



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS

LA CALIDAD HIDROGEOMORFOLÓGICA DE LA CUENCA DE
MÉXICO: UNA PROPUESTA METODOLÓGICA PARA
RECONOCER LA CALIDAD DEL ECOSISTEMA DE RIBERA

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

RAQUEL ORTIZ FERNÁNDEZ

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS
DR. JAVIER CARMONA JIMÉNEZ
Facultad de Ciencias, UNAM

COMITÉ TUTOR
DRA. PATRICIA BONILLA LEMUS
Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM
DR. ENRIQUE ARTURO CANTORAL URIZA
UMDI-Facultad de Ciencias Juriquilla, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO ENERO, 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS

LA CALIDAD HIDROGEOMORFOLÓGICA DE LA CUENCA DE
MÉXICO: UNA PROPUESTA METODOLÓGICA PARA
RECONOCER LA CALIDAD DEL ECOSISTEMA DE RIBERA

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

RAQUEL ORTIZ FERNÁNDEZ

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS
DR. JAVIER CARMONA JIMÉNEZ
Facultad de Ciencias, UNAM

COMITÉ TUTOR
DRA. PATRICIA BONILLA LEMUS
Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM
DR. ENRIQUE ARTURO CANTORAL URIZA
UMDI-Facultad de Ciencias Juriquilla, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO ENERO, 2017

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

OFICIO FCIE/DEP/799/2016

ASUNTO: Oficio de Jurado

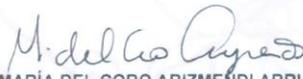
Lic. Ivonne Ramírez Wence
Directora General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 3 de octubre de 2016 se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS** en el campo de conocimiento de **Manejo Integral de Ecosistemas** del (la) alumno (a) **ORTIZ FERNÁNDEZ RAQUEL** con número de cuenta **303148560** con la tesis titulada "**La calidad hidrogeomorfológica en la Cuenca de México: Una propuesta metodológica para reconocer la calidad del ecosistema de ribera**", realizada bajo la dirección del (la) **DR. JAVIER CARMONA JIMENEZ**:

Presidente: DR. FRANCISCO JAVIER ÁLVAREZ SÁNCHEZ
Vocal: DR. ROBERTO BONIFAZ ALFONZO
Secretario: DR. ENRIQUE ARTURO CANTORAL URIZA
Suplente: DRA. ÁNGELA PIEDAD CARO BORREGO
Suplente: DRA. PATRICIA BONILLA LEMUS

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
Ciudad Universitaria, Cd. Mx., a 13 de diciembre de 2016


DRA. MARÍA DEL CORO ARIZMENDI ARRIAGA
COORDINADORA DEL PROGRAMA



MCAA/MJFM/ASR/gr*

Agradecimientos

Agradezco:

Al Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada (CVU/630449) durante la realización de mis estudios en el Posgrado de Ciencias Biológicas, UNAM.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT-UNAM) por el financiamiento otorgado al presente estudio a través de los proyectos de investigación “Los indicadores ecológicos del ecosistema fluvial en la Cuenca de México” (Clave: IN211712) y “Ampliando el potencial bioactivo de las cianobacterias: caracterización polifásica de los biofilms tóxicos en ríos periurbanos de la Cuenca de México” (Clave: IN220115).

A mi tutor principal, Dr. Javier Carmona Jiménez y a los miembros de mi Comité Tutor, Dra. Patricia Bonilla Lemus y Dr. Enrique Arturo Cantoral Uriza, por sus comentarios y sugerencias durante el desarrollo de este trabajo.

A Dr. Francisco Javier Álvarez Sánchez, Dr. Roberto Bonifaz Alfonzo, Dr. Enrique Arturo Cantoral Uriza, Dra. Ángela Piedad Caro Borrero y Dra. Patricia Bonilla Lemus, por dedicar el tiempo a la revisión de este trabajo, por sus comentarios y aportaciones para mejorarlo.

A la Dra. Ángela Piedad Caro Borrero y M. en C. Beatriz González Hidalgo por el apoyo para el registro y valoración de la calidad del ecosistema de ribera en los ríos de la Cuenca de México.

Agradecimientos personales

Quiero agradecer a mi tutor, Dr. Javier Carmona, por tu disposición, paciencia y motivación en todo momento. Por la confianza de aceptarme como alumna en el proyecto de la Cuenca de México, sin ti no hubiera sido posible la conclusión de mis estudios de posgrado y de este trabajo.

A los miembros de mi comité tutor, Dra. Patricia Bonilla Lemus y Dr. Enrique Cantoral Uriza, por tener la disposición de revisar y comentar para mejorar este trabajo además de estar presentes para las evaluaciones y trámites.

A la M. en C. Verónica Aguilar Zamora, por tu ayuda y orientación en la búsqueda de información cartográfica y por siempre resolver mis dudas con el SIG. Además de brindarme tu amistad.

A mis compañeros del laboratorio de Ecosistemas de Ribera, Mariana, Víctor, Rogelio, Karla y Ángela por la orientación en el trabajo de campo cuando comencé en este proyecto y cuando me incorporé al equipo, por cuestionarme y hacer que mi trabajo mejorara, por siempre tener la disposición de ayudar, motivar y para platicar.

A mi familia, Josefina, Paola, Fernanda, Enrique, Leticia; Paris y Lily, donde estén.

Índice

Resumen	10
Abstract	11
Introducción	12
Marco teórico	13
1. Evaluación de la calidad hidromorfológica.....	14
2. Uso de bioindicadores	17
Justificación.....	18
Preguntas de investigación.....	19
Objetivo general.....	19
Área de estudio	20
1. Clima.....	21
2. Geología	22
3. Vegetación.....	23
Materiales y Método	25
1. Información cartográfica.....	25
a. Construcción cartográfica del área de estudio.....	25
b. Ubicación de subcuencas y selección de sitios de muestreo	26
2. Validación de la información cartográfica	30
a. Evaluación de los parámetros físico-químicos	30
b. Diversidad vegetal.....	30
c. Evaluación de la calidad hidromorfológica.....	30
3. Análisis estadístico	32
4. Propuesta de un Índice de Calidad Hidromorfológica para los ríos de la Cuenca de México	33
5. Actividades potenciales de riesgo en los ríos de la Cuenca de México	33
Resultados	34
1. Actualización de la condición de permanencia de los ríos de la Cuenca de México	34
2. Ubicación de los ríos en Áreas Naturales Protegidas (ANP) y gradiente altitudinal de la Cuenca de México.....	36
3. Validación de la información cartográfica.....	38
a. Condición de los ríos de la Cuenca de México y su calidad hidromorfológica	38

b. Vegetación y uso de suelo de la Cuenca de México y su calidad hidromorfológica.....	40
c. Calidad hidromorfológica y caracterización biológica de los ríos de la Cuenca de México.....	42
4. Análisis de Clasificación Jerárquica (ACJ) de la calidad hidromorfológica y los parámetros físico-químicos.....	47
5. Propuesta del índice de evaluación hidromorfológica para los afluentes de la Cuenca de México (CuMeCH)	49
6. Potenciales zonas de riesgo en los afluentes de la Cuenca de México	50
Discusión y conclusiones	51
Referencias	55
Anexo 1	61
Anexo 2.....	65

Índice de figuras

Figura 1	Ubicación de la Cuenca de México en la República Mexicana	21
Figura 2	Regiones climáticas de la Cuenca de México	22
Figura 3	Regiones geológicas de la Cuenca de México	23
Figura 4	Modelo Digital de Elevación (MDE)	26
Figura 5	Subcuencas calculadas a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE)	29
Figura 6	Condición de los ríos de la Cuenca de México	35
Figura 7	Localización de los sitios de muestreo en Áreas Naturales Protegidas	37
Figura 8	Red hidrológica de la Cuenca de México y la calidad hidromorfológica	39
Figura 9	Vegetación y Uso de suelo y la calidad hidromorfológica	41
Figura 10	Calidad hidromorfológica con respecto al gradiente altitudinal	47
Figura 11	CAJ Sitios de la cuenca alta	45
Figura 12	CAJ Sitios de la cuenca baja	49
Figura 13	Mapa de recursos y explotación de los lagos de la Cuenca de México	61
Figura 14	Mapa topográfico de la Cuenca de México, con el área urbana y las superficies lacustres de 1984	64

Índice de tablas

Tabla 1	Parámetros evaluados en distintos índices de calidad hidromorfológica	16
Tabla 2	Aspectos que evalúa el índice CERA	31
Tabla 3	Aspectos que evalúa el índice QBR	32
Tabla 4	Ubicación de los sitios de muestreo de la Cuenca de México	27
Tabla 5	Condición de permanencia de los ríos de la Cuenca de México	34
Tabla 6	Ubicación de los sitios de muestreo en el gradiente altitudinal	36
Tabla 7	Longitud de los ríos de la Cuenca de México	38
Tabla 8	Características de los ríos de la Cuenca de México	43
Tabla 9	Resultados de la calidad hidromorfológica, índice CERA y QBR	46
Tabla 10	Resultados estadísticos (CAJ)	48
Tabla 11	Zonas potenciales de riesgo para la calidad hidromorfológica	50

Resumen

La Cuenca de México es un área extensa rodeada de numerosos sistemas montañosos por los que circulan de manera natural cerca de 17 ríos y arroyos perennes. Los ríos de la cuenca han sufrido intensos cambios en su estructura debido al uso antropogénico que se ha desarrollado en la región en las últimas décadas. Dado que estos cambios se presentan de manera continua, es necesario establecer los parámetros que puedan distinguir los elementos de naturalidad, de aquellos que modifican la estructura de los ríos. Para lo cual, el objetivo de este trabajo es caracterizar los rasgos que definen la estructura hidromorfológica de los ríos de la Cuenca de México para establecer las condiciones de referencia y su empleo como potencial indicador de la calidad ecológica a través del análisis físico-químico del agua, características hidromorfológicas y la composición biológica asociada al cauce. La metodología incluyó la generación de mapas base con información hidrológica actualizada, uso de suelo y vegetación, naturalidad del canal de flujo del agua del río y su denominación administrativa como Área Natural Protegida o Suelo de Conservación. Con base en la información cartográfica se eligieron sitios que potencialmente tuvieran buen estado ecológico y se validaron *in situ* utilizando protocolos de calificación de la calidad hidromorfológica. La evaluación de la calidad hidromorfológica se realizó en 50 sitios que corresponden a 13 subcuencas de la Cuenca de México. Se determinaron 31 sitios con potenciales condiciones de referencia, de los cuales 24 estuvieron ubicados en una zona protegida. Con la integración de la información bibliográfica y la recabada en campo, se determinó y actualizó el estado de permanencia de los ríos. A partir de la relación entre la calidad hidromorfológica y la calidad del agua de los ríos, se definió que las características de calidad de la vegetación (número de especies nativas), la hidrología (tramos conservados) y las perturbaciones antropogénicas (canalización y represamiento del canal) son los parámetros que más influyen en la calidad del ecosistema acuático. A partir de estas características, se desarrolló un índice de evaluación hidromorfológica con las condiciones de referencia de los ríos de la Cuenca de México.

Abstract

The Basin of Mexico is an extended area surrounded by a mountain system with 17 permanent rivers and streams. These rivers have changed in their structure during the last decade, because of the anthropogenic use in the region. As these changes are constant, therefore is necessary differentiate between the parameters that reflect the natural conditions from those that modify the rivers structure. The aim of this work is characterized the hydromorphological structure of some rivers from the Basin of Mexico to establish the reference conditions and its use as a potential indicator of the ecological quality, based in the water chemical analyze, to assess the hydromorphological characteristics and the diversity of organisms of the riparian ecosystem. The method included cartographic construction with updated information of hydrology, land use and land cover, natural conditions of the channel and its legal denomination as a natural protected area or conservation land. With the cartographic information, there were chosen sites with potentially good ecological status and were evaluated *in situ* using hydromorphological quality assessment protocols. The evaluation of the hydromorphological quality was made in 50 sites located in 13 sub-basins from the Basin of Mexico. There were 31 potential sites with reference conditions; 24 were in a natural protected zone. With the integration of the literature information data from the studied sites, it was determined the permanence flux status of the rivers. With the relationship between the hydromorphological quality and the water quality, there were defined that the most important parameters in the aquatic ecological quality were the riparian vegetation (number of native species), the hydrology (natural channel) and the anthropogenic disturbances (channelized rivers and presence of dams). With these characteristics, it was developed a hydromorphological assessment index with the reference conditions of the rivers from the Basin of Mexico.

Introducción

El ecosistema de ribera es un elemento importante en el funcionamiento de un río, sus dimensiones laterales y afluentes, así como muchas de sus dimensiones verticales, están contenidas en su hábitat. La zona de ribera está definida como la zona de transición entre un río y el ecosistema terrestre adjunto, que incluye el canal del río y la tierra que lo rodea que está influenciada por los cambios en el nivel de agua (Gregory *et al.*, 1991).

El lecho del río es la zona que siempre permanece inundada, incluso en momentos donde el caudal es bajo; el canal principal, es la zona donde el agua circula siempre, incluyendo periodos de pequeñas crecidas; la llanura de inundación, es donde el agua circula cuando el río está muy crecido; la ribera del río o banco del río, es el espacio situado en la zona de inundación donde se encuentra la vegetación de ribera, tiene una pendiente pronunciada y marca la extensión más baja de la vegetación perenne terrestre (Encalada *et al.*, 2011; Gregory *et al.*, 1991).

La importancia de la zona de ribera va más allá de la proporción que ocupa en el paisaje debido a su localización dentro de este y a la conexión entre el ecosistema acuático y terrestre. Las interacciones entre estos ecosistemas influyen la modificación del microclima (la luz, temperatura y humedad), alteración en la entrada de nutrientes corriente arriba, contribución de materia orgánica a la corriente de agua y en la zona de inundación y retención de sedimentos (Gregory *et al.*, 1991).

En general, el hábitat de ribera presenta alta diversidad, principalmente en los ríos con grandes superficies de inundación, la cual protege el canal principal de cambios temporales y amortigua grandes disturbios, así como la provisión de refugios para la vida silvestre (Munné *et al.*, 2003). De igual manera, provee servicios ecosistémicos a las poblaciones como el suministro de agua, tanto para consumo humano como para el desarrollo de diversas actividades (agricultura, ganadería, industria); purificación y transporte de agua, sedimentos y nutrientes; control de inundaciones y sequías; hábitat; retención de suelo y valores escénicos, culturales y de recreación (Ollero *et al.*, 2003).

A pesar de la importancia que tiene, el ecosistema de ribera es la primera zona que sufre un deterioro debido a la necesidad de extraer agua y canalizar los afluentes, así como la primera en ser impactada por la contaminación generada por actividades humanas. La zona de ribera puede convertirse en zona agrícola, de pastoreo o urbana, con la consecuente pérdida de la estructura y función del río y las zonas de inundación. Debido a que estos cambios se presentan de manera constante en el ecosistema de ribera, se requiere monitorear frecuentemente su estado ecológico.

Actualmente los ríos de montaña son uno de los ecosistemas más afectados por las actividades humanas, lo cual pone en riesgo la sustentabilidad de los servicios ecosistémicos. Algunas actividades antropogénicas que se realizan son, la canalización, el represamiento o la desconectividad de las zonas de inundación y los impactos se

reflejan en la calidad hidromorfológica que pueden afectar el canal del río y la zona de ribera (Dresti *et al.*, 2016; Maddock, 1999).

La Cuenca de México es una región que presenta gran cantidad de recursos hídricos, además de proveer de otros recursos ecosistémicos a las poblaciones de la Ciudad de México, Estado de México, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala. A pesar de la importancia que tiene, ha sufrido cambios urbanísticos y ecológicos intensos en los últimos 500 años. A principios del S. XVI el área lacustre estuvo integrada por cinco grandes lagos alimentados por casi medio centenar de ríos y a principios del S. XXI fue sustituida por una ciudad de 2,000 km². La mayoría de los ríos que mantienen su naturalidad se han convertido en drenajes abiertos de aguas negras o han sido entubados en los tramos que se encuentran en la zona urbanizada (Legorreta, 2009).

Debido a los cambios que ha sufrido la Cuenca de México por el uso antropogénico, es necesario evaluar periódicamente estos cambios a través de la integración de indicadores físico-químicos, biológicos e hidromorfológicos. Resaltar la importancia que tienen algunos factores en la calidad ecológica del ecosistema de ribera de la Cuenca de México y desarrollar un método de evaluación propio de las condiciones de la región.

Marco teórico

Los ríos son sistemas naturales de máxima dinámica y complejidad, se encuentran en constante ajuste espacial y temporal debido a los cambios en el caudal, lo que se traduce en movilidad lateral y vertical. Esta movilidad es un mecanismo de autorregulación y es impulsor de una dinámica ecológica que sostiene la riqueza y diversidad de estos ecosistemas. La dinámica fluvial es un elemento clave para el estado paisajístico, ambiental y ecológico de los sistemas fluviales (Ollero *et al.*, 2007).

El estado ecológico se refiere a la salud del ecosistema y es una medida integral del estado en el que se encuentra el ecosistema que está influenciado por distintos factores relacionados con el río, incluyendo la calidad del agua, hidrología, geomorfología y el hábitat físico (Maddock, 1999). Para evaluar estos indicadores, se requieren medidas específicas, como las características del canal del río, diversidad biológica (macroinvertebrados bentónicos, peces y algas macroscópicas), parámetros físico-químicos del ambiente acuático, información sobre la vegetación de ribera y las áreas adyacentes (Encalada *et al.*, 2011; Hering *et al.*, 2003; Maddock, 1999).

La evaluación el estado ecológico de un río, requiere el desarrollo de un protocolo basado en información biológica y cartográfica de los sitios de muestreo. Posteriormente se pueden establecer condiciones de referencia que sirven como blancos de la calidad y como base para el desarrollo de un sistema de evaluación. Para establecerlos, se utilizar información de las condiciones de los sitios, analizarlos con un Sistema de Información Geográfica (SIG) y validarlos *in situ* (Hering *et al.*, 2003; Stoddard *et al.*, 2006). Las condiciones de referencia deben asignarse según los distintos tipos de cuerpos de agua y no necesariamente representan las mejores condiciones o

prístinas y totalmente inalteradas, sino las que presenten mínimos efectos en la estructura y función del ecosistema derivados de actividades antropogénicas. Una condición de referencia debe reflejar parcial o totalmente las condiciones sin disturbio para los elementos hidromorfológicos, físicos, químicos y de calidad biológica; la concentración de contaminantes sintéticos debe ser cercano a cero o cerca del límite de detección de las técnicas analíticas usadas; la concentración de contaminantes específicos no sintéticos debe permanecer dentro del rango normal asociado con los niveles básicos (Acosta *et al.*, 2009; DMA, 2000; Nijboer *et al.*, 2004).

La selección de los sitios de referencia, se puede hacer con base en los posibles impactos o presiones que se producen en ellos y que serían el origen de las alteraciones en el estado de salud del ecosistema o se pueden estudiar directamente las comunidades de organismos y a partir de ellos establecer las condiciones de referencia (Acosta *et al.*, 2009). Posteriormente se hace una validación *in situ* para comprobar si cumplen con ciertas características como, condiciones naturales del ecosistema, buena calidad del agua, poca o nula evidencia de perturbación antropogénica, régimen natural del caudal, sin cambios significativos de drenaje, presencia de vegetación de ribera autóctona, sin canales de desagüe, calidad del hábitat fluvial aparentemente buena, grado de urbanización, agricultura y silvicultura tan bajo como sea posible, sin afluentes de contaminación que afecten el sitio y sin evidencia de eutrofización (Bonada *et al.*, 2002; Bordallo & Casado, 2011; Hering *et al.*, 2003).

La comparación de los sitios de referencia con los sitios que presentan algún tipo de alteración permite la definición y clasificación de diferentes estados de degradación en donde se pueda aplicar un sistema de evaluación y finalmente hacer una tipología de los ríos. Los factores abióticos más prominentes son la morfología del río, geoquímica, altitud, y tamaño del cauce (Bordallo & Casado, 2011; Hering *et al.*, 2003).

El establecimiento de las condiciones de referencia es importante debido a que son la base para los objetivos de protección de los cuerpos de agua. Posteriormente se debe estudiar comparativamente los distintos grupos biológicos propuestos como indicadores de la calidad del agua; establecer una red de monitoreo mediante índices biológicos con el fin de contar con un instrumento de control integral de la evaluación de la calidad del agua; elaborar un diagnóstico, propuestas de seguimiento y objetivos sobre la calidad del agua, utilizando índices biológicos seleccionados y proponer un conjunto de medidas para la corrección y recuperación de la calidad del agua con el fin de restituirlo en relación con los usos posibles o con su función ecológica (Martínez- Mas *et al.*, 2004).

1. Evaluación de la calidad hidromorfológica

Para definir el estado de la calidad de los ecosistemas de ribera, es esencial tomar en cuenta sus características físico-químicas y las variables hidromorfológicas (Munné *et al.*, 2003). La hidromorfología se refiere a la estructura, el cambio y la dinámica morfológica de los sistemas hidrológicos a través del tiempo. Estos cambian debido a

influencias naturales y antropogénicas como cambios en el uso de suelo y del agua causada por la urbanización, la agricultura y la modificación en la infraestructura para el uso del agua (Poole, 2010).

La Directiva Marco del Agua (DMA¹) en la Comunidad Europea en el año 2000, introdujo el término hidromorfología el cual se refiere a cualquier modificación del régimen de flujo, transporte de sedimentos, morfología del río y movilidad del canal lateral. Se utilizan los métodos hidrogeomorfológicos para entender los procesos físicos y las causas de la alteración de los ríos. La DMA (2000) toma en cuenta tres indicadores hidromorfológicos que evalúan tres categorías (muy buen estado, buen estado y estado moderado):

1. Régimen hidrológico. En muy buen estado el caudal y la hidrodinámica del río y la conexión resultante a aguas subterráneas reflejan total o casi totalmente las condiciones inalteradas; en buen estado y estado moderado, las condiciones se degradan.
2. La continuidad del río. En muy buen estado la continuidad de los ríos no tiene perturbaciones de origen antropogénico y por lo tanto permite que las comunidades acuáticas no se vean afectadas y que el transporte de nutrientes sea bueno; para la evaluación buen estado y estado moderado, las condiciones se degradan.
3. Las condiciones morfológicas. En muy buen estado, los modelos de los canales, las variaciones de ancho y profundidad, la velocidad del flujo, las condiciones del sustrato y la estructura y condición de las zonas de ribera corresponden total o parcialmente a condiciones inalteradas; para el caso del buen estado y estado moderado, las condiciones se van degradando.

Existen diversos índices que evalúan la calidad hidromorfológica, modificados de los parámetros que evalúa la DMA y dan un puntaje a partir del cual se determina la calidad del ecosistema de ribera (Tabla 1).

¹ La Directiva Marco del Agua (DMA) tiene como objetivo que las aguas superficiales del continente europeo tuvieran buen estado ecológico para el 2015. Para lograr esto, la Unión Europea facilitó una intercalibración para asegurar la heterogeneidad de definiciones del estado de los cuerpos de agua, reflejando la desviación de sus propiedades desde un estado con mínimos disturbios, definidos como condiciones de referencia. Uno de los mayores retos de la DMA ha sido encontrar una aproximación común para definir las condiciones de referencia y el nivel de perturbación antropogénica que está permitido en los sitios de referencia.

Tabla 1. Parámetros evaluados en índices de calidad hidromorfológica utilizados en distintos países.

País	Parámetros evaluados	Autor/Nombre del índice
España	<p>Evalúa nueve parámetros ordenados en tres grupos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Naturalidad del régimen del caudal • Disponibilidad y movilidad de sedimentos • Funcionalidad de la llanura de inundación 	Ollero <i>et al.</i> (2007)
	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones del suelo que ocupa la vegetación de ribera • Continuidad longitudinal, cobertura y patrones de distribución del corredor ribereño • Composición y estructura de la vegetación de ribera • Diversidad de edades y regeneración natural de las especies maderables • Condiciones del banco • Conectividad lateral 	González del Tánago & García del Jalón (2011) Riparian Quality Index (RQI)
Inglaterra	<ul style="list-style-type: none"> • Morfología del banco y del canal • Sustrato predominante • Características de sedimentación • Tipos de flujo • Características de artificialidad • Vegetación y uso de suelo 	Fox <i>et al.</i> (1998) River Habitat Survey (RHS)
	<p>Evalúa 28 indicadores, divididos en tres secciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Continuidad longitudinal y lateral • Morfología (patrones del canal, sección transversal, sustrato) • Vegetación 	Rinaldi <i>et al.</i> (2013) The Morphological Quality Index
E.U.A.	<p>Evalúa las características:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Uso de suelo, contaminación local y especies vegetales dominantes • Velocidad de corriente y profundidad • Tipo de sedimento, • Estado de flujo del canal, alteraciones en el canal. • sinuosidad, estabilidad de la ribera, protección que proporciona la vegetación de ribera al sustrato y ancho de la zona que abarca la vegetación de ribera 	Barbour <i>et al.</i> (2010 y 1999) Índice de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés).
Ecuador y Perú	<p>Evalúa la calidad del hábitat del bosque de ribera.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Características hidromorfológicas • Naturalidad de la vegetación de ribera 	Encalada <i>et al.</i> (2011) Índice de Calidad Ecológica de los ríos Altoandinos (CERA)
	<p>Valora el grado de degradación del canal fluvial y de la vegetación de ribera y considera las diferencias en la geomorfología del río desde la cabecera a las zonas bajas.</p>	Munné <i>et al.</i> (2003) Calidad del Bosque de Ribera (QBR, pos sus siglas en catalán).

2. Uso de bioindicadores

La calidad ecológica usualmente es validada a través de la evaluación de atributos clave que definen las comunidades y ensamblajes biológicos. Determinar y definir su estado de calidad a través del análisis de los organismos es una tarea compleja, especialmente en las regiones donde los ecosistemas prístinos son prácticamente inexistentes y el monitoreo biológico inicial se realizó cuando los impactos humanos ya habían tenido lugar (Nijboer *et al.*, 2004).

Dada la velocidad de los cambios ambientales, se requieren métodos para escoger las especies o ensamblajes de especies para establecer prioridades de conservación y monitoreo de respuestas bióticas a nivel local y global (Kremen, 1992). En el ecosistema de ribera habitan distintas comunidades de peces, invertebrados, bacterias o algas, estas han evolucionado en ambientes naturales y por lo tanto presentan distintos niveles de tolerancia a la contaminación del agua y algunas especies son muy sensibles a los cambios en el ambiente (Gregory *et al.*, 1991)

El propósito de utilizar bioindicadores para la evaluación y calidad de los ríos, es para ver la respuesta al estrés del ambiente y principalmente para alertar sobre las respuestas naturales a los impactos ambientales. La selección de especies indicadores debe basarse en una identificación que sea relativamente simple y que los organismos tengan una amplia distribución (Carmona *et al.*, 2016; Carmona & Caro-Borrero, 2016; Kremen, 1992).

Uno de los indicadores de la calidad ecológica de los ríos es la vegetación de ribera, que ocupa una de las áreas más dinámicas del paisaje. La distribución y composición de la comunidad de plantas refleja la historia de los disturbios fluviales debido a las inundaciones y los disturbios de la zona adyacente, como incendios, el viento, afectaciones a la vegetación o la presencia de plagas. La vegetación en las superficies cercanas al canal principal del río, se caracteriza por estar compuesta de arbustos y árboles anuales y en la zona de inundación puede contener comunidades de plantas maduras (Gregory *et al.*, 1991).

La importancia de la vegetación de ribera es el mantenimiento de procesos naturales del río, ya que provee entradas de materia orgánica, energía y nutrientes a los sistemas acuáticos. La zona de ribera puede amortiguar a los ríos de tierras adyacentes atrapando sedimentos, nutrientes u otros contaminantes. Asimismo, provee la sombra necesaria para los regímenes naturales de temperatura y aumenta la salud del ecosistema. La alta diversidad de sitios y los regímenes de disturbios que se presentan frecuentemente a lo largo del río, lleva a una alta diversidad de especies en la zona de ribera comparado con los hábitats de las zonas adyacentes (Gregory *et al.*, 1991) Debido a que la zona de ribera está en la frontera entre el sistema acuático y terrestre, son poderosos indicadores de la calidad (Río & Bailey, 2006).

Justificación

Entender la magnitud en la cual los sistemas ecológicos están experimentando perturbación antropogénica y cambios en su estructura y funcionalidad es crítica para la conservación del ecosistema de ribera a largo plazo. Dada la velocidad con la que ocurren estos cambios, se pueden desarrollar métodos confiables, rápidos y de bajo costo (Kremen, 1992; McGeoch, 1998; Van Dam *et al.*, 1994). Como una solución a esta problemática, se ha propuesto que los esfuerzos de conservación y manejo se enfoquen al análisis de la estructura hidromorfológica y su relación con la comunidad, que esta funcione como un indicador ambiental, bajo el supuesto de que la respuesta al cambio de las especies es representativa de un hábitat (Andelman & Fagan, 2000; Canterbury *et al.*, 2000; Caro & O'Doherty, 1999; Noss, 1990).

Algunas propuestas internacionales para prevenir el deterioro de los ecosistemas acuáticos, como la Directiva Marco del Agua (DMA, 2000), proponen que los sitios considerados potencialmente de referencia, deben localizarse en zonas de uso natural del suelo, con presencia de bosque natural, sin alteraciones en el cauce aguas arriba y sin recepción de vertederos (Bordallo & Casado, 2011).

La calidad del agua en México está regida por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000), en la cual se considera la concentración de nutrimentos y la cantidad de especies nocivas para el humano. En las últimas décadas se han incorporado indicadores biológicos alternativos que le dan mayor sensibilidad a la evaluación biológica, estos organismos son indicadores de otros grupos biológicos potencialmente nocivos para la salud humana y reducen el costo de operación del monitoreo ambiental (Foerster *et al.*, 2004). Sin embargo, la mayoría de los criterios físicos, químicos y biológicos que se aplican en México son una extrapolación de condiciones ambientales distintas a las nuestras, por lo tanto, es necesario evaluar y entender la dinámica ecológica de los ríos mexicanos para reconocer los indicadores que la califiquen.

En los últimos tres años, el grupo de Ecosistemas de Ribera de la Facultad de Ciencias ha trabajado de forma intensiva algunos afluentes de la Cuenca de México, lo que ha permitido reconocer la identidad taxonómica y descripción ambiental de algunas especies de diatomeas, algas macroscópicas, macroinvertebrados acuáticos y vegetación de ribera (Carmona & Caro-Borrero, 2016; Caro-Borrero *et al.*, 2015). Esta información ha sido empleada para justificar y planear estudios sobre la categorización y confirmación de los indicadores ecológicos que pueden aplicarse para monitorear y evaluar la calidad ambiental. Sin embargo, aún es necesario evaluar la estructura y función de la zona de ribera a través de indicadores de la calidad hidromorfológica y su relación con las condiciones y sitios de referencia. Esta información es necesaria para el desarrollo de un plan integral de manejo de agua en la región.

Preguntas de investigación

- ¿La información cartográfica (uso de suelo, clima, geología y estatus legal) de los ríos de la Cuenca de México sugieren sitios con muy buena calidad ecológica, relacionados con áreas de un estatus legal de conservación?
- ¿La validación hidromorfológica (conservación del caudal natural), físico-química (agua templada y oligotrófica) y biológica (vegetación de ribera) registrada *in situ* es congruente con la información cartográfica?
- ¿La evaluación de la calidad ecológica reconoce los elementos de perturbación ambiental más importantes originados por la actividad humana, donde la modificación del cauce afecta la estructura del río a nivel local y la contaminación del agua a nivel regional?

Objetivo general

Caracterizar los rasgos hidromorfológicos representativos de los ríos de la Cuenca de México y las zonas adyacentes del ecosistema de ribera para incorporarlos en un índice de calidad ecológica propio de regiones montañosas.

Objetivos específicos

- Determinar la tipología fluvial y los potenciales sitios de referencia de la Cuenca de México a través de un Sistema de Información Geográfica con elementos hidrológicos, geológicos y de uso de suelo.
- Establecer las condiciones de referencia hidromorfológica para evaluar la condición de la calidad ecológica en los ríos de la Cuenca de México, mediante el uso de indicadores ambientales físico-químicos, hidromorfológicos (CERA) y biológicos (vegetación de ribera).
- Proponer un índice de calidad hidromorfológica adaptado a las condiciones de la Cuenca de México.

Área de estudio

La Cuenca de México es una región que presenta vastos recursos hídricos que han persistido durante varios siglos y están sujetos a un continuo uso agropecuario, piscícola, turístico y doméstico. Los ríos de la cuenca nacen en las zonas montañosas que rodean al valle y generalmente circulan en diferentes pendientes por tramos de varios kilómetros antes de mezclarse con aguas negras que se originan de las actividades antropogénicas (Legorreta, 2009). No obstante, su importancia biológica y social, son escasos los trabajos relacionados con los ríos y las comunidades que los constituyen, lo que muestra una carencia de educación ambiental en los ciudadanos de lo que representan estos ambientes.

La Cuenca de México se ubica entre los meridianos 98-100° LO y los paralelos 19-20° LN. En su origen fue una cuenca endorreica que artificialmente fue abierta a la Cuenca del río Pánuco. Está rodeada de grandes montañas o volcanes de la Franja Volcánica Transmexicana (el Ajusco hacia el sur, la Sierra Nevada hacia el oriente y la Sierra de las Cruces hacia el poniente), hacia el norte está limitada por una sucesión de sierras y cerros (los Pitos, Tepotzotlán, Patlachique, Santa Catarina) y al sureste de la cuenca se encuentra rodeada por el Popocatepetl e Iztaccíhuatl. De esta cadena de Sierras descienden 45 ríos hoy aún existentes (Ferrusquía-Villafranca, 1993; Legorreta, 2009; Ezcurra, 1990). La cuenca tiene una superficie aproximada de 9,600 km² que abarca territorios del Estado de México (50%), Hidalgo (26.5%), Ciudad de México (13.8%), Tlaxcala (8.7%) y Puebla (1%) (Fig. 1). Del total de su área, 5,136 km² son terrenos planos, 4,464 km² son terrenos de montaña y cerca de 2,000 km² están ocupados por áreas urbanizadas (Perló & González, 2005). Desde el punto de vista biogeográfico, los ríos de la cuenca están catalogados como ríos tropicales de montaña (altitud mayor a 2,200 msnm), en donde la precipitación pluvial y la variación de temperatura a lo largo del año generan una comunidad biológica con mayor afinidad a regiones templadas o boreales (Bojorge *et al.*, 2010).

De acuerdo con Legorreta (2009) en la Ciudad de México existen 12 ríos perennes que contribuyen para llenar los lagos más importantes de la Cuenca de México, tales como, Zumpango, Guadalupe, Madín, Chalco y Nabor Carrillo; en la parte oriente, Tochac, Apan y Tecocomulco. Aún quedan manantiales modificados con infraestructura hidráulica y donde brota agua limpia como, Fuentes Brotantes, Santa Fe y Peña Pobre. Otros manantiales pertenecen a agencias privadas o se utilizan para necesidades particulares como, San Mateo Tlaltenango, Santa Rosa Xochiac, San Bartolo Ameyalco y Tlulmiac.

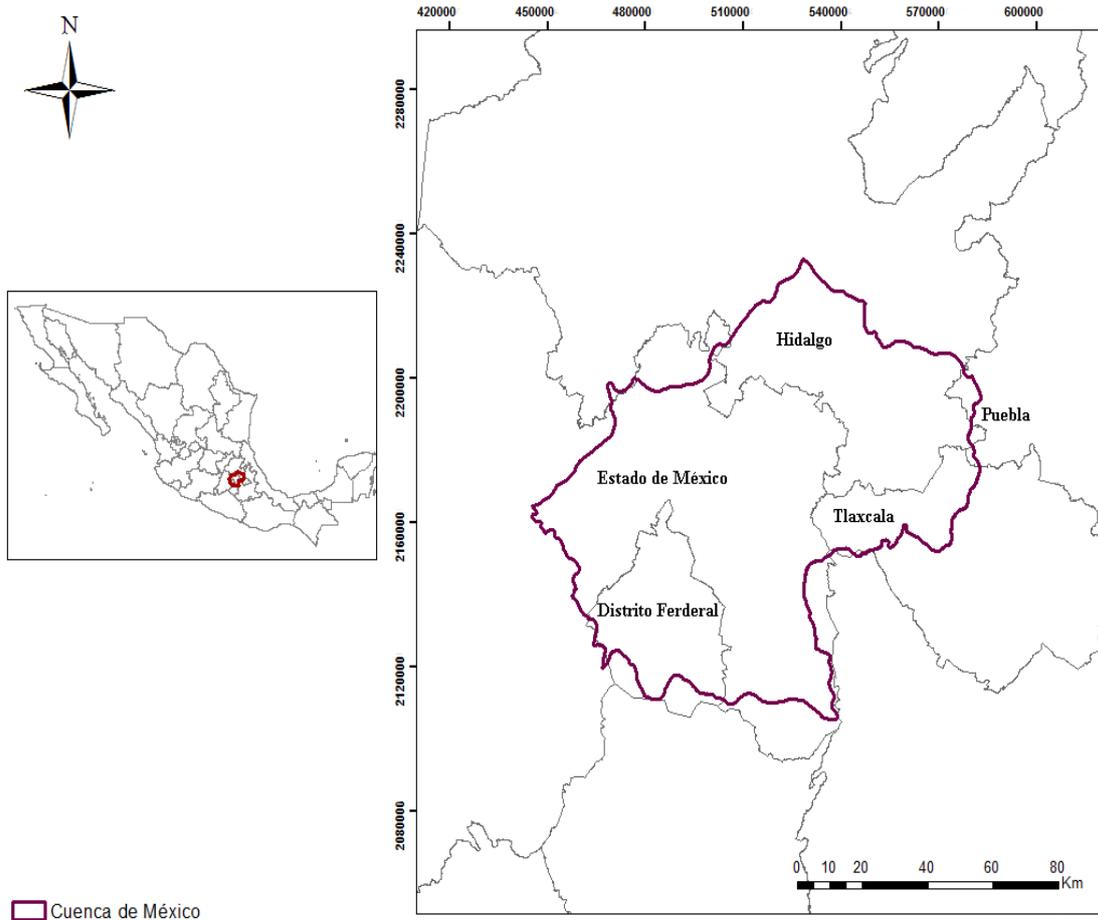


Figura 1. Ubicación de la Cuenca de México en la República Mexicana.

1. Clima

La Cuenca de México contiene diferentes climas, por ubicarse en la zona intertropical recibe una alta insolación durante todo el año, lo cual provoca que la temperatura sea alta, pero esta condición se ve modificada por la altitud y el relieve, de tal forma que en el sur se cuenta con un clima templado subhúmedo y en el centro es seco-semiárido. La temperatura promedio anual es de 12 y 18°C en los meses de marzo a mayo y menores a los 5°C en diciembre y enero (INEGI, 2013) (Fig. 2).

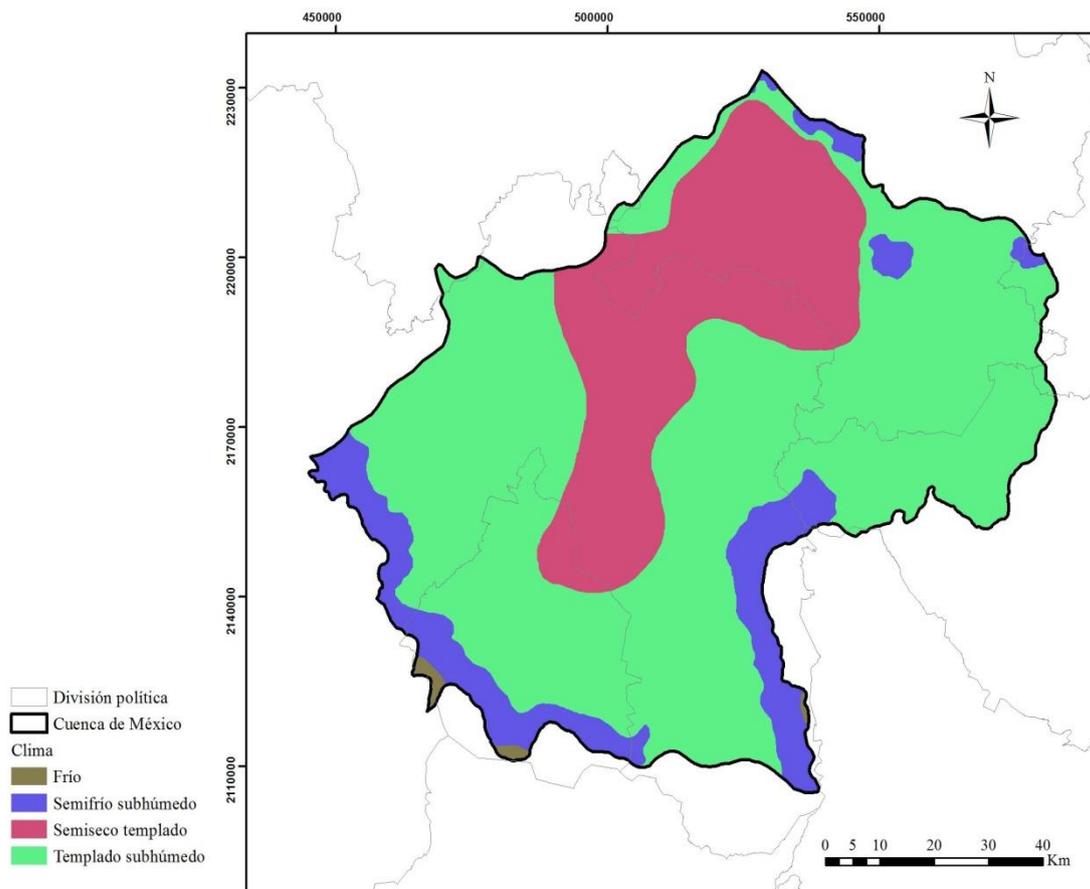


Figura 2. Clima de la Cuenca de México (INEGI, 2013).

2. Geología

La Cuenca de México forma parte de la Faja Volcánica Transmexicana, la cual se extiende en dirección Este-Oeste, atravesando la República Mexicana. Esta zona se considera una provincia fisiográfica independiente al resto de la República y se encuentra limitada por elevaciones topográficas de origen volcánico como la Sierra Guadalupe al norte, la sierra de las Cruces al poniente, la Sierra del Chichinautzin al sur y la Sierra Nevada al oriente. En relación al tipo de sedimento, se caracteriza por una composición de materiales volcánicos, intercalados con aluviones y cubiertos, en la parte central del valle, por arcillas lacustres. La mayor parte de las rocas y materiales que forman el subsuelo son permeables. Los materiales que constituyen el subsuelo corresponden a una intercalación de productos volcánicos como lavas, tobas y ceniza que incluyen materiales granulares transportados por ríos y arroyos provenientes de las partes topográficamente altas que circularon hacia los valles (Legorreta, 2009) (Fig. 3).

La cuenca de México tiene un origen geológico de roca ígnea extrusiva básica (basalto, toba básica, brecha volcánica básica), ígnea extrusiva ácida (riolita, toba riolítica y brecha volcánica), ígnea extrusiva intermedia (traquita, latita, andesita, toba intermedia), volcanoclástica y conglomerado (INEGI, 2013).

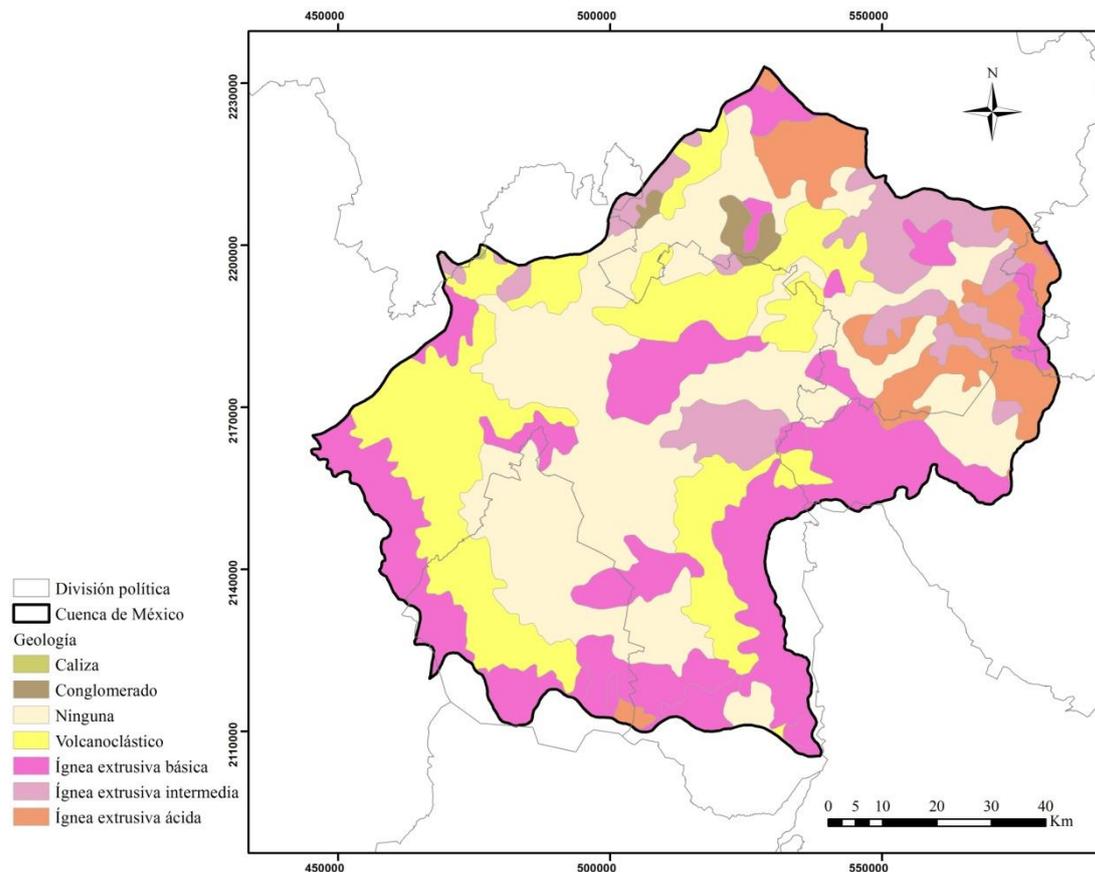


Figura 3. Geología de la Cuenca de México (INEGI, 2013).

3. Vegetación

De acuerdo con Rzedowski (2005), la Cuenca de México está representada por poseer los siguientes tipos de vegetación:

1. Bosque de *Pinus* spp., que es típico de los ecosistemas de montaña y crece entre los 2,350 y 4,000 m de altitud, con lluvias anuales de entre 700 y 1,200 mm. Entre los 2,500 y 3,100 msnm, se encuentran los bosques de *Pinus montezumae* en la parte sur de la cuenca y bosques de *Pinus rudis* en las montañas más secas del norte y del este. Por arriba de los 3,000 m crecen bosque de *Pinus hartwegii*.
2. Bosque de *Quercus* spp. (encino), se encuentra entre los 300 y 3,000 msnm, con lluvias anuales. Con frecuencia los bosques de pino y encino, crecen juntos formando comunidades mixtas. Los encinos tienen entre cinco y 12 m de altura. Por debajo de los 2,500 m dominan *Quercus obtusata* y *Quercus laeta*; entre los 2,500 y los 2,800 m, domina *Q. rugosa*. Por arriba de los 2,800 m domina *Q. laurina* y al norte de la cuenca son comunes los bosques bajos de *Q. microphylla* y de *Q. gregii*.
3. Bosque de *Juniperus* spp. (enebros), son arbustos o árboles de menos de 6 m de altura, forman bosques bajos y ralos, con abundante vegetación herbácea. Estos bosques son comunes en las partes norte, este y noreste de la cuenca, entre los

2,400 y los 2,800 m de altitud. Se desarrollan sobre laderas o planicies semiáridas, con lluvias anuales de entre 600 y 800 mm.

4. Matorral de encinos chaparros. Esta comunidad está formada por matorrales dominadas por *Quercus microphylla*, forma una cubierta densa de arbustos bajos (40 a 80 cm de altura). Este tipo de bosque se encuentra principalmente al noreste de la cuenca, en áreas semiáridas con 700 y 900 mm de lluvia media anual.
5. Pastizales. La principal formación de pastizales de la cuenca de México son los de *Hilaria cenchroides*, comunes al pie de la Sierra Nevada. Esta comunidad se ubica entre los 2,300 y 2,700 m de altitud, con precipitaciones anuales de 600 y 700 mm. En las planicies del centro y norte de la cuenca, a 2,300 y 2,400 m de altitud y sobre áreas fuertemente perturbadas, se desarrolla una comunidad de pastizal en la que dominan gramíneas anuales (*Aristida adscensionis* y *Bouteloua simplex*). A más de los 4,000 msnm, por encima del bosque de *Pinus hartwegii*, se encuentran los pastizales de *Muhlenbergia* y *Festuca*. Estos pastos o zacatonos, forman matas erectas de 60 a 120 cm de altura.
6. Matorrales xerófilos. Este tipo de vegetación está compuesta por varias comunidades arbustivas y son frecuentes en la parte norte de la cuenca, donde las precipitaciones son más pobres. En general ocupan partes bajas de la cuenca, entre 2,250 y 2,700 msnm de altitud, en áreas de precipitación media anual inferior a los 700 mm. En la Sierra de Guadalupe, en el centro de la cuenca, quedan restos del matorral *Eisenhardtia polystachya*, que está desapareciendo por la presión antropogénica. Al sur de la cuenca, domina un tipo de vegetación autóctona de *Senecio praecox*.
7. Vegetación halófila. Esta vegetación domina algunas partes más bajas de la cuenca, sobre los lechos de los antiguos lagos. Es particularmente común el lecho seco del antiguo lago de Texcoco. Este tipo de vegetación ocupaba los márgenes del lago, pero con la construcción del drenaje de la cuenca y el secado de los lagos, se ha extendido a las partes más bajas.
8. Vegetación acuática. Las plantas acuáticas ocupaban grandes extensiones de la cuenca de México, sin embargo, el secado de los lagos ha reducido su extensión a una fracción pequeña. La reducida vegetación acuática que prevalece en la cuenca, se encuentra en el Vaso de Texcoco, en el lago de Zumpango, en las chinampas de Xochimilco y en las partes bajas de lo que era el lago de Chalco. En Texcoco y Zumpango pueden observarse tulares, dominados por *Typha latifolia* (tule) y *Scirpus validus*.

Materiales y Método

La evaluación de la calidad hidromorfológica se estimó a partir de la información cartográfica y su validación en campo. La integración de ambas aproximaciones permitió estimar las potenciales condiciones de referencia en los ríos de la Cuenca de México.

1. Información cartográfica

Se obtuvo la siguiente información cartográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en formato shapefile (.shape) de la Serie V (2013): cartas topográficas escala 1: 250,000 (vegetación y uso de suelo, cuerpos de agua), red hidrológica (1:50,000) y un Modelo Digital de Elevación (1:50,000). Del portal de geoinformación del Consejo Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP, 2016), se obtuvo el shapefile de los polígonos de las Área Natural Protegida (ANP). Esta información se procesó en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para delimitar el área de estudio, seleccionar los sitios de muestreo para su evaluación hidromorfológica y posterior validación de la hidrología, geología, uso de suelo y vegetación de la Cuenca de México.

a. Construcción cartográfica del área de estudio

La Cuenca de México quedó delimitada de acuerdo con un Modelo Digital de Elevación (MDE), el cual determinó el área de captación de agua a partir del trazado de cauces y parteaguas (Bocco, 2007) (Fig. 4).

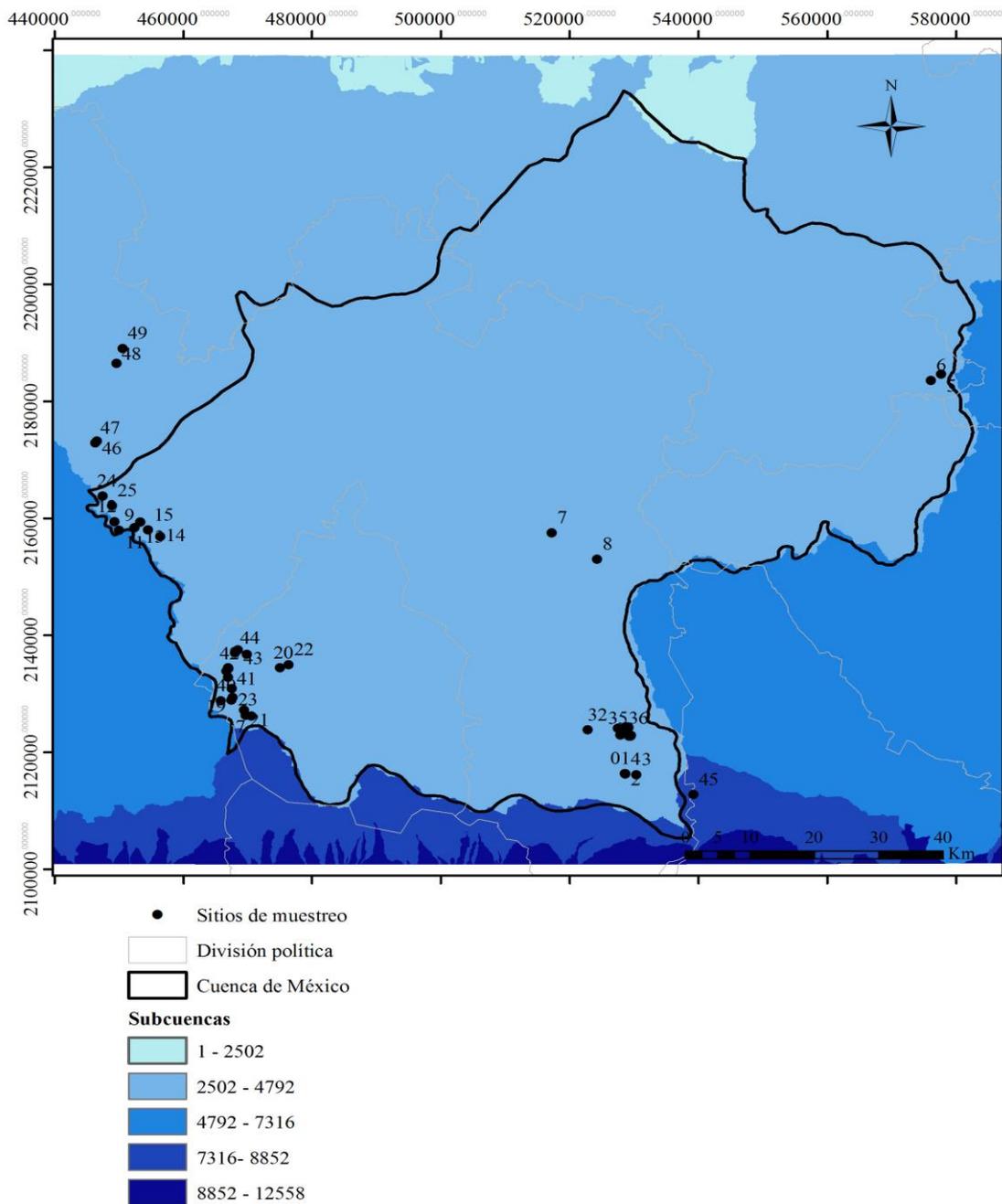


Figura 4. Modelo de subcuencas, calculado con el SIG a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) de la Cuenca de México.

b. Ubicación de subcuencas y selección de sitios de muestreo

Se evaluaron 50 sitios ubicados en 13 subcuencas (Tabla 4), de las cuales, tres estuvieron ubicadas fuera de los límites de la Cuenca de México y se usaron como referente de las cabeceras que se originan en las sierras vecinas a la cuenca ya que tuvieron características afines a la porción alta de los ríos de la Cuenca de México. Los sitios de muestreo representaron las cabeceras, zona media y baja de los ríos (Fig. 5), además de que estuvieran ubicados en zonas con uso de suelo y vegetación natural. El

periodo de muestreo fue de 2012 a 2015 en las tres estaciones del año más contrastantes del año: frío-seco (diciembre a febrero), cálido-seco (mayo y principios de junio) y la temporada de lluvias (julio a noviembre) (García, 2004).

La ubicación de las 13 subcuencas y sus sitios de muestreo fueron seleccionados de acuerdo: (a) el gradiente altitudinal (Fig. 5); (b) su ubicación en los polígonos de las zonas protegidas, ya fuera Área Natural Protegida (ANP) o Suelo de Conservación de la Ciudad de México; y (c) la distancia a los elementos de perturbación humana (longitud en km).

Tabla 4. Ubicación geográfica de las localidades muestreadas en cada subcuenca. Las coordenadas se indican en UTM (Universal Transversa de Mercator). El número de la localidad sirve para su identificación en las Figuras 6 y 7. Las subcuencas sombreadas están fuera del límite de la Cuenca de México.

Subcuenca	Localidad	X	Y	Altitud
Ameca-Canal Nacional	0. La Castañeda I	528569	2116392	2647
	1. La Castañeda II	528570	2116393	2625
	2. La Castañeda III	528571	2116394	2625
	3. La Castañeda IV	530313	2116217	2900
	4. Las Castañeda	528577	2116328	2608
Coatlaco	5. Rancho nuevo I	577633	2184660	2895
	6. Rancho nuevo II	576054	2183592	2799
Coaxacoaco	7. Miraflores	517194	2157539	2345
	8. Santa Catarina	524219	2153051	2855
Cuautitlán	9. Los Organillos	450047	2157961	3378
	10. Manantial Capoxi	453353	2159376	3177
	11. Manantial San Pedro	452496	2158405	3305
	12. Nacimiento Presa Iturbide	449337	2159454	3334
	13. Río Capoxi	453353	2159376	3183
La Colmena	14. La Caldera	456431	2156877	3124
	15. Xopachi	454589	2158025	2867
Las Regaderas	16. Monte Alegre (alto I)	469667	2126335	3596
	17. Monte Alegre (bajo II)	470552	2126234	3378
Magdalena-Eslava	18. Chautitle alto	465814	2128830	3357
	19. Chautitle cañada	467486	2128992	3350
	20. Confluencia Eslava-Magdalena	475005	2134466	2465
	21. Nacimiento Eslava	469433	2127230	3261
	22. Santa Teresa	476363	2135027	2492
	23. Truchero alto Magdalena	467653	2129429	3278
San Ildefonso	24. Las Palomas	447530	2163849	3417
	25. Truchero Don Álvaro	449009	2162189	3236

Tabla 4. Continuación

Subcuenca	¹ Localidad	X	Y	Altitud
San Rafael-Tlalmanalco	26. Agua dulce	529397	2122790	2802
	27. Canal San Rafael	529192	2122808	2865
	28. Cascada Compañía bajo	527464	2124108	2676
	29. Cascada Compañía	529085	2124240	2847
	30. Cosamala alto	528830	2124375	2803
	31. Cosamala bajo	528696	2124378	2757
	32. Estación UAM	522740	2123868	2429
	33. Inicio Canal San Rafael	529493	2122921	2895
	34. San Rafael	527861	2122973	3144
	35. San Rafael Canal	528295	2123298	2780
Santo Desierto	36. San Rafael Vereda	528295	2123298	2780
	37. Arroyo Desierto de los leones	466967	2134486	3014
	38. Convento desierto de los leones	466950	2132812	2925
	39. La Capilla Santa Rosa	469874	2136765	2840
	40. Santa Rosa Alto	466689	2133943	3050
	41. Santa Rosa Manantial	467507	2130913	3410
	42. Santa Rosa Medio a	466991	2134334	3014
	43. Truchero Valle de Monjas	468473	2137533	2700
Apatlaco	44. Valle de Monjas, Escuela	468011	2137020	2777
	45. Apatlaco	539238	2112826	3582
Río Frío	46. El Llano alto	446626	2173233	2840
	47. El Llano bajo	446366	2172897	2845
San Rafael	48. La Cabañita	449666	2186468	2413
	49. La Planta	450601	2189052	2358

¹La numeración de las localidades comienza en “0”, porque el SIG aplicó automáticamente esta numeración a la base de datos.

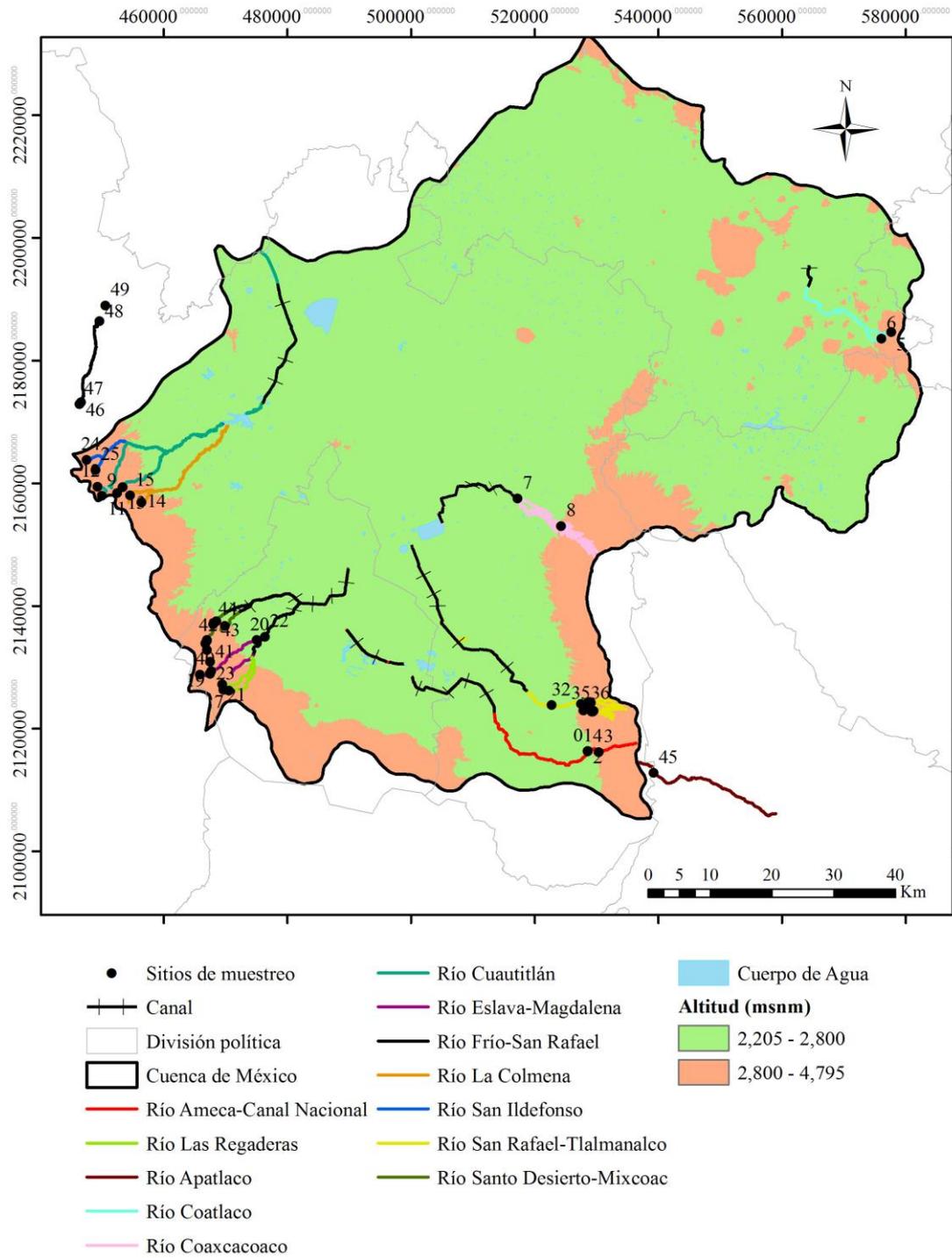


Figura 5. Ubicación de los sitios de muestreo en un gradiente altitudinal que se obtuvo a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) del territorio de la Cuenca de México. Los números indican el nombre de los sitios descritos en la tabla 2.

2. Validación de la información cartográfica

a. Evaluación de los parámetros físico-químicos

En cada sitio de muestreo se registraron *in situ* los parámetros físico-químicos del agua: iones de Hidrógeno (pH), conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y temperatura ($^{\circ}\text{C}$) con un medidor YSI-85; el oxígeno disuelto (mg L^{-1}) y porcentaje de saturación de oxígeno, con una sonda multiparamétrica Hach®.

Para determinar la química del agua, se tomó 1L de agua del sitio, se filtró con filtros de nitrocelulosa Millipore de 0.45 y 0.22 μm de poro y el agua se almacenó en frascos, durante su transporte se mantuvo en frío para su posterior análisis. Se determinó la concentración de nitrito, nitrato, amonio, nitrógeno inorgánico disuelto (NID) y fósforo reactivo soluble (FRS) con un espectrofotómetro Hach 3000, con una réplica de cada prueba (APHA, 2005).

b. Diversidad vegetal

La recolección de la vegetación de ribera se realizó dentro de un transecto de 10 m de longitud al cauce y 10 m perpendiculares. La recolecta se hizo de forma aleatoria en los distintos sustratos donde se observaron crecimientos a lo largo del transecto. En cada unidad muestral se estimó la abundancia absoluta, el estrato arbóreo y forma de vida al que pertenece (Rzedowski & Calderón, 2005; Espinosa & Sarukhán, 1997; Ávila- Akerberg, 2010).

Para estimar las diferencias de diversidad entre los sitios de estudio se realizó un Análisis de diversidad Shannon-Wiener (H') con la siguiente fórmula:

$$H' = \sum p_i \ln p_i$$

p = proporción relativa de individuos de las especies i con respecto al total N ($p = ni/N$).

c. Evaluación de la calidad hidromorfológica

La evaluación de la calidad hidromorfológica para el reconocimiento de los potenciales sitios de referencia de la Cuenca de México, se hizo en una sección longitudinal de 50 m aproximadamente en cada sitio de muestreo (Encalada *et al.*, 2011; Munné *et al.*, 2003). Con la finalidad de validar lo establecido por el Índice de Calidad Ecológica de los Ríos Altoandinos (CERA, Encalada *et al.*, 2011) e Índice de Calidad del Bosque de Ribera (QBR, por sus siglas en catalán, Munné *et al.*, 2003), con las características de los afluentes de la Cuenca de México.

Se eligieron estos dos índices para la evaluación de la calidad ecológica porque fueron desarrollados para ecosistemas de alta montaña con condiciones similares a las de la Cuenca de México. El índice CERA, se desarrolló para los bosques altoandinos (2,500-3,000 msnm) y bajos (2,000-2,500 msnm) que se caracterizan por una cobertura vegetal que se desarrolla en pendientes pronunciadas, precipitación abundante, velocidad de corriente alta, temperaturas bajas, alta oxigenación (Encalada *et al.*, 2011).

La evaluación CERA se hizo con una hoja de datos preestablecida por Encalada *et al.* (2011), en la cual se evalúan 22 parámetros, divididos en cuatro apartados (cuenca, hidrología, tramo y lecho). Cada apartado tiene un valor de 30 puntos, en total 120 puntos y para ser considerado sitio de referencia se requiere >100 puntos. La evaluación se divide en cinco clases de calidad hidromorfológica: muy buena (>96), buena (76-95), media (51-75), mala (26-50) y pésima (<25) (Tabla 2).

Tabla 2. Aspectos que evalúa el Índice de calidad hidromorfológica (CERA) dividido en sus cuatro apartados. Cada apartado tiene un valor de 25 puntos (tomado de Encalada *et al.*, 2011).

Apartado	Aspectos evaluados
Cuenca	Cobertura de especies introducidas Porcentaje de cobertura de pastos artificiales ¹ Porcentaje de cobertura de usos urbanos Ausencia de vegetación nativa Explotación ganadera intensiva
Hidrología	Presencia de grandes presas aguas arriba del lugar Derivaciones de agua para hidroeléctricas Trasvases a otras cuencas Derivaciones para usos en agricultura y ganadería Derivaciones para uso en minería Derivaciones para uso urbano
Tramo	Canalización del río por infraestructuras rígidas Canalización del río por terraplenes Presencia de cultivos y pasto en la llanura de inundación Infraestructuras laterales Falta de cubierta de la zona de ribera Cubierta de la zona de ribera
Lecho	Sustrato del lecho artificial Infraestructuras transversales Presencia de efluentes directos al río Contaminación orgánica evidente Presencia de basuras y escombros

¹Los pastos artificiales, fueron evaluados como pastos introducidos.

Se evaluaron 15 sitios de muestreo con el índice QBR (Munné *et al.*, 2003), debido a que no se contaba con una guía detallada de las especies vegetales nativas e introducidas de la Cuenca de México, para realizar la evaluación de la vegetación de ribera. Esta evaluación se utilizó para la calibración del índice de calidad hidromorfológica con las condiciones de referencia propias de la Cuenca de México.

El índice QBR está dividido en cuatro apartados con un valor entre 0 y 25 puntos, que sumados dan un total de 100 puntos (Tabla 3). Está clasificado en cinco categorías para la calidad del bosque de ribera: >95 puntos se considera una ribera sin alteraciones o en estado natural; 75-95 puntos, la ribera está ligeramente perturbada y la calidad es buena; 55-70 puntos, la ribera tiene una alteración importante y la calidad es aceptable; 30-50 puntos, la ribera tiene una alteración fuerte y la calidad es mala y 0-25, la degradación de la ribera es extrema y la calidad pésima.

Tabla 3. Aspectos que evalúa el Índice de Calidad del Bosque de Ribera (QBR, pos sus siglas en catalán) (tomado de Munné *et al.*, 2003).

Apartados	Parámetros evaluados
Grado de cubierta de la zona de ribera	<ul style="list-style-type: none"> • Se cuentan los matorrales y arbustos, pero no los pastos anuales. • Se valora la calidad de la conectividad de la ribera con el ecosistema adyacente.
Estructura de la cubierta	<ul style="list-style-type: none"> • Se mide la naturalidad de la estructura de la ribera.
Naturalidad y complejidad de la cubierta	<ul style="list-style-type: none"> • Se toma en cuenta la tipología de la geomorfología y se valora la naturalidad y complejidad de la cubierta vegetal con relación a las especies nativas que se deberían encontrar en la zona sin alteraciones antropogénicas. • Ribera Cerrada: presentan baja potencialidad para presentar riberas extensas, generalmente son las zonas de cabecera. • Zonas medias de los ríos: potencialidad intermedia para tener zonas con abundante vegetación. • Zonas bajas: riberas más extensas y mayor diversidad específica.
Grado de alteración del canal fluvial	<ul style="list-style-type: none"> • Registrar las modificaciones al canal: • Sobre el lecho del río, reduciendo el espacio del cauce, pero sin presencia de infraestructuras. • Presencia de infraestructuras rígidas que sean discontinuas y paralelas al lecho del río, modificando su canal • Canalizaciones del tramo alterando orillas o toda la ribera.

El reconocimiento de la naturalidad de la vegetación de ribera se basó en los trabajos previos de Rzedowski & Calderón (2005), Espinosa & Sarukhán (1997) y Ávila-Akerberg (2010).

3. Análisis estadístico

Para reconocer los grupos de sitios con calidad hidromorfológica y las variables físico-químicas similares, se hizo un Análisis de Clasificación Jerárquica (ACJ). Los datos se estandarizaron con el algoritmo $\ln(x+1)$ y se hizo el CAJ con el programa XLSTAT (XLSTAT, 2013).

Cada sitio quedó representado por un promedio de las evaluaciones que se hicieron en las distintas estaciones del año que se colectaron y se dividieron en dos grupos de acuerdo con el gradiente altitudinal (cuenca alta $>2,800$ msnm y cuenca baja $<2,800$ msnm) y la calidad hidromorfológica se tomó separada en los cuatro aspectos que evalúa (Tabla 2). La división de los sitios se hizo debido a que los resultados de la evaluación hidromorfológica mostraron que los sitios que están en la zona alta tienen menor perturbación que los sitios ubicados en la zona baja (urbanizada y con desarrollo de actividades antropogénicas).

4. Propuesta de un Índice de Calidad Hidromorfológica para los ríos de la Cuenca de México

A partir de los grupos de sitios con los rasgos hidromorfológicos y las variables físico-químicas, se determinaron las condiciones de referencia hidromorfológica y las actividades antropogénicas que la afectan. El análisis quedó integrado en la propuesta de un índice que incluye la calidad hidromorfológica del ecosistema de ribera para los ríos de la Cuenca de México.

5. Actividades potenciales de riesgo en los ríos de la Cuenca de México

Con el uso de Google Earth (2016), se localizaron las actividades que potencialmente ponen en riesgo los potenciales sitios de referencia, las actividades identificadas fueron zonas de cultivo, de ganadería, presas y asentamientos humanos que pudieron ser observados con este programa.

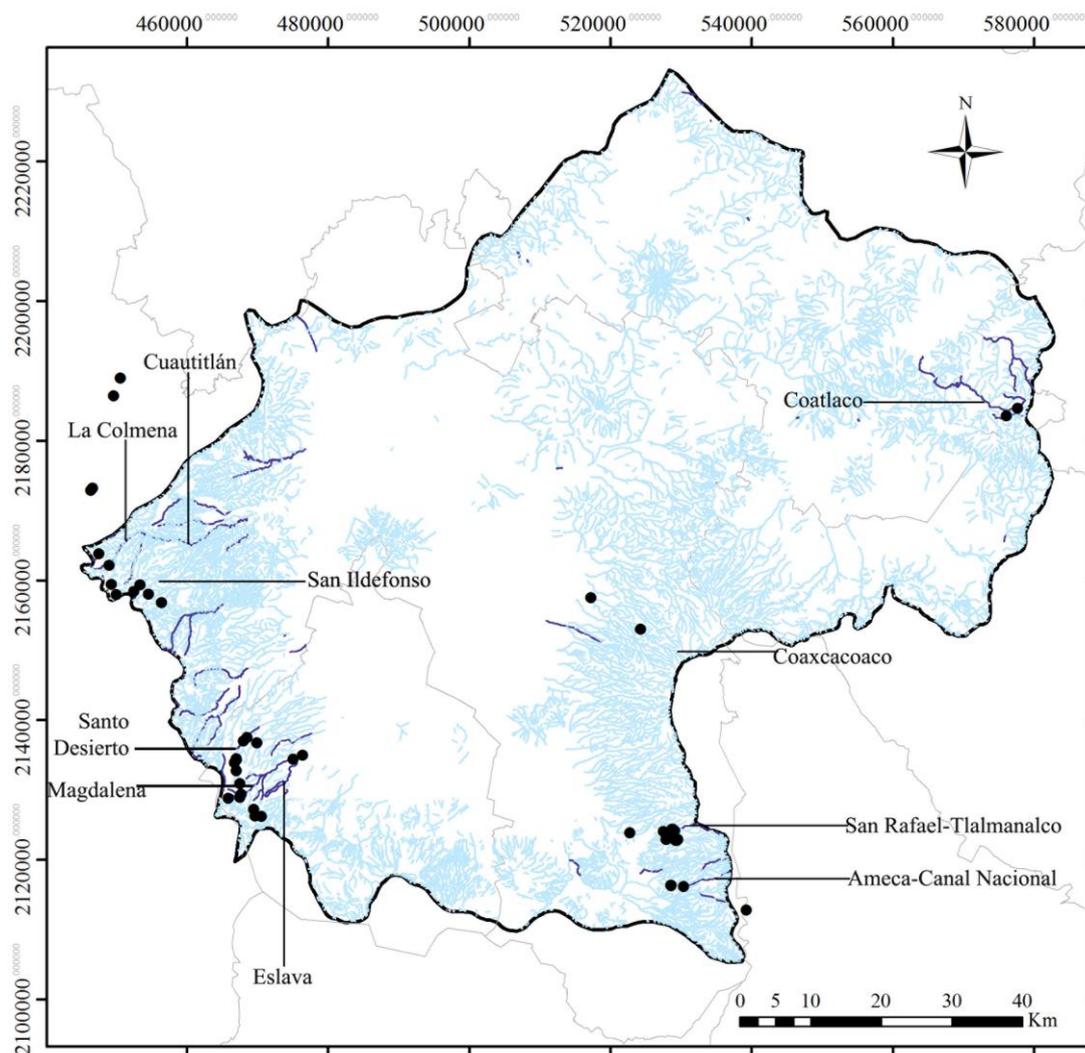
Resultados

1. Actualización de la condición de permanencia de los ríos de la Cuenca de México

La carta hidrológica elaborada por INEGI (2013), mostró una abundante red de distribución hidrológica en la cuenca y una clasificación de acuerdo con el estado de permanencia de los escurrimientos. De los 13 ríos muestreados en este trabajo, sólo cinco estuvieron representados con una condición perenne: Santo Desierto, Magdalena y la zona alta de los ríos Ameca-Canal Nacional, San Rafael y Cuautitlán. El resto estuvieron señalados en condición intermitente (Fig. 6 y Tabla 5).

Tabla 5. Condición de permanencia de los 13 ríos muestreados en la Cuenca de México de acuerdo con INEGI (2013) y de acuerdo con la validación *in situ* durante los muestreos que se hicieron durante época de lluvias y de secas. Los tres ríos sombreados están fuera del límite de la cuenca.

Subcuenca	Condición (INEGI, 2013)	Condición validada <i>in situ</i>	Aforo promedio ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
Ameca-Canal Nacional	Perenne (tramo de la zona alta)	Perenne	0.27
Coatlaco	Intermitente	Intermitente (por verificar)	0.02
Coaxacoaco	Intermitente	Perenne	0.24
Cuautitlán	Perenne (cuenca alta)	Perenne	0.01
La Colmena	Intermitente	Perenne	0.03
Las Regaderas	Intermitente	Perenne	0.006
Magdalena- Eslava	Perenne	Perenne	0.33
San Ildefonso	Intermitente	Perenne	0.06
San Rafael-Tlalmanalco	Perenne (tramo de la zona alta)	Perenne	0.24
Santo Desierto	Perenne	Perenne	0.13
Apatlaco	Intermitente	Perenne	0.98
Río Frío	Intermitente	Perenne	0.31
San Rafael	Intermitente	Perenne	1.03



- Sitios de muestreo
- División política
- Cuenca de México
- Condición de los ríos**
- Intermitente
- Perenne

Figura 6. Condición de permanencia de los ríos de la Cuenca de México de acuerdo con la carta hidrológica de INEGI (2013).

2. Ubicación de los ríos en Áreas Naturales Protegidas (ANP) y gradiente altitudinal de la Cuenca de México

Las subcuencas del Estado de México con sitios ubicados en un Área Natural Protegida (ANP) fueron, Coaxcacoaco, Cuautitlán, La Colmena, San Rafael, San Idefonso, San Rafael-Tlalmanalco, Apatlaco y Río Frío. La subcuenca Ameca-Canal Nacional tuvo un tramo dentro de un ANP (por arriba de los 3,500 msnm) pero los sitios de muestreo estuvieron ubicados por debajo de los 2,800 msnm. La subcuenca del río Coatlaco no estuvo ubicada dentro de un ANP. Las subcuencas ubicadas en el suelo de conservación de la Ciudad de México fueron, Magdalena-Eslava, Santo Desierto y Las Regaderas. La Ciudad de México está dividida en dos zonas administrativas, el suelo de conservación y la zona urbana (GDF, 2012), no existe un decreto de ANP federal, pero se consideró zona protegida debido a que funciona como instrumento de conservación al regular cualquier actividad diferente de la conservación dentro del suelo de conservación de la Ciudad de México (Tabla 6 y Fig. 7).

La Cuenca de México tuvo un rango altitudinal de 2,205 a 4,795 msnm y se dividió en cuenca alta (4,795-2,800 msnm) y baja (2,800-2,205 msnm). El 92 % de los sitios estuvieron ubicados en la cuenca alta y 6% en la cuenca baja (Tabla 6).

Tabla 6. Ubicación de los sitios de muestreo de acuerdo al gradiente altitudinal en cuenca alta o baja y su ubicación en un ANP o en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México. Las subcuencas sombreadas se encuentran fuera del límite de la Cuenca de México.

Subcuenca	No. de sitios muestreados	Sitios ubicados en zona protegida	Número de sitios por gradiente altitudinal	
			Alta (4,795-2,800 msnm)	Baja (2,800-2,205 msnm)
Ameca- Canal Nacional	5	-	5	-
Coatlaco	2	-	2	-
Coaxcacoaco	2	1	1	1
Cuautitlán	5	5	5	-
La Colmena	2	2	2	-
Las Regaderas	2	2	2	-
Magdalena-Eslava	6	4	4	2
San Idefonso	2	2	2	-
Santo Desierto	8	8	8	-
San Rafael-Tlalmanalco	11	10	10	1
Río Frío	2	1	2	-
Apatlaco	1	1	1	-
San Rafael	2	-	2	-
TOTAL	50	36	46	4

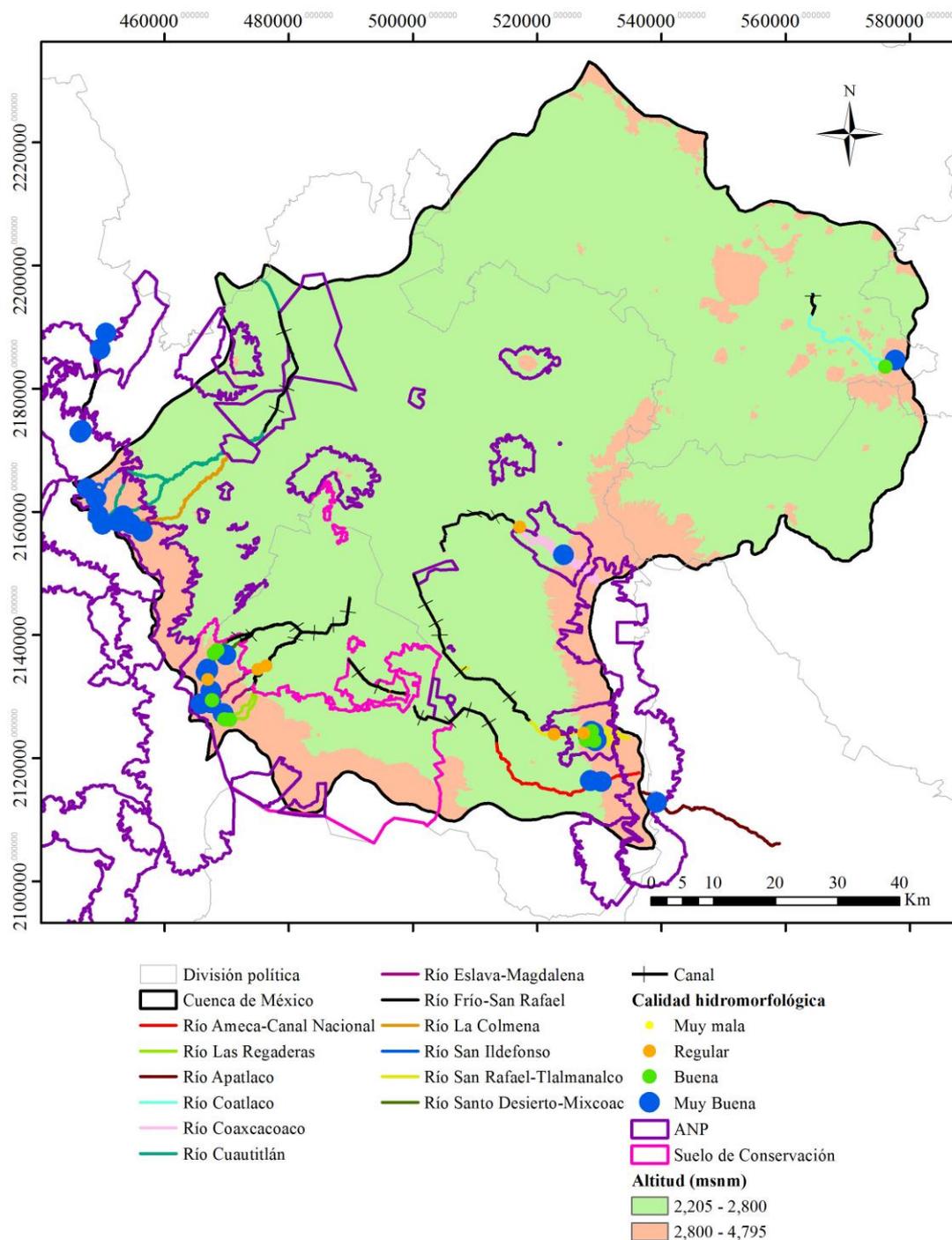


Figura 7. Ubicación de los ríos y los puntos de muestreo dentro de las Áreas Naturales Protegidas (ANP). El gradiente de colores sólidos corresponde a la zonación altitudinal de la cuenca alta (rojo) y baja (verde).

Dado que existen diferentes estatus legales de conservación en las cuencas, los ríos (Fig. 7 y Tabla 7) quedaron definidos como, tramo natural: dentro o fuera de una zona de conservación y tramo canalizado: dentro o fuera de una zona de conservación.

Los ríos Cuautitlán, La Colmena, Las Regaderas, San Ildefonso, Apatlaco y Río Frío-San Rafael, tuvieron su longitud total en estado natural (Tabla 7). Los ríos con mayor proporción en estado natural fueron, Amecameca-Canal Nacional (63% en estado natural y 37% canalizado); Coatlaco (85% en estado natural y 15% canalizado); Magdalena (61% en estado natural y 39% canalizado) y Eslava (61% en estado natural y 39 % canalizado). Los ríos que tuvieron menor proporción en estado natural fueron, Coaxcacoaco (49% en estado natural y 51% canalizado) y Santo Desierto (23% en estado natural y 77% canalizados) y San Rafael-Tlalmanalco (37 % en estado natural y 63 % canalizado).

Los 13 ríos muestreados en la Cuenca de México sumaron una longitud total de 385.6 km, de los cuales 127.8 km estuvieron en estado natural y en una zona protegida, mientras que 113.9 km estuvieron canalizados y de estos, 9.2 km fueron intervenciones en zonas protegidas (Tabla 7).

Tabla 7. Longitud de los ríos estudiados en la Cuenca de México, la cual se dividió de acuerdo con la ubicación de sus tramos dentro de un ANP o del suelo de conservación de la Ciudad de México. Las subcuencas sombreadas están fuera del límite de la Cuenca de México.

Subcuenca/río	Longitud total (km)	Tramo canalizado (km)			Tramo natural (km)		
		Fuera de una zona protegida	En zona protegida	Total	En zona protegida	Fuera de una zona protegida	Total
Ameca-Canal Nacional	51.1	29.9	2	32	4.8	14.1	19
Coatlaco	25.1	21.3	-	21.3	-	3.8	3.8
Coaxcacoaco	37.5	1.8	16.589	18.4	-	-	19
Cuautitlán	64.2	28.9	41.878	64.2	-	-	-
La Colmena	27.1	22.7	4.386	21.1	-	-	-
Las Regaderas	10.6	0.64	10.038	10.6	-	-	-
La Magdalena	21.7	-	13.27	13.2	-	8.4	8.4
Eslava	8.7	-	5.341	5.3	-	3.3	3.3
San Ildefonso	8.4	1.8	6.664	8.4	-	-	-
San Rafael-Tlalmanalco	53.4	7.4	12.099	19.5	-	33.8	33.8
Santo Desierto-Mixcoac	34.2	-	7.918	7.9	4.3	21.9	26.2
Apatlaco	27.2	23.3	3.8429	27.2	-	-	-
Río Frío-San Rafael	15.9	12.1	3.764	15.9			
TOTAL	385.6	150.4	127.8	265.7	9.2	85.6	113.9

3. Validación de la información cartográfica

a. Condición de los ríos de la Cuenca de México y su calidad hidromorfológica

La validación de la información cartográfica para la condición de los ríos, mostró que 12 de los 13 ríos muestreados (excepto el río Coatlaco que falta muestrear en época

de secas para confirmar su condición), son perennes. Esta condición se asignó debido al flujo de agua tanto en época de secas y de lluvias que se ha observado a lo largo de tres años de muestreo (Fig. 8).

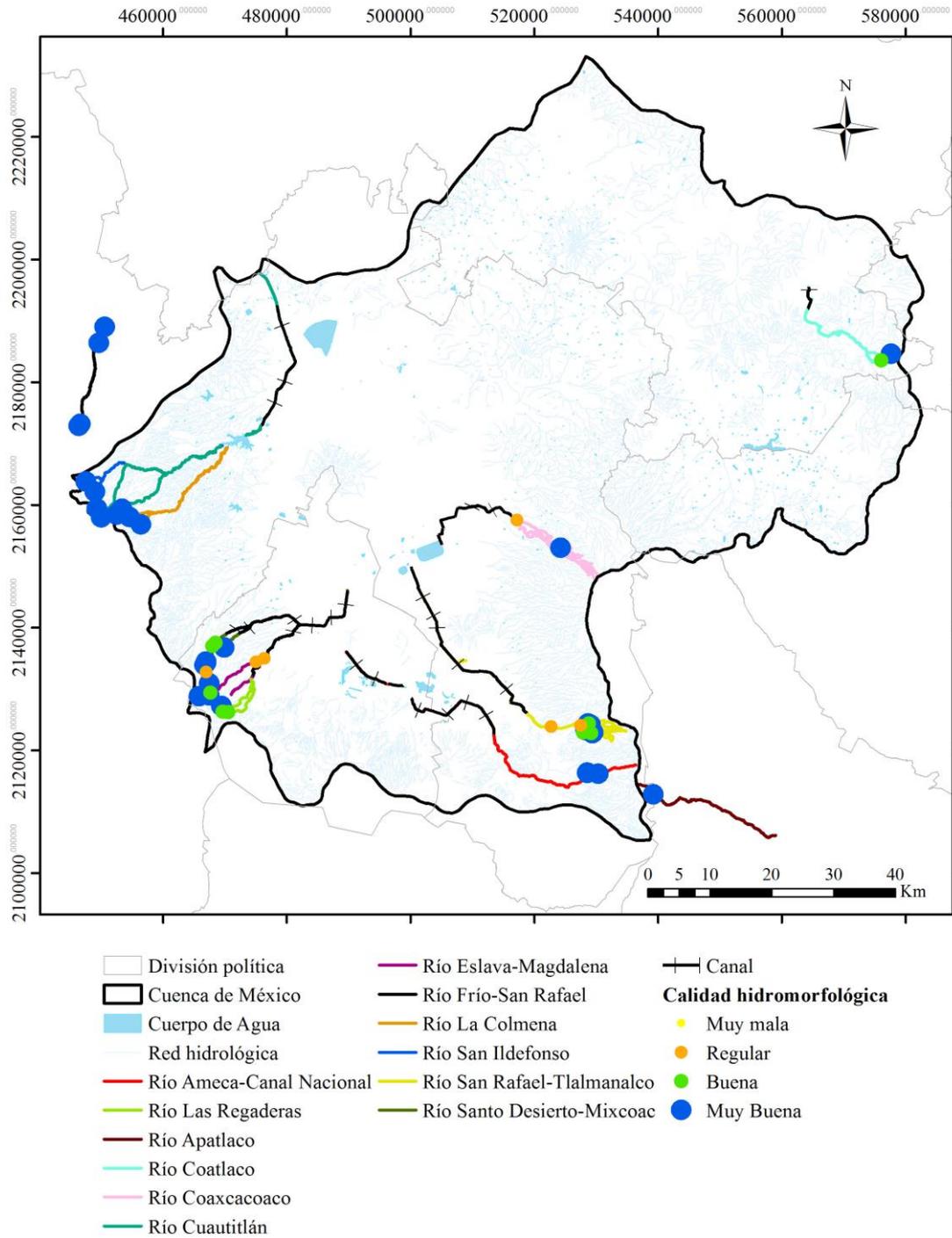


Figura 8. Red hidrológica de la Cuenca de México, los puntos de muestreo están señalados de acuerdo con su calidad hidromorfológica evaluada con el índice CERA.

b. Vegetación y uso de suelo de la Cuenca de México y su calidad hidromorfológica

De acuerdo con INEGI (2013), el 70% del suelo de la Cuenca de México se utiliza para desarrollar actividades primarias (industria pecuaria, agrícola y forestal), el 20% del suelo es zona urbana que abarca la mayor parte del territorio de la Ciudad de México y algunas zonas del Estado de México. La vegetación está representada por bosques de *Pinus*, *Abies* y mixto (Fig. 9).

La evaluación de la calidad hidromorfológica mostró que los sitios ubicados en zonas donde la vegetación conserva su naturalidad o donde hay poca perturbación, tienen calidad hidromorfológica de regular a muy buena. Estos sitios a su vez están ubicados en la cuenca alta (arriba de los 2,800 msnm) y la calidad hidromorfológica disminuye mientras la altitud disminuye, asimismo cuando el uso de suelo cambia a una zona urbanizada o a zonas para el desarrollo de industrias o la ganadería, agricultura y piscícola (Fig. 9).

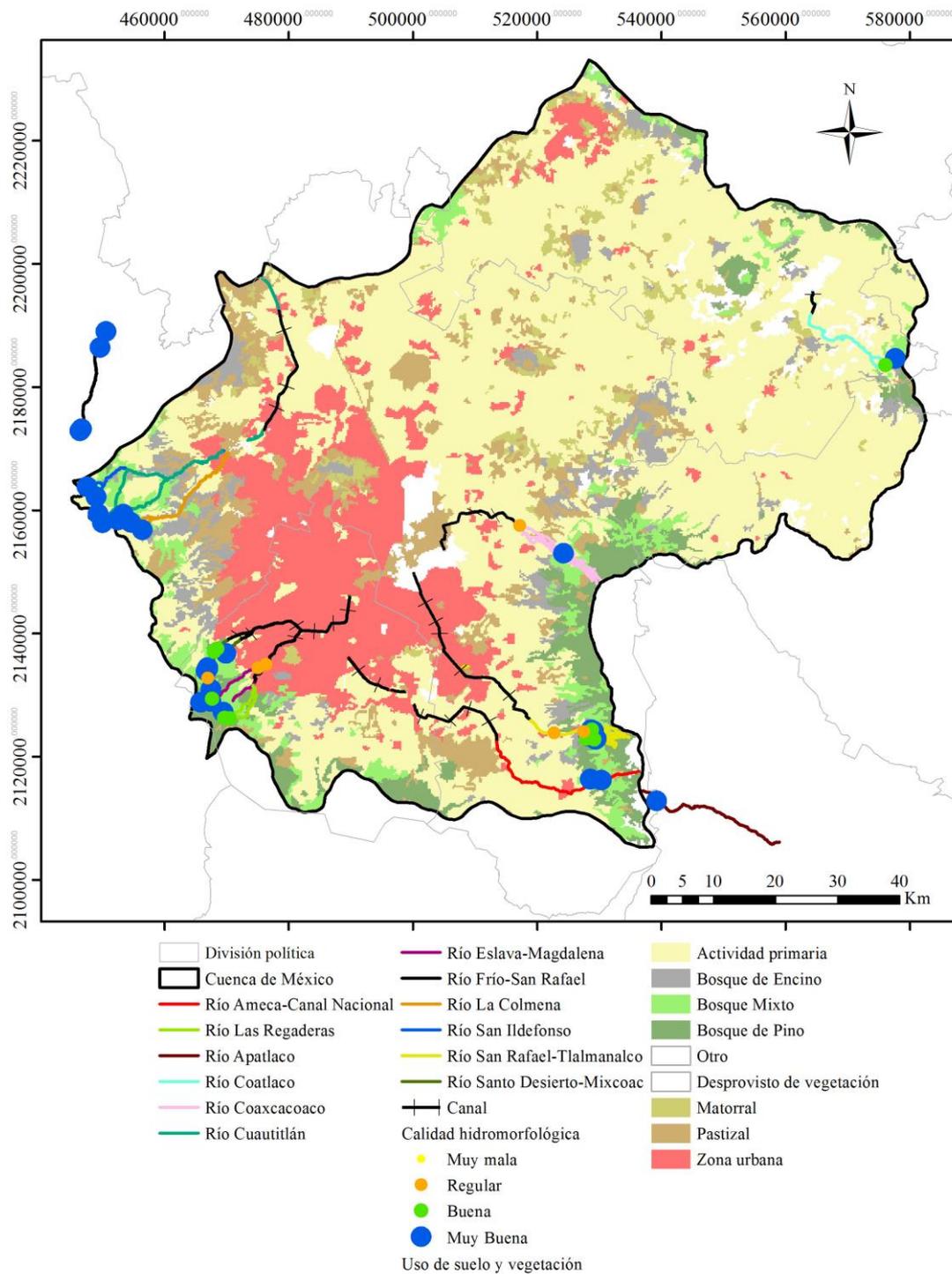


Figura 9. Uso de suelo y vegetación en la Cuenca de México. Los puntos de muestreo están indicados con su calidad hidromorfológica (CERA).

c. Calidad hidromorfológica y caracterización biológica de los ríos de la Cuenca de México

La integración cartográfica y la validación hidromorfológica y biológica en campo, permitió hacer una evaluación actualizada del estado ecológico de los afluentes de la Cuenca de México (Tabla 8). Los ríos de la Cuenca de México se caracterizaron como ríos de afinidad templada con temperaturas entre 5 y 17 °C, pH ligeramente ácido a neutro entre 5 y 7.5, ubicados en un gradiente altitudinal de entre 2,800 y 4,700 msnm, con estratos de bosques de *Pinus* (3,400 - 3,800 msnm), de *Abies* (2,750 - 3,500 msnm) y mixto (2,620 - 3,370 msnm), por arriba de los 2,800 msnm, el uso de suelo es principalmente bosque, aunque presenta alteraciones antropogénicas como asentamientos humanos, represamientos, tala clandestina, trucheros, ganadería, agricultura y desarrollo de actividades turísticas, la cuenca baja de la Ciudad de México está totalmente urbanizada y con desarrollo de actividades industriales en el Estado de México.

En la Cuenca de México se registraron 31 sitios potenciales de referencia, de los cuales 21 estuvieron ubicados en la cuenca alta (>2,800 msnm) y siete en la cuenca baja (<2,800 msnm) (Tabla 6). Las condiciones de referencia fueron, bosques de ribera con una cobertura vegetal nativa del 70 %, donde la zona de ribera se encuentra alterada por asentamientos humanos y construcción de caminos, el canal del río se conserva natural, aunque en las zonas bajas hay descargas de uso doméstico, presencia de presas corriente arriba, ya sean de estructuras rígidas o de costales, presencia de trucheros y donde el nivel trófico del agua es oligotrófico a eutrófico de acuerdo con Dodds (2003) y con límites permisibles para consumo humano de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000).

Tabla 8. Características de los ríos estudiados de la Cuenca de México. Condición del río (C); Calidad Hidromorfológica (CH); Zona protegida (ZP). Nombre de las zonas protegidas: Reserva Estatal “Sistema Telotzotzingo” (RE), Parque Ecológico Recreativo Zempoala “Otomí Mexica” (PETR), Santuario del Agua y Forestal “Manantiales Cascada Diamantes” (SAF), Parque Nacional “Desierto de los Leones” (PNDL), Parque Nacional “Izta-Popo” (PNIP), Suelo de Conservación (SC), e Índice de diversidad Shannon-Wiener (H’).

Subcuenca	Localidad	C	Orden	Uso de suelo y Vegetación	C H	ZP	Nivel trófico	H’Vegetación
Ameca-Canal Nacional	0	Perenne	4	Bosque Mixto	104	No	Oligo-Meso	0.29
	1	Perenne	4	Bosque Mixto	104	No	Oligo-Meso	0.3
	2	Perenne	4	Bosque Mixto	104	No	Oligo-Meso	
	3	Perenne	4	Bosque Pino	120	No	Oligo-Meso	
	4	Perenne	4	Bosque Mixto	96	No	Oligo-Meso	
Coatlaco	5	Pendiente	1	Bosque Mixto	100	No	Oligo-Meso	
	6	Pendiente	2	Actividad Primaria	82	No	Oligo-Meso	
Coaxcacoaco	7	Perenne	4	Actividad Primaria	74	RE	Meso-Eu	
	8	Perenne	3	Bosque Mixto	98	RE	Meso-Eu	
Cuautilán	9	Perenne	1	Actividad Primaria	108	PETR	Oligo-Meso	0.28
	10	Perenne	1	Bosque Mixto	114	PETR	Oligo-Meso	0.27
	11	Perenne	1	Actividad Primaria	118	PETR	Oligo-Meso	0.235
	12	Perenne	1	Actividad Primaria	108	PETR	Oligo-Meso	0.21
	13	Perenne	1	Bosque Mixto	114	PETR	Oligo-Meso	0.22
La Colmena	14	Perenne	4	Bosque Encino	116	PETR	Oligo-Meso	0.24
	15	Perenne	2	Bosque Mixto	115	PETR	Oligo-Meso	0.22
Las Regaderas	16	Perenne	3	Bosque Pino	77	SC	Oligo-Meso	0.24
	17	Perenne	3	Pastizal	77	SC	Oligo-Meso	0.17
Magdalena-Eslava	18	Perenne	1	Pastizal	116	SC	Oligo-Meso	
	19	Perenne	2	Bosque Pino	120	No	Oligo-Meso	0.26
	20	Perenne	4	Zona urbana	54	SC	Meso-Eu	
	21	Perenne	1	Bosque Pino	110	SC	Oligo-Meso	0.28
	22	Perenne	5	Zona urbana	52	SC	Meso-Eu	
	23	Perenne	4	Bosque Pino	88	SC	Oligo-Meso	
San Ildefonso	24	Perenne	1	Bosque Mixto	120	PETR	Oligo-Meso	0.23
	25	Perenne	4	Bosque Mixto	107	PETR	Oligo-Meso	0.22
San Rafael-Tlalmanalco	26	Perenne	4	Bosque Mixto	100	SAF	Meso-Eu	0.215
	27	Perenne	4	Bosque Mixto	94	SAF	Oligo-Meso	
	28	Perenne	4	Bosque Encino	66	SAF	Oligo-Meso	0.31
	29	Perenne	4	Bosque Mixto	112	SAF	Oligo-Meso	

Tabla 8. Continuación.

Subcuenca	Localidad	C	Orden	Uso de suelo y Vegetación	CH	ZP	Nivel trófico	H°Vegetación
San Rafael-Talmanalco	30	Perenne	4	Bosque Mixto	92	SAF	Meso-Eu	0.29
	31	Perenne	4	Bosque Mixto	104	SAF	Oligo-Meso	
	32	Perenne	5	Actividad Primaria	72	No	Meso-Eu	
	33	Perenne	4	Bosque Mixto	118	SAF	Oligo-Meso	0.25
	34	Perenne	1	Bosque Pino	85	SAF	Oligo-Meso	
	35	Perenne	4	Bosque Encino	96	SAF	Oligo-Meso	
	36	Perenne	4	Bosque Encino	96	SAF	Oligo-Meso	0.25
Santo Desierto	37	Perenne	2	Bosque Mixto	120	PNDL	Oligo-Meso	0.255
	38	Perenne	2	Bosque Mixto	65	PNDL	Meso-Eu	
	39	Perenne	1	Actividad Primaria	104	PNDL	Oligo-Meso	0.23
	40	Perenne	2	Bosque Mixto	110	PNDL	Oligo-Meso	0.215
	41	Perenne	1	Bosque Mixto	114	PNDL	Oligo-Meso	0.23
	42	Perenne	2	Bosque Mixto	114	PNDL	Oligo-Meso	
	43	Perenne	3	Bosque Mixto	79	PNDL	Meso-Eu	
	44	Perenne	2	Bosque Mixto	89	PNDL	Meso-Eu	
Fuera del límite de la Cuenca de México								
Apatlaco	45	Perenne	3	Bosque Mixto	111	PNIP	Oligo-Meso	0.32
Río Frío	46	Perenne	4	Bosque Mixto	102	PETR	Oligo-Meso	
	47	Perenne	4	Bosque Mixto	104	PETR	Oligo-Meso	0.24
San Rafael	48	Perenne	5	Bosque Mixto	114	No	Oligo-Meso	0.19
	49	Perenne	5	Bosque Mixto	100	No	Oligo-Meso	0.29

De los 31 sitios potenciales de referencia (puntos azules, cuadrantes 2 y 4 de la Fig. 10), 24 se ubicaron por arriba de los 2,800 msnm dentro de una zona protegida (puntos azules del segundo cuadrante, Fig. 10) y 7 sitios estuvieron en la cuenca baja (puntos azules del cuarto cuadrante, Fig. 10).

De los 19 sitios que tuvieron calidad hidromorfológica por debajo de los 100 puntos, 8 estuvieron ubicados por arriba de los 2,800 msnm con calidad hidromorfológica entre 65 y 99 puntos (puntos verdes del primer cuadrante, Fig. 10) y 11 sitios están ubicados en la cuenca baja y tienen calidad hidromorfológica de entre 50 y 99 puntos (puntos rojos, tercer cuadrante, Fig. 10).

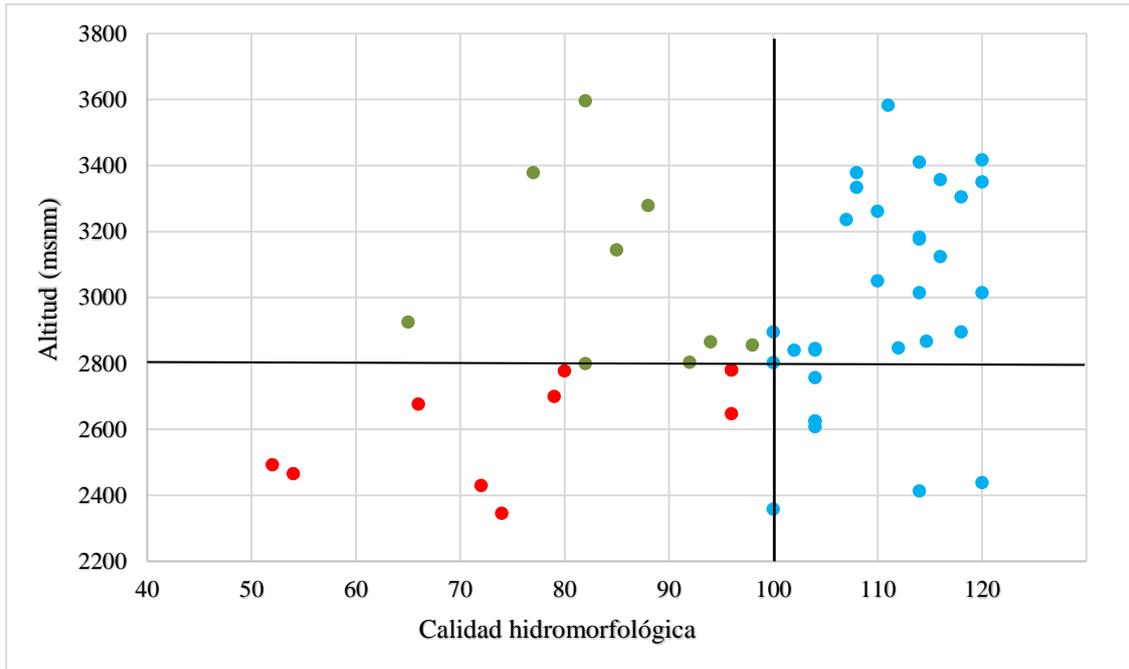


Figura 10. Calidad hidromorfológica con respecto a la altitud de los sitios de muestreo. Los sitios que se ubicaron arriba de los 2,800 msnm (cuenca alta y en zona protegida) y los puntos de color azul son los que tuvieron más de 100 puntos en el índice CERA, considerados como sitios de referencia.

El sitio de mayor altitud fue de la subcuenca Apatlaco con 3,582 msnm, con calidad hidromorfológica muy buena (111 puntos). En la subcuenca Coaxacoaco, estuvo ubicado el sitio con menor altitud (Miraflores) con 2,345 msnm. y calidad hidromorfológica buena (74 puntos) (Tabla 8). En la subcuenca Magdalena-Eslava estuvo ubicado el sitio Santa Teresa, que fue el de menor calidad hidromorfológica (52 puntos, pésima) de los sitios de la Cuenca de México y ubicado a los 2,492 msnm. Esta parte baja del río Magdalena está totalmente urbanizada, el agua contiene los desechos que se acumulan a lo largo de su cauce producto de las actividades que se desarrollan en el suelo de conservación de esa zona de la Ciudad de México (agricultura, ganadería, comercio, asentamientos humanos); además la zona de ribera presenta construcciones laterales artificiales y la vegetación de ribera está ausente (Tabla 9).

El sitio de la Estación UAM, ubicado en la cuenca baja (subcuenca San Rafael-Tlalmanalco) tuvo una disminución de la calidad hidromorfológica comparado con los sitios que se evaluaron corriente arriba, en esta zona hay desarrollo de actividades primarias, algunos asentamientos urbanos cerca de la zona de ribera, ausencia de vegetación de ribera, el río se encuentra canalizado y con efluentes directos de las casas asentadas ahí.

Tabla 9. Resultados de la evaluación hidromorfológica CERA (valor máximo 120 puntos), su puntuación desglosada en los cuatro apartados que evalúa (valor máximo de 30 puntos) y la evaluación QBR (valor máximo 100) que se hizo en 15 sitios de muestreo.

Subcuenca	Sitio	QBR	CERA	Cuenca	Hidrología	Tramo	Lecho
Ameca-Canal Nacional	La Castañeda I		104	30	24	26	24
	La Castañeda II	100	104	30	24	26	24
	La Castañeda III		104	30	24	26	24
	La Castañeda IV		120	30	30	30	30
	Las Castañeda		96	22	28	24	22
Coatlaco	Rancho nuevo I		100	24	26	22	23
	Rancho nuevo II		82	18	24	21	24
Coaxacoaco	Miraflores	20	74	14	24	14	22
	Santa Catarina	45	98	28	24	22	24
Cuautitlán	Los Organillos promedio		108	28	28	24	28
	Manantial Capoxi		114	26	30	28	30
	Manantial San Pedro	45	118	30	30	29	30
	Nac. Presa Iturbide		108	25	27	27	29
	Río Capoxi		114	26	30	28	30
La Colmena	La Caldera		116	28	28	30	30
	Xopachi promedio	100	115	30	27	28	30
Las Regaderas	Monte Alegre (alto I)		82	18	24	12	28
	Monte Alegre (bajo II)		77	14	22	17	24
Magdalena-Eslava	Chautitle alto	50	116	30	30	28	28
	Chautitle cañada	100	120	30	30	30	30
	Confluencia Eslava-Magdalena		54	14	18	12	10
	Nacimiento Eslava	30	110	26	30	26	28
	Santa Teresa		52	14	18	10	10
	Truchero alto Magdalena		88	18	28	18	24
San Ildefonso	Las Palomas promedio	100	120	30	30	30	30
	Truchero Don Álvaro	20	107	27	26	27	27
San Rafael-Tlalmanalco	Agua dulce		100	28	26	23	26
	Canal San Rafael		94	22	28	18	26
	Cascada Compañía bajo		66	14	24	14	14
	Cascada Compañía	25	112	28	30	28	26
	Cosamala alto		92	20	30	22	20
	Cosamala bajo		104	28	26	20	24
	Estación UAM		72	14	30	14	14
	Inicio Canal San Rafael	75	118	30	30	30	28
	San Rafael		85	28	21	20	21
	San Rafael Canal		96	24	28	18	26
	San Rafael Vereda		96	24	28	18	26

Tabla 9. Continuación

Subcuenca	Sitio	QBR	CERA	Cuenca	Hidrología	Tramo	Lecho
Santo Desierto	Arroyo Desierto Leones		120	30	30	30	30
	Convento Desierto Leones		65	16	20	8	21
	La Capilla Sta. Rosa	39	104	24	28	26	26
	Santa Rosa Alto	75	110	29	29	28	29
	Santa Rosa Manantial	75	114	30	30	26	28
	Santa Rosa Medio a		114	28	30	28	28
	Truchero Valle Monjas		79	20	20	22	16
	Valle de Monjas, Escuela		80	16	24	16	24
Apatlaco	Apatlaco		111	30	28	30	26
Río Frío	El Llano alto		102	22	30	24	26
	El Llano bajo		104	20	30	24	30
San Rafael	La Cabañita		114	30	28	26	30
	La Planta		100	26	26	22	26

4. Análisis de Clasificación Jerárquica (ACJ) de la calidad hidromorfológica y los parámetros físico-químicos

El ACJ mostró que al evaluar las cuatro secciones de la calidad hidromorfológica por separado, hubo una mayor afinidad numérica entre los sitios de muestreo y los parámetros físico-químicos (Tabla 10).

El ACJ de los sitios de la cuenca alta, dividió los sitios en tres grupos, que presentan una alta calidad en la cuenca, en la hidrología, el tramo y el lecho, es decir, que tuvieron pocas alteraciones en la morfología del cauce, no existe canalización, presencia de cultivos y hay pocas especies vegetales introducidas (Fig. 11).

Se observó una agrupación similar en los sitios de la cuenca baja, que, al tener características similares, la variable que mejor explica su agrupación es el índice CERA seccionado, principalmente por presentar baja calidad en el tramo (zona de inundación de la ribera), existe canalización del río, presencia de cultivos, falta de cobertura en la zona de ribera y un alto porcentaje de especies introducidas (Fig. 12).

Tabla 10. Resultado del Análisis de Agrupación Jerárquica (CAJ, por sus siglas en inglés) de los sitios muestreados en la Cuenca de México, de acuerdo con las variables calidad hidromorfológica y parámetros físico-químicos. Los sitios se separaron de acuerdo con su ubicación en cuenca alta y cuenca baja.

Variables analizadas	Variable que explica la agrupación	Grupos	Figura
Cuenca alta			
Índice de calidad hidromorfológica seccionado NID FRS	Calidad hidromorfológica seccionada.	Tres grupos:	11
		Sitios color azul: alta calidad en la cuenca, hidrología, tramo y lecho (>20).	
		Sitios color verde: disminución en la calidad hidromorfológica. Alta calidad en la hidrología y lecho (>20).	
		Color naranja: calidad hidromorfológica es buena, los sitios presentan una disminución en la calidad del lecho del río.	
Cuenca baja			
Índice de calidad hidromorfológica seccionado FRS NID	Calidad hidromorfológica seccionada.	Tres grupos:	12
		Sitios color azul: presentan muy buena calidad en la cuenca (20-30).	
		Sitios color rojo: presentan una pésima calidad en la cuenca, hidrología, tramo y lecho del río (<25).	

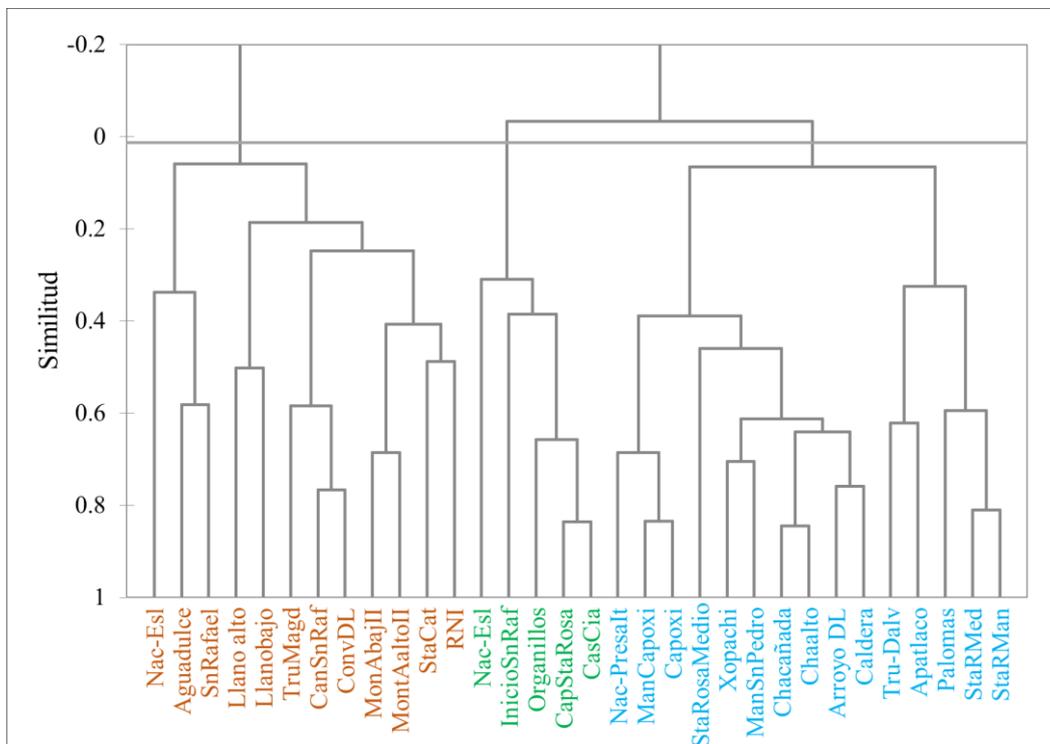


Figura 11. Cuenca alta analizada con las variables Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID), Fósforo Reactivo Soluble (FRS) y la Calidad Hidromorfológica dividida en las cuatro secciones que evalúa el índice de Calidad Ecológica de los Ríos Altoandinos (CERA).

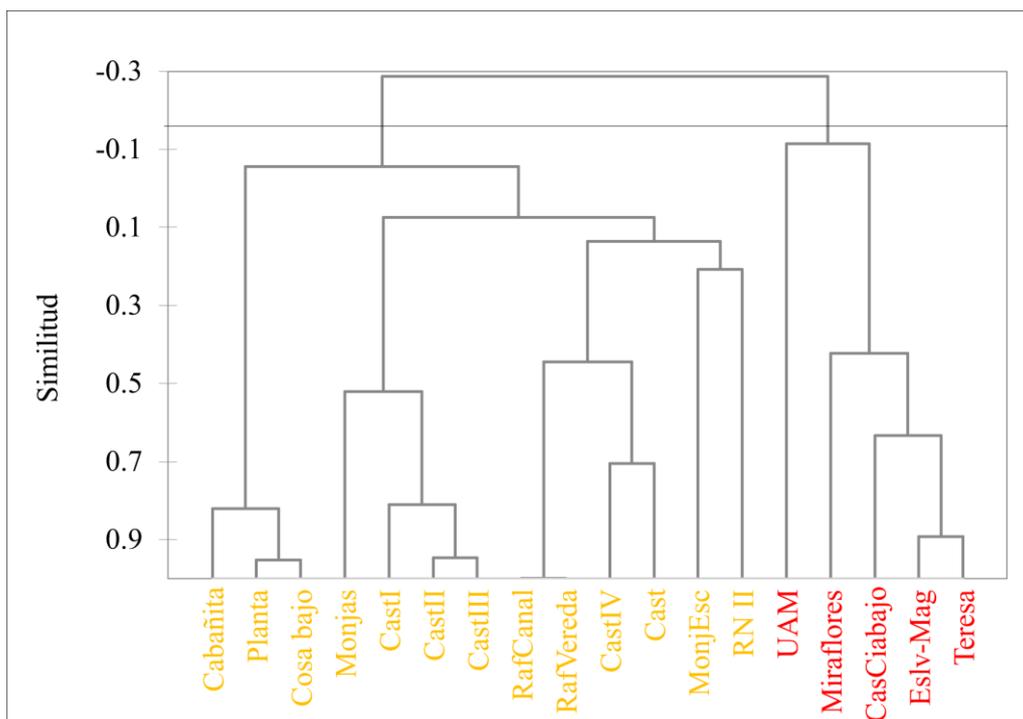


Figura 12. Cuenca baja analizada con las variables Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID), Fósforo Reactivo Soluble (FRS) y la Calidad Hidromorfológica dividida en las cuatro secciones que evalúa el índice de Calidad Ecológica de los Ríos Altoandinos (CERA).

5. Propuesta del índice de evaluación hidromorfológica para los afluentes de la Cuenca de México (CuMeCH)

A partir de las condiciones de referencia de los sitios de la Cuenca de México, se estructuró un Índice de la Calidad Hidromorfológica de la Cuenca de México (CuMeCH) (Anexo 2). La estructura se calibró y adecuó a partir del índice CERA, que se utilizó para evaluar los sitios de la Cuenca de México y de los índices QBR y EPA.

La primera hoja es de datos generales sobre el sitio de muestreo, registro de parámetros físico-químicos del agua, porcentaje de la composición del sustrato, el tipo de bosque en el que se está ubicado el sitio de muestreo, la forma de vida predominante y un espacio para agregar fotos del tramo muestreado.

La siguiente hoja contiene los 12 parámetros hidromorfológicos a evaluar, divididos en tres secciones:

- a) Calidad de la cuenca. Cobertura vegetal, estabilidad del banco, características del sustrato y desarrollo de ganadería y agricultura en la zona de ribera.
- b) Hidrología. Presencia de presas, regímenes de velocidad y profundidad, alteración del canal y estado del canal.
- c) Alteraciones antropogénicas. Efluentes directos al río por uso doméstico, desarrollo urbano, desarrollo humano y presencia de contaminación orgánica, basuras y escombros.

El índice tiene un total de 120 puntos y cada sección tiene un total de 40 puntos. El apartado de calidad de la cuenca, evalúa la cobertura vegetal nativa en porcentaje, esta tiene una guía anexa de las especies vegetales. Esta guía de identificación está dividida por tipo de bosque (*Pinus hartgewii*, *Abies religiosa* y mixto), cada uno de los apartados tiene una subdivisión de especies nativas e introducidas, su forma de vida y una imagen (tomadas de CONABIO, 2016). Posteriormente cada parámetro tiene una descripción gráfica como base para dar un puntaje, estas fotografías representan las condiciones que observamos en los ríos de la Cuenca de México.

El puntaje dado en cada parámetro se selecciona con una marca, para que al final se sume y se verifique el estado hidromorfológico de acuerdo a la tabla de colores.

6. Potenciales zonas de riesgo en los afluentes de la Cuenca de México

Las zonas potenciales de riesgo observadas en los sitios de muestreo, fueron principalmente el cambio de uso de suelo para desarrollar actividades agrícolas, ganaderas, asentamientos humanos o desarrollo de actividades recreativas/turísticas y la presencia de presas (Tabla 11). Los sitios que tienen una calidad hidromorfológica buena y muy buena (>96 puntos del índice CERA), están expuestos por su cercanía a la expansión de las actividades antropogénicas.

Tabla 11. Sitios donde se desarrollan actividades que potencialmente ponen en riesgo la calidad ecológica del río en zonas de conservación de la Cuenca de México.

Subcuenca	Sitio	Actividad antropogénica desarrollada	Distancia al sitio de muestreo (km)
Ameca-Canal Nacional	La Castañeda I	Pastizal para ganado	0.2
	La Castañeda	Pastizal para ganado	1
Coatlaco	Rancho nuevo II	Tierras de cultivo y terracería	
Coaxacoaco	Miraflores	Asentamientos humanos hacia el Este del río	0.03
Cuautitlán	Río Capoxi	Presa Capoxi corriente abajo del río Cuautitlán	0.16
	Nacimiento presa Iturbide	Presa Iturbide corriente abajo del sitio de muestreo	1
San Rafael-Tlalmanalco	Cascada Compañía bajo	Presencia de asentamientos humanos	0.08
	Truchero Don Álvaro	Presencia de zona de cultivo	0.1
Santo Desierto	Valle de Monjas, Escuela	Zona turística y recreativa del Parque Nacional Desierto de los Leones	1

Discusión y conclusiones

De acuerdo con los protocolos utilizados para la evaluación de la calidad hidromorfológica, la selección de los potenciales sitios de referencia se debe hacer sobre la cartografía, porque permite integrar la información de uso de suelo, hidrología, geología del territorio para después hacer la validación *in situ*, que debe ser congruente con lo que se observó en mapas (Bordallo & Casado, 2011; Munné & Prat, 2004; Prat *et al.*, 2012; Torrero & Campo, 2008). En el caso de este trabajo, la información de la Cuenca de México de INEGI (Serie V, 2013) fue una aproximación para conocer el estado actual de la calidad del ecosistema de ribera, porque la validación *in situ* mostró que la información no está actualizada y se requiere de una escala menor, ya que el nivel de aproximación con el que se está trabajando es de subcuenca.

En la validación *in situ* del uso de suelo, no hubo congruencia con la presencia de actividades agrícolas, ganaderas, trucheros, asentamientos humanos y zonas de comercio presentes en la zona de ribera. En cuanto al tipo de vegetación, estuvo representada de manera general con los principales tipos de bosque que componen a la cuenca: *Pinus*, *Abies* y mixto (Ávila- Akerberg, 2010; Espinoza & Sarukhán, 1997; Rzedowski & Calderón, 2005). Sin embargo, los índices de evaluación hidromorfológica requieren el reconocimiento espacial y temporal de la riqueza y diversidad de la vegetación asociada a la ribera (Barbour, 2010; Encalada *et al.*, 2011; Munné *et al.*, 2003), la cual tampoco está representada en la cartografía por la escala espacial tan amplia con la que se reporta.

La condición de permanencia de los ríos, se determinó subvalorada en la carta hidrológica de INEGI (2013), ya que sólo cinco de las 13 subcuencas estudiadas, están registradas como perennes. La representación de las construcciones laterales, presas de gavión, entubamiento y canalización de los ríos no estuvo señalada, siendo que algunos de estos canales son evidentes en la zona urbana de la Ciudad de México, donde las corrientes de agua están señaladas con flujo natural o sin modificaciones artificiales. La información disponible de INEGI (2013) no registra los cambios que ha tenido la naturalidad de los ríos y del uso de suelo en la Cuenca de México. Principalmente el avance de la mancha urbana al suelo de conservación de la Ciudad de México durante los últimos años, que ha disminuido su capacidad para recargar los acuíferos y aumentando el riesgo de convertirla en potencial entrada de contaminantes al acuífero (Cram *et al.*, 2008). Por otra parte, se encontraron remanentes constructivos de una activa y próspera industria textil y maderera. Especialmente canales de derivación y turbinas generadoras de electricidad (dínamos) en la subcuenca de los ríos San Rafael-Tlalmanalco, Magdalena-Eslava y San Rafael-Río Frío (Caro-Borrero *et al.*, 2015). Esta característica puede indicar una histórica intervención hidráulica, la que ha dejado de funcionar y recuperado parcialmente los componentes estructurales y funcionales del ecosistema acuático (Carmona & Caro-Borrero, 2016).

Esta desactualización significa un esfuerzo de selección de potenciales sitios de muestreo, donde cada vez que se necesite realizar un monitoreo, se debe de ir a campo sin la certeza de que los sitios tienen condiciones de poca perturbación antropogénica (Bordallo & Casado, 2011).

Las cartas de uso de suelo y la hidrológica funcionan como un referente general para la ubicación de las zonas que se conservan potencialmente naturales. En general están desactualizadas o intervenidas. A partir de los resultados de la validación *in situ*, proponemos que la selección de los potenciales sitios de referencia, sea de acuerdo con gradiente altitudinal, la zonación de áreas protegidas (Fig. 12) y la evaluación de las condiciones hidromorfológicas de referencia. Los ríos están influenciados por distintos factores bióticos y abióticos, como se observó en la Cuenca de México, donde todas las aguas superficiales están sujetas a una actividad humana a nivel local o regional, causando presión en el ecosistema completo. Por ejemplo, si los ríos pueden presentar una buena calidad físico-química y una estructura física degradada, el resultado será un hábitat poco propicio para la comunidad bentónica (Garófano-Gómez *et al.*, 2011; Ollero *et al.*, 2007; Río & Bailey, 2006; Villamarín *et al.*, 2014).

Lo anterior muestra que la planeación urbana no ha considerado el mantenimiento de las áreas naturales como fuente de servicios ecosistémicos de la Cuenca de México como son la provisión de agua, captura y almacenamiento de carbono, regulación del clima, amortiguamiento de inundaciones y sequías y posibilidad de desarrollar actividades productivas como agricultura, ganadería, recreación y turismo. En los últimos 50 años, con la acelerada urbanización de la Ciudad de México, se ha perdido gran extensión del suelo, para solucionar las presiones sociales, de vivienda y movilidad. A pesar de que la Cuenca de México tiene zonas con pendientes pronunciadas de $>10^\circ$, que se consideraban barreras naturales, han dejado de ser un obstáculo para los asentamientos humanos. Como lo eran, la Sierra de Guadalupe, al norte de la cuenca, la Sierra de Santa Catarina, el Ajusco y Chichinautzin, al sur, el lago de Texcoco, al este, y al oeste la zona montañosa de las sierras de las Cruces y Monte Alto (Gutiérrez & González, 2010). Muchas de estas zonas presentan asentamientos irregulares, los que disminuyen en gran medida la posibilidad de que los suelos permitan recargar el acuífero y mantener una vegetación ribereña propia (Cram *et al.*, 2008).

Otro de los factores que afecta la morfología del canal, es la construcción de presas de gavión. No obstante, pueden capturar grandes flujos de agua y almacenarla para su posterior uso en la generación de energía, también pueden provocar cambios en la cantidad y calidad del agua del río y retención de sedimentos, lo que altera la continuidad del cauce y cambios en la diversidad (Dresti *et al.*, 2016). En México, debido a la inequidad económica y social, es necesario recurrir a incentivos y subsidios gubernamentales para llevar a cabo procesos de manejo de los recursos, porque que es una fuente permanente de recursos financieros para mantener el programa y muchas veces no tiene el carácter sustentable (Maass & Cotler, 2007), por lo que puede existir

un abuso de dichos incentivos y no se llevan a cabo de manera adecuada dichos programas.

Los Programas de Manejo de las ANP, proponen acciones de restauración de los ecosistemas para la recuperación de las funciones y procesos ecológicos de estas áreas, que han sido afectados por fenómenos naturales o por acciones antropogénicas (CONANP, 2014). A partir del reconocimiento de los 31 potenciales sitios de referencia ubicados en ANP, sería posible establecer una red de monitoreo, para continuar con el proceso de propuestas en los programas de manejo y dar continuidad al monitoreo de estos sitios de referencia, que los sitios que tienen media y mala calidad, no disminuyan de estatus y se traten de igualar con los de referencia, si las causas de disturbio se pueden eliminar, siempre que la perturbación no haya causado daños irreversibles, o los sitios que requieran ser restaurados (Bordallo & Casado, 2011; Bouleau & Pont, 2014)

El deterioro en las porciones medias de la cuenca de México, donde existen descargas urbanas o de basura, se relaciona con los aportes de nutrientes como detergentes, insecticidas y aporte de desechos de la agricultura, poco significativos asociados al desarrollo de actividades domésticas. De acuerdo con la NOM-011.CNA-2000 (DOF, 2000), los ríos tuvieron rangos permisibles para el nitrógeno inorgánico disuelto) y fósforo reactivo soluble para consumo humano. De acuerdo con el criterio de Dodds (2003), los potenciales sitios de referencia para ríos en estado natural de Estados Unidos son oligo-mesotróficos y en la cuenca baja son meso-eutróficos. Lo que muestra una falta de estandarización en los niveles de concentración permitida de acuerdo con parámetros internacionales.

En este trabajo se utilizaron dos índices para reconocer la calidad del ecosistema de ribera, con los índices CERA y QBR porque los ríos altoandinos (ríos de montaña) y de España (región templada), tienen características afines con los ríos templados de montaña de la cuenca de México. Sin embargo, las condiciones de referencia y las perturbaciones que disminuyen la calidad ecológica de los ríos son distintas. Por lo que es importante hacer una calibración de los índices de acuerdo con las condiciones del sitio de estudio, ya que los indicadores son construidos con la mayor representatividad espacial y temporal (Bouleau & Pont, 2014). Por ejemplo, la Directiva Marco del Agua (2003), propone que antes de utilizar la metodología de evaluación, debe ser calibrada para la ecorregión europea donde se está llevando a cabo dicha evaluación, con un equipo de expertos para asegurar la armonización a través de métodos de evaluación de la calidad del agua. Sin embargo, la calibración en el caso de México, se hizo después de haber tomado otros índices de evaluación porque no se contaba con información previa sobre las condiciones de referencia de los ríos para poder hacer dichos cambios.

Las condiciones de referencia han sido definidas como un estado presente o pasado que corresponda a características de baja presión antropogénica, sin efectos de industrialización, urbanización o agricultura, con pocas modificaciones físico-químicas, hidromorfológicas y biológicas, y se tiene que adaptar de acuerdo con las condiciones de referencia de cada sitio estudiado (Bouleau & Pont, 2014; Nijboer *et al.*, 2004, Pardo

et al., 2012). Por lo que, en estudios de ríos en Estados Unidos, se ha adaptado el índice de calidad hidromorfológica, donde la modificación que se ha hecho es el listado de la vegetación de ribera nativa e introducida, ya que aumentará la certeza de la evaluación de la naturalidad de la vegetación para valorar el estado ecológico (Colwell & Hix, 2008).

La propuesta hecha en este trabajo, integra los aspectos hidromorfológicos, físico-químicos y biológicos que debe tener una evaluación de la calidad ecológica de los ríos y que se realizó a partir de índices que evalúan únicamente la vegetación de ribera (QBR) o la calidad de la zona de ribera (CERA), siguiendo la evaluación de calidad ecológica de los ríos Mediterráneos propuesta por Prat *et al.* (2012), donde se muestra un método basado en distintas evaluaciones: la calidad del bosque de ribera, el hábitat fluvial y los macroinvertebrados. Lo que se pretende realizar en el grupo de trabajo del laboratorio de Ecosistemas de Ribera, UNAM, es tener este tipo de metodología de integración de distintos índices (evaluación hidromorfológica, físico-química, de vegetación de ribera, de indicadores biológicos como macroalgas, diatomeas y macroinvertebrados).

La generación de índices o su calibración a partir de protocolos afines a las regiones de estudio, son un trabajo de construcción permanente que requiere de la generación de una línea base de conocimiento del ecosistema (Colwell & Hix, 2008). El presente estudio pretende establecer clases de calidad ecológica, a partir del conocimiento de los elementos propios de los ríos de la Cuenca de México. Para lo cual se generó una métrica para distinguir estas clases. Asimismo, con el índice de evaluación de la calidad hidromorfológica se elaboraron los mapas de calidad de los ríos y se establecieron las condiciones de referencia de la Cuenca de México. El siguiente paso en el proceso es un control de calidad que asegure que los datos obtenidos están reflejando los valores con un nivel de certeza aceptable, y se pueda aplicar como un índice de evaluación que pueda contribuir con el monitoreo, la conservación y restauración de los ríos (FEM, 2011).

Para realizar estas acciones de conservación y manejo, se debe tomar en cuenta que existen limitaciones de orden biofísico (natural) y restricciones sociales y legales, como muestran los resultados. Los 31 potenciales sitios de referencia están mostrando intervenciones antropogénicas y además están bajo restricciones federales, estatales o comunales. Por lo que para lograr implementar un programa de manejo se deben seguir metodologías para el manejo de los socioecosistemas, donde se considera que tanto los procesos y funciones ecológicas como los distintos actores sociales que están involucrados en el manejo de los recursos y deben estar coordinados en la toma de decisiones (Maass & Cotler, 2007).

Referencias

- Acosta, R., Ríos, B., Rieradevall, M. & Prat, N. 2009. Propuesta de un protocolo de evaluación de la calidad ecológica de ríos Andinos (CERA) y su aplicación a dos cuencas de Ecuador y Perú. *Limnética* 28 (1): 35-64.
- Andelman, S.J. & Fagan, W.F. 2000. Umbrellas and flagships: Efficient conservation surrogates or expensive mistakes? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 97: 5954-5959.
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association and Water Environmental Federation. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20 th Edition. Washington D. C.
- Ávila-Akerberg, V.D. 2010. Forest quality in the southwest of Mexico City. Assessment towards ecological restoration of ecosystem services. Doctoral Thesis. Institut für Landespflege. 138 pp.
- Barbour, M.T., Gerritsen, J., Synder, B.D. & Stribling, J.B. 1999. Rapid bioassessment Protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish. Second Edition. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). Office of Water; Washington, D.C.
- Barbour, T.M. & Paul, M.J. 2010. Adding value to water resource management through biological assessment of rivers. *Hydrobiologia* 651: 17-24.
- Bocco, G. 2007. La cartografía y los sistemas de información geográfica en el manejo integrado de cuencas. En: Cotler, H (Compilador). El manejo integral de cuencas en México. Segunda edición. Secretarí del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México, D.F. 2007. 348 pp.
- Bojorge, M., Carmona, J., Cartajena, A.M. & Beltrán, M.Y. 2010. Temporal and spatial distribution of macroalgal communities of mountain streams in Valle de Bravo Basin, central México. *Hydrobiologia* 641: 159-169.
- Bonada, N., Prat, N., Munné, A., Rieradevall, M., Alba-Tercedor, J., Álvarez, M., Avilés, J., Casas, J., Jáimez-Cuéllar, P., Mellado, A., Moyá, G., Pardo, E., Robles, S., Ramón, G., Suárez, M-L., Toro, M., Vida-Abarca, M.R., Vivas, S. & Zamora-Muñoz, C. 2002. Criterios para la selección de condiciones de referencia de los ríos mediterráneos. Resultados del proyecto GUADALMED. *Limnética* 31 (3-4): 99-114.
- Bordallo, A. & Casado, C. 2011. Aproximación al establecimiento de una red de referencia para la implantación de la Directiva Marco del Agua en la comunidad de Madrid. *Limnética* 31 (1): 1-12.

- Bouleau, G. & Pont, D. 2014. Did you say reference conditions? Ecological and socio-economic perspectives on the European Water Framework Directive. *Environmental Science and Policy, Elsevier* 47:32-41.
- Canterbury, G.E., Martin, T.E., Petit, D.R., Petit, L.J., & Bradford, D.F. 2000. Bird communities and habitat as ecological indicators of forest condition in regional monitoring. *Conservation Biology* 14: 544-558.
- Carmona, J., Ramírez, R., Bojorge-García, M.G., González, B. & Cantoral-Uriza, E. 2016. Estudio del valor indicador de las comunidades de algas bentónicas: una propuesta de evaluación y aplicación en el río Magdalena, Ciudad de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 32 (2): 139-152.
- Carmona-Jiménez, J. & Caro-Borrero, A. 2016. La calidad ecológica de los ríos periurbanos de la Cuenca de México y Distrito Federal. En: Adrián Guillermo Aguilar (coordinador). La Ciudad de México en el siglo XXI: realidad y retos. Primera Edición. Ciudad de México: Gobierno de la Ciudad de México, Secretaría de Ciencias, Tecnología e Innovación. Miguel Ángel Porrúa. 2016. 778 pp.
- Carmona-Jiménez & Caro-Borrero, A., J. 2016. Associations between macroinvertebrates and *Paralemanea mexicana*, an endemic freshwater red alga from Mountain River in Central Mexico. *Neotropical Entomology* doi: 10.1007/s13744-016-0420-z.
- Caro-Borrero, A., Carmona-Jiménez, J. & Mazari-Hiriart, M. 2015. Evaluation for ecological in peri-urban rivers in Mexico City: a proposal for identifying and validating reference sites using benthic macroinvertebrates as indicators. *Journal of Limnology* 74 (1): 1-16.
- Caro, T.M. & O'Doherty G. 1999. On the use of surrogate species in conservation biology. *Conservation Biology* 13: 805-814.
- Colwell, S.R. & Hiz, D.M. 2008. Adaptation for the QBR index use in riparian forests of central Ohio. *Proceedings of the 16th Central Hardwoods Forest Conference*.
- CONABIO. Portal de geoinformación. Sistema Nacional de información sobre biodiversidad [en línea] [fecha de revisión: marzo, 2016] Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONABIO. 2016. Listado alfabético de especies de maleza de México [en línea] [fecha de revisión: junio, 2016] Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/paginas/lista-plantas-generos.htm>
- CONANP. Capítulo 1. La conservación de los Ecosistemas y su Biodiversidad. En: Plan Nacional de Desarrollo. Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2014-2018. México. 1477 pp.
- CONANP. Sistema de Información Geográfica [en línea] [fecha de revisión: agosto, 2016] Disponible en:

<http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/>

- Cram, S., Cotler, H., Morales, L.M., Sommer, I. & Carmona, E. 2008. Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito Federal. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 66:81-104.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2000. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a los que debe someterse el agua para su potabilización. 22 noviembre 2000. Secretaría de Salud México. D.F.
- Directiva Marco del Agua (DMA. 2000. DIRECTIVA 2000/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- Dresti, C., Becciu, G., Saidi, H. & Ciampittiello, M. 2016. The hydromorphological state in Mountain Rivers subject to human impacts: a case study in the North-West of Italy. *Environmental Earth Science* 75-495.
- Dodds, W.K. 2003. Misuse of inorganic N and soluble reactive P concentrations to indicate nutrient status of Surface waters. *Journal of the North American Benthological Society* 22 (2): 171-181.
- Encalada, A. C., Rieradevall, M., Ríos-Touma, B., García & N., Prat, N. 2011. Protocolo simplificado y guía de evaluación de la calidad ecológica de ríos andinos (CERA-S). USFQ, UB, AECID, FONAG. Quito, 83 pp.
- Espinosa G. & Sarukhán, J. 1997. Manual de malezas del Valle de México. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México y fondo de Cultura Económica. México, D.F. 407 pp.
- Ezcurra, E. 1990. De las chinampas a la megalópolis: El medio ambiente en la Cuenca de México. Fondo de Cultura Económica, México D.F., 407 pp.
- Freshwater Ecology and Management Research Group (FEM). 2011. Diseño de programas de biomonitoreo e intercalibración de metodologías para la medida del estado de salud de los ríos. Univesitat de Barcelona. 16 p.
- Ferrusquía-Villafranca I. 1993. Geology of Mexico: A synopsis. En: Ramamoorthy T.P., Bye R., Lot A. & Fa. J. (eds.). *Biological diversity of Mexico, origins and distribution*. Oxford University Press. New York.
- Foerster, J., Gutowsky, A. & Schaumburg, J. 2004. Defining types of running waters in Germany using benthic algae: A prerequisite for monitoring according to the Water Framework Directive. *Journal of Applied Phycology* 16: 407-418.

- Fox, P.J.A., Natura, M. & Scarlett, P. 1998. An account of the derivation and testing of a standard field method, River Habitat Survey. *Aquatic Conservation: Marine and freshwater ecosystems* 8: 455-475.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. México.
- Gobierno del Distrito Federal (GDF). 2012. Atlas Geográfico del suelo de conservación del Distrito Federal. México.
- González del Tánago, M. & García de Jalón, D. 2011. Riparian Quality Index (RQI): a methodology for characterizing and assessing the environmental conditions of riparian zones. *Limnetica* 30 (2): 235-254.
- Garófano-Gómez, V., Martínez-Capel, F., Paredo-Parada, M., Marín, E.J.O., Muñoz, R., Soares, R.M. & Pinar-Arenas, J.L. 2011. Assessing hydromorphological and floristic patterns along a regulated Mediterranean river: The Serpis River (Spain). *Limnetica* 30 (2): 307-328.
- Gregory, S.V., Swanson, F.J., McKee, W.A. & Cummins, K.W. 1991. An ecosystem perspective of riparian zones. *Bioscience* 41 (8): 540-551.
- Google Earth. 2016. [en línea] [fecha de revisión 28-11-2016]. Disponible en: <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>
- Gutiérrez, M.T. & González, J. 2010. Capítulo 1. Evolución del crecimiento espacial de la Ciudad de México en relación con las regiones geomorfológicas de la Cuenca de México. En: Raúl Aguirre Gómez (coordinador). Estudios sobre los remanentes de agua en la Cuenca de México. Primera Edición. México, UNAM, Instituto de Geografía. 2010. 111 pp.
- Hering, D., Buffagni, A., Moog, O., Sandin, L., Sommerhäuser, M., Stubauer, I., Johnson, R., Pinto, P., Skoulikidis, N., Verdonshot & P., Zahràdkova, S. 2003. The development of a system to assess the ecological quality of streams based on macroinvertebrates. Design of the sampling programmed within the AQEM project *International Rev. Hydrobiology* 88 (3-4): 345-361.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2013. Cartas topográficas. Serie V, escala 1: 50,000. Hojas E14B41 (Amecameca), E14B22 (Apan), E14B31 (Chalco), E14B31 (Chagnahuapan), E14A39 (Ciudad de México), E14B12 (Ciudad Sahagún), E14A29 (Cuautitlán), E14B42 (Huejotzingo), E14A49 (Milpa Alta), F14D81 (Pachuca), F14D81 (Polotitlán), E14B32 (San Martín), E14A48 (Tenango), E14A18 (Tepeji), E14B21 (Texcoco), E14B11 (Tizayuca), E14B33 (Tlaxcala), E14B13 (Tlaxco), E14A38 (Toluca), F14D82 (Tulancingo), E14A28 (Villa del Carbón), E14A19 (Zumpango).
- Kremen, C. 1992. Assessing the indicator properties of species assemblages for natural areas monitoring. *Ecological Applications* 2: 203-217.

- Legorreta, J. 2009. Ríos, lagos y manantiales del valle de México. Universidad Autónoma Metropolitana, Gobierno del Distrito Federal. México, D.F.
- López, L. 2007. La Cuenca de México. *Arqueología XV* (86): 44-71.
- Maddock, I. 1999. The importance of physical habitat assessment for evaluating river health. *Freshwater Biology* 41: 373-391.
- Martínez-Mas, J.F., Correcher, E., Piñón, A., Martínez-Muro, M.S. & Pujante, A. M. 2004. Estudio del estado ecológico de los ríos de la cuenca hidrográfica del Júcar (España) mediante el índice BMWP. *Limnetica* 23 (3-4): 331-346.
- Maass, J.M. & Cotler, H. 2007. Protocolo para el manejo de ecosistemas en cuencas hidrográficas. En: Cotler, H. (Comp.) El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. Segunda Edición. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología. México, D.F. 41-58 pp.
- McGeoch, M.A. 1998. The selection, testing and application of terrestrial insects as bioindicators. *Biological Review* 73: 181-201.
- Munné, A., Prat, N., Solà, C., Bonada, N. & Rieradevall, M. 2003. A simple field method for assessing the ecological quality of riparian habitat in rivers and streams: QBR index. *Aquatic conservation: Marine and freshwater ecosystems* 13: 147-163.
- Munné, A. & Prat, N. 2004. Defining river types in a Mediterranean Area: a methodology for the implementation of the EU Water Framework Directive. *Environmental assessment* 34 (5): 711-729.
- Nijboer, R.C., Johnson, R.K., Verdonshot, P.F.M., Sommerhäuser, M. & Buffagni, A. 2004. Establishing reference conditions for European streams. *Hydrobiologia* 516: 91-105.
- Noss, R.F. 1990. Indicators for monitoring biodiversity: A hierarchical approach. *Conservation Biology* 4: 355-364.
- Ollero, A., Echeverría, M.T., Sánchez, M., Auría, V., Ballarín, D. & Mora, D. 2003. Metodología para la tipificación hidromorfológica de los cursos fluviales de Aragón en aplicación de la Directiva Marco de Aguas (2000/60/CE). *Geographicalia* 44: 7-25.
- Ollero, A., Ballarín, D., Díaz, E., mora, D., Sánchez, M., Acín, V., Echeverría, M.T., Granado, D., González, A.I., Sánchez, L. & Sánchez, N. 2007. Un índice hidrogeomorfológico (IHG) para la evaluación del estado ecológico de sistemas fluviales. *Geographicalia* 52: 113-141.
- Pardo, I., Gómez-Rodríguez, C., Wasson, J.G., Owem, R., van de Bund, W., Kelly, M., Bennett, C., Birk, S., Buffagni, A., Erba, S., Mengin, N., Murray-Bligh, J. & Ofeböeck,

- G. 2012. The European reference condition concept: A scientific and technical approach to identify minimally-impacted river ecosystems. *Science for the Total Environment* 420: 33-42.
- Perló, C. & González, R.A. 2005. ¿Guerra por el agua en el valle de México? Estudio sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y Estado de México. UNAM-Fundación Fredrich Ebert Stiftung. México.
- Poole, G. C. 2010. Stream hydrogeomorphology as a physical science basis for advances in stream ecology. *Journal of the North American Benthological Society* 29 (1): 12-25.
- Prat, I., Gómez-Rodríguez, C., Wasson, J-G., Owe, R., van de Bund, W., Kelly, M., Bennett, C., Birk, S., Buffagni, A., Erba, S., Menginm N., Murray-Bligh & Ofenböeck, G. 2012. The European reference condition concept: A scientific and technical approach to identify minimally-impacted river ecosystems. *Science of the Total Environment* 420: 33-42.
- Río, S.L. & Bailey, R.C. 2006. Relationship between riparian vegetation and stream benthic communities at three spatial scales. *Hydrobiologia* 55: 153-160.
- Rzedowski, J. & Calderón, G. 2005. Flora fanerogámica del Valle de México. Segunda edición, Primera reimpresión. Instituto de Ecología y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Pátzcuaro, Michoacán. 1406 pp.
- Stoddard, J.L., Larsen, D.P., Hawkins, C.P., Johnson, R.K. & Norris, R.H. 2006. Setting expectations for the ecological condition of streams: the concept of reference condition. *Freshwater bioassessment* 16 (4): 1267-1276.
- Torrero, M.P. & Campo, A.M. 2008. Hidrogeomorfología en la Cuenca en el río Sauce Chico, Argentina. *Revista geográfica de Valparaíso* 41: 1-13.
- Van Dam, H., Mertens A. & Sinkel J. 1994. A code checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* 28: 117-133.
- Villamarín, C., Prat, N. & Rieradevall, M. 2014. Caracterización física, química e hidromorfológica de los ríos altoandinos tropicales de Ecuador y Perú. *Latin America Aquatic Research* 42 (5): 1072-1086.
- XLSTAT. 2014. Getting started manual. Addinsoft. 2. New York.

Anexo 1

Contexto histórico del agua en la Cuenca de México

La Cuenca de México ha sido un lugar atractivo para el establecimiento de asentamientos humanos, debido a las condiciones geográficas y gran cantidad de recursos naturales de la región. Desde la época prehispánica, los asentamientos humanos han tenido lugar en las planicies lacustres y proluviales lacustres de la Cuenca de México. Hace un millón de años la Cuenca de México estaba abierta en su porción sur y estaba integrada por los ríos Cuernavaca, que drenaba la porción occidental y era alimentada por los escurrimientos de la Sierra de las Cruces y; Cuautla que descendía de la Sierra Nevada. Ambos eran afluentes del río Amacuzac que formaban parte de la cuenca del río Balsas que posteriormente desembocaba en el Océano Pacífico. Debido a la actividad volcánica se originó la Sierra del Chichinautzin en el Cuaternario superior; esa estructura cerró por el sur el antiguo valle de México, a partir de entonces la cuenca fue cerrada o endorréica (Fig. 14) (Gutiérrez & González, 2010).



Figura 14. Mapa de recursos y explotación de la región de los lagos de la Cuenca de México. Tomado de López (2007) en la revista *Arqueología*.

En el 1,200 A.C. comenzó el desarrollo de Cuicuilco, que fue la primera gran ciudad de la Cuenca de México. Esta alcanzó una población de 20,000 habitantes, en el 200 A.C. Entre los años 200 A.C. y 200 D.C., la erupción del volcán Xitle, destruyó Cuicuilco, lo que permitió que Teotihuacán se convirtiera en un gran centro urbano, alcanzando una población de más de 100,000 habitantes en el año 500 D.C. Posteriormente, la ciudad entró en un periodo de crisis que terminó con el colapso y desaparición de su civilización en el 650 D.C, debido a la sobreexplotación de los recursos de la región (López, 2007; Gutiérrez & González, 2010).

Posteriormente, cuando los aztecas llegaron a la región de la Cuenca de México, alrededor del 1,300 D.C., la cuenca estuvo sobrepoblada y existían solo algunos sitios para el establecimiento de los nuevos habitantes, que se establecieron en una pequeña isla en el interior del lago de Texcoco (Ezcurra, 1990; Gutiérrez & González, 2010). Debido al gran crecimiento poblacional y para ganar terreno al lago, se construyeron las chinampas. Para evitar las inundaciones y contener las avenidas que afectaban a México-Tenochtitlán, se construyó un albardón de Nezahualcóyotl, que separó las aguas saladas del lago de Texcoco y previno a la ciudad de Tenochtitlán de inundaciones (López, 2007; Gutiérrez & González, 2010).

Durante de la conquista española, la infraestructura y desarrollo tecnológico para el manejo y aprovechamiento de los lagos, desapareció. La visión de los pueblos indígenas de una ciudad que convivía con el agua, no coincidió con la visión europea, de aprovechar la tierra. En los primeros años de la colonia de la Nueva España, se incrementó la actividad en el comercio de la cuenca y las poblaciones cercanas a la Ciudad de México (Ezcurra, 1990). Con la fundación de la Nueva España sobre la ciudad de Tenochtitlán-Tlatelolco, los españoles se enfrentaron a las inundaciones, producto de las crecidas del lago de Texcoco. En 1555 se presentó la primera inundación, después de la conquista y la Ciudad de México se vio afectada, por lo cual, se propuso construir la nueva ciudad en Coyoacán, pero se decidió asentarla en las ruinas de Tenochtitlán (Ezcurra, 1990; Gutiérrez & González, 2010).

La siguiente gran inundación fue en 1580, en esta época se planteó la idea de construir un desagüe general que drenara los lagos. Pero debido a que se requería una gran inversión, únicamente se repararon y ampliaron los diques, albarradas y calzadas. Hasta el S. XVII, después de la tercera gran inundación en 1604, se ordenó la construcción del desagüe general. Para esto, se escogió el proyecto de Enrico Martínez quien propuso la construcción de un túnel al norte de la cuenca, pasando cerca de Huhueteca para llevar las aguas al río Tula, mismo que se conecta con el río Panuco y desemboca en el Golfo de México. Enrico Martínez pretendía desecar los lagos a través de esta obra, pero las autoridades decidieron desviar el río Cuautitlán, que para entonces era el más caudaloso y que tenía como afluentes los ríos Tepetzotlán, Guadalupe y el Grande (Gutiérrez & González, 2010)

Las obras de desagüe continuaron en el S. XVII y terminaron hasta 1789. Durante este periodo continuaron las inundaciones, pero en menor intensidad. Debido al crecimiento tanto de la ciudad como de la población asentada alrededor de los lagos, así

como el incremento en los niveles de azolvamiento, las superficies de los lagos fueron perdiendo extensión, alejándose cada vez más de las orillas de la Ciudad de México. Tras la guerra de independencia, se inició la ampliación del desagüe, pero no trascendió debido a la falta de dinero. En los primeros años del México independiente, la región de la cuenca no presentó grandes incrementos en su población, debido a la falta de desarrollo económico y a las periódicas intervenciones militares del S. XIX (López, 2007; Gutiérrez & González, 2010).

En 1856, se construyó el canal de San Lorenzo, que hoy en día se conoce como el canal de Garay. Este canal, comunicaba los lagos de Xochimilco y Texcoco, lo que permitió que las aguas de los lagos de Xochimilco y Chalco descargaran sus aguas en el de Texcoco, evitando los riesgos de inundación en el sur de la ciudad.

Durante el Porfiriato, se reanudó la obra del gran canal de desagüe y el túnel de Tequisquiác. Después de la Revolución Mexicana, en la década de 1930, la Ciudad de México se convirtió en una de las más grandes del mundo, al expandirse el área urbana, se poblaron áreas de los antiguos lagos, llegando a alcanzar poblaciones, antiguamente alejadas de la ciudad como Coyoacán, Santa Fe e Iztapalapa y para finales del S. XX se alcanzó a Xochimilco, Tlalpan y Tlahuac (López, 2007; Gutiérrez & González, 2010).

El área urbana había alcanzado zonas que eran utilizadas para la agricultura, por lo que entre 1940 y 1970 se inició el entubamiento de algunos ríos, canales de riego y arroyos. En este periodo se entubaron los ríos Churubusco, la Magdalena, San Ángel, Tequilazco, Barranca del Muerto, Mixcoac, de la Piedad Becerra, Tacubaya, Consulado, San Joaquín, Miramontes, aprovechando la superficie de estos para la construcción de avenidas (López, 2007; Gutiérrez & González, 2010).

En 1953 se creó la Dirección General de Obras Hidráulicas, debido a los continuos problemas de inundaciones y sanitarios debido a la acumulación de aguas negras, a pesar del entubamiento de los ríos antes mencionados. En 1967 fue aprobado el Proyecto del Drenaje Profundo de la Ciudad de México el cual fue inaugurado en 1975, este sistema consistió en el emisor central de 8 km y un emisor oriente de 10 km de los cuales se unen para formar un enorme emisor de 50 km, con una longitud total de 68 km (López, 2007; Gutiérrez & González, 2010).

Como consecuencia de la ampliación del sistema de desagüe de la cuenca durante la segunda mitad del S. XIX y debido al crecimiento de la ciudad de 1960 a 1980, el nivel de los lagos disminuyó a tal grado que desaparecieron parcialmente (Fig. 2). En 1951 tuvo que ser desviado el cauce del río Churubusco para rescatar la zona de chinampas de Xochimilco y Tlahuac. El lago de Texcoco desapareció en 1970 y se tuvieron que construir lagos artificiales para rescatar la región (López, 2007; Gutiérrez & González, 2010).

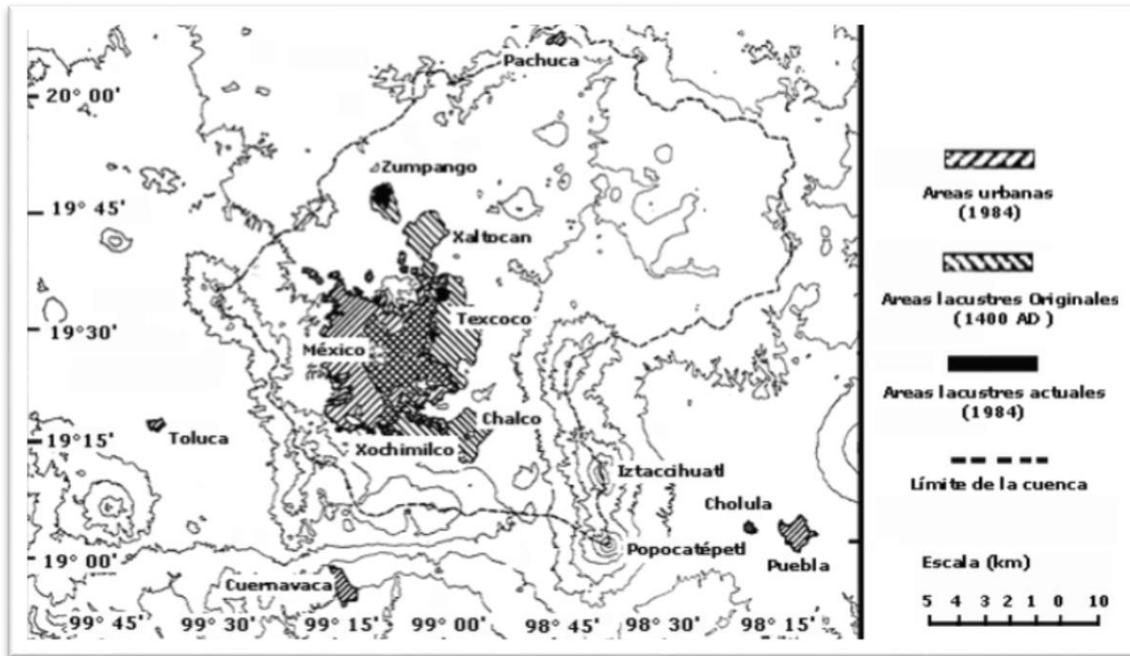


Figura 14. Mapa topográfico de la Cuenca de México, con el área urbana y las superficies lacustres que permanecían en 1984. Tomado de Ezcurra (1990).



UNAM
POSGRADO
Ciencias Biológicas



Protocolo de evaluación de la Calidad Hidromorfológica de la Cuenca de México (CuMeCH)

Raquel Ortiz Fernández
Javier Carmona Jiménez
Beatriz González Hidalgo

Universidad Nacional Autónoma de México
Posgrado en Ciencias Biológicas
Facultad de Ciencias
Laboratorio de Ecosistemas de Ribera

Anexo 2

Índice

Calidad Hidromorfológica de los ríos de la Cuenca de México.....	iii
Estructura del protocolo de evaluación hidromorfológica	v
1. Componentes físico-químicos de los ríos de la Cuenca de México/CuMeFQ.....	vi
2. Componentes hidromorfológicos de los ríos de la Cuenca de México/CuMeCH	vii
Calidad hidromorfológica (interpretación).....	viii
I. CUENCA	ix
1. Cobertura vegetal. La proporción de taxa introducidos con respecto a los nativos. .ix	
2. Estabilidad del banco.....	xxvii
3. Características del sustrato	xxviii
4. Desarrollo de ganadería, agricultura en la zona de ribera	xxviii
II. HIDROLOGÍA	xxix
5. Presencia de presas.....	xxix
6. Regímenes de velocidad.....	xxix
7. Alteraciones en el canal	xxx
8. Estado del canal.....	xxx
III. PERTURBACIONES ANTROPOGÉNICAS	xxxi
9. Efluentes directos al río.....	xxxi
10. Desarrollo urbano	xxxi
11. Desarrollo humano	xxxii
12. Contaminación orgánica, basuras y escombros	xxxii
Bibliografía	xxxiii

Calidad Hidromorfológica de los ríos de la Cuenca de México

La Cuenca de México es una región que presenta una gran cantidad de recursos hídricos, debido al desarrollo urbano, ha sufrido deterioro en la calidad ecológica de sus ríos. La cuenca tiene una superficie aproximada de 9,600 km² que abarca territorios del Estado de México (50%), Hidalgo (26.5%), Ciudad de México (13.8%), Tlaxcala (8.7%) y Puebla (1%) (Fig. 1). Del total de su área, 5,136 km² son terrenos planos, 4,464 km² son terrenos de montaña y cerca de 2,000 km² están ocupados por áreas urbanizadas (Legorreta, 2009; Perló & González, 2005).

Debido a la importancia que tienen los ríos en la provisión de servicios ecosistémicos para la población, como la provisión de agua, el control de inundaciones, la belleza escénica, entre otros, el grupo de Ecosistemas de Ribera de la Facultad de Ciencias ha trabajado en los últimos tres años, algunos ríos de la Cuenca de México, lo que ha permitido reconocer las condiciones de referencia y las actividades que deterioran la calidad ecológica de los ríos (Carmona & Caro-Borrero, 2016; Caro-Borrero *et al.*, 2015).

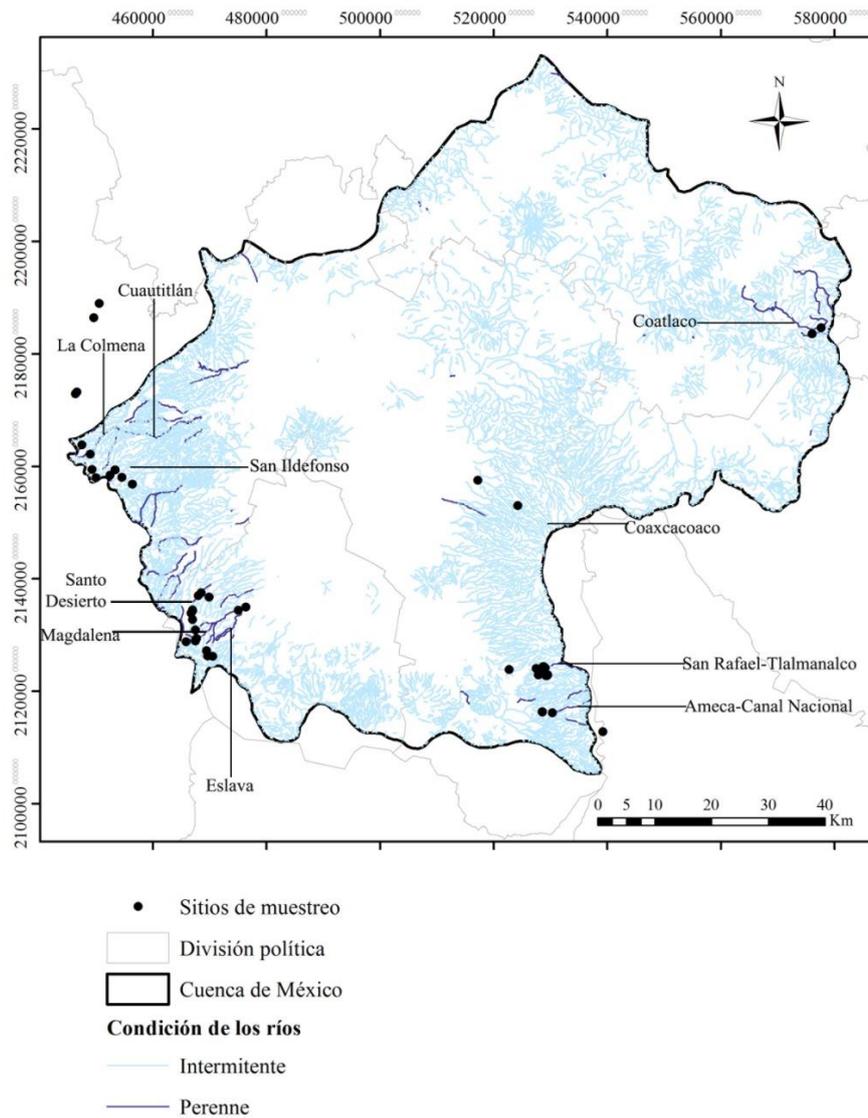


Figura 1. Red hidrológica de la Cuenca de México (modificado de INEGI, 2003).

Esta información se ha utilizado para desarrollar el presente protocolo que permita monitorear y evaluar la calidad ecológica de los ríos de la cuenca, integrando la evaluación físico-química del agua, de calidad hidromorfológica y la naturalidad de la vegetación de ribera. La hidromorfología se refiere a la estructura, el cambio y la dinámica morfológica de los sistemas hidrológicos a través del tiempo. Estos cambian debido a influencias naturales y antropogénicas como cambios en el uso de suelo y del agua causada por la urbanización, la agricultura y la modificación en la infraestructura para el uso del agua, modificación del régimen de flujo, transporte de sedimentos, morfología del río y movilidad del canal lateral DMA (2000).

Estructura del protocolo de evaluación hidromorfológica

El protocolo se debe aplicar en un transecto de 10 m de longitud al cauce y 10 m perpendiculares, que permite la observación de la vegetación de ribera para reconocer su naturalidad y también permite reconocer las características de los parámetros que evalúa el índice

Posteriormente se comienza con el llenado de la primera hoja de datos generales sobre el sitio de muestreo, registro de parámetros físico-químicos del agua, porcentaje de la composición del sustrato, el tipo de bosque en el que se está ubicado el sitio de muestreo, la forma de vida predominante y un espacio para agregar fotos del tramo muestreado.

La siguiente hoja contiene los 12 parámetros hidromorfológicos a evaluar, divididos en tres secciones:

- d) Calidad de la cuenca.
- e) Hidrología.
- f) Alteraciones antropogénicas.

El apartado de calidad de la cuenca, evalúa la cobertura vegetal nativa en porcentaje, esta tiene una guía anexa de las especies vegetales. Esta guía de identificación está dividida por tipo de bosque (*Pinus hartgewii*, *Abies religiosa* y mixto), especies nativas e introducidas, forma de vida y una imagen para su identificación (tomadas de CONABIO, 2016). Asimismo, cada parámetro tiene una descripción gráfica de las condiciones de los ríos de la Cuenca de México y que se utiliza para dar un puntaje.

El índice tiene un total de 120 puntos y cada sección tiene un total de 40 puntos. El puntaje dado en cada parámetro se selecciona con una marca, para que al final de la evaluación, se obtenga el total y se verifique el estado hidromorfológico de acuerdo a la tabla de colores, en óptima (120-85), media (84-47), mala (46-13) y pobre (<12).

1. Componentes físico-químicos de los ríos de la Cuenca de México/CuMeFQ

Nombre de la subcuenca		Localidad					
LN		Fecha			Hora		
LO		Altitud					
Completaron la forma (nombres)							
Parámetros del agua							
Físicos	Temperatura del agua (°C)						
	Conductividad específica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)						
	Oxígeno Disuelto(OD)/ Saturación de Oxígeno (SO)						
	Aforo ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)						
Químicos	pH						
	Fósforo (mg L^{-1})						
	Nitrito (mg L^{-1})						
	Nitrato (mg L^{-1})						
	Amonio (mg L^{-1})						
Sustrato inorgánico (% de composición en el área muestreada)	Rocas						
	Canto (64-256 mm)						
	Grava (2-64 mm)						
	Arena (0.06-2 mm)						
	Arcilla (0.004 mm)						
Vegetación de ribera	Tipo de bosque			Forma de vida dominante			
	<i>Abies</i>	<i>Pinus</i>	Mixto	árbol	arbusto	pasto	hierba
Agregar fotografías del tramo que se evaluó							

2. Componentes hidromorfológicos de los ríos de la Cuenca de México/CuMeCH

Parámetro	Óptimo	Medio	Malo	Pobre
I. CUENCA				
1. 1. Cobertura vegetal (Nativa)*	Más del 70% de la cobertura vegetal de la zona de ribera compuesta con especies nativas.	60-40% de cobertura vegetal nativa	50-30% de la ribera cubierta por vegetación nativa.	Menos del 30 % de la superficie del banco cubierta por vegetación, parches aislados de la vegetación.
Ribera derecha (Puntaje)	5	3	2	0
Ribera izquierda (Puntaje)	5	3	2	0
2. 2. Estabilidad del banco	Banco estable, poca o mínima (<10%) evidencia de erosión.	Banco moderadamente estable, pequeñas áreas de erosión (10-50 %)	Banco moderadamente inestable con áreas erosionadas, gran potencial de erosión (50-80 %) durante las inundaciones.	Banco inestable, muchas áreas erosionadas (>80%).
Puntaje	10	7	4	1
3. 3. Características del sustrato	Mezcla de materiales, como grava y arena, raíces sumergidas y vegetación acuática	Mezcla de arena, arcilla o lodo; algunas raíces sumergidas y vegetación acuática	Arcilla en la superficie, pocas raíces sumergidas, sin vegetación acuática	Capa de arcilla o rocas, sin presencia de raíces sumergidas o vegetación acuática
Puntaje	10	7	4	1
4. 4. Desarrollo de ganadería y agricultura en la zona de ribera	Sin presencia de cultivos o zonas para el ganado, sin derivaciones para ganadería o agricultura.	20% del suelo para uso agrícola y ganadero.	50% del suelo para uso agrícola y ganadero.	Más del 80% del suelo para uso agrícola y ganadero, presencia de derivaciones para uso doméstico o industrial
Ribera derecha (Puntaje)	5	3	2	0
Ribera izquierda (Puntaje)	5	3	2	0
II. HIDROLOGÍA				
5. 5. Presencia de presas	Ausencia de presas (incluyendo de gavión y de costales) corriente arriba del río.		Presencia de presas (incluyendo de gavión y de costales) corriente arriba del río.	
Puntaje	10		0	
6. 6. Regímenes de velocidad/ profundidad	Presencia de 4 regímenes: lento-profundo lento-somero rápido-profundo somero	3 regímenes	2 regímenes	1 régimen (usualmente lento-somero)
Puntaje	10	7	4	1
7. 7. Alteración en el canal	Ausencia de canalización.	Evidencia de canalización en el pasado.	Canalización extensiva, 40-80% del escurrimiento canalizado e interrumpido.	Banco de la ribera con cemento o gavión, el 80% del escurrimiento canalizado. Hábitat de ribera alterado o ausente.
Puntaje	10	7	4	1

8. 8. Estado del canal	El agua alcanza la base de ambos bancos y el sustrato está expuesto mínimamente	El agua llena >75% del canal disponible o el 25% del sustrato está expuesto	El agua llena 25-75% del canal o el sustrato está expuesto	Muy poca agua en el canal
Puntaje	10	7	4	1
III. PERTURBACIONES ANTROPOGÉNICAS				
9. 10. 9. Efluentes directos al río por el uso doméstico 11.	Ausencia		Presencia	
Puntaje	10		1	
12. 10. Desarrollo urbano	Ausencia de asentamientos humanos, carreteras, derivaciones para usos domésticos o industriales.	20% del suelo para uso humano.	50% del suelo para uso humano.	Más del 80% del suelo para uso humano.
Puntaje	10	7	4	1
13. 11. Desarrollo humano	Ausencia de actividades humanas	Al menos una actividad humana: ganadería, agricultura o piscícola.	Al menos tres actividades humanas: agrícolas, ganadera, piscícola, doméstica (casa/comercio).	Actividades agrícolas, ganadera, piscícola, doméstica (casa/comercio).
Puntaje	10	7	4	1
14. 12. Presencia de contaminación orgánica y de basura y escombros	Menos del 10% de presencia de basura y/o escombros.	Entre 20-40 % de presencia de basura y/o escombros.	Entre 50-80% de presencias de basura y/o escombros.	Más del 90% de Basura y/o escombros.
Puntaje	10	7	4	1
PUNTAJE TOTAL				

CALIDAD HIDROMORFOLÓGICA DEL RÍO (INTERPRETACIÓN)

Calidad Hidromorfológica	Puntaje
Óptima	120 - 85
Media	84 - 47
Mala	46 - 13
Pobre	<12

I. CUENCA

1. Cobertura vegetal. La proporción de taxa introducidos con respecto a los nativos.

Especie	Forma de Vida	Imagen
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> 3420-3800 msnm		
Especies Nativas		
<i>Cestrum nocturnum</i> L.	Árbol	
<i>Alchemilla vulcanica</i> Schldtl. & Cham.	Hierba perenne	
<i>Conyza sophiifolia</i> Kunth.	Hierba anual	
<i>Cyperus seslerioides</i> Kunth.	Hierba perenne	

<p><i>Drymaria leptophylla</i> (Cham. & Schltld.) Fenzl ex Rohrb.</p>	<p>Hierba anual</p>		
<p><i>Epilobium ciliatum</i> Raf.</p>	<p>Hierba perenne</p>		
<p><i>Equisetum hyemale</i> L.</p>	<p>Hierba perenne</p>		
<p><i>Erigeron pubescens</i> Kunth.</p>	<p>Hierba perenne</p>		
<p><i>Eryngium carlinae</i> F. Delaroche.</p>	<p>Hierba perenne</p>		

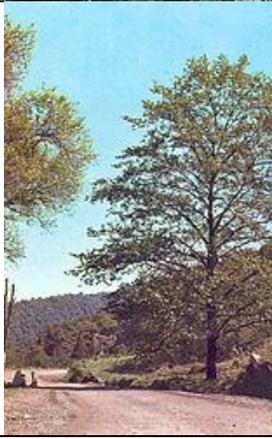
<p><i>Eupatorium sp. L.</i></p>	<p>Hierba perenne</p>		
<p><i>Gamochaeta americana (Mill.) Wedd.</i></p>	<p>Hierba anual</p>		
<p><i>Lobelia cardinalis (L.) Batsch.</i></p>	<p>Hierba perenne</p>		
<p><i>Lopezia racemosa Cav.</i></p>	<p>Hierba anual</p>		

<p><i>Malvastrum coromandelianum</i> (L.) Garcke.</p>	<p>Hierba anual</p>		
<p><i>Melampodium divaricatum</i> (Rich.) DC.</p>	<p>Hierba anual</p>		
<p><i>Oenothera pubescens</i> Willd. ex Spreng.</p>	<p>Hierba perenne</p>		
<p><i>Phytolacca icosandra</i> L.</p>	<p>Hierba</p>		
<p><i>Ranunculus peциolares</i> Humb., Bonpl. & Kunth ex DC.</p>	<p>Hierba perenne</p>		

<p><i>Salvia mexicana</i> L.</p>	<p>Hierba perenne</p>		
<p><i>Solanum nigrescens</i> M. Martens & Galeotti.</p>	<p>Hierba</p>		
<p><i>Stevia jorullensis</i> Kunth.</p>	<p>Hierba perenne</p>		
<p><i>Verbena teucriifolia</i> M. Martens & Galeotti.</p>	<p>Hierba perenne</p>		
<p><i>Veronica peregrina</i> subsp. <i>xalapensis</i> (Kunth) Pennell.</p>	<p>Hierba anual</p>		

Especies Introducidas		
<i>Plantago major</i> L.	Hierba anual	
<i>Poa annua</i> L.	Hierba anual	
<i>Reseda luteola</i> L.	Hierba anual	
<i>Taraxacum officinale</i> F.H. Wigg.	Hierba perenne	
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> y <i>Abies religiosa</i>		
Especies Nativas		
<i>Salix paradoxa</i> Kunth.	Árbol	

<i>Acaena elongata</i> L.	Arbusto o hierba		
<i>Alchemilla pringlei</i> (Rydb.) Fedde	Hierba perenne		
<i>Arenaria bourgaei</i> Hemsl.	Hierba perenne		
<i>Bidens pilosa</i> L.	Hierba anual		
<i>Geranium seemannii</i> Peyr.	Hierba perenne		
Especies Introducidas			

<p><i>Achillea millefolium</i> L.</p>	<p>Hierba perenne</p>		
<p><i>Chenopodium murale</i> L.</p>	<p>Hierba anual</p>		
<p>Bosque de <i>Abies religiosa</i> 2750-3500 msnm</p>			
<p>Especies Nativas</p>			
<p><i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. & Cham.</p>	<p>Árbol</p>		
<p><i>Alnus jorullensis</i> Kunth</p>	<p>Árbol</p>		

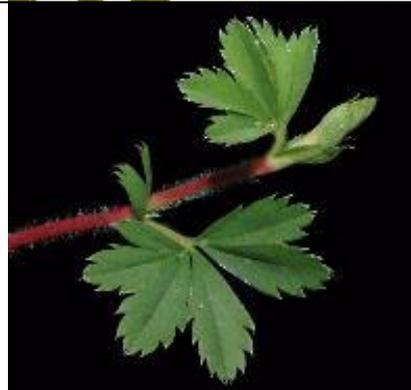
<p><i>Ageratina glabrata</i> (Kunth) R.M. King & H. Rob.</p>	<p>Arbusto</p>		
<p><i>Ageratina maireriana</i> (DC.) R.M. King & H. Rob.</p>	<p>Arbusto</p>		
<p><i>Arctostaphylos pungens</i> Kunth.</p>	<p>Arbusto</p>		
<p><i>Ageratum corymbosum</i> Zuccagni.</p>	<p>Hierba</p>		
<p><i>Alchemilla pectinata</i> Kant.</p>	<p>Hierba perenne</p>		

<p><i>Sigesbeckia jorullensis</i> Kunth.</p>	<p>Hierba perenne</p>		
<p>Especies Introducidas</p>			
<p><i>Sambucus nigra</i> L.</p>	<p>Árbol</p>		
<p>Bosque de <i>Abies religiosa</i> y Mixto</p>			
<p>Especies Nativas</p>			
<p><i>Arbutus xalapensis</i> Kunth</p>	<p>Árbol</p>		
<p><i>Brachypodium mexicanum</i> (Roem. & Schult.) Link.</p>	<p>Hierba perenne</p>		
<p><i>Bromus carinatus</i> Hook. & Arn.</p>	<p>Hierba perenne</p>		

<i>Erigeron longipes</i> DC.	Hierba perenne		
<i>Oxalis corniculata</i> L.	Hierba perenne		
<i>Tripogon spicatus</i> (Nees) Ekman.	Hierba perenne		
<i>Urtica dioica</i> L.	Hierba perenne		
<i>Montanoa tomentosa</i> Cerv.	Arbusto		

<p><i>Salvia gesneriflora</i> Lindl. & Paxton.</p>	<p>Arbusto</p>		
<p>Especies Introducidas</p>			
<p><i>Conyza bonariensis</i> (L.) Cronquist.</p>	<p>Hierba anual</p>		
<p><i>Erodium cicutarium</i> (L.) L'Hér. ex Aiton.</p>	<p>Hierba anual</p>		
<p><i>Eruca sativa</i> Mill.</p>	<p>Hierba anual</p>		

<p><i>Rumex obtusifolius</i> L.</p>	<p>Hierba perenne</p>	
<p><i>Adiantum andicola</i> Liebm.</p>	<p>Hierba perenne</p>	
<p>Bosque Mixto 2620-3370 msnm</p>		
<p>Especies nativas</p>		
<p><i>Alnus acuminata</i> Kunth subsp. <i>glabrata</i> (Fernald) Furlow.</p>	<p>Árbol</p>	
<p><i>Baccharis conferta</i> Kunth.</p>	<p>Arbusto</p>	

<p><i>Baccharis salicifolia</i> (Ruíz Pav.) Pers.</p>	<p>Arbusto</p>	
<p><i>Baccharis sordescens</i> DC.</p>	<p>Arbusto</p>	
<p><i>Adiantum braunii</i> Mett. ex Kuhn.</p>	<p>Hierba perenne</p>	
<p><i>Alchemilla procumbens</i> Rose.</p>	<p>Hierba perenne</p>	

<p><i>Arachniodes denticulata</i> (Sw.) Ching.</p>	<p>Hierba perenne</p>		
<p><i>Argemone ochroleuca</i> Sweet.</p>	<p>Hierba anual o perenne</p>		
<p><i>Arracacia aegopodioides</i> (Kunth) J.M. Coult. & Rose.</p>	<p>Hierba anual</p>		
<p><i>Asplenium formosum</i> Willd.</p>	<p>Hierba</p>		
<p><i>Begonia gracilis</i> Kunth.</p>	<p>Hierba</p>		

<p><i>Bidens aurea</i> (Ait.) Sherff.</p>	<p>Hierba perenne</p>	
<p><i>Bromus dolichocarpus</i> Wagnon.</p>	<p>Hierba perenne</p>	
<p><i>Oxalis latifolia</i> Kunth.</p>	<p>Hierba</p>	
<p><i>Phacelia platycarpa</i> (Cav.) Spreng.</p>	<p>Hierba perenne</p>	

<p><i>Pseudognaphalium semiamplexicaule</i> (DC.) Anderb.</p>	<p>Hierba perenne</p>	
<p><i>Sicyos microphyllus</i> Kunth.</p>	<p>Hierba anual</p>	
<p><i>Solanum americanum</i> Mill.</p>	<p>Hierba anual</p>	
<p><i>Solanum corymbosum</i> Jacq.</p>	<p>Hierba perenne</p>	
<p><i>Tridax trilobata</i> (Cav.) Hemsl.</p>	<p>Hierba anual</p>	

<p><i>Verbena gracilis</i> Desf.</p>	<p>Hierba perenne</p>		
<p>Especies Introducidas</p>			
<p><i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn.</p>	<p>Hierba anual</p>		
<p><i>Melinis repens</i> (Willd.) Zizka.</p>	<p>Hierba perenne</p>		
<p><i>Mentha</i> sp. L.</p>	<p>Hierba perenne</p>		
<p><i>Prunella vulgaris</i> L.</p>	<p>Hierba perenne</p>		

<i>Rumex acetosella</i> L.	Hierba perenne		
----------------------------	----------------	--	--

2. Estabilidad del banco

Banco estable	Banco parcialmente erosionado	Banco totalmente erosionado
		

3. Características del sustrato

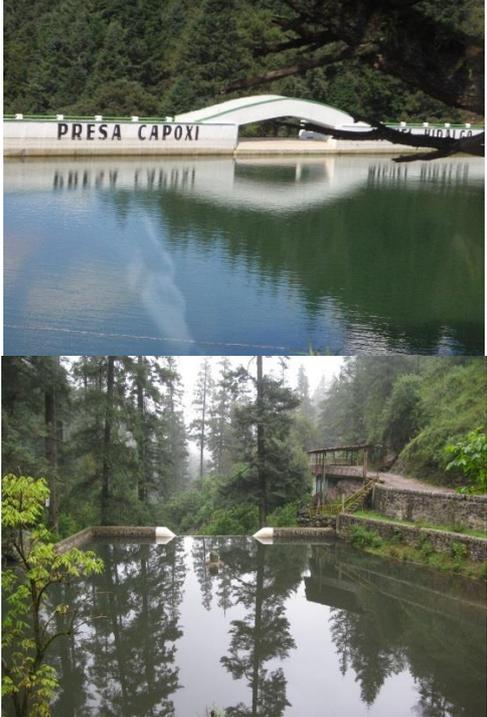
Arena, Grava, Canto, Arena	Algas y Vegetación acuática
	

4. Desarrollo de ganadería, agricultura en la zona de ribera

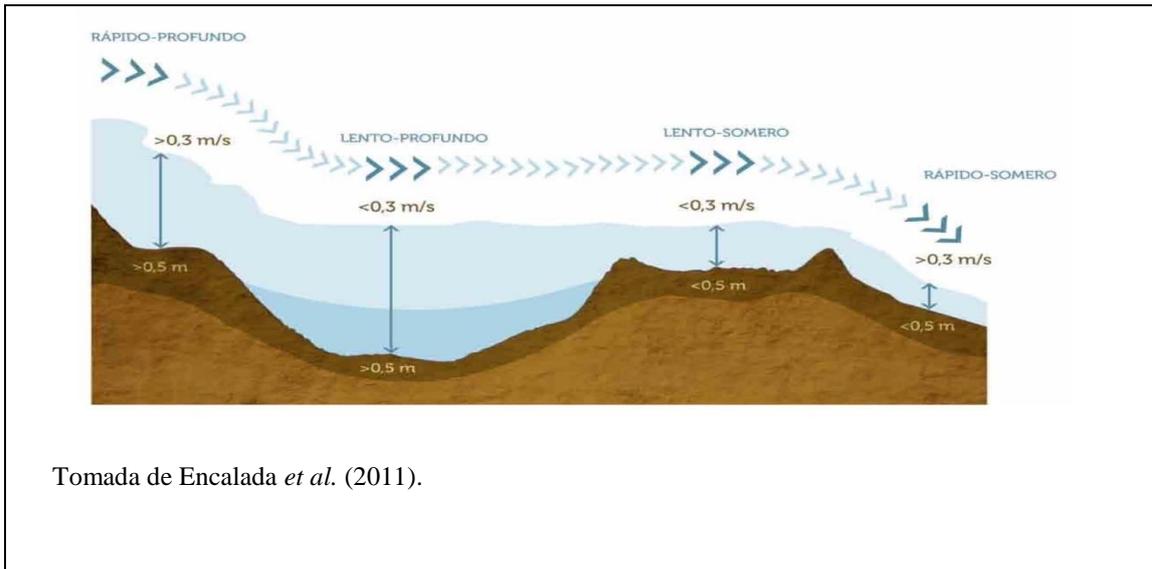
Sin presencia de cultivos o zonas para el ganado	Más del 80% del suelo para uso agrícola y ganadero
	

II. HIDROLOGÍA

5. Presencia de presas

Sin presencia de presas	Presencia de presas
	

6. Regímenes de velocidad



7. Alteraciones en el canal

Sin alteraciones en el canal	Alteraciones parciales en el canal	Canal totalmente modificado
		

8. Estado del canal

<p>El agua alcanza la base de ambos bancos y el sustrato no está expuesto</p>	<p>Muy poca agua en el canal</p>
	

III. Perturbaciones antropogénicas

9. Efluentes directos al río

<p>Sin efluentes al río</p>	<p>Descarga directa de residuos al río</p>
	 <p>ABR-24-2012</p>

10. Desarrollo urbano

Sin desarrollo urbano	Desarrollo urbano en la zona de ribera, carreteras y construcciones de casas.
	 <p data-bbox="938 1055 1209 1086">Fuente: Samantha García</p>

11. Desarrollo humano

Sin desarrollo humano	Desarrollo humano en la zona de ribera
	

12. Contaminación orgánica, basuras y escombros

Sin basura, ni escombros	Presencia de algunas basuras y escombros	Presencia abundante de basuras y escombros
		

Bibliografía

- Encalada, A. C., Rieradevall, M., Ríos-Touma, B., García & N., Prat, N. 2011. Protocolo simplificado y guía de evaluación de la calidad ecológica de ríos andinos (CERA-S). USFQ, UB, AECID, FONAG. Quito, 83 pp.
- Carmona-Jiménez & Caro-Borrero, A., J. 2016. Associations between macroinvertebrates and *Paralemanea mexicana*, an endemic freshwater red alga from Mountain River in Central Mexico. *Neotropical Entomology* doi: 10.1007/s13744-016-0420-z.
- Caro-Borrero, A., Carmona-Jiménez, J. & Mazari-Hiriart, M. 2015. Evaluation for ecological in peri-urban rivers in Mexico City: a proposal for identifying and validating reference sites using benthic macroinvertebrates as indicators. *Journal of Limnology*. 74(1): 1-16.
- CONABIO. 2016. Listado alfabético de especies de maleza de México [en línea] [fecha de revisión: junio, 2016] Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/paginas/lista-plantas-generos.htm>
- Directiva Marco del Agua (DMA. 2000. DIRECTIVA 2000/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2013. Cartas topográficas. Serie V, escala 1: 50,000. Hojas E14B41 (Amecameca), E14B22 (Apan), E14B31 (Chalco), E14B31 (Chignahuapan), E14A39 (Ciudad de México), E14B12 (Ciudad Sahagún), E14A29 (Cuautitlán), E14B42 (Huejotzingo), E14A49 (Milpa Alta), F14D81 (Pachuca), F14D81 (Polotitlán), E14B32 (San Martín), E14A48 (Tenango), E14A18 (Tepeji), E14B21 (Texcoco), E14B11 (Tizayuca), E14B33 (Tlaxcala), E14B13 (Tlaxco), E14A38 (Toluca), F14D82 (Tulancingo), E14A28 (Villa del Carbón), E14A19 (Zumpango).
- Instituto de Biología. Lista de Malezas de México. UNIBIO: Colecciones Biológicas. 2006-05-25. Universidad Nacional Autónoma de México. [en línea] [fecha de revisión 21-08-2016]. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/paginas/lista-plantas-generos.htm>
- Legorreta, J. 2009. Ríos, lagos y manantiales del valle de México. Universidad Autónoma Metropolitana, Gobierno del Distrito Federal. México, D.F.
- Perló, C. & González, R.A. 2005. ¿Guerra por el agua en el valle de México? Estudio sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y Estado de México. UNAM-Fundación Fredrich Ebert Stiftung. México.