos sugieren lo contrario. Por otra parte, la riqueza y la diversidad biológicas (H'), usando número de familias de macroinvertebrados, sugieren que es en la temporada seca cuando hay mejores índices de diversidad, equidad y abundancia, aunque los valores entre sitios fueron más contrastantes que en la temporada lluviosa (**Cuadro IV**).

CUADRO IV. ÍNDICE DE INTEGRIDAD BIÓTICA (IIB) Y DE DIVERSIDAD BIOLÓGICA (H') CON BASE EN FAMILIAS DE MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS COLECTADOS EN LA TEMPORADA LLUVIOSA Y SECA

Sitio	Índice de Integridad Biótica (IIB)			
	Individuos	Familias	IIB	H'
Lluviosa				
Tuxcacuesco	118	9	4.15	1.46
Tonaya	134	8	3.38	0.38
Apulco	211	5	6.50	0.88
Paso Real	42	2	5.25	0.78
Seca				
Tuxcacuesco	169	5	4.80	1
Tonaya	128	5	4.75	1.09
Apulco	53	5	6.30	1.12
Paso Real	73	5	4.83	1.01

IIB: 0.0-3.75 Excelente, 3.76-4.25 Muy bueno, 4.26-5.00 Bueno, 5.01-5.75 Regular, 5.76-6.50 Regular pobre, 6.51-7.25 Pobre, 7.26-10 Muy pobre.
 H': Índice de Shannon-Wiener.

El sitio de Tuxcacuesco presenta una condición muy buena con 4.15 puntos en el muestreo de la temporada lluviosa y una condición buena en el muestreo de la temporada seca con 4.80 puntos. Para el sitio de Tonaya se encontró una condición de excelente con 3.38 puntos en temporada lluviosa y de muy buena en temporada seca con un valor de 4.75 puntos, siendo éste el sitio con la mejor calidad en base al IIB. El sitio de Apulco en la temporada lluviosa y seca presentó una condición pobre con 6.50 y 6.30 puntos respectivamente, y con el valor de diversidad más bajo, siendo el sitio con la peor calidad de los cuatro estudiados según el IIB. Paso Real presentó una condición buena en temporada lluviosa con 5.25 puntos y muy buena con 4.83 en la temporada seca.

El análisis de correspondencia canónica (ACC) (**Fig. 5**), indica que la varianza acumulada de la relación entre las variables ambientales y las comunidades biológicas puede ser explicada por los dos primeros ejes en un 57%. En los sitios con los valores más altos de caudal se agrupan tres familias, Hydropsichidae, Baetidae y Perlidae; estas familias presentan una relación positiva con el caudal y además son las familias con mayor sensibilidad a la contaminación

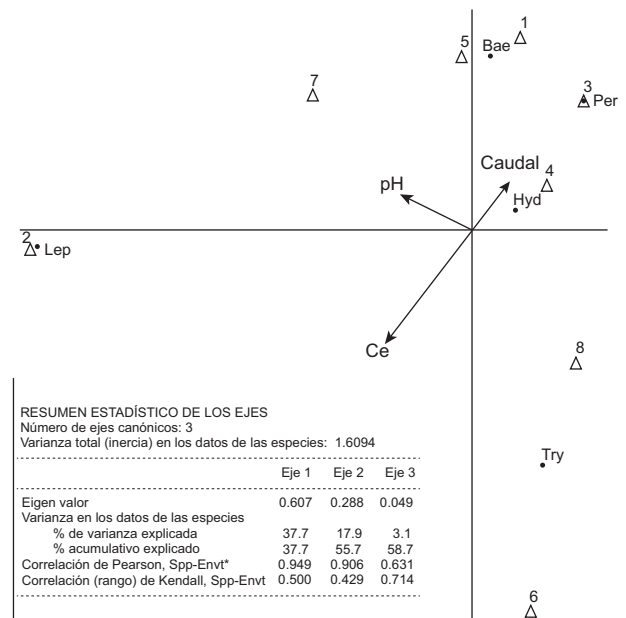


Fig 5. Análisis de correspondencia canónica en el ordenamiento de los sitios muestreados (1-5 Tuxcacuesco, 2-6 Tonaya, 3-7 Apulco y 4-8 Paso Real) en ambas temporadas, según la presencia y abundancia de las familias de macroinvertebrados: Leptopheibidae (Lep), Baetidae (Bae), Perlidae (Per), Hydropsichidae (Hyd), Trycoritidae (Try), colectados por sitio y relacionado con las variables ambientales (pH, conductividad eléctrica y caudal)

orgánica (Merrit y Cummins 1996). Por su parte, la variable de pH no presenta una relación positiva o directa sobre la agrupación de las familias de macroinvertebrados. Los valores de pH fueron bastante homogéneos entre las dos temporadas y no existe alta variabilidad entre sitios. La conductividad eléctrica tiene relación con las familias Trycoritidae y Leptopheibidae; estas tienen mayores facilidades de adaptación y por lo tanto son las más tolerantes a efectos de condiciones extremas o de perturbación (Metcalf 1994, DeShon 1995). Se puede apreciar mediante la ordenación que las familias de macroinvertebrados se están separando entre sitios y entre temporadas de muestreo, esto como resultado de la misma estructura de las comunidades de macroinvertebrados y de las variables ambientales.

DISCUSIÓN

El agua de riego puede contener niveles excesivos de nitrógeno, perjudicando a ciertos cultivos que son sensibles, manifestándose por un mayor crecimiento vegetativo que provocará un retraso en la maduración y baja calidad del producto (Ayers y Wescot 1987). Cuando las aguas de riego tienen una concentración < 5 mg/L de N_{total} , no se presenta ninguna restricción en su uso, si la concentración de nitrógeno total fluctúa dentro del rango de 5 a 30 mg/L, el uso de esta agua presenta una restricción moderada. En cambio, si las aguas de riego tienen una concentración de nitrógeno total >30 mg/L, estas aguas presentan restricciones severas en su uso (Ayers y Wescot 1987). Las variaciones de concentración de N_{total} en el muestreo de la temporada lluviosa y seca, encontradas en las aguas de los sitios muestreados posiblemente se relacionan con la descarga de aguas residuales agrícolas, que derivan de la aplicación de fertilizantes nitrogenados, así como de las descargas de aguas residuales provenientes de granjas porcícolas, como se ha evidenciado en otros trabajos de investigación (Fregoso-Zamorano 2015).

Con base en los resultados se encontró que, en el aspecto de calidad de riberas, los cuatro sitios de muestreo se encuentran en condiciones de degradación y esto es preocupante ya que tal como menciona Amitha (2003), los hábitats ribereños son altamente dinámicos, son una zona de encuentro o ecotono de los flujos del río y las tierras de la orilla con influencia antrópica. Muchos de los nutrientes son considerados como contaminantes cuando entran en altas concentraciones al río, por ejemplo, el nitrógeno y el fósforo usados en los fertilizantes

pueden contribuir a la contaminación del río, si estos fluyen directamente hacia el mismo. No obstante, las plantas de las franjas ribereñas pueden absorber los remanentes de los fertilizantes y usar estos nutrientes para su crecimiento y así evitar la contaminación directa de los cauces fluviales.

De acuerdo con los resultados, la calidad ecológica de las franjas ribereñas en los sitios muestreados en las cuencas tributarias de Tonaya y Apulco, presentan condiciones pobres, por lo tanto, esto influye directamente en la calidad del agua que llega a los cauces principales aumentando los problemas de depósito de contaminantes y carga excesiva de nutrientes, resultado de la utilización de insumos agrícolas y el depósito de sedimentos por la erosión.

De igual manera se observó que esta degradación se debe principalmente a causas humanas como la urbanización, la desecación, el dragado, el encausamiento y el direccionamiento de los cauces. Se le suman la contaminación con residuos sólidos, la contaminación por drenajes municipales, la erosión, la deforestación, la introducción de especies exóticas, y la invasión de la agricultura y la ganadería sobre la zona de las riberas, el resultado es la modificación de todas las dimensiones del sistema fluvial.

Por otra parte, los resultados del índice de integridad biótica y diversidad reflejan que, en cuanto a las diferencias estacionales, se puede destacar que no se apreció ningún patrón que separe las estaciones lluviosa y seca, por lo que las diferencias encontradas en un mismo punto no se deben a factores climáticos o de la variabilidad estacional. Zamora-Muñoz et al. (1995), realizaron un estudio en la cuenca del Río Genil en España, en el cual encontraron valores menores del índice en los meses invernales, determinando que esta reducida variación de los índices biológicos, más que estar relacionada con la temperatura era causada por la polución, de forma que se supone su independencia de la estacionalidad. Asimismo, Moya et al. (2009), en un estudio realizado en ríos del altiplano boliviano, encontraron que la estacionalidad o intermitencia no tiene efecto significativo sobre la riqueza y abundancia total, sin embargo, si tiene efecto significativo ($p < 0.01$) sobre la riqueza de ETP (efemerópteros, tricópteros y plecópteros) además de afectar el índice de sustrato y la conductividad.

En un estudio realizado en la Laguna de Tecocomulco en Hidalgo, México, por Rico-Sánchez et al. (2014), se encontró que los macroinvertebrados presentaron variaciones temporales que responden principalmente a las épocas cálida (seca y húmeda) y fría, con una mayor diversidad durante la época

cálida y lluviosa (verano). Los resultados indican que la Laguna de Tecocomulco tiene variaciones espaciales y temporales relacionadas tanto con factores ambientales como bióticos con la presencia de grupos dominantes.

CONCLUSIONES

El RQI presentó valores de 32 a 70 puntos, siendo Apulco el sitio con la condición más pobre (32), y Paso Real (70) con una condición regular; para este estudio ningún sitio presentó condiciones buenas en cuanto a la composición y arquitectura de los bordes. La conductividad eléctrica de las aguas de los sitios muestreados presentó valores en promedio de 0.3975 ($\mu\text{S}/\text{cm}$), concluyendo que pueden usarse para riego en casi todos los cultivos y tipos de suelo ya que la salinización es mínima. Los valores de pH presentan un promedio de 8.26, por lo tanto las aguas muestreadas son alcalinas.

En el aspecto biológico, se colectaron 928 individuos de macroinvertebrados correspondientes a ocho órdenes y 13 familias, 505 individuos fueron colectados en el muestreo de la temporada lluviosa y 423 en el muestreo de la temporada seca. De las 13 familias, cinco corresponden al grupo funcional de depredadores y ocho al de colectores. La familia con más individuos colectados fue la Hydropsychidae con 431 individuos, le sigue la familia Tricorythidae con 114 individuos y la Leptopheibidae con 78 individuos colectados. Las variables ambientales que tienen mayor influencia en la presencia de las familias sensibles de macroinvertebrados son el caudal y la conductividad eléctrica. En la cuenca de Apulco el caudal es regulado por una presa en su parte alta, esto provoca que en la temporada seca el caudal prácticamente desaparezca, lo que causa alteraciones al régimen del caudal natural afectando directamente a las comunidades biológicas y a las poblaciones humanas, ya que los procesos naturales de descomposición y ciclo de nutrientes no se realizan de forma adecuada, alterando las redes tróficas y la calidad del ecosistema acuático en su conjunto. En contraste, el río Tonaya no presenta alteraciones en el régimen de caudal natural y aunque al final de la temporada seca pierde el flujo de agua, se logran las condiciones para el establecimiento de las comunidades de macroinvertebrados. Por todo lo anterior, los datos sugieren que la cuenca tributaria del río Tonaya presenta mejor calidad del agua, mientras que la cuenca de Apulco presenta la valoración más pobre del IIB.

La cuenca tributaria de Apulco está aportando agua de mala calidad al cauce principal del río Tuxcacuesco, con base en los resultados obtenidos en este estudio. Esto es preocupante ya que esta cuenca no está funcionando como cuenca saneadora del río Tuxcacuesco. Los pobladores aledaños utilizan estas aguas para subsistir, para riego agrícola, para recreación, e incluso algunos pobladores practican la pesca para obtener alimento. Esto último es muy importante por los problemas de salud que se pueden estar ocasionando por consumir ya sea agua o peces dentro de esta cuenca. Este trabajo es un diagnóstico integral de la calidad del agua de las cuencas del río Tuxcacuesco, ya que se utilizaron diferentes métodos y técnicas de evaluación, lo que permite conocer y obtener más información para futuros trabajos o para fomentar proyectos de restauración.

REFERENCIAS

- Aguirre M. (2007). Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrológicas. Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador, 114 pp.
- Amitha K.H. (2003). Riparian vegetation along the middle and lower zones of the Chalakkudy river. Limnological Association of Kerala. Iringalakkuda Kerala, India, 118 pp.
- APHA (1995). Standard methods for examination of water and wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, Washington, EUA, 1035 pp.
- Ayers R.S. y Westcot D. (1987). La calidad del agua y su uso en la agricultura. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia, 173 pp.
- CE (2000). La directiva marco del agua de la EU. Comisión Europea, Oficina de Publicaciones. <http://doi.org/10.2779/75335>
- Cotler H., Garrido A. Bunge V. y Cuevas M. (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, Ciudad de México, México, pp. 115-120.
- DeShon J.E. (1995). Development and application of the invertebrate community index. En: Biological assessment and criteria: Tools for water resource planning and decision. (W.S. Davis. y T.P. Simon Eds.). CRC Press, Boca Raton, Florida, EUA, pp. 217-243. <http://doi.org/10.1080/0964056022000013039>

- Eaton A.D., Clesceri L.S. y Greenberg A.E. (1995). Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th Edition. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, EUA, 1325 pp.
- González del Tánago M. y García de Jalón D. (2011). Riparian quality index (RQI): A methodology for characterizing and assessing the environmental conditions of riparian zones. *Limnetica* 30 (1), 235-254.
- González del Tánago M., García de Jalón D., Lara F. y Garilleti R. (2006). Índice RQI para la valoración de las riberas fluviales en el contexto de la directiva marco del agua. *Ingeneria Civil* 143 (2), 97-108.
- Guzmán A.M. (1997). Las aguas superficiales del estado de Jalisco. Diagnóstico. Programa de ordenamiento ecológico y territorial del estado de Jalisco. Marco Físico. Instituto de Limnología. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, México, 125 pp.
- Henne L.J., Schneider D.W. y Martínez-Rivera L.M. (2002). Rapid assessment of organic pollution in a west-central Mexican river using a family-level biotic index. *J. Environ. Plann. Manage* 45 (5), 613-632. <http://doi.org/10.1080/0964056022000013039>
- Martínez-Rivera L.M., Carranza A.M. y García M. (2000). Aquatic ecosystem pollution of the Ayuquila river, Sierra de Manantlan Biosphere Reserve, Mexico. En: *Aquatic Ecosystems of Mexico: status and scope.* (M. Munawar, S.G. Lawrence, I.F. Munawar y D.F. Malley, Eds.). Backhuys Publishers, Leiden, Holanda, pp. 165-181.
- Merrit R.W. y Cummins K.W. (1996). An introduction of the aquatic insects of North America. 3a Ed. Dubuque: Kendall/Hunt. Michigan, EUA, 862 pp.
- Metcalf J.L. (1994). Biological water-quality assessment of rivers: Use of macroinvertebrate communities. En: *The river handbook: Hidrological and ecological principles.* (C. Peter y E.P. Jeffrey, Eds.). Blackwell Scientific Publications Press, Oxford, Inglaterra, pp. 145-170.
- Meza D. (2010). Planeación del territorio de la cuenca del río Tuxcacuesco en base al análisis multicriterio. Tesis de Maestría. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de la Costa Sur. Autlán de Navarro, Jalisco, México, 176 pp.
- Moya N., Gibon F.M., Oberdoff T., Rosales C. y Domínguez E. (2009). Comparación de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos en ríos intermitentes y permanentes del altiplano boliviano: implicaciones para el futuro cambio climático. *Ecol. Aplic.* 8 (2), 104-114.
- Olcina-Gil A. y Gómez-Mendocino J. (2001). Geografía de España. Editorial Ariel. Madrid, España, 659 pp.
- Pacheco A.J., Sauri R.M. y Cabrera S.A. (2002). Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. *Ingeniería* 6 (3), 76-81.
- PNUMA (2007). Perspectivas para el medio ambiente mundial, GEO5 medio ambiente para el desarrollo, Organización de las Naciones Unidas, Nueva York, EUA, 20 pp.
- Rappole J.H. y DeGraaf R.M. (1993). Neotropical migratory birds. Natural history, distribution and population change. Comstock publishing assoc. Londres, Inglaterra, 676 pp.
- Reece P. y Richardson J.S. (2000). Biomonitoring with the reference condition approach for the detection of aquatic ecosystem at risk. En: *Proceedings of a conference on the biology and management of species and habitats at risk.* (L.M. Dearling y B.B. Kamloops, Eds.), Columbia Británica, Canadá, pp. 549-552.
- Richards L.A. (1973). Suelos Salinos y Sódicos. Manual de Agricultura No. 60, Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América. Washington, EUA, 172 pp.
- Richards L.A. (1990). Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos: Manual No. 60. 6ª Ed. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. Laboratorio de Salinidad. Washington, EUA, 172 pp.
- Rico-Sánchez A.E., Rodríguez-Romero A.J., López-López E. y Sedeño-Díaz J.E. (2014). Patrones de variación espacial y temporal de los macroinvertebrados acuáticos en la laguna de Tecocomulco, Hidalgo, México. *Biología Tropical* 62 (2), 81-96.
- Rodríguez R.U. (2009). Balance hídrico climático de la cuenca Ayuquila-Armería. Tesis de Licenciatura. Universidad de Guadalajara. Autlán de Navarro, Jalisco, México, 103 pp.
- Sabater S., Donato J., Giorgi A. y Elosegui A. (2009). La importancia del caudal. En: *Conceptos y técnicas en ecología fluvial.* (S. Sabater y A. Elosegui, Eds.) Fundación BBVA, Girona, España, 439 pp.
- Santana E., Navarro S., Martínez L.M., Aguirre A., Figueroa P. y Aguilar C. (1993). Contaminación, aprovechamiento y conservación de los recursos acuáticos del río Ayuquila, Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco-Colima. *Tiempos de Ciencia* 30, 29-38.
- Saunders D. y Hobbs R. (1991). *Nature conservation 2: The role of corridors.* Ed Chipping Norton, Australia, 442 pp.
- SEMARNAT (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, en aguas y bienes nacionales. Secretaría de

- Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Diario Oficial de la Federación. 23 de abril de 1995. Ciudad de México, México, 35 pp.
- SEMARNAT (2008). Programa nacional hídrico 2007-2012 (CONAGUA), Ciudad de México, México, 163 pp.
- Sierra C.A. (2011) Calidad del agua, evaluación y diagnóstico. Universidad de Medellín. Medellín, Colombia, 456 pp.
- SSA (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano, límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Federación. 30 de noviembre de 1995. Ciudad de México, México, 71 pp.
- Torres M., Basulto Y., Cortés J., García K., Koh A., Puerto F. y Pacheco J. (2013). Evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación del agua subterránea en Yucatan. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 1 (3), 189-203.
- USEPA (1983). Methods for chemical analysis of water and wastes. Report No. EPA-600/4-79-020), Washington, EUA, 544 pp.
- Weigel B.M., Henne L.J., Martínez-Rivera L.M. (2002). Macroinvertebrate-based index of biotic integrity for protection of streams in west-central Mexico. *J. N. Am. Benthol. Soc.* 21 (1), 686-700. <http://doi.org/10.2307/1468439>
- Zamora-Muñoz C., Sáinz-Cantero C.E., Sánchez-Ortega A. y Alba-Tercedor J. (1995). Are biological indices BMWP' and APST' and their significance regarding water quality seasonally dependent? Factors explaining their variations. *Wat. Res.* 29 (1), 285-290.