



Universidad Michoacana De San Nicolás de Hidalgo

Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental

DETERMINACIÓN DE UN RÉGIMEN DE CAUDALES
ECOLÓGICOS COMO ANTECEDENTE PARA LA PRESERVACIÓN
DEL ECOSISTEMA ACUÁTICO EN EL MEANDRO DEL RÍO
LERMA UBICADO EN LA PIEDAD MICHOACÁN

TESIS presentada por:

ADRIÁN IXCOATL CERVANTES SERVÍN

Al Programa de la Maestría en Ciencias en
Ingeniería Ambiental como requisito
parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN
INGENIERÍA AMBIENTAL**

Morelia Michoacán.

Agosto de 2011

RESUMEN

En este trabajo se presenta la realización de la simulación del hábitat físico para el meandro del río Lerma ubicado en la ciudad de La Piedad Michoacán, México., con el propósito de valorar la disponibilidad de hábitat potencialmente utilizable (HPU) para la especie seleccionada en el estudio *Ictalurus punctatus* en sus estadios de vida (desove, alevín, juvenil y adulto); se realiza la evaluación para el caudal que maximiza el HPU. Para dicho fin, se empleó el sistema PHABSIM (Physical Habitat Simulation System) el cual es parte de la metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology). Se realiza la simulación de hábitat fluvial utilizando modelos de simulación hidrodinámica, del hábitat y el modelo para las preferencias de la especie objetivo, se obtiene así el comportamiento del HPU como función del río en estudio, el cual se muestra en las graficas caudal-hábitat potencialmente utilizable (Q-HPU); en las que se identifica el caudal que maximiza el HPU en sus diferentes estadios de vida, para el desove $10\text{ m}^3/\text{s}$, alevín $4\text{ m}^3/\text{s}$, juvenil $20\text{ m}^3/\text{s}$ y adulto $23.18\text{ m}^3/\text{s}$. En el caso de los estadios de alevín y adulto la tendencia es a maximizar el HPU con el decremento e incremento respectivamente de los caudales. El porcentaje de hábitat disponible para los cuatro estadios de desarrollo resultaría adecuado para los caudales de 10 y $23\text{ m}^3/\text{s}$, el caudal de $8\text{ m}^3/\text{s}$ produce un hábitat del 99% para el estadio desove; se propone asignar un caudal de $8\text{ m}^3/\text{s}$ al mes de abril, el porcentaje de hábitat disponible para los cuatro estadios de desarrollo resultaría adecuado para los caudales de 10 y $23\text{ m}^3/\text{s}$, y notando que el caudal de $8\text{ m}^3/\text{s}$ produce un hábitat del 99% para el estadio desove; se propone asignar un caudal de $8\text{ m}^3/\text{s}$ al mes de abril que es el de menor caudal, y a partir de abril ir modificando proporcionalmente los caudales ecológicos de abril a diciembre y del mismo mes hacia mayo. Posteriormente se propone asignar el caudal máximo de $23\text{ m}^3/\text{s}$ al mes de septiembre, e ir disminuyendo proporcionalmente hacia julio y octubre. Por último los meses de junio y noviembre, en los que se da la transición de los caudales altos a los bajos y viceversa, se calculan los caudales ecológicos promediando los caudales inmediato superior e inmediato inferior.

Palabras clave: Simulación de hábitat físico, IFIM, PHABSIM, Q-HPU, caudales ecológicos.

ÍNDICE

Resumen.....	iii
Lista de Tablas	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Gráficos	viii
Agradecimientos.....	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 GENERALIDADES; EL AGUA Y LAS CIVILIZACIONES	1
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	6
1.2.1 <i>La Importancia de los caudales ambientales.....</i>	<i>7</i>
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1 LA METODOLOGÍA IFIM (<i>INSTREAM FLOW INCREMENTAL METHODOLOGY</i>).....	10
2.1.1 <i>IFIM es una herramienta interdisciplinaria para la solución de problemas</i>	<i>10</i>
2.1.2 <i>IFIM es un sistema modular de soporte a decisiones.....</i>	<i>11</i>
2.1.3 <i>IFIM se fundamenta en principios ecológicos.....</i>	<i>12</i>
2.1.3.1 Régimen de caudales	13
2.1.3.2 Estructura del hábitat.....	13
2.1.3.3 Calidad del agua.....	14
2.1.3.4 Fuentes de entrada de energía	14
2.1.3.5 Interacciones bióticas	15
2.1.4 <i>IFIM es una metodología evolutiva.....</i>	<i>16</i>
2.1.5 <i>IFIM es un proceso.....</i>	<i>16</i>
3. JUSTIFICACIÓN.....	17
4. HIPÓTESIS.....	18
5. OBJETIVOS.....	18
5.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
5.2 OBJETIVO PARTICULAR.....	18
6. METODOLOGÍA.....	19
6.1 LA APLICACIÓN DE PHABSIM	21
6.1.1 <i>Descripción de la zona de estudio</i>	<i>22</i>
6.1.2 <i>Ictiofauna; caracterización de especies y selección de la especie objetivo.....</i>	<i>24</i>
6.1.2.1 Justificación de la utilización de la especie <i>Ictalurus punctatus</i> como especie objetivo	29

6.1.3	<i>Descripción del tramo de río en estudio</i>	32
6.1.4	<i>Hidrodinámica fluvial</i>	32
6.2	OBTENCIÓN DE DATOS DE CAMPO PARA LA SIMULACIÓN DE LA HIDRODINÁMICA FLUVIAL.....	33
6.2.1	<i>Caudales objetivo o de muestreo</i>	33
6.2.2	<i>Secciones transversales</i>	34
6.2.3	<i>Topografía</i>	34
6.2.3.1	Términos de referencia para los trabajos de topografía.....	35
6.2.4	<i>Obtención de la Topografía</i>	45
6.3	SIMULACIÓN DEL HÁBITAT.	51
7.	RESULTADOS	54
7.1	PLANO TOPOGRÁFICO	55
7.2	CURVAS DE PREFERENCIA DE HÁBITAT	56
7.3	PERFILES DE FLUJO LONGITUDINALES	58
7.4	SIMULACIÓN DE LA SUPERFICIE LIBRE DEL AGUA	59
7.5	SIMULACIÓN DE VELOCIDADES	60
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	61
8.1	RÉGIMEN DE CAUDALES ECOLÓGICOS	61
8.2	CAUDALES HISTÓRICOS DEL RÍO LERMA, EN LA PIEDAD, MICHOACÁN	65
9.	CONCLUSIONES	69
10.	BIBLIOGRAFÍA	72
	ANEXO	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de impactos en ríos.

Tabla 2 Especies ícticas encontradas en los sitios de muestreo, tabla modificada de: Informe de los Avances Correspondientes de Agosto-Septiembre 2009. Proyecto CONACYT 73881.

Tabla 3 Datos de campo capturados en Excel.

Tabla 4 Hábitat potencialmente utilizable (HPU) obtenido para los estadios de vida de la especie Ictalurus Punctatus, en el meandro del río Lerma en La Piedad, Michoacán.

Tabla 5 Hábitat potencialmente utilizable (HPU) obtenido para los estadios de vida de la especie Ictalurus punctatus, en el meandro del río Lerma en La Piedad, Michoacán.

Tabla 6 Caudales medios mensuales del río Lerma, medidos en la Estación Corrales, durante el periodo 1930-1939.

Tabla 7 Caudales medios mensuales interanuales del río Lerma, obtenidos a partir de los datos contenidos en la tabla 6.

Tabla 8 Caudales ecológicos mensuales propuestos, en m³/s.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación del Municipio de La Piedad de Cabadas Michoacán.

Figura 2 Cuenca Lerma – Chapala.

Figura 3 Localización del meandro del río Lerma en La Piedad, Michoacán y-Santa Ana Pacueco, Guanajuato. (Google Earth 4.3.7284.3916 (beta)), 20°23'03.95" N, 102°02'19.43"O.

Figura 4 Especies acuáticas nativas de la parte baja del río Lerma.

Figura 5 Vista de planta ubicación del meandro y dren de alivio. Planta.

Figura 6 Zonas delimitadas como polígonos en las que las secciones se obtendrán de paramento a paramento (ver, también, las ilustraciones 5a y 5b).

Figura 7 Elementos para marcar los puntos de referencia en la poligonal abierta y en las secciones transversales.

Figura 8 Colocado del prisma para levantamiento de puntos de la topografía.

Figura 9 Levantamiento de secciones transversales en la zona inundada.

Figura 10 Aspecto de la distribución de puntos topográficos levantados en la zona del meandro, arroyos y dren de alivio.

Figura 11 Matriz de los atributos de las celdas en un sitio de estudio en PHABSIM. Tomada del manual de PHABSIM capítulo 2.

Figura 12 Plano topográfico del meandro de la Piedad.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfica 1 Dibujo de las secciones transversales, obtenidas a partir de los datos de campo capturados en Excel (Cero en Santa Ana Pacueco, Gto.)

Gráfica 2 Depurado de secciones transversales (Sección 0+188.265 Eliminada-Sección trunca.).

Gráfica 3 Relación hábitat-caudal para una especie/estadio derivada de un análisis PHABSIM. Tomada del manual de PHABSIM capítulo 2.

Gráfica 4 Preferencia vs velocidad.

Gráfica 5 Preferencia vs profundidad.

Gráfica 6 Preferencia vs índice de cauce.

Gráfica 7 Perfiles de flujo longitudinales, dirección de flujo de izquierda a derecha.

Gráfica 8 Simulación de las aturas de superficie del agua.

Gráfica 9 Distribución de velocidades simuladas – velocidades observadas.

*Gráfica 10 Curvas Caudales-Hábitat potencialmente utilizable (HPU), para los estadios de vida juvenil y adulto, de la especie *Ictalurus punctatus*, obtenidas para el meandro del río Lerma en La Piedad, Michoacán.*

*Gráfica 11 Curvas Caudales-Hábitat potencialmente utilizable (HPU), para los estadios de vida desove y alevín, de la especie *Ictalurus Punctatus*, obtenidas para el meandro del río Lerma en La Piedad, Michoacán.*

Gráfica 12 Régimen de caudales medios anuales del río Lerma, en la estación hidrométrica Corrales, en el periodo 1930-2009.

Gráfica 13 Régimen de caudales medios mensuales interanuales, del río Lerma, en la estación hidrométrica Corrales, obtenido con datos del periodo 1930-1939.

Gráfica 14 Régimen de caudales medios mensuales interanuales, del río Lerma, en la estación hidrométrica Corrales, obtenido con datos de el periodo 1930-1939; y régimen de caudales ecológicos propuesto.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis más sentidos agradecimientos a todas las personas e instituciones que en gran medida aportaron a la realización de este trabajo de investigación.

A mi familia que sustenta y soporta mis más grandes sueños y anhelos en especial a mi madre la Licenciada en Enfermería María Luisa Servín Lara quien con su apoyo y comprensión me alienta a soñar con lo imposible.

A mis compañeros y amigos de la primera generación del programa institucional de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por todo su cariño y amistad.

Al Doctor en Ciencias Medardo Cerna Gonzales por todo su apoyo y comprensión. ¡Mi admiración y respeto a todas las personas que trascienden a su época!

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades; el agua y las civilizaciones

No es de extrañarse que, las civilizaciones más importantes en la historia de la humanidad fueran aquellas en las que se disponía en gran forma del recurso hídrico, principalmente ríos y lagos. Con base a este recurso se desarrollaron civilizaciones de las que hasta hoy día perdura su legado, como Egipto con el río Nilo, Roma con el río Tíber, Mesopotamia con los ríos Tigris y Éufrates, las cuales se denominan civilizaciones fluviales. En Mesoamérica Los Mayas, Los Aztecas y Los Toltecas se desarrollaron a orillas ó sobre grandes masas de agua, como han sido los emblemáticos lagos Texcoco y Titicaca; algunas otras, en las orillas costeras de los Océanos Pacífico y Atlántico. La generalización del regadío artificial, en las culturas mencionadas, nos permite calificar de sociedades hidráulicas a dichas formaciones sociales (Luis Vitale. 1983)

La Piedad, población prehispánica fundada por los aztecas y denominada Zula: “Lugar de Codornices”. Fue conquistada en 1380 por los tarascos, bajo el mando de Tariácuri, quien la llamó Aramutaro Tzicuirin: “Lugar de Cuevas Pequeñas”. Obtuvo el rango de municipio, por la Ley Territorial del 10 de diciembre de 1831. En 1861, se elevó a la categoría de Villa, siendo su nombre “Villa de Rivas”. Diez años más tarde, en 1871 se le otorgó el título de Ciudad, con el nombre de “La Piedad de Cabadas”, en memoria del cura José Cabadas Corzo.

Se localiza al Norte del estado, en las coordenadas 20°21’ de latitud Norte y 102°02’ de longitud Oeste, a una altura de 1,680 metros sobre el nivel del mar. Situada dentro de la cuenca del río Lerma, limita al Norte con los estados de Jalisco y Guanajuato, al Este con Numarán, al Sur con Zináparo, Churintzio y Ecuandureo, y al Oeste con Yurécuaro como se muestra en la (Figura 1). Su distancia a la capital del Estado es de 183 km., (Centro Nacional de Desarrollo Municipal. 1999).



Figura 1 Ubicación del Municipio de La Piedad de Cabadas Michoacán.

La cuenca del río Lerma (Figura 2) comprende la siguiente área geográfica: el área de captación cuyo colector principal es el río Lerma, incluyendo el lago de Chapala y las áreas de captación de otras corrientes que descargan directamente en él, hasta el sitio denominado cortina de Poncitlán, localizado sobre el tramo inicial del río Santiago, a su salida del lago de Chapala.

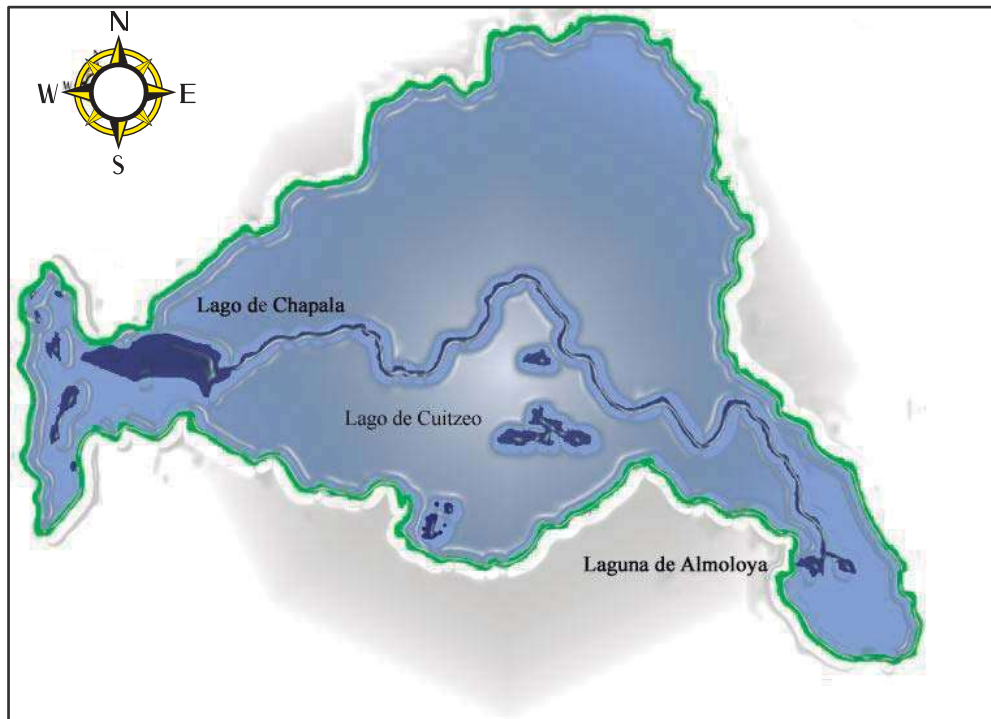


Figura 2 Cuenca Lerma – Chapala.

Desde sus orígenes, en la laguna de Almoloya hasta el lago de Chapala, el cauce principal es el río Lerma. El agua que fluye por el cauce discurre por las siguientes entidades federativas: Estado de México, Michoacán, Querétaro, Guanajuato y Jalisco.

El río Lerma se origina en los manantiales de Almoloya del río en el Estado de México y atraviesa hacia el NO del Valle de Toluca, formando parte del sistema Lerma-Chapala-Santiago que descarga en el Océano Pacífico. Este sistema provee de agua potable a la ciudad de México por un acueducto que atraviesa la Sierra de las Cruces (García y Falcón 1974 en Bueno-Soria J. *et al.* 1980). Este río es un recurso natural básico para las actividades humanas y también es utilizado como fuente de energía eléctrica que surte a la ciudad de México con 79,000 kw (García y Falcón, 1974 en Bueno-Soria J. *et al.* 1980).

Por otra parte, sus aguas, se utilizan para riego de los cultivos de las zonas agrícolas situadas en sus márgenes, como ejemplo tenemos el Valle de Santiago en el estado de Guanajuato el cual ocupa un lugar importante dentro de las zonas agrícolas del país, asimismo es hábitat de peces comestibles que son aprovechados por el hombre de estas regiones (Bueno-Soria J. *et al.* 1980). Sin embargo, la mayor parte de sus aguas están contaminadas por ser utilizado como canal receptor de desecho por las ciudades y zonas industriales de Toluca y Salamanca, recordando que en esta última existe una refinería de petróleo. Aunado a lo anterior, se agrega la contaminación que tiene su origen en el lavado de las tierras de cultivo (Bueno-Soria J. 1980).

Como lo menciona (Bueno-Soria J., 1980) en relación a la problemática ambiental-ecológica del Río Lerma, estas condiciones no han cambiado a beneficio del ecosistema acuático del río, sino por el contrario, en base al estudio del Centro de Investigaciones Interdisciplinario para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) en el año 2003 para el meandro del río ubicado en La Piedad, la problemática ha aumentado.

En la mayoría de los ríos de México se ha modificado, en diferente medida, el régimen original de sus caudales, como consecuencia de la utilización del recurso hídrico para diferentes usos (i.e., doméstico, público urbano, pecuario, agrícola, generación de energía eléctrica, industrial, etc.) (García-Rodríguez E. y Ochoa-Franco L.A., 2008).

El río Lerma en el tramo de estudio está intrínsecamente relacionado en su geografía con dos entidades federativas (Figura 3); La Piedad de Cabadas, Michoacán y el pueblo Santa Ana Pacueco, municipio de Pénjamo, Guanajuato. Este río sirve a su vez como límite territorial para la parte Noroeste de Michoacán y la parte Suroeste de Guanajuato. A continuación se muestra la ubicación espacial del meandro del río Lerma en la Piedad, Michoacán.

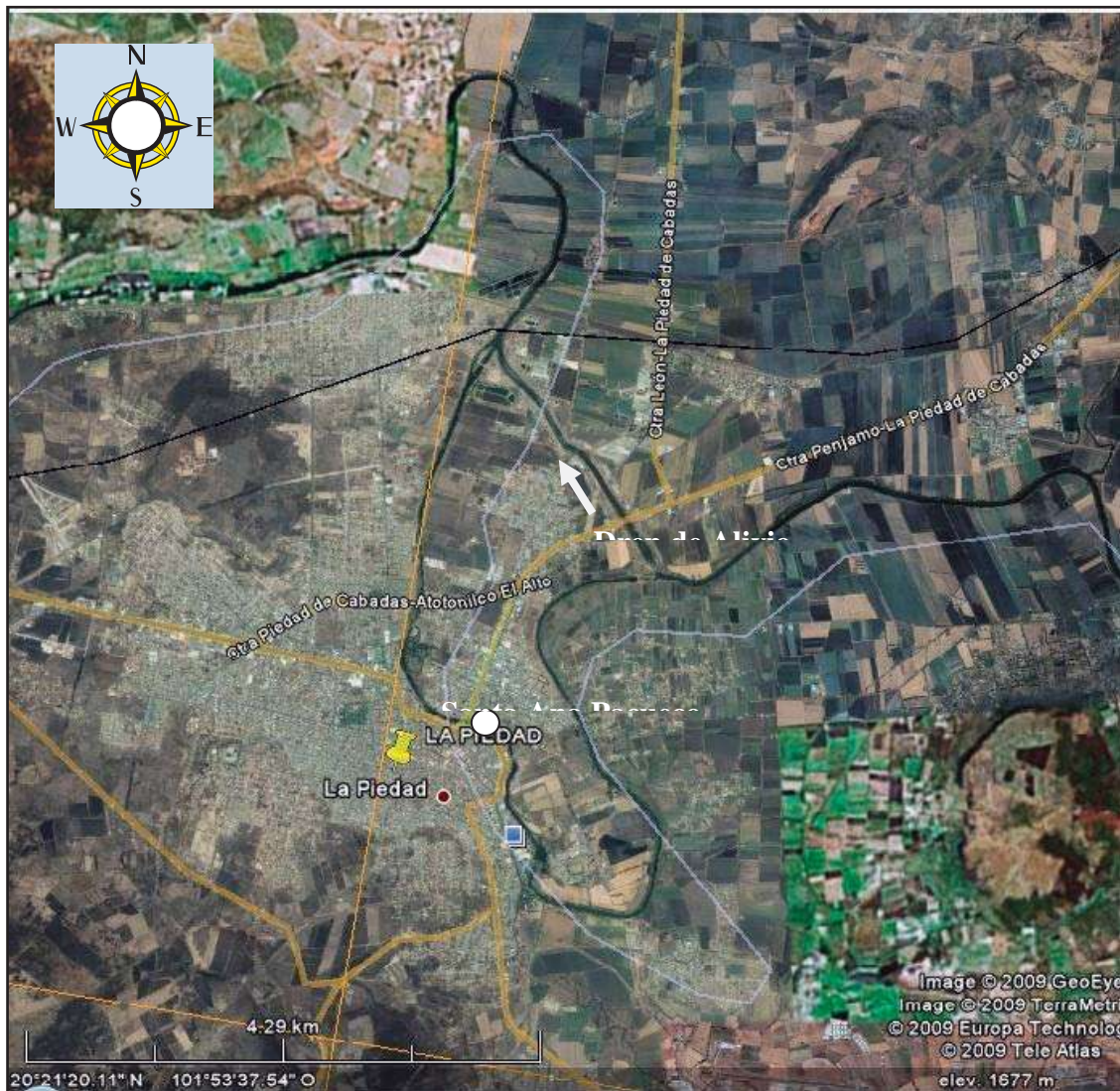


Figura 3 Localización del meandro del río Lerma en La Piedad, Michoacán y-Santa Ana Pacueco, Guanajuato. (Google Earth 4.3.7284.3916 (beta)), 20°23'03.95" N, 102°02'19.43"O.

El río Lerma es un componente esencial de la ciudad de La Piedad y Santa Ana Pacueco. Los servicios que ofrece el río a estas comunidades son varios, como: el suministro de agua para el riego de parcelas de cultivo, regulador de clima, belleza escénica y desgraciadamente en algunos puntos de ambas localidades como dren para aguas de residuos municipales, rastros y pequeñas cerdillas.

Aunque la ciudad de La Piedad cuenta al final del meandro con una planta de tratamiento para aguas residuales municipales, más del 10 % del total de la población no está conectada al colector de aguas municipales y estas descargan sus aguas directamente al río (Rubio-Olivares, J. 2008), de igual manera prevalece la problemática en la comunidad de Santa Ana Pacueco, Guanajuato.

1.2 Descripción del problema

A finales de los años setentas y debido a la problemática de inundaciones que padecía La Piedad durante las crecientes del río Lerma, fue construido un dren de alivio de aproximadamente 2.8 kilómetros de longitud (Figura 3), considerando el denominado meandro del cauce. Dicho dren se mantiene en funcionamiento aunque con problemas en sus compuertas (CIIDIR, 2003).

De la investigación efectuada en septiembre de 2003 por parte del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) denominado “Evaluación física, química y biológica del río Lerma (meandro) a la altura de la ciudad de La Piedad, entre los estados de Guanajuato y Michoacán”, en su parte de resultados se mencionan los problemas más importantes con referencia al deterioro sanitario:

1. Se evidencia el grado de deterioro de esta fracción del río Lerma
2. El régimen de inundaciones se sigue presentando a pesar de las obras hidráulicas que se han realizado.
3. Esta zona se considera un foco de infección por enfermedades gastrointestinales.
4. Los niveles de degradación de la calidad del agua aumentan al avanzar por los 12.5 Km. del meandro.
5. En los últimos tres años, los índices de enfermedades en la población infantil se han incrementado, la zona ocupa uno de los primeros lugares en el mundo en incidencia de neurocisticercosis y debido al uso desmedido de insecticidas en los hogares, por la abundancia de mosquitos, se presenta el problema de leucemia. Hoy, dicho lecho alcanza el rango de foco infeccioso de alto riesgo.

1.2.1 La Importancia de los caudales ambientales

El aprovechamiento del recurso hídrico en México se ha incrementado debido a las demandas ligadas al abastecimiento poblacional y a las de los sectores industriales, agropecuarios e hidroeléctricos primordialmente. “El proceso intervencionista del dominio hidráulico favorece un desarrollo valioso indiscutible, pero a expensas de un deterioro preocupante de los ecosistemas fluviales. Aunque el derecho legal para extraer agua de una corriente para finalidades diversas ha sido reconocido durante siglos, la noción de unos caudales ambientales preservadores de los ecosistemas fluviales es relativamente muy reciente” (Lamb y Doerksem. 1987). En (Diez-Hernández J.M. & Ruiz-Cobo D.H. 2007).

2. MARCO TEÓRICO

Las obras hidráulicas son tan abundantes en los ecosistemas fluviales que, en la actualidad, son pocos los ríos cuyos caudales no están regulados artificialmente. Por ello, la Gestión del Agua y de los recursos biológicos con ella relacionados debe enfrentarse con frecuencia a la problemática que estas obras originan y en concreto cuantificar los caudales circulantes mínimos capaces de mantener los ecosistemas de los ríos regulados (García de Jalón D. y Gonzales del Tango M., 1998).

El uso de las obras hidráulicas origina una regulación artificial de caudales que afecta profundamente a la fauna reófila, no ya por las grandes fluctuaciones de nivel provocadas (la mayoría de ellas mucho más dramática que las debidas a la torrencialidad natural), sino también por el desfase temporal en que ocurren respecto a la fenología natural (Ward y Stanford. 1979; Petts, 1984).

La atención de los diferentes usos del agua se debe dar dentro de un marco de respeto a los ecosistemas asociados, con la finalidad de lograr el desarrollo sustentable de los países. Para tal fin, en lo que se refiere a las corrientes superficiales, se determinan regímenes de caudales ecológicos mediante metodologías que permiten evaluar los requerimientos hídricos para que los organismos que habitan tal ecosistema cuenten con las condiciones adecuadas para su desarrollo (Stalnaker, 1982; en Tharme R.E., 2003), al mismo tiempo que se aporta información importante para determinar la disponibilidad del recurso hídrico para otros usos (e.g., agrícola, pecuario e industrial) (García-Rodríguez E. y Ochoa-Franco L.A., 2008).

Investigadores de instituciones públicas y privadas de varios países han realizado esfuerzos encaminados a diseñar y/o aplicar metodologías para determinar la cantidad de agua necesaria para el mantenimiento del ecosistema fluvial: Arthington *et al.* (2004), Bovee *et al.* (1998), García de Jalón (2003), García *et al.* (1999), Gore *et al.* (1988), Jowett (1998), Martínez (2000), Parasiewicz y Dunbar (2001), Tennant (1976) y Tharme (2003), entre otros; las metodologías que más se han utilizado en el ámbito mundial (Tharme, 2003; Reiser *et al.*, 1989) son las de Tennant (basada en datos hidrológicos) y la IFIM (Instream Flow Incremental Methodology). En esta última, la simulación del hábitat fluvial es una herramienta fundamental, (García-Rodríguez *et al.*, 2008), “Entre la diversidad de enfoques propuestos para evaluar los regímenes de caudales ecológicos, el más utilizado y aceptado científicamente es la conocida metodología <<Instream Flow Incremental Methodology>> (IFIM)”. (Diez-Hernández J.M. & Ruiz-Cobo D.H., 2007)

“The Instream Flow Incremental Methodology (IFIM)” por sus siglas en inglés y al cual en lo sucesivo llamaremos IFIM, fue desarrollado por la (USGS) “U.S. Geological Survey - Biological Resources Division”, La división de recursos biológicos de la oficina de estudios geológicos de Los Estados Unidos de América. La metodología IFIM ha estado presente de una forma u otra desde 1980., y podemos encontrar ya en 1982 un primer escrito “A guide to analysis using the instream flow incremental methodology”, este documento es conocido como: “Instream flow information paper 12”, publicado por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de E. U. (Bovee 1982) en (Bovee *et al.*, 1998).

IFIM es uno de los instrumentos más utilizados en el mundo para evaluar los efectos de la manipulación de flujos en hábitats de ríos. Es al mismo tiempo uno de los más malinterpretados y, en algunos casos mal utilizados (Bovee Keen D., 1998). Para la realización de nuestros objetivos y de este trabajo de investigación, en lo que se refiere a la modelación de caudales ambientales utilizaremos la metodología IFIM.

2.1 La Metodología IFIM (*Instream Flow Incremental Methodology*)

Podemos mencionar brevemente las características principales de esta metodología.

- IFIM es una herramienta interdisciplinaria para la solución de problemas.
- IFIM es un sistema modular de soporte a decisiones.
- IFIM se fundamenta en principios ecológicos.
 - Régimen de caudales.
 - Estructura de hábitats.
 - Calidad del agua.
 - Fuentes de entrada de energías.
 - Interacciones bióticas.
- IFIM es una metodología evolutiva.
- IFIM es un proceso.

2.1.1 IFIM es una herramienta interdisciplinaria para la solución de problemas

IFIM se debería de considerar principalmente como un proceso para la solución de problemas de gestión de agua que incluye intereses en los recursos para el hábitat riveroño. Esta metodología fue desarrollada bajo el liderazgo de Servicio de Pesca y Vida Silvestre de E.U., por un grupo interdisciplinario de científicos tomados del gobierno federal y agencias y academias del recurso estatal (Trihey and Stalnaker 1985; Stalnaker 1993) en (Bovee *et al.*, 1998). La primera década en el desarrollo de esta metodología se enfocó en la integración de numerosas técnicas desarrolladas de la ingeniería de recursos de agua e ingeniería en calidad del agua, ictiología biológica y ciencias sociales (Stalnaker 1982) en (Bovee *et al.*, 1998).

Las operaciones de reserva y los modelos de dirección de agua, cuando son acoplados con los análisis en serie de periodos de hábitat de IFIM, permiten comparar numerosas alternativas de esquemas para la liberación de agua (Harpman *et al.*, 1993) en (Bovee *et al.*, 1998).

2.1.2 IFIM es un sistema modular de soporte a decisiones

IFIM se compone de una librería de procedimientos analíticos enlazados que describen las características espaciales y temporales del hábitat que resultan de una alternativa de manejo en la gestión de un río. Una de las características únicas de IFIM es el análisis simultáneo en la variabilidad del hábitat sobre el tiempo y el espacio (Bovee *et al.*, 1998).

Se pueden utilizar tres niveles de estratificación-macro hábitat en una análisis IFIM: Cuenca tipo drenaje, la cual puede variar en tamaño y forma desde decimas a miles de kilómetros cuadrados. Una red generalmente consiste en dos ó más subcuencas, pero puede comprender una cuenca drenaje completa. El segmento es el estrato más pequeño y se considera como la unidad de cálculo fundamental utilizada en IFIM (Bovee *et al.* 1998).

Los meso hábitats se pueden subdividir en componentes de macro hábitats, los cuales varían en área de menos de uno hasta varios metros cuadrados. Un micro hábitat se define como el área localizada del río que tiene relativamente condiciones homogéneas de profundidad, velocidad, substrato y cobertura (Bovee *et al.*, 1998).

2.1.3 IFIM se fundamenta en principios ecológicos.

“Karr y asociados (Gorman and Karr 1978; Karr *et al.*, 1986), al desarrollar el índice de integridad biológica (IIB), sugieren que los impactos humanos-inducidos en los sistemas de ríos se dividen en las siguientes categorías: régimen de flujos, estructura del hábitat, calidad del agua, suministro de energía e interacciones bióticas. La tabla 1 recopila estos mecanismos como factores a ser considerados cuando se identifican impactos potenciales como resultado de una interrupción en una o más vías.” (Bovee *et al.*, 1998).

Tabla 1 Tipos de impactos en ríos.

Régimen de caudales	Estructura del hábitat	Calidad del agua	Suministro de energía	Interacciones bióticas
Descarga	Diversidad de hábitat	Nutrientes	Producción de algas	Especies exóticas
Profundidad	Salinización	Régimen térmico	Entrada de energía	Especies endémicas
Velocidad	Estabilidad de rivera	Turbidez	Partículas de materia orgánica	Candidato a especie amenazada y en peligro
Frecuencia de inundación	Cobertura	Salinidad	Invertebrados acuáticos	Hibridación
Magnitud de inundación	Restos de madera	Oxígeno disuelto	Invertebrados terrestres	Estructura poblacional
Frecuencia de sequía	Sinuosidad del canal	pH		Competencia
Magnitud de sequías	Vegetación riparia	Toxinas		Riqueza de especies
Variaciones del caudal	Conectividad del hábitat			Depredación
				Estructura trófica

2.1.3.1 Régimen de caudales

“La hidrología conlleva el análisis temporal dentro de IFIM debido a que la cantidad de hábitat en un segmento en un tiempo dado se relaciona al caudal en ese mismo tiempo. Una de las consideraciones más importantes en el diseño de un análisis IFIM es determinar el periodo apropiado de registro y espacios de tiempo para ser utilizados en describir variaciones de hábitat bajo una línea base y alternativa en régimen de caudales.” (Bovee *et al.*, 1998).

2.1.3.2 Estructura del hábitat

“La estructura del hábitat es cuantificada en escala de microhábitat pero se agrega a la escala mesohábitat en IFIM” (Bovee *et al.*, 1998). El sistema de simulación de hábitat físico (The Physical Habitat Simulation System) por sus siglas en inglés (PHABSIM) (Millhous *et al.*, 1989) consiste en la integración de modelos hidráulicos y de micro hábitat con el fin de cuantificar la cantidad de micro hábitat disponible para una especie objetivo dentro de varios rangos de descarga. La combinación que hace PHABSIM de las características estructurales del canal, distribuciones simuladas de profundidad, de velocidad y los criterios de preferencia de hábitat para la especie objetivo, arrojan una relación funcional entre caudales y el área micro hábitat utilizable por unidad de longitud en el cauce para la especie objetivo.

“Los modelos de simulación hidráulica permiten una predicción precisa de las variables hidráulicas (e. g., profundidad, velocidad y anchura) para descargas que no pudieron o no fueron medidas. Dichas simulaciones permiten al analista evaluar la duración y tiempos de inundación de la zona de transición terrestre-acuática (Junk *et al.*, 1989). También es posible describir las relaciones entre caudales y estructura del hábitat en términos más generales, tales como diversidad de hábitat y riqueza.” (Bovee *et al.*, 1998).

2.1.3.3 Calidad del agua

“La temperatura y la calidad del agua son componentes del Macrohábitat de IFIM. Los estudios de IFIM generalmente incorporan modelos de calidad del agua en uso común por el departamento de recursos hídricos o la agencia de salud pública de la región (Bartholow 1989; Thornton *et al.*, 1990). Se han preparado documentos guía para la evaluación y recomendación de regímenes de temperatura en conjunción con aplicaciones IFIM para algunas especies de peces importantes (Armour 1991, 1993).” (Bovee *et al.*, 1998).

2.1.3.4 Fuentes de entrada de energía

“Hoy día, los modelos relacionados con los caudales para evaluar la entrada primaria de energía en los ríos ha sido restringida a simulaciones de áreas en microhábitats para el uso de macro invertebrados bénticos en cauces, que no son habitados por salmones ó truchas. Dichos modelos se basan en la ocupación de diferente substrato y condiciones de velocidad por varias especies de insectos acuáticos (Sprules 1947; Needham and Usinger 1956; Minshal 1984; Gore 1987)” (Bovee *et al.*, 1998).

2.1.3.5 Interacciones bióticas

“De las cinco vías enlistadas por Karr (1991), las vías bióticas han sido las más ignoradas y ofrecen un área de oportunidad para desarrollos futuros. La competencia inter-específica tiene una consecuencia en el manejo de flujo como aquellos tomados para examinar la cantidad de hábitat sobre especies de truchas (Nehring and Miller 1987; Loar and West 1992). Un análisis cuidadoso de temperaturas históricas simuladas y patrones de flujo para el área de un río puede proveer evidencia suficiente para la hipótesis que explica la dominancia observada de una especie sobre otra en la zona. Temperaturas desfavorables durante el nivel de desove e incubación, altas velocidades desfavorables durante la emergencia de los alevines, o traslapes en los espacios de desarrollo y descanso durante periodos críticos todo puede mover el balance a favor de una especie sobre de otra” (Bovee *et al.*, 1998).

“El enfoque inicial de los estudios de flujos de caudales que se usan en IFIM es entender las dinámicas en el cambio de hábitat bajo condiciones históricas de caudales para el sistema del río bajo estudio. IFIM presenta procedimientos analíticos diseñados para relacionar las dinámicas de hábitat e hidrología. Estos procedimientos proveen información compatible con cuatro conceptos actuales de los ecosistemas en ríos: (1) el concepto de sucesión longitudinal expuesto por Shelford (1911), trabajado por Trautman (1942), Burton y Odum (1945), y Vannote *et al.*, (1980); (2) segregación de hábitat y la importancia de parches de hábitat y fronteras de hábitat en la partición de recursos (Chapman 1962, 1966; Wiens 1977; Schlosser 1982, 1987; (3) el concepto de frecuencia de inundación expuesto por Junk *et al.*, (1989); y (4) las respuestas bióticas a procesos estocásticos (Grossman *et al.* 1982; Schlosser 1987). En la dinámica de los sistemas lóticos, la integración de estos conceptos es necesaria para marcar la diferencia entre procesos estocásticos y procesos determinativos para la comunidad a estudiar (Schlosser 1982; Gelwick 1990; Strange *et al.*, 1991)” en (Bovee *et al.*, 1998).

2.1.4 IFIM es una metodología evolutiva.

“Cientos de aplicaciones de IFIM así como numerosas críticas e invitaciones para mejorar aparecieron en los años 1980’s (Marthur *et. al.*, 1985; Morhardt 1986; Shirvell 1986; Orth 1987; Scott and Shirvel 1987; Gore and Nestler 1988; Lamb 1989). Bajo el auspicio de la American Fisheries Society (AFS), se llevaron a cabo dos investigaciones en 1981 y en 1986 para todo el estado, agencias de pesca en provincias y federales en Norte América, incluyendo numerosos usuarios de IFIM. La investigación trajo como resultado el acopio y resumen en la extensión del uso de IFIM en Norte América, y la declaración de prioridades para las necesidades de investigación (Reiser *et al.*, 1989). Bovee et al creen que en el futuro incrementará la importancia de las relaciones en las dinámicas del hábitat con las dinámicas de las poblaciones de peces y características de la comunidad” (Bovee *et al.* 1998).

2.1.5 IFIM es un proceso

“La ultima perspectiva de IFIM es la de un proceso el cual consiste en cuatro actividades o fases interrelacionadas: Identificación y diagnóstico del problema que consiste en dos componentes (1) Análisis legal e institucional en su contexto para la solución del problema, (2) Análisis que identifica las necesidades de los tomadores de decisiones, de los problemas y de la información que se necesitará para resolver el problema, estudio de planeación, estudio de implementación, y análisis de alternativas/resolución de problemas.” (Bovee *et al.*, 1998).

3. JUSTIFICACIÓN

Para la ciudad de La Piedad es de importancia prioritaria dentro de sus necesidades municipales solucionar de una manera integral la problemática ambiental que se tiene hoy día, una parte de esta, es la determinación de un régimen de caudales ecológicos que garantice la disponibilidad de un caudal mínimo circulante en los diferentes meses a lo largo del año por el meandro del río Lerma ubicado en esta misma ciudad, el cual se espera que mejore las condiciones ambientales en la ciudad.

En relación con los regímenes de caudales ecológicos, en la Legislación Mexicana se habla del uso del agua para conservar los ecosistemas acuáticos, de acuerdo a lo siguiente: en la Ley de Aguas Nacionales y su reglamento publicado en el año 2004, artículo 3 fracción LIV, se encuentra la definición del uso ambiental o uso para conservación ecológica, en la cual se habla del caudal que debe conservarse para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio ecológico del sistema. Adicionalmente, en varios artículos de la Ley antes mencionada, y en el inciso 4.3.3 y el transitorio segundo de la Norma Oficial mexicana NOM-011-CNA-2000, se justifica la necesidad de normalizar un procedimiento para determinar los volúmenes de agua o caudales necesarios para conservar en buen estado los ecosistemas correspondientes, (García-Rodríguez E. y Ochoa-Franco L.A. 2008).

4. HIPÓTESIS

La disponibilidad de hábitat para las especies objetivo en el meandro del río Lerma en La Piedad, Michoacán depende del caudal circulante y del hábitat físico fluvial.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo General

Determinar un régimen de caudales ecológicos como antecedente para la preservación del ecosistema acuático en el meandro del río Lerma ubicado en La Piedad, Michoacán.

5.2 Objetivo Particular

Efectuar la simulación del hábitat físico del meandro del río Lerma ubicado en La Piedad, Michoacán, y utilizar los resultados como base para proponer un régimen de caudales ecológicos.

6. METODOLOGÍA

La simulación del hábitat pretende integrar dos de los principales componentes del ecosistema fluvial que determinan la productividad de la fauna acuática: el régimen de flujo y la estructura física del hábitat (Karr *et al.*, 1986). Para integrar dichos componentes se emplean modelos para la simulación de la hidrodinámica fluvial y del hábitat, que son alimentados con datos hidrométricos, biológicos y geomorfológicos, tomados directamente del río en estudio, de tal manera que para cada caudal se determina la disponibilidad de hábitat potencialmente utilizable por los organismos acuáticos objetivo, y se construyen gráficos caudal-hábitat para determinar el caudal que maximiza el hábitat potencialmente utilizable., (García-Rodríguez E. y Ochoa-Franco L.A. 2008).

En la metodología IFIM (Bovee *et al.*, 1998 y Bovee, 1992), la simulación del hábitat se efectúa utilizando el sistema para computadora denominado PHABSIM (Physical Habitat Simulation System) (Waddle, 2001; Milhous *et al.*, 1984 y 1989). Los sistemas de simulación del hábitat están constituidos, fundamentalmente, por dos partes: 1) uno o varios modelos para efectuar la simulación de la hidrodinámica fluvial, y 2) uno o varios modelos para efectuar la simulación del hábitat. El PHABSIM fue el primer sistema de simulación del hábitat desarrollado (Milhous, 1984), y ha sido aplicado y contrastado en numerosos países., (García-Rodríguez E. y Ochoa-Franco L.A. 2008).

“PHABSIM predice los cambios del microhábitat físico asociados con las alteraciones del flujo tal como una reducción en su caudal para los cambios estacionales, provee además herramientas de simulación, las cuales caracterizan la estructura del microhábitat físico de un río y describen las características dependientes del flujo del hábitat físico en función de las respuestas biológicas de una especie objetivo seleccionada y sus estadios de vida” (Bovee *et al.*, 1998).

“La relación entre el hábitat físico y la producción de peces o cualquier otro organismo acuático asume que la generación de beneficios para los peces está limitada por la disponibilidad de hábitat físico. Esta hipótesis no siempre es cierta. La producción puede ser limitada por la calidad del agua (i.e., lluvia ácida), por las actividades del hombre (i.e., actividades de uso de tierras ó la sobreexplotación de algunas especies), o por los acontecimientos y las condiciones que ocurren en una escala temporal y espacial más allá del alcance de la aplicación del modelo. En esencia en todas las situaciones, el hábitat físico es una condición necesaria, pero no suficiente, para la producción y supervivencia de organismos acuáticos. Por lo tanto, los resultados de PHABSIM pueden visualizarse mejor como un indicador *potencial* de población en sistemas donde las condiciones de hábitat que se describen en PHABSIM son las preocupaciones principales.” (Bovee *et al.*, 1998).⁵

“Para entender PHABSIM se deben comprender como se usa el termino general hábitat. Macrohábitat se refiere a una porción longitudinal de un río en el cual las condiciones químicas o físicas influyen la conveniencia de todo segmento de río para un organismo acuático. Mesohábitat es un área discreta de un río definida por la geometría del canal con características físicas similares, e.g., pendiente, ancho, profundidad y substrato. Dichas unidades geomórficas (Hawkins, *et al.*, 1993) son llamadas comúnmente piscinas, rabiones, etc. Microhábitat se refiere al área más pequeña ubicada dentro de una escala mesohábitat mas grande utilizada por un organismo acuático para funciones específicas (e.g., desove). Microhábitat se describe típicamente por una combinación de variables hidráulicas y físicas tales como, profundidad, velocidad, substrato y cobertura en una escala espacial cerca del cero hasta algunos metros. Finalmente, el hábitat total es una agregación de área mojada disponible condicionada por conveniencias de microhábitat y macrohábitat.” (Bovee *et al.*, 1998).

“PHABSIM estima los cambios en el microhábitat físico como una función del flujo, pero no integra directamente otros elementos de sistemas loticos tales como, calidad del agua y entradas de energía.” (Bovee *et al.*, 1998).

“La salida más común de PHABSIM es, el área utilizable ponderada (WUA). Esta medida de hábitat es una combinación de cantidad y calidad del microhábitat físico. WUA se expresa en unidades de área de microhábitat por unidades de distancia lo largo de un río (e.g., pies cuadrados por 1000 pies de río ó metros cuadrados por 1000 m) en IFIM, los valores de microhábitat derivados de PHABSIM sirven de entrada en una valoración para una propuesta alternativa en el manejo de un río, que conllevara a la negociación de regímenes de caudales.” (Bovee *et al.*, 1998).

“PHABSIM está enfocado para usarse en aquellas situaciones donde el flujo del río es un factor limitante que controla los recursos acuáticos y las condiciones del campo son compatibles con las teorías base y suposiciones de varios modelos de hábitat se conjugan razonablemente. PHABSIM puede conjugarse con análisis de series de hábitat para incorporar el componente temporal en la variación del hábitat.” (Bovee *et al.*, 1998).

6.1 La aplicación de PHABSIM

Una vez que se ha determinado que PHABSIM es una herramienta apropiada de análisis en el alcance y niveles de selección de IFIM, el enfoque general en su aplicación se puede dividir en nueve pasos conceptuales. Estos proveen un marco inicial del modelo y una guía para algunos de los problemas involucrados. Estudios individuales se pudieran desviar de estos pasos y en todos los casos el usuario debería considerar cuidadosamente, justificar y documentar las decisiones hechas para estructurar el análisis para una aplicación en particular. La metodología que se utilizará en este trabajo de investigación se describe a detalle en adelante y para su mejor comprensión se divide en: Descripción de la zona de estudio, Hidrodinámica fluvial, Obtención de datos de campo para la simulación de la hidrodinámica fluvial y Simulación del hábitat.

6.1.1 Descripción de la zona de estudio

Localización geográfica de la cuenca a estudiar.

Al borde de la rivera sur del río Lerma, en intersección de los estados de Michoacán, Jalisco y Guanajuato, el municipio de la Piedad se encuentra al noreste del estado de Michoacán de Ocampo. Se localiza en las coordenadas extremas: Al norte 20°24' al sur 20°13', de latitud norte al este 101°57' y al oeste 102°11' de longitud Oeste. Su cabecera principal La Piedad de Cavadas se localiza a los 20°21' de latitud norte y a los 102°02' de longitud oeste a 1680 metros sobre el nivel del mar

Climatología;

Descripción del clima en la ciudad de La Piedad, temperaturas medias anuales y precipitaciones. Su clima preponderante en el Municipio es semicálido subhúmedo, con lluvias en verano. Tiene una precipitación pluvial anual del 700 milímetros y temperaturas que oscilan de 3.0 a 38.5° centígrados. Tiene una temperatura media anual de 17 °C, por lo que su clima es templado, con veranos calurosos y lluvias permanentes de junio a septiembre y una estación invernal no bien definida, INEGI 2011

Hidrología;

Descripción de los afluentes del Río Lerma en el tramo de estudio, características geográficas (distancia, área de la cuenca) y clasificación del río. Con un relieve de suelo irregular, el municipio presenta múltiples accidentes orográficos. Hacia el Norte, se forma el Valle de La Piedad o Bajío con terrenos planos; al Noroeste, siguiendo el cauce del río Lerma se elevan escarpados montes; al oeste se levantan algunos lomeríos. En la parte central, a una altura de 2510 mts sobre el nivel del mar, aparece enhiesto el Cerro de Cujuarato, más conocido entre los lugareños como Cerro Grande, a cuyas faldas y en cierta forma hasta sus pies, se tiende el caserío que forma la cabecera municipal de La Piedad, con límite en las riberas del Río Lerma. Otra elevación importante es la Mesa de Acuitzio, a 1820 metros sobre el nivel del mar. La extensión total del territorio se caracteriza por tener suelos tipo Chernozem o negros profundos, propios para la agricultura. Las Principales corrientes del municipio están formadas por los arroyos Zináparo, La Providencia, El Jaguey, y Los Paredones que desembocan en el río Lerma. (http://www.municipiosmich.gob.mx/la_piedad/territorio/datos/datos.php. 2010).

Obras de ingeniería sobre el cauce

Siete puentes unen a La Piedad con las poblaciones que se localizan al lado opuesto del Río Lerma: El puente de El Salto, a 10 kilómetros de la cabecera municipal y que comunica a los Estados de Michoacán y Jalisco; el puente de cuota en el libramiento de la carretera México-La Piedad-Guadalajara; el Puente Morelos, que brinda el mayor servicio a habitantes de la región y a transportistas y vehículos automotrices de todo el país; el Puente Cavadas, restringido al uso peatonal desde hace poco tiempo; el puente Casto Saldaña Villaseñor, que une a la comunidad piedadense de Río Grande con la penjamense de Santa Ana Pacueco; el Puente Michoacán, obra relativamente reciente del gobierno municipal piedadense, que desemboca en la calle Querétaro; y el Puente Guanajuato, inaugurado en el mes de enero por el gobierno de Guanajuato, y que desemboca en el Boulevard López Mateos, a la altura de la empresa Impulsora Comercial y de

Determinación de un régimen de caudales ecológicos como antecedente para la preservación del ecosistema acuático en el meandro del río Lerma ubicado en La Piedad Michoacán.

Servicios Delta, S.A. de C.V. Para el tránsito de peatones, se han construido tres puentes, sobre la vía de mayor tráfico vehicular, el Boulevard Lázaro Cárdenas: El primero en el Jardín Marcos H. Pulido, otro frente a la Tienda Aurrerá y el tercero delante de la Terminal de Autobuses Foráneos. (http://www.municipiosmich.gob.mx/la_piedad/territorio/datos/datos.php. 2010)

6.1.2 Ictiofauna; caracterización de especies y selección de la especie objetivo

Se realizaron dos muestreos de especies ícticas en las orillas del meandro, una en la temporada de estiaje al mes de mayo y otra a finales del mes de septiembre, ya que el periodo de lluvias se retrasó en el año de 2009. Ambos muestreos se realizaron en los mismos sitios.

“Los peces presentes en los alrededores del meandro del río Lerma (La Piedad) son en su mayoría especies introducidas con amplios intervalos de tolerancia a la calidad del agua. Para estos muestreos se registran nueve especies, de las cuales cinco son introducidas y utilizadas para el acuarismo. En cuanto a las especies nativas (4), estas también son tolerantes.” (Informe de los Avances Correspondientes de Agosto-Septiembre 2009. Proyecto CONACYT 73881.) Los resultados de los muestreos, así como los parámetros fisicoquímicos del agua se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Especies ícticas encontradas en los sitios de muestreo, tabla modificada de: Informe de los Avances Correspondientes de Agosto-Septiembre 2009. Proyecto CONACYT 73881.

Sitio	Profundidad (m)	Temperatura °C	Cond. (uS/cm)	pH	Salinidad (ppt)	NH ₃ (mg/L)	O ₂ (mg/L)	Especie	Abundancia
Numarán									
Abril	Superficie	25.5	568	6.97	0.30	0.1	5.56		
Septiembre	Superficie	24.54	789	7.75	0.39	3.64	1.83	<i>Poecilia sphenops</i>	1
	Descarga	25.27	1047	7.75	0.51	8.8	0.67	<i>Xiphophorus helleri</i>	3
Rancho San Cristóbal antes de el Salto									
Abril	Superficie	20.8	528	6.97	0.30	0.2	4.2	<i>Cyprinus carpio</i>	4
Septiembre	Superficie	25.58	524	7.74	0.25	1.4	4.45	<i>Xiphophorus helleri</i>	54
								<i>Heterandria bimaculata</i>	1
								<i>Goodea atripinnis</i>	10
								<i>Poecilia sphenops</i>	2
								<i>Oreochromis aureus</i>	16
								<i>Oreochromis aureus</i>	29
								<i>Poecilia mexicana</i>	41
								<i>Xiphophorus helleri</i>	16
								<i>Goodea gracilis</i>	7
								<i>Heterandria bimaculata</i>	8
Camino San Juan El Fuerte-El Salto									
Abril	Superficie	20.8	544	6.99	0.30	0.2	5.0	<i>Xiphophorus helleri</i>	18
Septiembre	Superficie	25.84	534	7.69	0.25	1.59	4.0	<i>Heterandria bimaculata</i>	1
								<i>Poecilia mexicana</i>	15
								<i>Poecilia sphenops</i>	4
								<i>Oreochromis aureus</i>	3
								<i>Heterandria bimaculata</i>	2
								<i>Xiphophorus helleri</i>	31
								<i>Poecilia sphenops</i>	63
								<i>Poecilia reticulata</i>	5
								<i>Oreochromis aureus</i>	22

Ya que las especies nativas encontradas en los sitios de muestreo presentan una tolerancia alta a los impactos ambientales, estas no pueden ser consideradas como candidatas a la especie objetivo. En este caso es necesario realizar una investigación bibliográfica para encontrar la comunidad histórica de especies acuáticas que habitó la parte baja del río Lerma. En esta investigación bibliográfica se utilizaron las siguientes bases de datos: Colección-Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Biología- Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad de Nuevo León, Remib-Conabio, Museo Nacional de Ciencias Naturales Madrid, “University of Michigan, US”, “Tulane University, US” y “University of Winsconsin, US).

Los resultados obtenidos se presentan a continuación para la comunidad histórica de peces en la parte baja del río (Figura 4).

- a) *Notropis calientis*
- b) *Algansea tincella*
- c) *Yuriria alta*
- d) *Ictalurus dugesii*
- e) *Chirostoma jordani*, *Chirostoma arge*, *Chirostoma aculeatum*
- f) *Zoogoneticus purepechus*
- g) *Goodea atripinnis/gracilis*
- h) *Chapalichthys encaustus*
- i) *Poeciliopsis infans*
- j) *Poecilia reticulata*



Figura 4 Especies acuáticas nativas de la parte baja del río Lerma.

La utilización de PHABSIM involucra la selección de una especie objetivo para su uso en los modelos de hábitat. Una parte fundamental de PHABSIM es definir las condiciones que proveen un hábitat favorable para las especies objetivo consideradas. Un paso fundamental al inicio del estudio en PHABSIM es la identificación, selección de especie objetivo y estadios de vida (Bovee *et al.*, 1998).

Para nuestro estudio es importante garantizar que la especie objetivo seleccionada arrojará en términos de resultados las descargas de flujo más altas con lo cual garantizaremos la mayor cantidad de hábitat disponible para las otras especies.

Los criterios de selección que se tomaron fueron los siguientes: que la especie tuviera una resiliencia baja, que fuera carnívora, de talla grande y que tuviera una preferencia de microhábitat con aguas claras/turbias profundas, y velocidades altas.

Con los criterios de selección antes descritos se ha seleccionado a la especie *Ictalurus dugesii* como la especie objetivo para iniciar el estudio en PHABSIM. Debido a que no se cuenta en la actualidad con información acerca de las curvas de preferencia de hábitat para esta especie, se tomó la decisión de utilizar una especie de la misma talla aproximada y de preferencias de hábitat similares encontrándose al *Ictalurus punctatus* como la especie para realizar el estudio en PHABSIM.

6.1.2.1 Justificación de la utilización de la especie *Ictalurus punctatus* como especie objetivo

Se define a la especie/s objetivo/s como la especie que se utiliza en el análisis de PHABSIM para la generación de resultados en términos de hábitat potencialmente utilizable para cada 1000 m de río. Esta definición de especie objetivo involucra directamente los mayores requerimientos de hábitat que debe tener la especie dentro de su comunidad, es decir, la especie que se toma como objetivo es aquella que demanda la mayor cantidad de hábitat y que cumple con los criterios de selección antes mencionados, para con esto garantizar que todas las demás especies de la comunidad tendrán el hábitat necesario.

La información requerida para la simulación de hábitat físico comprende datos de preferencia de hábitat en relación a tres parámetros: velocidad, profundidad e índice de cauce, para sus diferentes estadios de vida que incluimos en la simulación de hábitat físico (desove, alevín, juvenil y adulto), a esta información se le conoce como curvas de preferencia de hábitat.

Las curvas de preferencia de hábitat cuando no se tienen disponibles como información se construyen de acuerdo a técnicas bien conocidas para recolección y conteo de individuos, esto contempla que la calidad del agua y el impacto ambiental del río es lo suficientemente aceptable como para que soporte a la comunidad de peces nativos del mismo, en el caso del estudio realizado en el meandro del río Lerma ubicado en la ciudad de La Piedad, Michoacán, la calidad del agua y el impacto del tramo del río en estudio no cumplen con las características suficientes para el desarrollo y soporte de la comunidad de peces nativos que existió en río.

En este caso fue necesario realizar una segunda investigación para encontrar toda la información disponible para la familia *Ictaluridae*, información que fue recopilada de las bases de datos del museo de historia natural de Florida, en su documento (TAXONOMIC INFORMATION ON CATFISHES, junio de 2010). En el que se menciona que, con 49 especies, *Ictaluridae*, el pez gato cabeza de toro es la familia más grande de los peces de aguas frías endémicos de Norte América. Los peces gato son fáciles de reconocer de otros peces de aguas frías en Norte América, no tienen escamas, tienen 4 pares de bigotes alrededor de la boca, una aleta adiposa, espinas duras en los orígenes de las aletas dorsales y pectorales (excepto por

Determinación de un régimen de caudales ecológicos como antecedente para la preservación del ecosistema acuático en el meandro del río Lerma ubicado en La Piedad Michoacán.

algunas especies de cavernas), una aleta pélvica en el abdomen. Los miembros de esta familia son activos principalmente durante la noche en contraste con otros grandes grupos de peces de agua fría en Norte América. El pez gato de cabeza plana y el pez gato azul, los gigantes de la familia con cerca de 60 kg y más de 1.5 m de longitud, y otras muy grandes especies, especialmente el muy comercializado pez gato de canal, son de mayor importancia comercial, manejo y valor acuacultura.

Los ictaluridos se organizan en 7 géneros:

Ictalurus, con 7 especies incluyendo al pez gato de canal.

Ameiurus, con 7 especies.

Noturus, con 30 especies pequeñas conocidas como madtoms.

Pylodictis, únicamente con el pez gato cabeza plana.

Satan y *Trogloganis*, cada uno con una especie de cueva en Texas.

Prietella, con 2 especies de cuevas en México.

El género *Ictalurus* con 7 especies comprende:

Ictalurus balsanus, (Balsas catfish)

Ictalurus dugesii, (Lerma catfish)

Ictalurus furcatus, (Blue catfish)

Ictalurus Lupus, (Hedwater catfish)

Ictalurus mexicanus (Río verde catfish)

Ictalurus pricei, (Yaqui catfish)

Ictalurus punctatus, (Cannel catfish)

Se identifico mediante información bibliográfica que la especie similar al *Ictalurus dugesii* es el *Ictalurus punctatus* y que ambos comparten la preferencia en relación al mismo tipo de hábitat: viven en aguas frías claras a turbias, fosas tranquilas sobre rocas, arena o limo, en arroyos y ríos chicos a grandes; presas. Comúnmente se encuentran cerca de vegetación.

La validez de utilizar información de una especie diferente a la especie objetivo inicialmente seleccionada para los estudios en PHABSIM puede ser un tema de discusión para la comunidad científica que estudia la simulación de hábitat físico en ríos y hay casos reportados donde incluso no solo utilizan información de otra especie sino que generan información específica para una especie que ya no habita el río de estudio como es el caso del río Palacé en Colombia y el estudio de caudales ambientales realizado por el Dr. Juan Manuel Diez Hernández y el M. C. Darío Hernán Ruiz Cobo en el cual generan curvas de preferencia particularizadas integrando el conocimiento de biología y ecología de los peces.

En ausencia de los criterios de idoneidad específicos para la especie *Ictalurus dugesii*, y en el contexto de información limitada a cerca de sus requerimientos de hábitat, se han adoptado las curvas de preferencia de hábitat de la especie *Ictalurus Punctatus* en sus estadios de: desove, alevín, juvenil y adulto. Las similitudes encontradas en la preferencia del tipo de hábitat antes mencionado respaldan un razonamiento coherente para este proceso de análisis. De cualquier forma, no podemos negar que la incertidumbre intrínseca a una simplificación de este tipo se puede disminuir con un mayor conocimiento del sistema hidrobiológico relativo a la dinámica trófica y las interacciones entre poblaciones y comunidades (Diez Hernández y Ruiz Cobo, 2007).

6.1.3 Descripción del tramo de río en estudio

Coordenadas, altitud, anchura promedio, pendiente media, caudal medio anual, caudales máximos, identificación de pozas, zonas de aguas rápidas y descripción del sustrato.

Para fines de simulación hidráulica el río se describe desde las aguas más abajo (a la salida de la ciudad de La Piedad) con coordenadas $20^{\circ}22'17.6''$ N y $102^{\circ}01'02.6''$ O, hacia aguas más arriba (a la entrada a la ciudad) con coordenadas $20^{\circ}21'12.93''$ N y $102^{\circ}00'19.76''$ O, ver Anexo 1. Su altitud referenciada con una elevación en sus partes más bajas de cada sección comprende 1665.9 msnm aguas más abajo y 1667.9 msnm en su última sección (aguas más arriba). Su anchura promedio con referencia a la zona rivereña es de 129.6m, su pendiente media del fondo del canal es de 0.0002m, en el meandro se pueden encontrar diferentes tipos de hábitat como son pozas de diferentes tamaños algunas de ellas artificiales como la que se encuentra en el parque de La Placa, también encontramos pocas zonas de aguas rápidas distribuidas a lo largo del cauce.

6.1.4 Hidrodinámica fluvial.

El flujo en un canal abierto es un proceso tridimensional. Incluye la respuesta al cambio en la forma de canal, las corrientes secundarias y varía continuamente a través del ancho y largo del eje del río. Modelos de diversa complejidad capturan el proceso de flujo global en diferentes grados. En PHABSIM, el modelo de perfil de superficie de agua (WSP- Water Surface Profile) utiliza el método paso-remanso para obtener una representación unidimensional de flujo. Los modelos STGQ y MANSQ usan medios empíricos para obtener representaciones de flujo similares basados en transectos. Los modelos hidráulicos en PHABSIM operan con la suposición

Determinación de un régimen de caudales ecológicos como antecedente para la preservación del ecosistema acuático en el meandro del río Lerma ubicado en La Piedad Michoacán.

de un perfil de lecho fijo y una inclinación en la superficie de agua que es el nivel a través de cada sección transversal.

La modelación hidráulica en PHABSIM caracteriza a los atributos físicos en el río (i.e., profundidad, velocidad, e índice de canal) sobre una gama deseada de descargas. El éxito o fracaso de este esfuerzo es dependiente de la cantidad y la calidad de los datos de campo, la complejidad de la naturaleza física del río y en última instancia de la capacidad de los modelos hidráulicos para reflejar los procesos físicos en el río. Para una explicación detallada de la simulación hidráulica véase el manual PHABSIM.

Los modelos matemáticos que se utilizan para la simulación de ASLA y velocidades en PHABSIM son:

- Altura de la superficie libre del agua (ASLA); Los modelos que se pueden utilizar para determinar la ASLA son: WSP (Water Surface profile) y STGQ (relación caudal-ASLA, i.e., Q-stage) del PHABSIM.
- Velocidades; Modelo VELSIM. Mediante este modelo se calculan las velocidades en las secciones transversales.

6.2 Obtención de datos de campo para la simulación de la hidrodinámica fluvial.

6.2.1 Caudales objetivo o de muestreo

Los datos hidráulicos necesarios para la calibración de los modelos de hidrodinámica fluvial que forman parte de PHABSIM, consisten, como mínimo, en un juego de velocidades preferentemente tres) y tres alturas de la superficie libre del agua (ASLA), mediciones en las secciones transversales seleccionadas del tramo de estudio, para tres caudales diferentes de ser posible.

Para este estudio en particular se realizaron las mediciones de altura de superficie del agua para dos caudales diferentes en distintos puntos sobre el meandro:

$$Q_1 = 13.44\text{m}^3/\text{s}$$

$$Q_2 = 23.18\text{m}^3/\text{s}$$

6.2.2 Secciones transversales

Atendiendo a criterios hidráulicos, se ubicaron secciones transversales en los controles hidráulicos del tramo, así como los cambios importantes del cauce tanto en planta como en perfil longitudinal.

6.2.3 Topografía

Para la obtención de la topografía del tramo del río Lerma en La Piedad, Michoacán (Meandro), se elaboraron, en primer lugar, unos términos de referencia, de tal manera que se obtuvieran toda la información puntual y de detalles, que requiriera los diferentes grupos de trabajo del proyecto (i.e., Ingeniería Ambiental e Integración y Mejoramiento de la Imagen Urbana).

En los términos de referencia mencionados, se ha incluido el levantamiento de todos aquellos detalles que permitieran obtener una representación adecuada del meandro, para efectuar la simulación de la hidráulica y del hábitat, definiendo el perfil longitudinal general del cauce, las variaciones del cauce en planta (zonas estrechas y anchas), y zonas de flujo dividido (i.e., zonas de islas). Cabe señalar que se tuvo en cuenta, también, la existencia de entradas de tributarios a lo

Determinación de un régimen de caudales ecológicos como antecedente para la preservación del ecosistema acuático en el meandro del río Lerma ubicado en La Piedad Michoacán.

largo del tramo de estudio. Los términos de referencia, elaborados por el Dr. Ezequiel García Rodríguez (2009), se encuentran a continuación:

6.2.3.1 Términos de referencia para los trabajos de topografía

“1 Se levantarán secciones transversales en el meandro del río Lerma, en La Piedad, Michoacán (Figura 5). Las secciones serán perpendiculares a la dirección del flujo.

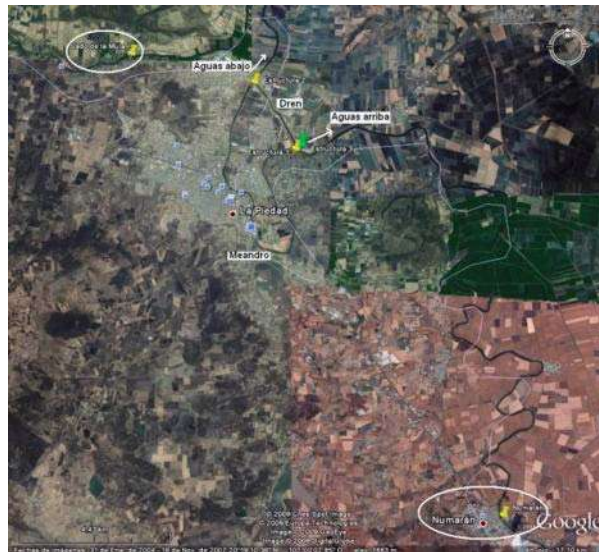


Figura 5 Vista de planta ubicación del meandro y dren de alivio. Planta.

2 En el meandro de La Piedad (entre las estructuras 1 y 2), la separación entre secciones será la que se muestra en ilustraciones complementarias al presente escrito (figuras de Google Earth en las que se indica la ubicación de las secciones transversales y cuadro con las coordenadas geográficas de, por lo menos, uno de los puntos de cada sección, anexo 1).

Determinación de un régimen de caudales ecológicos como antecedente para la preservación del ecosistema acuático en el meandro del río Lerma ubicado en La Piedad Michoacán.

3 Cuando no haya construcciones en las riberas del cauce, las secciones transversales tendrán una longitud de 50m a cada lado del eje del cauce (Figura 5a y 5b).

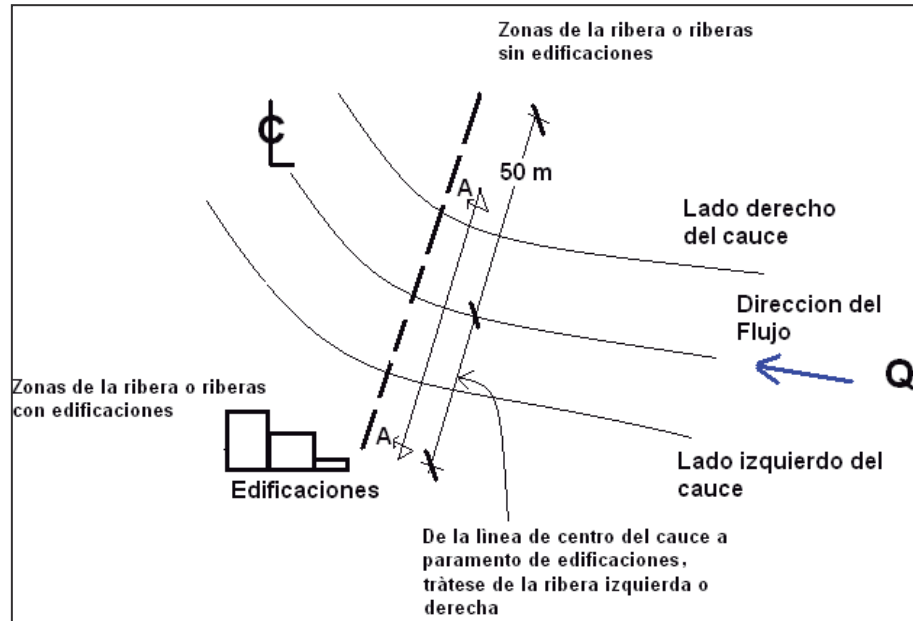


Figura 5a Lineamientos para el levantamiento de secciones transversales. Planta.

En particular, en las zonas delimitadas como polígonos (Figura 6), las secciones se tomarán de paramento a paramento de construcciones.

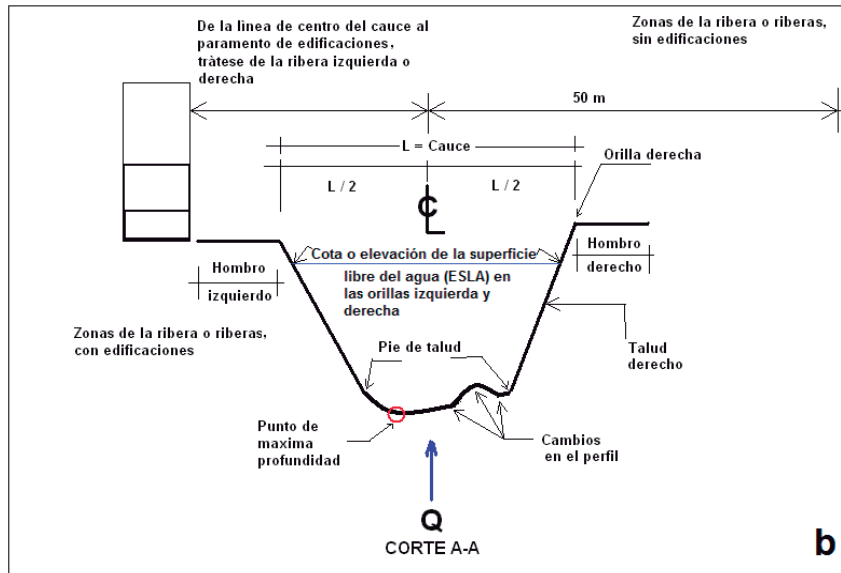


Figura 5b Lineamientos para el levantamiento de secciones transversales. Sección transversal.

4 Para su levantamiento, las secciones transversales se numerarán de aguas abajo hacia aguas arriba (y con esta numeración se dibujarán en los planos correspondientes), iniciando el levantamiento de cada sección transversal en el lado derecho del cauce en relación a la dirección del flujo (Figura 5a y 5b), y su desarrollo incluirá tanto el cauce como las riberas, y en éstas (en las riberas) la sección llegará hasta el paramento de la construcción más cercana al cauce.

5 Se requiere de una planta topográfica con una cobertura de 50 metros a cada lado del eje del meandro (Figura 5a), o de paramento a paramento, donde se identifiquen todos los detalles significativos como: las alcantarillas, postes de infraestructura, paramentos de edificaciones, bardas, banquetas, vialidades o bocacalles, apoyos de puentes, escaleras y cualquier otro elemento fijo y permanente. Además de curvas de nivel a cada 0.50 metros (en todo el meandro).

6 En el caso de los puntos propuestos para la construcción de los puentes (polígonos amarillos de la Figura 6) se solicitan curvas de nivel a cada 0.25 metros en una cobertura de 50 metros a eje de la vialidad transversal, hasta el nivel del agua.

En el caso de las vialidades perpendiculares al meandro, señaladas en los polígonos amarillos de la Figura 6, se deberá registrar el nivel a eje de trazo en un tramo de 100 metros.

Levantamiento de todos los puentes existentes peatonales y vehiculares, indicando la sección y número de apoyos, así como la altura libre que se tiene entre la parte alta del arroyo de la calle y la parte más baja de la losa del puente, o el perfil del terreno natural en la sección transversal del cauce y la parte baja de la losa del puente.

En la Figura 6 se especifican polígonos que corresponden a la posible ubicación de los puentes (polígonos amarillos), así como de las zonas donde la sección supera los 50m (zonas delimitadas por circunferencias en color blanco).

7 Las secciones transversales incluirán los puntos que se muestran en la Figura 5b (hombros, talud, pie de talud, cambios importantes en la sección y el punto de máxima profundidad), y en la obtención de cada sección transversal de utilizará como mínimo 40 puntos, de los cuales 24 deben distribuirse en la zona mojada. Estos puntos se obtendrán, independientemente de obtener aquellos puntos adicionales necesarios para incluir la información que menciona en el punto 5, relativa a “detalles significativos”.

8 En cada sección transversal se determinará y reportará la cota o elevación de superficie libre del agua (ESLA) en ambas orillas del cauce (Figura 5b).



Figura 6 Zonas delimitadas como polígonos en las que las secciones se obtendrán de paramento a paramento (ver, también, las ilustraciones 5a y 5b).

9 Para efectuar el levantamiento topográfico del tramo de río en estudio, se trazará una poligonal abierta a lo largo del tramo de estudio. Esta poligonal abierta estará formada por puntos situados a una distancia máxima igual a la separación de las secciones transversales, indicada anteriormente. En cada sección transversal se colocará una referencia (elemento de marqueo), de tal manera que se garantice la permanencia de los elementos de referencia o marqueo y, por lo tanto, de los puntos de referencia (se deberá anotar en los planos correspondientes el tipo de elemento de marqueo utilizado). En todas las secciones transversales se colocará un elemento de marqueo o punto de referencia a cada lado del cauce, los cuales servirán para alinear la sección transversal correspondiente. En cada punto de referencia (en el sitio) deberá estar visible el número de la sección transversal y el cadenamiento correspondiente.

Determinación de un régimen de caudales ecológicos como antecedente para la preservación del ecosistema acuático en el meandro del río Lerma ubicado en La Piedad Michoacán.

10 La ubicación de algunas de las secciones transversales antes mencionadas podrá ser modificada, con la finalidad de que las secciones permitan definir adecuadamente el perfil longitudinal general del cauce (tanto en planta como en perfil), y que permitan captar las variaciones del cauce. En planta: zonas estrechas y anchas, zonas de flujo dividido (por ejemplo, zonas de islas). Cabe mencionar que la ubicación de las secciones transversales se puede ajustar, en las cercanías de la zona de contacto del cauce principal con tributarios y/o de efluentes del mismo, de tal manera que se capten, de la mejor manera posible, las zonas de ingreso y salida de agua a lo largo del tramo de estudio.

Particularidades

11 Se deberá obtener la geometría detallada de cada obra que se encuentre en el cauce del meandro del río Lerma que se encuentran entre la estructura 1 y la estructura 2. En el caso de los puentes (ver lista de ejemplo de puentes y otras estructuras presentes en la zona de estudio, aunque no exhaustiva, en la parte final de este escrito) se deberá contar con lo siguiente: número y medidas de la sección transversal de las pilas, espesor y longitud de la losa en ambos sentidos (esto es, longitudinal y transversal), así como el tipo y forma de los estribos. En el caso de estructuras compuestas por compuertas, será necesario determinar el número y tipo de ellas, su espesor, así como su radio.

12 Levantamiento de tributarios. Se levantarán los tributarios o corrientes principales que llegan al meandro: Arroyo 5 de Oros (desde el punto en el que ingresa al meandro hasta 2km aguas arriba del arroyo 5 de Oros), Arroyo Hondo (desde el punto en el que ingresa al meandro hasta 1km aguas arriba del Arroyo Hondo), Arroyo El Tigre (desde el punto en el que ingresa al meandro hasta 1 km aguas arriba del Arroyo El Tigre), Arroyo Tamaulipas (desde el punto en el que ingresa al meandro hasta 1km aguas Arriba del Arroyo Tamaulipas). En estas corrientes se levantarán secciones transversales a cada 50m, que incluyan posibles áreas de inundación, indicando en ambos lados de la sección la cota del agua (ESLA) en caso de que esté fluyendo agua.

En el caso de los puentes se deberá contar con lo siguiente: número y medidas de la sección transversal de las pilas, espesor y longitud de la losa en ambos sentidos, así como el tipo y forma de los estribos (de igual manera que se mencionó en el punto 12, anterior).

El espesor de la losa de cualquier elemento que se encuentre en el cauce será definido por la elevación de dicho elemento en su parte superior, así como la elevación de la parte inferior.

Cuando se habla de geometría detallada de obras que se encuentren sobre el cauce, se refiere a que en cada una de estas estructuras (por ejemplo puentes o alcantarillas) se deberá obtener la geometría en las direcciones longitudinal y transversal (incluyendo espesores) con la finalidad de delimitar estas obras pensando en el obstáculo que pueden constituir al flujo del agua.

Planos

1. Para la presentación del levantamiento topográfico se requiere que el cadenamamiento sea en el sentido contrario al flujo del agua, es decir, de aguas abajo hacia aguas arriba, y por consecuencia las secciones serán obtenidas teniendo en cuenta este orden.
2. Toda la información obtenida será entregada tanto impresa como en formato digital (en disco compacto o memoria portátil), y deberá estar georeferenciada (o referenciada a un banco de nivel de coordenadas conocidas), con curvas de nivel, con su cota correspondiente y a cada 0.5 m, salvo en aquellas zonas en las que se solicite una menor separación.
3. Se entregarán planos en planta, perfiles y secciones transversales, impresos y de forma digital (en Autocad Versión 2004 o posterior a escalas que permitan su fácil manejo).
4. Se deberá entregar, también, original (o copia legible) de los datos obtenidos en campo (libretas, estadillos o formatos, etc.).

Lista de ejemplo de puentes, otras estructuras y corrientes influentes presentes en la zona de estudio

Estructuras sobre el meandro.

- I. Estructura 1
- II. Puente de Río Grande
- III. Cortina o Puente de la Placa
- IV. Puente Guanajuato
- V. Puente Peatonal
- VI. Puente Cabadas
- VII. Puente Michoacán
- VIII. Puente de Cuota
- IX. Estructura 2

Estructuras sobre el dren de alivio o rectificación

- I. Estructura 3
- II. Puente de Cuota

Otras estructuras

- I. Entrega al meandro del Drenaje Pluvial.
- II. Puente del Ferrocarril (Aguas Abajo)
- III. Puente-Vado (Aguas Abajo 7.5 Km. Aproximadamente)
- IV. Entrega al meandro de descargas de agua residual

V. Otras Estructuras aguas arriba del meandro

Corrientes de llegada (influentes) al meandro

- I. Arroyo Hondo
- II. Arroyo Tamaulipas
- III. Arroyo San Cristóbal, o Arroyo 5 de Oros
- IV. Arroyo El Tigre

La precisión requerida en las mediciones (por ejemplo, mediciones de ángulos, distancias y cotas) es la habitual en estaciones totales fabricadas conforme a normas internacionales. Por ejemplo, Precisión de 6 segundos, Precisión en distancia (+/- 2 ppm x D) mm.”

6.2.4 Obtención de la Topografía

Inicialmente se habían colocado un mínimo de 178 secciones transversales a lo largo del meandro, sin embargo, finalmente, se levantaron 329 secciones, obteniéndose una mejor definición. Para levantar las secciones se utilizó una poligonal abierta, en la que se ubicaron una serie de puntos de referencia, con coordenadas conocidas (Bancos de nivel), así como puntos ubicados en los extremos de las secciones transversales a los cuales se les definieron sus coordenadas en relación con los bancos de nivel. Estos puntos constituyen una referencia horizontal y vertical estable durante el tiempo que duran los muestreos de campo, especialmente durante las mediciones topográficas e hidrométricas (Figura 7).

Para el levantamiento topográfico se utilizó estación total, mediante la cual, con su correspondiente prisma (Figura 8), se obtuvieron las coordenadas de los puntos topográficos del levantamiento de la zona del estudio. Para levantar las secciones transversales en la zona húmeda, se utilizó una balsa y el prisma (Figura 9).

En la figura 10 se puede observar el aspecto de la distribución de puntos levantados en la zona de estudio. Una vez obtenidos los datos de campo, fueron vaciados en hojas de Excel, como se observa en la tabla 3, y a partir de estos se dibujaron las secciones transversales (Gráfica 1), con la finalidad de revisarlas y depurarlas, eliminando aquellas secciones levantadas de manera parcial (Gráfica 2).



Figura 7 Elementos para marcar los puntos de referencia en la poligonal abierta y en las secciones transversales.



Figura 8 Colocado del prisma para levantamiento de puntos de la topografía.



Figura 9 Levantamiento de secciones transversales en la zona inundada.

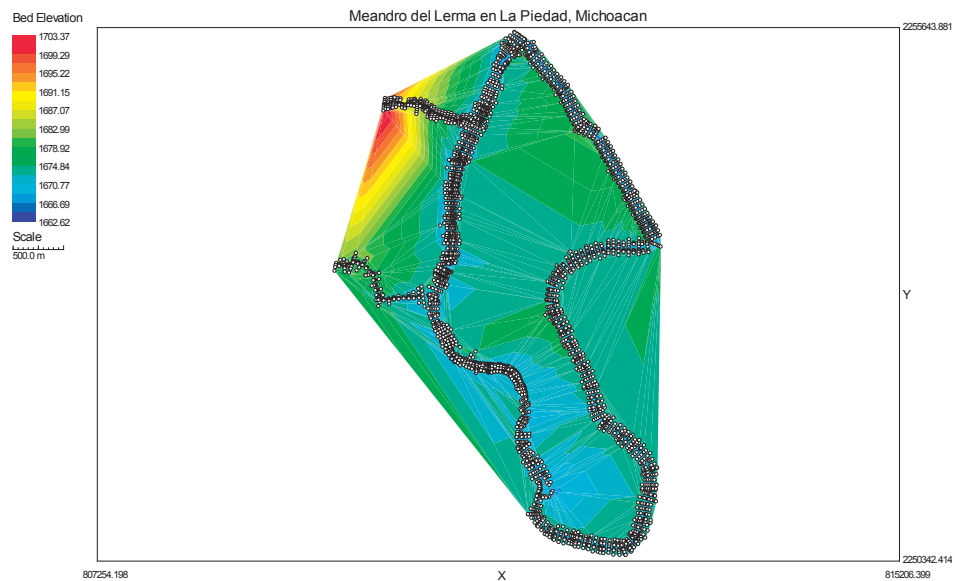
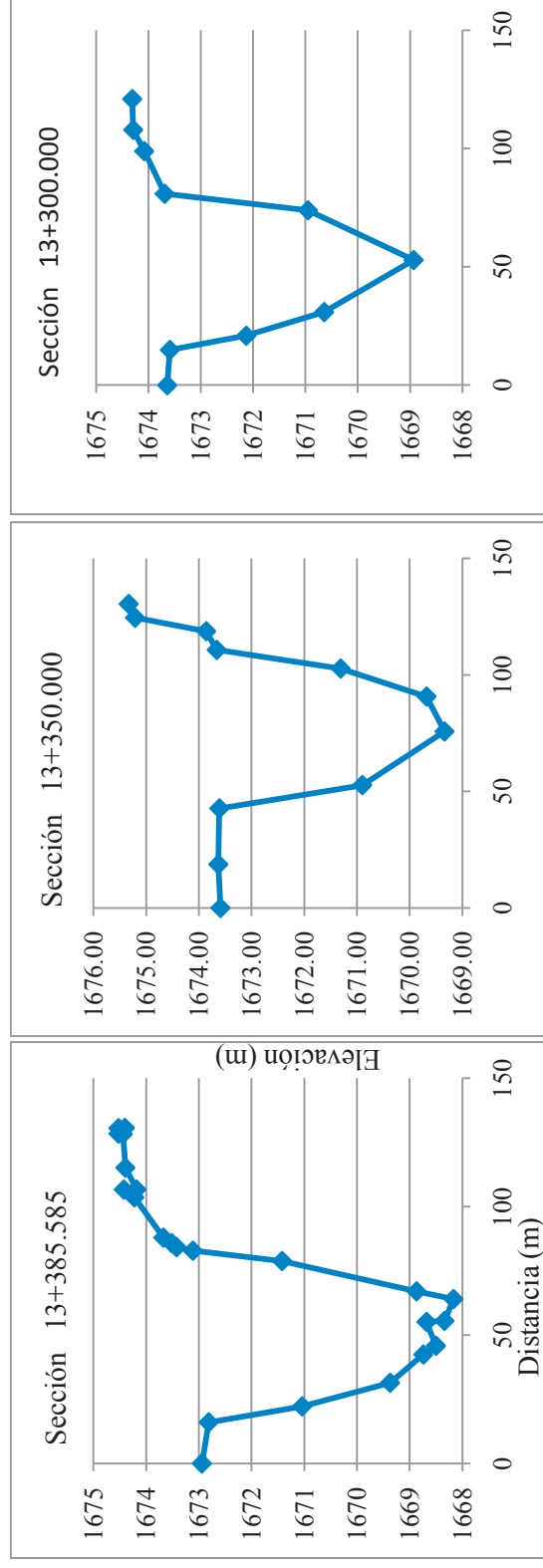


Figura 10 Aspecto de la distribución de puntos topográficos levantados en la zona del meandro, arroyos y dren de alivio.

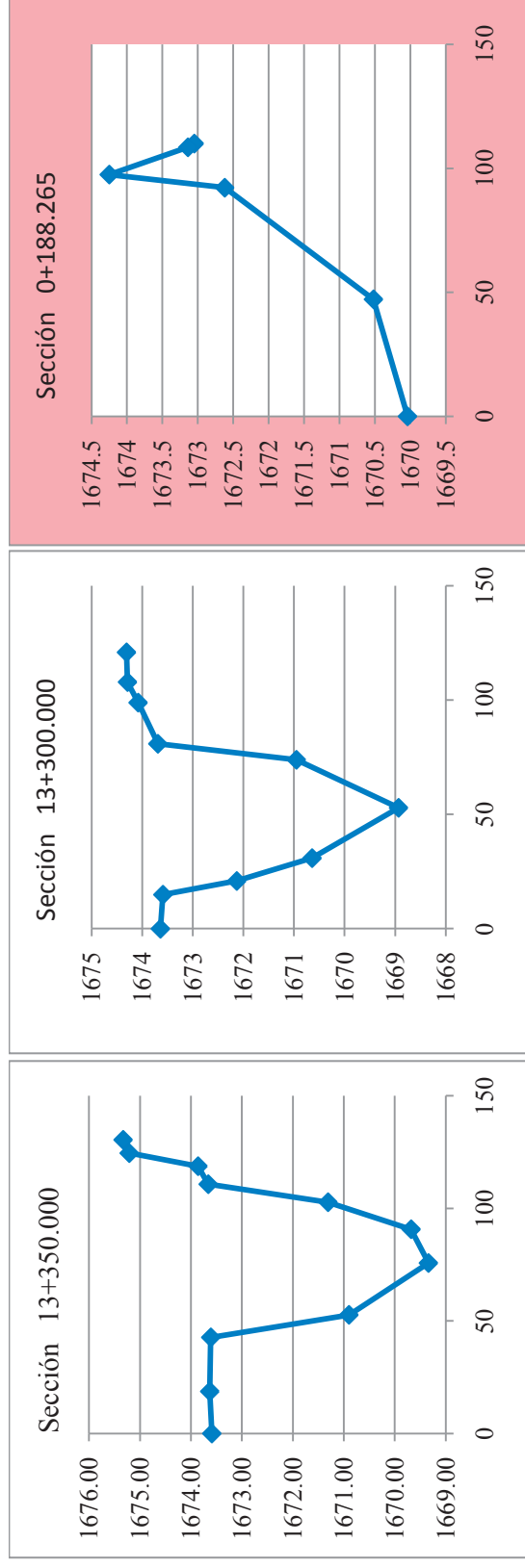
Determinación de un régimen de caudales ecológicos como antecedente para la preservación del ecosistema acuático en el meandro del río Lerma ubicado en La Piedra Michoacán.

Tabla 3 Datos de campo capturados en Excel.

		N.A.M.O. = 1668.68			ESV. 20° 19' 25.00" IZQ.			MILPA			MILPA			N.A.M.E. = 1671.04					
								O. TALUD			T.N. RIO			O. RIO					
	O. CARPETA																		
42.60	42.70								65.70	56.50	45.50	42.10	32.40	32.80					
0.85	0.73								-2.63	-4.30	-4.93	-5.17	-5.33	-4.99					
								O. TALUD			O. BANQUETA			T.N. DEL RIO			O. RIO		
O. GUARNICION	O. CALLE	O. CALLE	GUARNICION AB	GUARNICION AR	CERCA DE JARDIN	PI	O. BANQUETA	O. BANQUETA	O. TALUD	T.N. DEL RIO	O. RIO	O. RIO	O. RIO	F. O. RIO					
40.50	40.30	27.20	18.72	18.70	15.70	13+385.585	2.20	3.70	5.10	9.10	20.90	20.90	23.90						
0.85	0.77	0.72	0.51	0.75	0.55	1673.67	-0.16	-0.25	-0.56	-2.25	-4.80	-4.80	-5.50						
		N.A.M.O. = 1668.61/1669.68									N.A.M.E. = 1671.04/1670.90								



Gráfica 1 Dibujo de las secciones transversales, obtenidas a partir de los datos de campo capturados en Excel (Cero en Santa Ana Pacueco, Gto.)



Gráfica 2 Depurado de secciones transversales (Sección 0+188.265 Eliminada-Sección trunca.).

Cabe mencionar que fue necesario dar cierto orden a los datos de las secciones transversales, de tal manera que el cero de las mismas quedara ubicado en el lado derecho en función del sentido del flujo, con la finalidad de poder capturarlos adecuadamente en el Sistema para la simulación del hábitat PHABSIM.

Obtención de datos hidráulicos

Se obtuvieron velocidades, profundidades y caudales, en cada sección transversal. Para la obtención de las velocidades en todas las secciones transversales que participaron en la simulación, se utilizó un programa para simulación hidráulica y así obtener tanto las velocidades requeridas como las alturas del agua. Los datos hidráulicos necesarios para calibrar estos modelos se tomaron en el sitio del estudio y se mencionan a detalle en el capítulo de resultados.

Rugosidad

Se realizaron campañas para determinar la rugosidad del sustrato y se tomó como referencia el índice de cauce con una escala del 1 al 10. La escala se presenta a detalle en el capítulo de Resultados.

Datos complementarios de hábitat: sustrato y refugio

Para el sustrato se utilizará la terminología y las clases de tamaño aceptadas por la “American Geophysical Union” (AGU). Para el refugio, se determinan los elementos que puedan ser utilizados por los peces para tal fin.

6.3 Simulación del hábitat.

Los modelos para la simulación hidráulica en PHABSIM se aplican para determinar las características de un río en términos de velocidad y profundidad como una función de la descarga para toda una gama de descargas consideradas dentro del estudio. En el proceso de simulación del hábitat, esta información se integra con los criterios de preferencia de hábitat (HSC-Habitat Suitability Criteria) para producir una medición de hábitat físico disponible como función de una descarga.

La teoría general detrás de los programas de simulación dentro de PHABSIM se basa en la suposición de que las especies acuáticas responden a los cambios en el ambiente hidráulico. Estos cambios se simulan para cada celda en un segmento definido del río. Las simulaciones de los segmentos del río toman forma en una matriz multidimensional de las áreas de superficie calculadas teniendo diferentes combinaciones de parámetros hidráulicos (i.e., profundidad, velocidad e índice de canal) como se ilustra en la figura 11. La profundidad y velocidad de cada celda es el promedio de la profundidad simulada y de los valores de velocidad obtenidos de la fase de simulación hidráulica en PHABSIM. La profundidad y los atributos de velocidad varían con los cambios de las descargas, provocando cambios en la cantidad de hábitat disponible. El producto final de la simulación de hábitat es una descripción del área como una función de las descargas. Esta información puede ayudar en la identificación de periodos de tiempo críticos para una etapa biológica, limitando la disponibilidad del hábitat para cada etapa (i.e., capacidad física de transporte) y limitando la disponibilidad de hábitat para varias especies, en la simulación de hábitat se utilizaran las curvas de preferencia de hábitat de la(s) especie(s) objetivo.

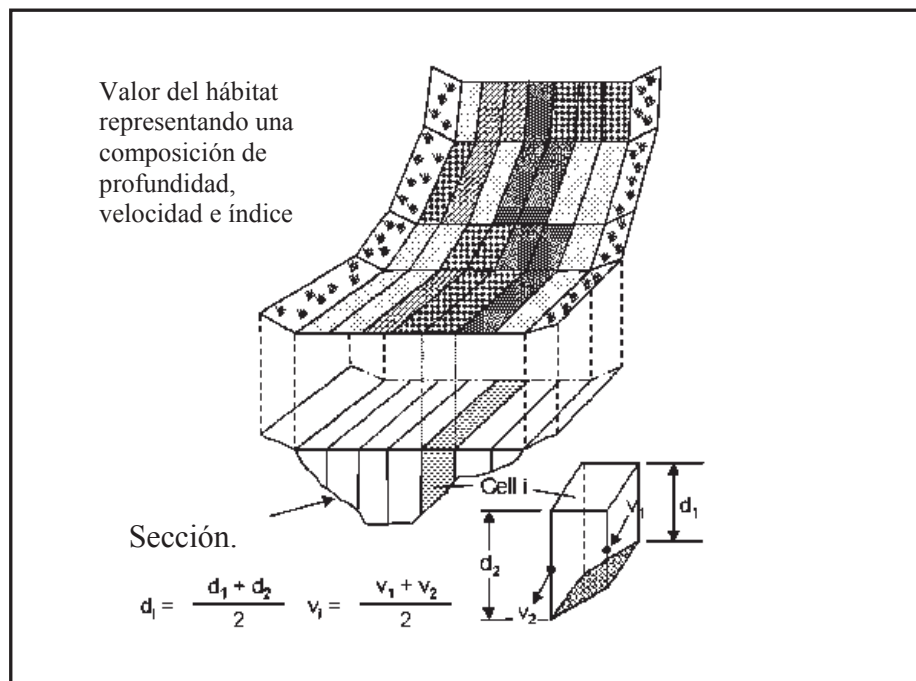
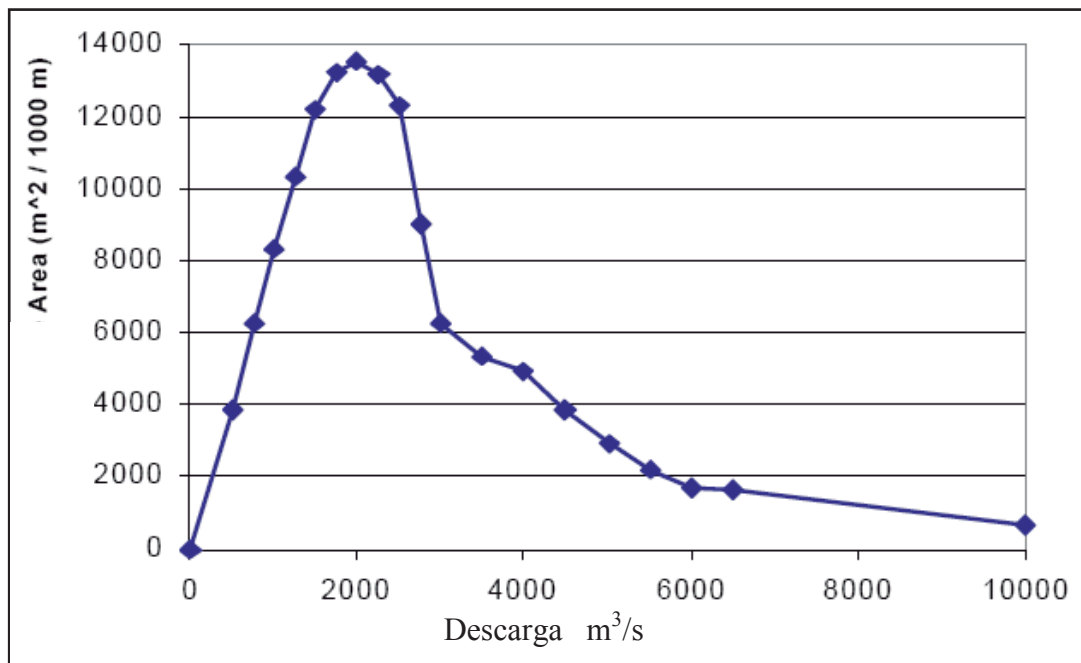


Figura 11 Matriz de los atributos de las celdas en un sitio de estudio en PHABSIM. Tomada del manual de PHABSIM capítulo 2.



Gráfica 3 Relación hábitat-caudal para una especie/estadio derivada de un análisis PHABSIM. Tomada del manual de PHABSIM capítulo 2.

Para mayor información acerca de cómo utilizar el programa de simulación vea el Manual de PHABSIM cuya cita aparece en la bibliografía.

7. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados parciales y los resultados finales producto de la simulación utilizando el programa de computo PHABSIM descrito ampliamente en los capítulos anteriores. Para la obtención de estos resultados se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

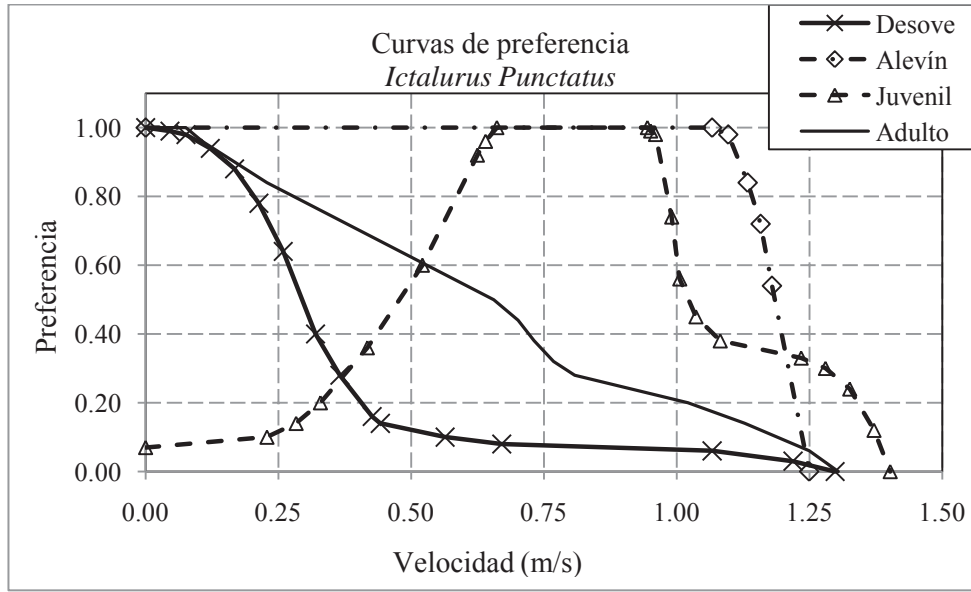
- Se utilizaron dos caudales de calibración a $13.44 \text{ m}^3/\text{s}$ y a $23.18 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Se realizaron simulaciones de altura de la superficie del agua, de velocidades y de cantidad de hábitat utilizable para caudales de 4, 8, 10 y $20 \text{ m}^3/\text{s}$ además de los correspondientes para los caudales de calibración.
- Los datos de velocidades en cada sección son simulados.
- Se utilizaron las curvas de preferencia de hábitat (velocidad, profundidad y sustrato) para los diferentes estadios de vida (desove, alevín, juvenil y adulto) de la especie de estudio seleccionada *Ictalurus punctatus*.

7.1 Plano topográfico

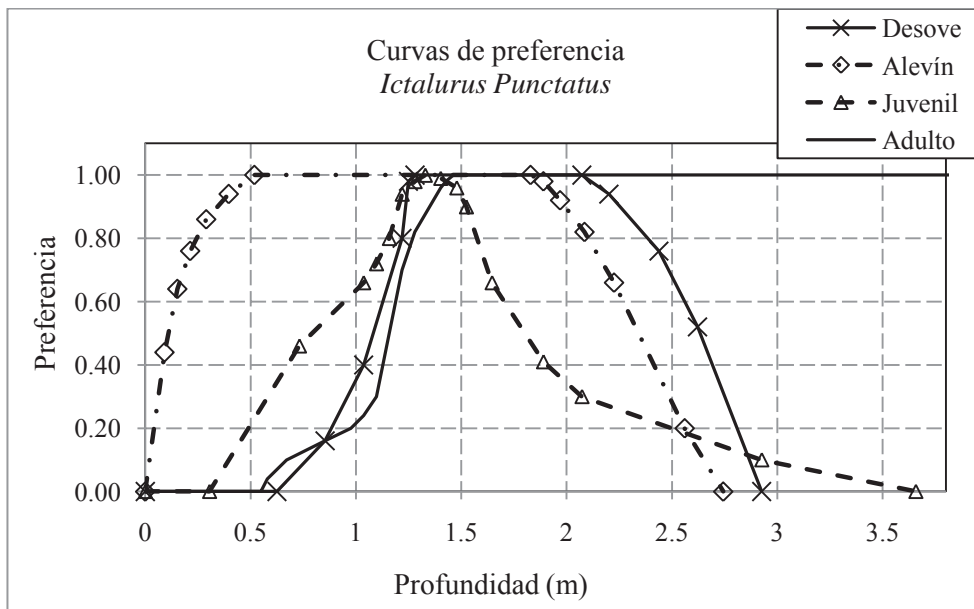
Figura 12 Plano topográfico del meandro de la Piedad.

7.2 Curvas de Preferencia de Hábitat

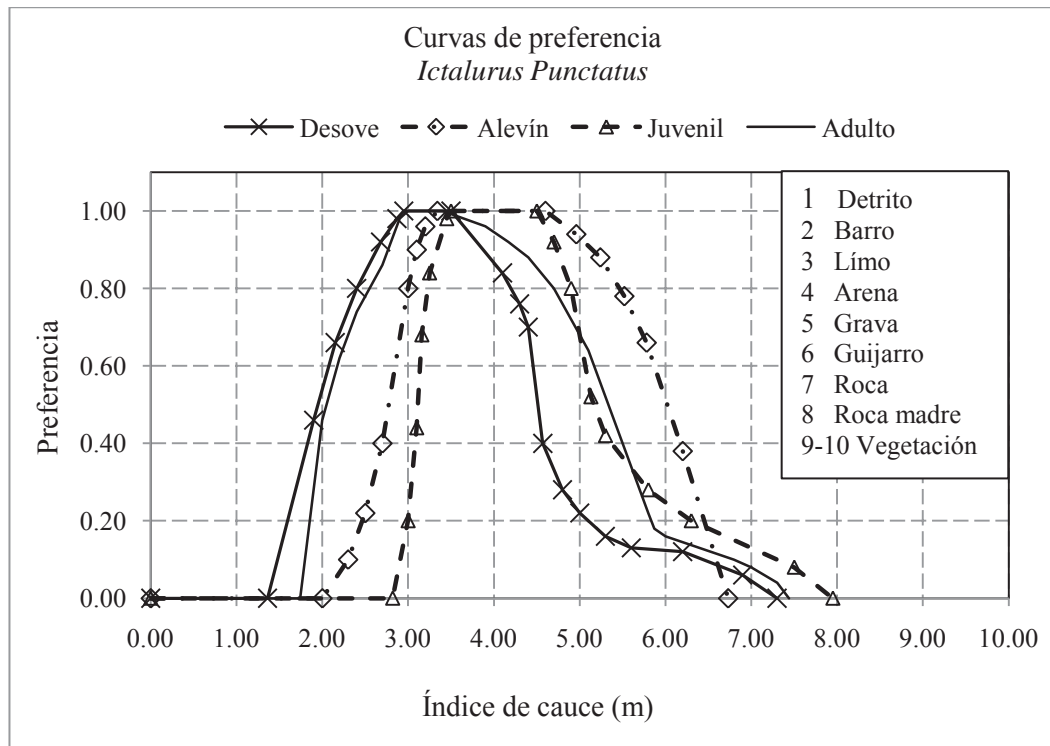
Se muestran las preferencias de hábitat de la especie *Ictalurus Punctatus* en sus diferentes estadios de vida. (Modificadas de Herricks, 1980)



Gráfica 4 Preferencia vs velocidad.



Gráfica 5 Preferencia vs profundidad.



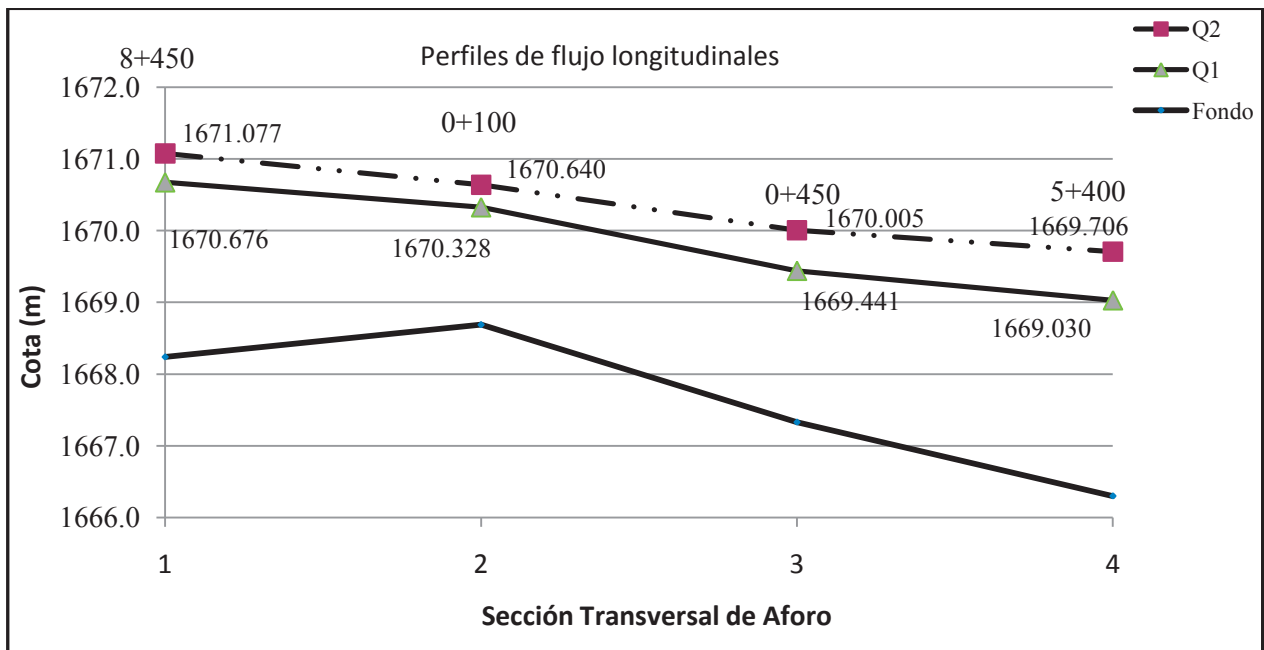
Gráfica 6 Preferencia vs índice de cauce.

7.3 Perfiles de Flujo Longitudinales

Se muestran las pendientes hidráulicas del río para sus dos caudales de muestreo/calibración así como la pendiente del fondo del cauce.

Q1=13.44 m³/s

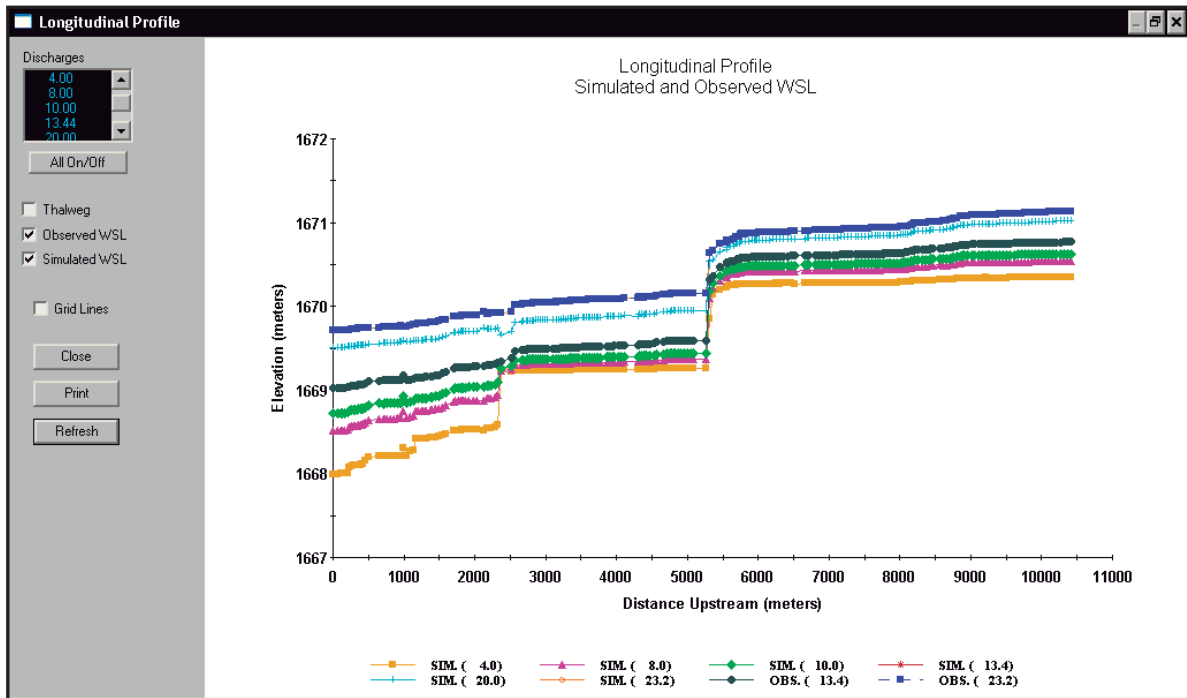
Q2=23.18 m³/s



Gráfica 7 Perfiles de flujo longitudinales, dirección de flujo de izquierda a derecha.

7.4 Simulación de la Superficie Libre del Agua

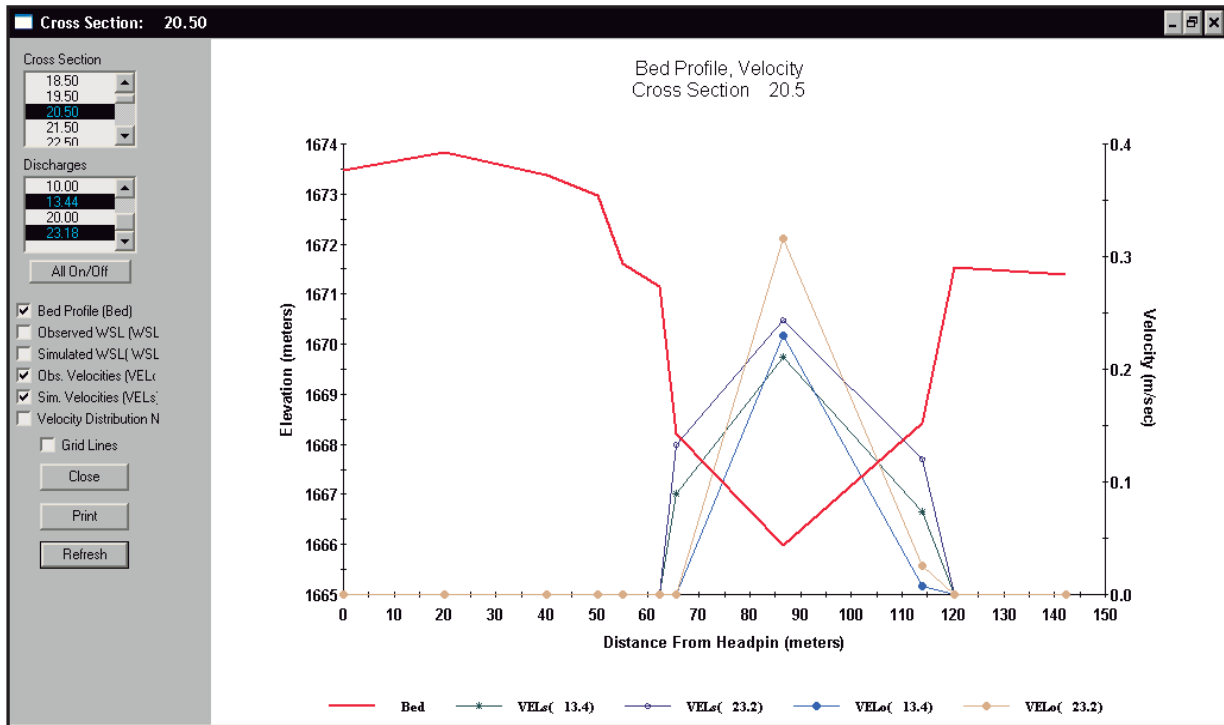
Se utilizó la aplicación WSL del programa PHABSIM en la simulación de las alturas de superficie libre del agua para 4, 8, 10 y 20 m³/s, las cuales se muestran en la siguiente figura. Las simulaciones fueron calibradas con los datos de que se muestran en la grafica 7 para el método STGQ.



Gráfica 8 Simulación de las aturas de superficie del agua.

7.5 Simulación de Velocidades

Para la simulación de velocidades se utilizó la aplicación (Velocity) en PHABSIM y se muestra en la siguiente figura la distribución de velocidades en una sección transversal.

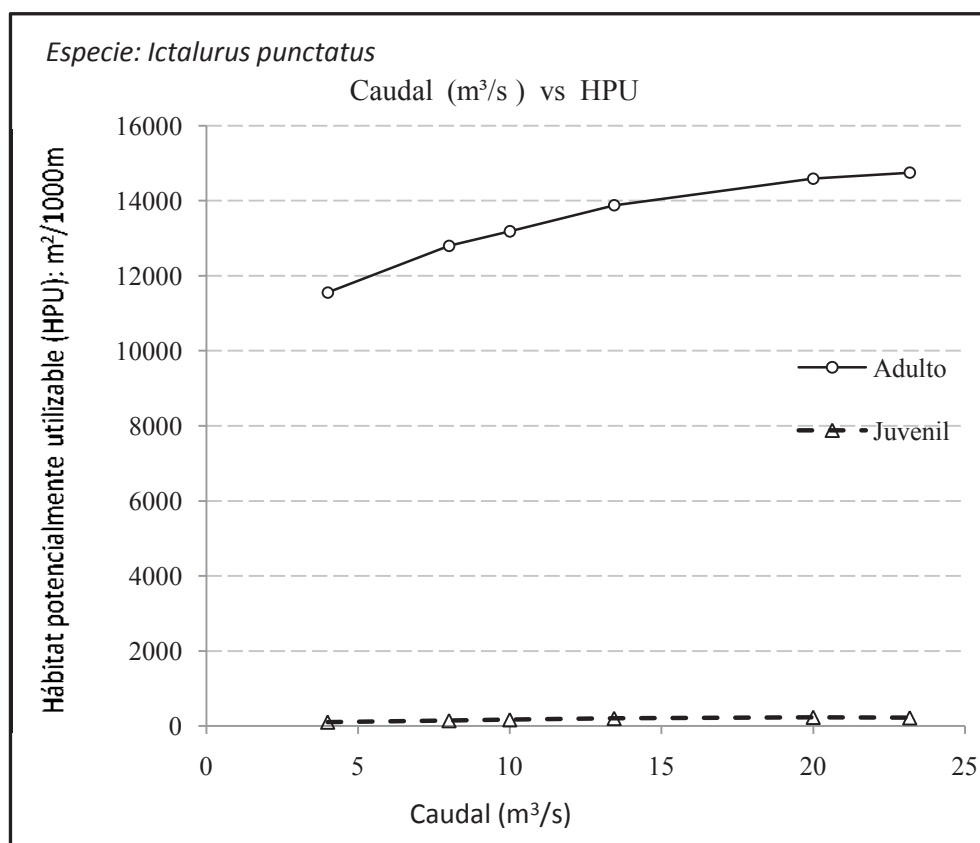


Gráfica 9 Distribución de velocidades simuladas – velocidades observadas.

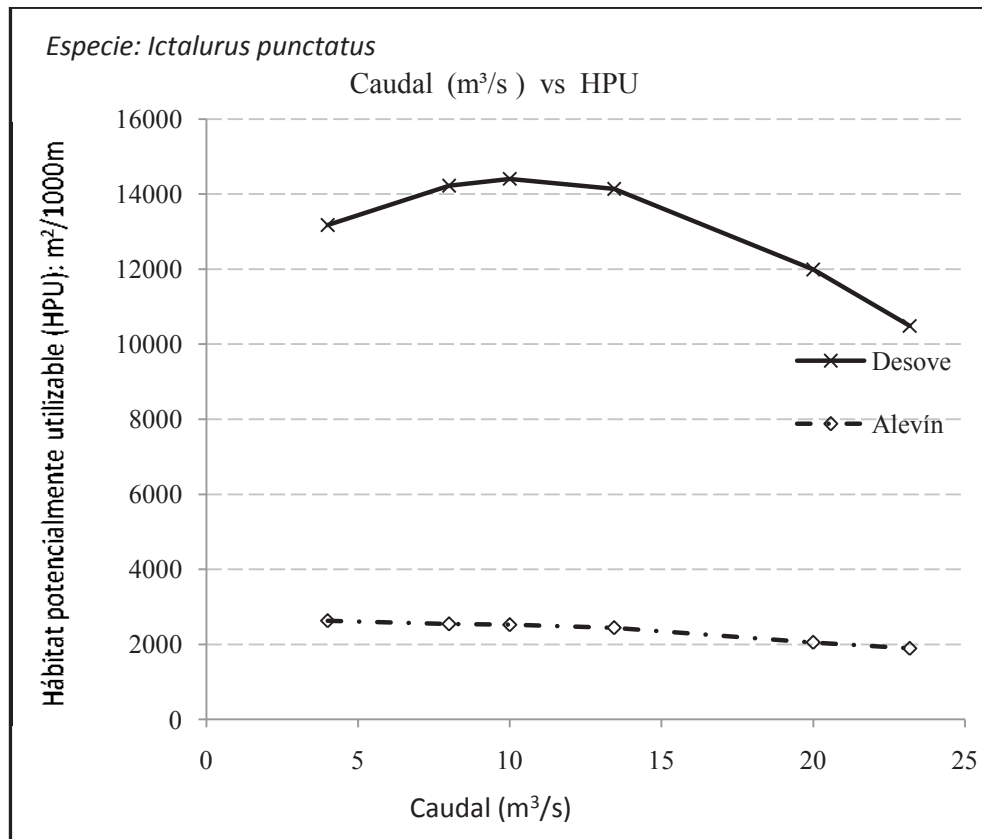
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1 Régimen de caudales ecológicos

Habiéndose obtenido el hábitat potencialmente utilizable (HPU) para los diferentes estadios de vida de la especie *Ictalurus punctatus*, se presentan las curvas caudal-hábitat en las graficas 10 y 11, construidas con los datos de la tabla 4, el siguiente paso en la elaboración de una propuesta de regímenes de caudales ecológicos, consiste en observar los caudales que maximizan el hábitat para los estadios de vida de la especie antes mencionada.



Gráfica 10 Curvas Caudales-Hábitat potencialmente utilizable (HPU), para los estadios de vida juvenil y adulto, de la especie *Ictalurus punctatus*, obtenidas para el meandro del río Lerma en La Piedad, Michoacán.



Gráfica 11 Curvas Caudales-Hábitat potencialmente utilizable (HPU), para los estadios de vida desove y alevín, de la especie *Ictalurus Punctatus*, obtenidas para el meandro del río Lerma en La Piedad, Michoacán.

Tabla 4 Hábitat potencialmente utilizable (HPU) obtenido para los estadios de vida de la especie *Ictalurus Punctatus*, en el meandro del río Lerma en La Piedad, Michoacán.

Especie: <i>Ictalurus punctatus</i>				
Caudal (m ³ /s)	Estadio de vida			
	desove	alevín	juvenil	adulto
Hábitat potencialmente utilizable (HPU): m ² /1000m				
4.00	13178.68	2630.67	105.65	11551.94
8.00	14222.68	2545.49	143.77	12798.51
10.00	14407.02	2524.02	168.02	13183.78
13.44	14137.79	2444.01	203.09	13878.11
20.00	11990.32	2051.91	232.92	14588.21
23.18	10486.76	1890.95	219.90	14747.41

Tabla 5 Porcentaje de hábitat potencialmente utilizable (HPU) obtenido para los estadios de vida de la especie *Ictalurus punctatus*, en el meandro del río Lerma en La Piedad, Michoacán.

Especie: <i>Ictalurus punctatus</i>				
Caudal (m ³ /s)	Estadio de vida			
	desove	alevín	juvenil	adulto
% Hábitat potencialmente utilizable (HPU): m ² /1000m				
4.00	91	100	45	78
8.00	99	97	62	87
10.00	100	96	72	89
13.44	98	93	87	94
20.00	83	78	100	99
23.18	73	72	94	100

En las gráficas 10 y 11, así como en el tabla 4, se puede observar que los caudales simulados y/o medidos, que maximizan el HPU son 23.18, 20, 4 y 10, respectivamente, para los estadios de vida adulto, juvenil, alevín y desove, de la especie *Ictalurus punctatus*. Cabe mencionar que en el caso de los estadios de vida alevín y adulto, la tendencia es a maximizarse el HPU con el decremento e incremento, respectivamente de los caudales, y que el caudal que

maximiza el HPU en esos casos sería inferior y superior, respectivamente, para estos dos estadios de vida, a los caudales antes mencionados. Estos caudales constituyen una de las referencias para proponer un régimen de caudales ecológicos para el meandro del río Lerma en La Piedad, Michoacán. Particularmente se debe tener en cuenta que el estadio de desarrollo que cuenta con menor hábitat es el juvenil, y que para este caso el caudal que lo maximiza es el de 20 m³/s. Además se debe tener en cuenta que la época de desove de esta especie tiene lugar en la primavera (FAO, 2011), con la finalidad de lograr que en esa época se tenga el mayor hábitat posible.

En la tabla 5 se puede observar que el porcentaje de hábitat disponible para los cuatro estadios de desarrollo resultaría adecuado para los caudales de 10 y 23 m³/s, que las reducciones mayores resultan en porcentajes superiores al 70% del hábitat máximo potencialmente utilizable.

8.2 Caudales históricos del río Lerma, en La Piedad, Michoacán

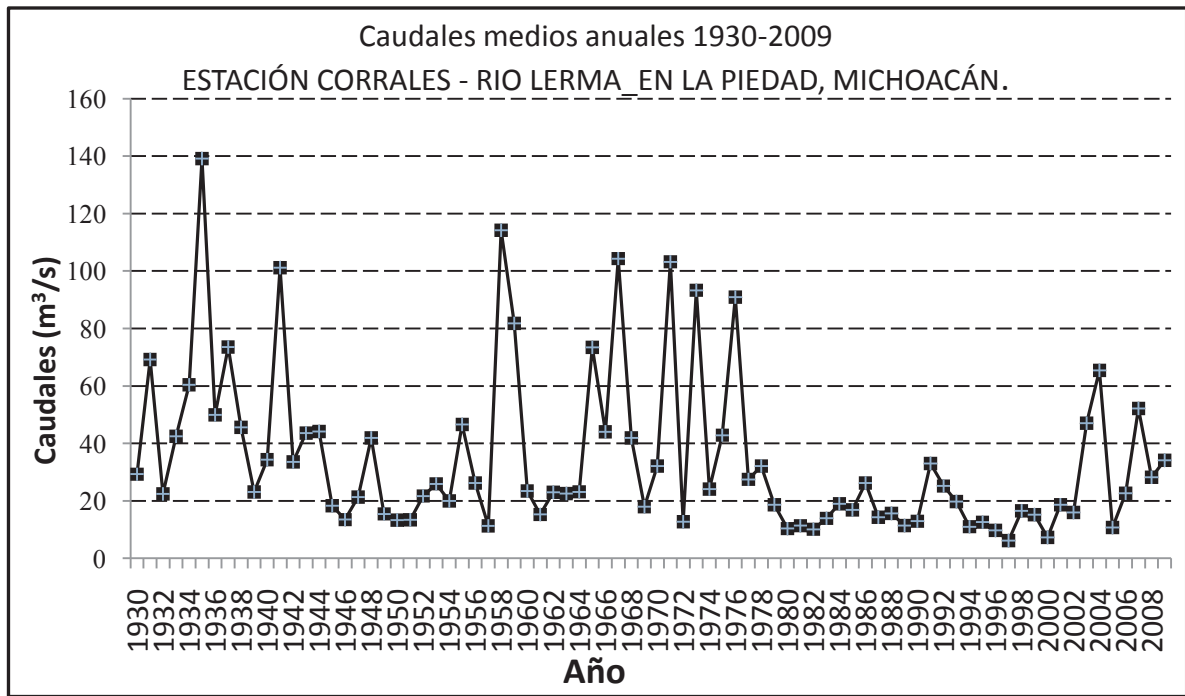
Para conocer los caudales históricos del río Lerma, en La zona cercana a La Piedad, Michoacán, se utilizarán los caudales medios diarios medidos en la estación hidrométrica Corrales (i.e. la más cercana al tramo de estudio), publicados en el Banco de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Los datos utilizados en el presente trabajo, en relación con la estación Corrales, son los correspondientes al periodo 1930-2009. En la gráfica 12 se puede observar el régimen de caudales históricos del río Lerma en la estación Corrales.

Cabe mencionar en este momento, que los caudales medios en un punto dado de un río, pueden haber sido modificados por acciones antropogénicas (e.g. mediante la construcción de obras hidráulicas), por lo tanto, es importante señalar que cuando se habla de caudales ecológicos se debe pensar en caudales naturales que circulan o han circulado por el tramo de estudio. Tales caudales naturales son aquellos cuya magnitud no ha sido modificada artificialmente. Por lo tanto, en el caso de estudio es importante tener en cuenta que las modificaciones al régimen natural de caudales han sucedido principalmente por la operación de presas de almacenamiento y/o regulación, situadas aguas arriba, las estructuras de regulación situadas en la zona (i.e. estructuras-compuertas 1, 2 y 3), así como el dren de alivio construido en la misma zona.

Por lo antes mencionado, es necesario conocer las obras hidráulicas que afectan y/o han afectado los caudales que han circulado por el tramo del Lerma en estudio. Al respecto, se puede mencionar que la presa Solís, situada en la parte superior del Lerma, ha regulado los caudales del mismo río desde 1939, por lo tanto este hecho provoca que los caudales aprovechables para el objetivo del presente trabajo de tesis, se reducirían al periodo 1930-1939, periodo en el que se

podría considerar que se tendrían caudales relativamente inalterados, puesto que el río Lerma es uno de los más aprovechados y por lo tanto es posible la existencia de obras hidráulicas anteriores a la construcción de la presa Solís, que pudiesen haber modificado su régimen de caudales naturales en fechas anteriores a 1939.



Gráfica 12 Régimen de caudales medios anuales del río Lerma, en la estación hidrométrica Corrales, en el periodo 1930-2009.

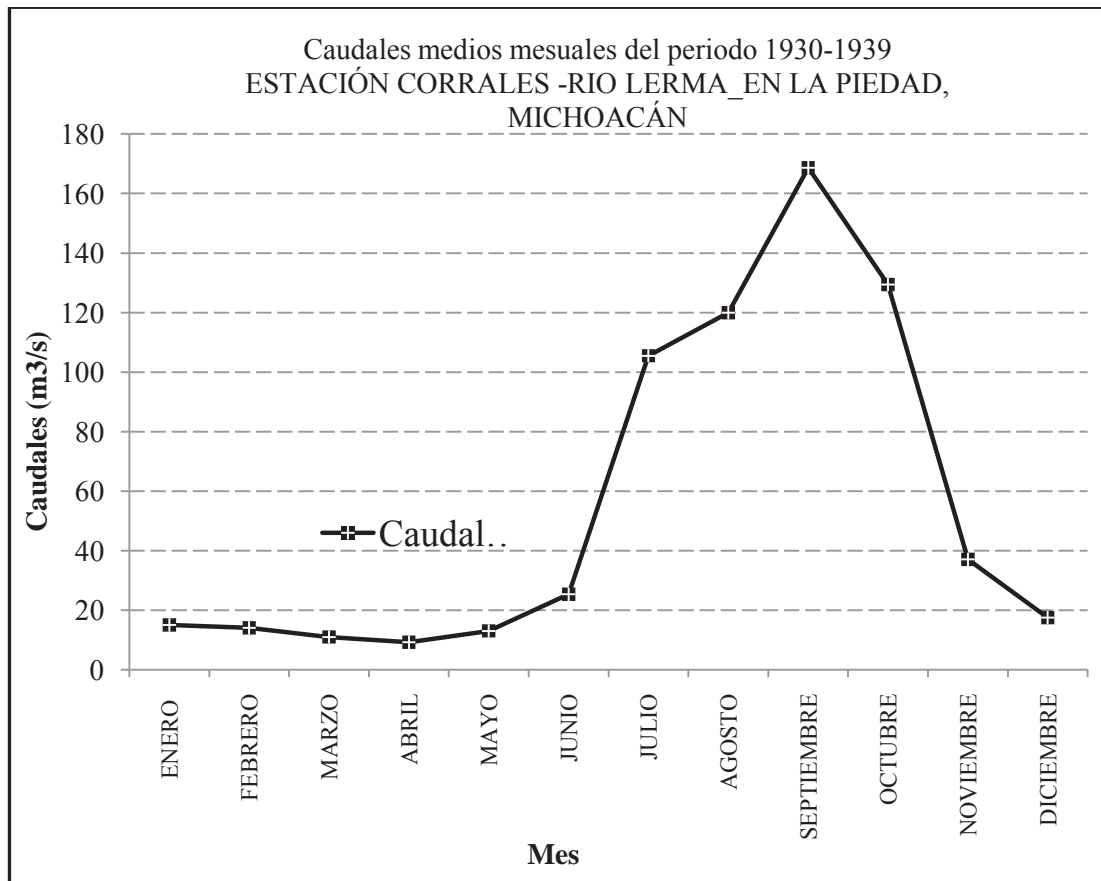
Utilizando el periodo de datos 1930-1939 (tablas 6 y 7), se obtiene un régimen de caudales medios mensuales interanuales (gráfica 13), que servirá como base para proponer un régimen de caudales ecológicos medios mensuales.

Tabla 6 Caudales medios mensuales y anuales del río Lerma, medidos en la Estación Corrales, durante el periodo 1930-1939.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Q prom.
1930	9.608	7.669	6.655	8.252	8.812	28.58	64.51	34.48	11.47	61.97	85.79	23.60	29.28
1931	11.95	14.15	8.156	8.499	15.21	38.29	52.13	239.6	268.1	104.2	48.75	21.55	69.23
1932	13.42	9.629	10.91	9.189	11.45	11.55	18.63	26.24	75.80	53.50	19.50	9.079	22.41
1933	10.20	9.168	4.704	3.399	4.381	6.545	17.29	60.50	201.8	153.0	25.14	13.58	42.48
1934	11.27	8.406	5.125	4.336	7.634	9.949	32.63	112.1	241.4	244.1	29.83	18.34	60.43
1935	13.27	15.23	11.35	8.483	11.62	72.07	396.6	386.0	411.5	275.6	44.38	23.48	139.1
1936	21.18	20.1	17.19	15.45	20.71	15.87	42.58	94.64	100.8	181.6	50.66	17.98	49.91
1937	19.04	17.39	16.55	13.22	17.62	24.85	211.3	81.51	255.9	162.4	36.61	26.07	73.56
1938	24.78	24.26	20.38	14.71	20.23	28.83	197.2	118.7	49.29	20.23	14.05	14.42	45.59
1939	16.36	14.85	9.463	7.084	13.20	17.68	21.93	45.81	69.90	37.09	16.15	7.621	23.09

Tabla 7 Caudales medios mensuales interanuales del río Lerma, obtenidos a partir de los datos contenidos en la tabla 6.

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
15.11	14.09	11.05	9.26	13.09	25.42	105.50	119.98	168.64	129.41	37.09	17.58



Gráfica 13 Régimen de caudales medios mensuales interanuales, del río Lerma, en la estación hidrométrica Corrales, obtenido con datos del periodo 1930-1939.

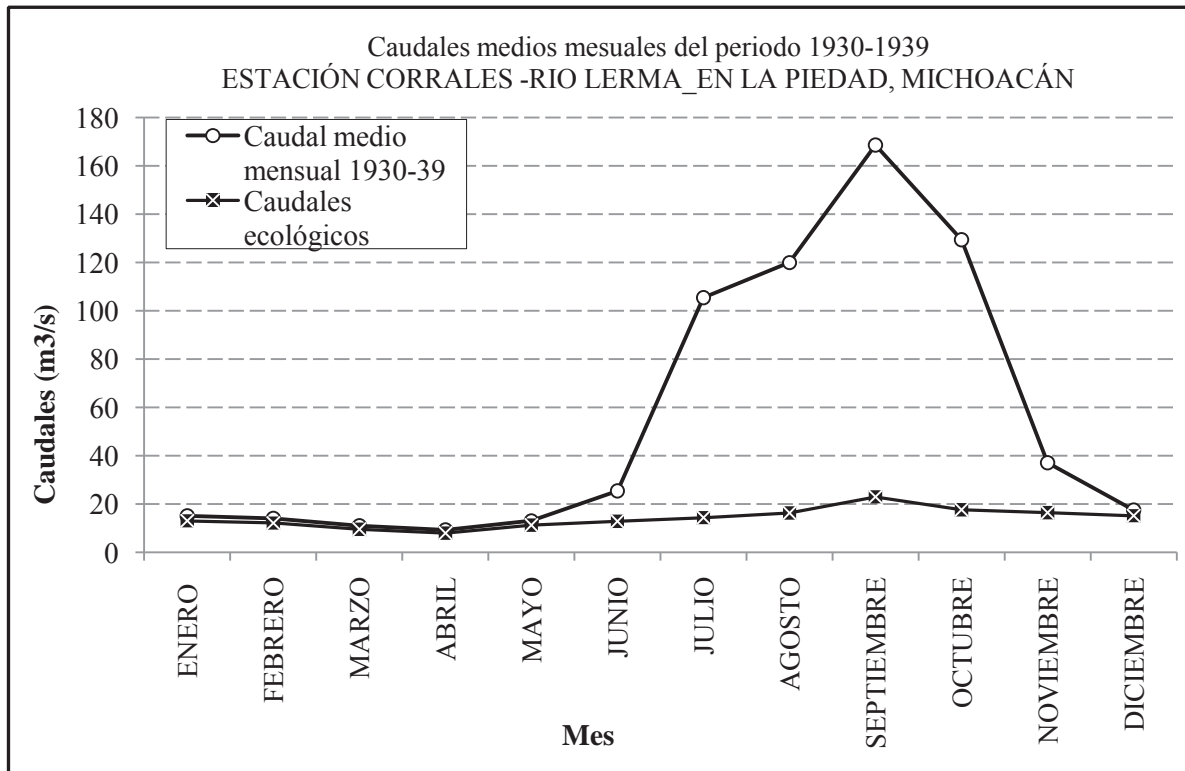
En este momento es importante mencionar que en el tramo de estudio, el río Lerma tiene restringida su zona de inundación por la presencia de una cantidad importante de casas-habitación, y que con un caudal aproximado de 23m³/s el agua empieza a inundar los patios de las primeras casas. Lo anterior aunado al hecho de que la cuenca del Lerma es deficitaria de recursos hídricos, delata la práctica imposibilidad de establecer un régimen de caudales ecológicos cercano al régimen natural; por lo tanto habrá que pensar más bien en un régimen de caudales ecológicos mínimos.

9. CONCLUSIONES

Recordando que el porcentaje de hábitat disponible para los cuatro estadios de desarrollo resultaría adecuado para los caudales de 10 y 23 m³/s, y notando que el caudal de 8m³/s produce un hábitat del 99% para el estadio desove; se propone asignar un caudal de 8m³/s al mes de abril que es el de menor caudal en el hidrograma de la grafica 13, y a partir de abril ir modificando proporcionalmente los caudales ecológicos de abril a diciembre y del mismo mes hacia mayo. Posteriormente se propone asignar el caudal máximo de 23 m³/s al mes de septiembre, e ir disminuyendo proporcionalmente con el hidrograma de la grafica 13, hacia julio y octubre. Por último los meses de junio y noviembre, en los que se da la transición de los caudales altos a los bajos y viceversa, se calculan los caudales ecológicos promediando los caudales inmediato superior e inmediato inferior. Quedando los caudales ecológicos de la magnitud que se muestra en la tabla 8, y con la distribución, como régimen de caudales, como se muestra en la grafica 14.

Tabla 8 Caudales ecológicos mensuales propuestos, en m³/s.

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
13.1	12.2	9.5	8.0	11.3	12.8	14.4	16.4	23.0	17.6	16.4	15.2



Gráfica 14 Régimen de caudales medios mensuales interanuales, del río Lerma, en la estación hidrométrica Corrales, obtenido con datos del periodo 1930-1939; y régimen de caudales ecológicos propuesto.

La información que ofrecen las curvas Caudal-HPU es una herramienta de gran valor para el gestor del recurso hídrico en la determinación de un régimen de caudales ecológicos los cuales definen el gasto mínimo circulante necesario para la conservación del hábitat fluvial que garantizan una condición adecuada del ecosistema.

La simulación de las alturas de superficie libre del agua se ha realizado utilizando la aplicación STGQ de PHABSIM y se han obtenido resultados más que adecuados para el meandro del río Lerma ubicado en la ciudad de La Piedad, Michoacán. Dicha simulación se ha realizado con dos pares de valores caudal-altura de la superficie libre del agua para cada sección transversal.

Para la simulación de la distribución de velocidades se utilizó el modelo VELSIM que es la herramienta principal utilizada para simular la distribución de velocidades en una sección transversal para las descargas requeridas en el tramo de río en estudio, cabe señalar que al no contar con mediciones de velocidades ni mediciones de alturas de superficie libre del agua para cada una de las secciones transversales involucradas en el análisis, estas se han generado en otro programa de simulación hidráulica unidimensional que involucra como parte fundamental la integración de la altura de la superficie libre del agua. En relación a la simulación de los perfiles de velocidades de las secciones transversales utilizando el modelo VELSIM en general se observan buenos resultados.

Podemos concluir que el uso de la tecnología IFIM y su aplicación el programa PHABSIM es una herramienta exitosa en la simulación del hábitat físico y en la determinación de los caudales ecológicos, y así poder utilizar los resultados como base para proponer un régimen de caudales ecológicos como antecedente para la preservación del ecosistema acuático en el meandro del río Lerma ubicado en La Piedad, Michoacán.

10. BIBLIOGRAFÍA

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (2011). Departamento de Pesca y Acuicultura. http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Ictalurus_punctatus/es. Consultada el 21 de julio de 2011.
- Florida Museum of Natural History (Junio de 2010) *Taxonomic Information on Cat Fishes* <http://www.flmnh.ufl.edu/catfish/>.
- García-Rodríguez E. (2009). *Topografía del río Lerma en el tramo (meandro) de La Piedad Michoacán*. Comunicación personal.
- García-Rodríguez E., Martínez-Austria P.F., García de Jalón-Lastra D. M., Martínez-Capel F.S. (2008). *Simulación del hábitat físico en un tramo del Río Lozoya, utilizando el sistema PHABSIM*. Ingeniería Hidráulica en México, vol. XXIII, núm. 4, pp. 41-52, Octubre-Diciembre.
- García-Rodríguez E., Ochoa-Franco L.A. (2008). *Metodologías para la Determinación de Regímenes de Caudales Ecológicos y su Factibilidad de Aplicación en México*. 4º Congreso Estatal de Ciencia y Tecnología. 30 y 31 de Octubre. Morelia, Michoacán, México.
- Rubio-Olivares J. (2008). *Entrevista Personal*. Ingeniero titular Secretaria de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento (SAPAS). La Piedad Michoacán. México
- Diez-Hernández J. M. y Ruiz-Cobo D. H. (2007) *Determinación de caudales ambientales confiables en Colombia: el ejemplo del río Palacé (Cauca)*. Investigación.
- Diez-Hernández J. M., Martínez de Azagra A., (2006). *Directrices para la modelación hidráulica de caudales ambientales mediante la metodología IFIM*. III Congreso Ibérico Sobre Gestión y Planificación del Agua. España.
- Comisión Nacional del Agua (2004): *Ley de Aguas Nacionales y su reglamento*. 206pp.

Tharme E.R. (2003). *A Global Perspective on Environmental Flow Assessment: Emerging Trends in the Development and Application of Environmental Flow Methodologies for Rivers*. River Res. Applic. 19: 397-441. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.

Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) (2003): *Evaluación física, química y biológica del río Lerma (meandro) a la altura de la Ciudad de La Piedad, entre los estados de Guanajuato y Michoacán* México.

Espinoza-C. C., Vargas-M. X., Pardo-P. M. (1999). *Metodología Incremental Para la Asignación de Caudales Mínimos Aconsejables, IFIM*. VI jornadas del CONAPHI-CHILE. 25-28 Mayo Santiago, Chile.

Centro Nacional de Desarrollo Municipal (1999). *Michoacán*. Gobierno del estado de Michoacán. Enciclopedia de Los Municipios de México. http://www.emexico.gob.mx/work/EMM_1/Michoacan/Mpios/16069a.htm

García de Jalón D. y Gonzales del Tango M. (1998). *El concepto de caudal ecológico y criterios para su aplicación en los ríos españoles*. I Congreso Ibérico Sobre Gestión y Planificación del Agua 14-18 Septiembre. España.

Bovee K.D., Lamb B. L., Bartholow J.M., Stalnaker C.B., Taylor J. and Henriksen J. (1998). *Stream Habitat analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology*. U.S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report USGS/BRD-1998-0004. Viii + 131 pp.

García-Rodríguez E. y Martínez- Austria P. (1997): *Métodos de cálculo del caudal de reserva ecológico para corrientes superficiales: el caso de los ríos Tonto y Santo Domingo, en el estado de Oaxaca, México*. Memorias Técnicas del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (Tomo II). 12 pp. Zacatecas, Zac. (México): Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales A.C. (FEMISCA).

García-Rodríguez E. y Paz-Soldán Córdova G. A. (1997): *Estimación de las Necesidades Hídricas para la Conservación de la Ecología Fluvial de los Ríos Regulados*. Memorias Técnicas del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (Tomo II). 8 pp. Zacatecas, Zac. (México): Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales A.C. (FEMISCA).

Bueno-Soria J., López-Aguado B. y Márquez-Mayaudón C. (1980). *Consideraciones preliminares sobre la ecología de los insectos acuáticos del río Lerma*. Instituto de Biología, Departamento de Zoología, México 20, D.F.

Herricks, E. E., J.B. Stall, J.W. Eheart, A. B. Libby, S.F. Railback, and M.J. Sale. (1980). *Instream flow needs analysis of the Little Wabash River Basin*. Dept. Civil Eng., University of Illinois, Urbana, IL. 150 pgs.

ANEXO

DEFINICIONES DE TÉRMINOS Y NOMBRES DE PROGRAMAS UTILIZADOS

Los siguientes términos y sus definiciones se ofrecen para ayudar al lector a comprender algunos de los vocabularios utilizados en el programa de computo PHABSIM, en la descripción de canal hidráulico abierto, curvas de preferencia y modelación de hábitat. Así mismo establece una terminología apropiada en el desarrollo de esta tesis. Esta terminología está basada en el manual de PHABSIM publicado en el idioma inglés y de no ser especificado todas sus unidades se basan en el sistema tradicional de unidades inglesas.

ALTURA DE INSTRUMENTO: Elevación de la vista a través de un nivel. Los niveles de medición se miden hacia abajo desde este plano.

ANCHO: La distancia a través de un canal en la superficie del agua medida normal al flujo.

ANCHO, CANAL: Una anchura arbitraria basada en lo que el observador ve como un canal.

ANCHO, MOJADO: Ancho de un río con agua en el.

ANCHO, PIE: El ancho de la base de un canal trapezoidal.

ANCHO, RIVERA: El ancho de un río justo antes que el flujo sobrepase la capacidad de conducir el agua el canal, es decir antes que derrame por ambos o uno de los bordos del cauce.

ANCHO, RÍO: El mismo que el ancho de canal o el ancho del río mojado.

ANCHO, SUPERIOR: El ancho del área mojada del flujo a través del canal de un río.

ÁREA, LECHO UTILIZABLE PONDERADO (WUBA - Weighted Usable Bed Area): El área del lecho de un río ponderado por su idoneidad para un organismo acuático. (Unidades: pies cuadrados o metros cuadrados).

ÁREA, SECCIÓN-TRANSVERSAL: El área de la sección que contiene agua, perpendicular a la dirección de flujo. (Unidades: pies cuadrados o metros cuadrados).

ÁREA, TRANSPORTE: Área sección-transversal de un río perpendicular a la corriente.

ÁREA, UTILIZABLE: La superficie de un río que puede ser utilizada por un organismo acuático. (Unidades: pies cuadrados o metros cuadrados).

ÁREA, UTILIZABLE PONDERADA (WUA-Weighted Usable Area): La superficie de un río medida en relación a su idoneidad para un organismo acuático. (Unidades: pies cuadrados o metros cuadrados).

CELDA: Tal como se utilizan en PHABSIM, un incremento de ancho de un canal de un río ponderado por su importancia relativa por longitud en un área dada definido por verticales.

COBERTURA: Áreas de refugio en un canal de un río que proporcionan a organismos acuáticos protección contra los depredadores y/o un lugar para descansar y conservar la energía debido a una reducción de la fuerza de la corriente o camuflaje visual, por ejemplo, piscinas, bancos, peñas, aguas profundas, turbulencia superficial, etc..

COEFICIENTE BETA: (1) Coeficiente utilizado para representar el cambio en la rugosidad de Manning con descarga o radio hidráulico. (2) Relación entre el esfuerzo al corte del sustrato y las fuerzas de resistencia del material-sustrato.

CURVAS, CONVENIENCIA-de-USO (SI): Igual que las curvas de preferencias excepto que se enfatiza el concepto de la conveniencia de las condiciones para un organismo específico.

CURVAS, PREFERENCIA: Los criterios utilizados para medir un área como una valoración de preferencia para un organismo acuático específico. El organismo prefiere determinadas condiciones.

CURVAS, USABILIDAD: Igual que las curvas de preferencias excepto que se enfatiza el concepto de usabilidad en las condiciones para un organismo específico.

DATUM: Cualquier cantidad numérica, geométrica o un conjunto de cantidades tales que puedan servir como una base o referencia para otras cantidades. Un plano o punto convenido estándar de elevación, señalada por cotas de referencia permanentes sobre algunas estructuras inmóviles sólidas, desde las cuales se miden las elevaciones, o de las cuales son referenciadas.

DESCARGA: La tasa de flujo (Q), o volumen de agua que fluye en un río en un lugar determinado y en un determinado plazo de tiempo, expresado como pies cúbicos sobre segundo (cfs) en unidades inglesas o en metros cúbicos sobre segundo, en sistema MKS.

ECUACIÓN DE MANNING: Una fórmula empírica para el cálculo de la velocidad en un canal o conducto. La ecuación en las unidades tradicionales inglesas es:

$$V = \frac{1.49}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

ERROR, CALIBRACIÓN DE VELOCIDAD (VCE): El error calculado para la relación $v=aQ^b$ y se calcula para unidades inglesas/unidades MKS como:

$$VCE = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{v} - v}{v}$$

donde:

v = velocidad estimada

\bar{v} = velocidad medida

n = número de pares de velocidad de descarga utilizados para determinar los coeficientes a , b .

ELEVACIÓN en SUPERFICIE DEL AGUA (WSL): La elevación de superficie del agua en relación a una referencia arbitraria.

ESTADIO DE VIDA: Una clasificación arbitraria de la edad de un organismo en las fases relacionadas con la morfología del cuerpo y potencial reproductivo, por ejemplo, "edad media" para hombre y "juvenil" para los peces.

FACTOR AJUSTE DE VELOCIDAD (VAF): La relación de la descarga para la cual las velocidades están siendo simuladas a la suma de simulación de velocidades de celda por las áreas de celda:

$$VAF = \frac{Q_{objetivo}}{\sum_{i=1}^n v_i a_i}$$

donde:

Q = descarga objetivo (Descarga a ser simulada)

v_i = velocidad de celda

a_i = área de celda

n = número de celdas húmedas

FACTOR, CELDA: También se denomina factor de uso de conveniencia compuesto. La función de velocidad (v), profundidad (d) y el índice de canal (CI) utilizado para un área de un río como peso para su valor como hábitat. El término se define en el contexto de modelos de hábitat específicos en el capítulo 5 del manual de PHABSIM.

FACTOR DE PONDERACIÓN: El valor que mide un área de superficie o área de volumen como su valor como hábitat.

FACTOR, TRANSPORTE: en situaciones de flujo uniforme, el área disponible para el transporte de agua es directamente proporcional a la descarga Q. El factor de transporte (K) es la relación entre las características de canal y el flujo. La ecuación en las unidades inglesas es:

$$K = \frac{1.49}{n} AR^{2/3}$$

La descarga puede definirse en términos de K

$$Q = \sqrt{SK}$$

donde:

A = área, transporte

R = radio hidráulico

n = rugosidad de Manning

Q = descarga

K = factor, transporte

S = pendiente

FLUJO: El movimiento de un flujo de agua y otras sustancias móviles de lugar a lugar; descarga; la cantidad total llevada por un río.

FLUJO, ESTABLE e INESTABLE: Se dice que un flujo en canal abierto es estable si la profundidad y la velocidad del flujo no cambia o puede suponerse constante durante un intervalo específico de tiempo. El flujo es inestable si cambia la profundidad y la velocidad con el tiempo.

FLUJO, SUB-CRITICO y SÚPER-CRITICO: En cualquier cuerpo de agua en movimiento están actuando tanto las fuerzas de inercia y de gravedad en el cuerpo de agua. El efecto de gravedad en el estado del flujo está representado por la relación entre las fuerzas de inercia y de gravedad, i.e., Número de Froude.

Si el número de Froude es menor que la unidad, predominan las fuerzas de gravedad, por tanto, el flujo tiene baja velocidad y se describe como tranquilo o sub-crítico. Si el número de Froude es mayor que la unidad, los efectos de la inercia son mucho más pronunciados, por lo que el flujo es de alta velocidad y se describe como rápido, o supercrítico. Cuando el Número de Froude es igual a la unidad, el flujo se define como crítico.

La mayoría de los estudios en caudales ocupan principalmente por el estado sub-crítico de flujo, aunque se pueden tratar simulaciones hidráulicas para ciertas actividades recreativas con los estados de flujo súper-críticos que son difíciles de simular.

FLUJO, UNIFORME y VARIADO: Flujo uniforme significa que la profundidad de flujo y la velocidad son las mismas en cada sección de un tramo del canal, es decir no cambian sus características hidráulicas en el espacio y el tiempo. Por lo tanto, la energía hidráulica, y pendientes del fondo son paralelos. Si el flujo es variado, la profundidad y la velocidad del flujo cambian a lo largo del canal. El flujo variado se clasifica en variación rápida o gradual, dependiendo de la distancia en el que se produce el cambio. La variación rápida se manifiesta en un cambio brusco en la profundidad, resultando en saltos hidráulicos, caídas hidráulicas y fenómenos relacionados. El criterio para uniforme o flujo variado es el cambio en profundidad con respecto al espacio.

FONDO: La parte del fondo del canal de un río; puede ser húmedo ó seco.

GEOMETRÍA, HIDRÁULICA: Las dimensiones de ciertas características de un río con respecto a las fracciones húmedas y no húmedas del cauce.

GRADIENTE: La tasa de cambio de cualquier característica por unidad de longitud. Vea pendiente.

HÁBITAT FÍSICO: El lugar donde vive una población y sus alrededores como se define en las condiciones físicas, más comúnmente profundidad, velocidad y condiciones del canal tales como sustrato y objetos de cobertura.

ÍNDICE DE CANAL: Un índice de idoneidad para las características de canal, generalmente sustrato o cobertura.

IFIM: The Instream Flow Incremental Methodology. (Véase Bovee, *et al.*, 1998 y Stalnaker, *et al.*, 1995)

MACROHÁBITAT: Las condiciones del hábitat en una fracción del río controlan la distribución longitudinal de los organismos acuáticos.

MARCAS DE REFERENCIA: Los puntos terminales en una sección transversal. Por lo general marcada por algo (una “referencia”) marcada en el terreno. Por convención, la primera marca se hace en la rivera izquierda viendo aguas arriba.

MICROHÁBITAT: Área pequeña del hábitat (celda) de un río que controla lugares específicos o rangos de hábitat.

NIVEL: La elevación o distancia vertical de la superficie de agua por encima de una referencia (un plano de elevación conocida o arbitraria).

NIVEL DE FLUJO CERO (SZF): La elevación en la superficie del agua en una sección transversal cuando el flujo llega a cero. Esto es el punto más bajo del fondo ó la superficie de la fosa cuando no se produce ningún flujo (i.e., un punto en el sustrato aguas abajo actúa como el control de superficie de la fosa).

NÚMERO DE FROUDE: Un número adimensional utilizado como un índice para caracterizar el tipo de flujo en una estructura hidráulica que tiene la fuerza de gravedad (como la única fuerza de producción de movimiento) junto con la resistencia a la fuerza de inercia utilizadas, en este documento el número de Froude es:

$$F_R = \frac{V}{\sqrt{gd}}$$

donde:

F_R = Número de Froude

V = velocidad promedio de la columna

g = aceleración de gravedad

d = profundidad del agua

NÚMERO de REYNOLDS–FLUJO: Un número adimensional relativo a la fuerza de fluidez del agua a las fuerzas viscosas. Este se calcula mediante la ecuación:

$$Re = \frac{V * d}{\nu}$$

donde:

Re = Número de Reynolds

ν = Viscosidad cinemática del agua

V = velocidad media

d = profundidad del agua

NÚMERO de REYNOLDS–SUSTRATO (R^*): Un número adimensional utilizado como un índice para caracterizar la importancia relativa de las fuerzas activas sobre el sustrato a las fuerzas viscosas en el fluido. Se calcula mediante la ecuación:

$$R^* = \frac{\mu^* D}{\nu}$$

donde:

μ^* = Velocidad de corte (véase velocidad, corte)

D = es un tamaño de partícula característicos

ν = viscosidad cinemática de agua

PARÁMETRO DE COBERTURA β : Relación de tensión del corte del sustrato y las fuerzas de resistencia del material de cobertura:

$$\beta = \frac{\tau D}{\gamma_s - \gamma} = \frac{RS}{(S_s - 1)D}$$

donde:

τ = tensión al corte del sustrato fondo

γ_s = unidad de peso del material sustrato

γ = unidad de peso del agua

D = tamaño de material del sustrato

S_s = gravedad específica del material sustrato

R = radio hidráulico

S = pendiente

Los términos γ_s , τ también se utilizan para el parámetro de cobertura y D puede ser el tamaño promedio de la capa de superficie o la D_{65} de la superficie (D_{65} es donde el 65 % de las partículas son más finas).

PERFIL, LONGITUDINAL: (1) abierto en canales hidráulicos abiertos, es una grafica de la elevación en la superficie del agua contra la distancia del canal y/o elevación del fondo. (2) Una línea de las elevaciones por un río normalmente el Thalweg. Más a menudo incluye las elevaciones del fondo y de las elevaciones en la superficie del agua

PERFIL, TRANSVERSAL: Igual como una sección transversal.

PENDIENTE: La inclinación o gradiente desde una la línea horizontal ó superficie. El grado de inclinación puede expresarse como una relación, tales como 1: 25, que indica un aumento de la unidad en 25 unidades de distancia horizontal ó como longitud 0.04.

PENDIENTE, ENERGÍA: Cambio en la energía total (potencial y cinética) disponible en un punto. Generalmente se aproxima como el cambio entre la sección transversal dividido por la distancia entre las secciones transversales.

PENDIENTE, HIDRÁULICA: El cambio en la elevación de la superficie del agua entre dos Secciones transversales, dividido por la distancia entre las secciones transversales.

PENDIENTE, SUPERFICIE DE AGUA: La pendiente de la superficie del agua en una ubicación del río y generalmente se aproxima como la diferencia en las elevaciones de la

superficie del agua en dos puntos diferentes en el río dividido por la distancia del largo del río entre los puntos.

PENDIENTE, THALWEG: El cambio en la elevación del fondo, medida en los puntos de profundidad máxima, dividido por la distancia entre las secciones transversales.

PROFUNDIDAD: La distancia vertical desde un punto en el sustrato a la superficie libre del agua.

PROFUNDIDAD, HIDRÁULICA: Equivalente al tirante medio o profundidad promedio, que es la relación que existe entre el área hidráulica y el ancho de la superficie libre del agua.

PROFUNDIDAD MEDIA: Promedio aritmético de las profundidades en una sección. El área de la sección transversal dividido por el ancho de superficie.

PROFUNDIDAD, THALWEG: La distancia vertical del punto más bajo de un canal de sección transversal a la superficie libre del agua, es decir, la profundidad máxima de la sección transversal.

PERÍMETRO MOJADO: La distancia en la parte del fondo y los lados de una sección transversal de un canal en contacto con el agua, las unidades pueden ser pies o metros.

PARÁMETRO PARA TRANSPORTE DE AGUA (WTP): Tal como se utilizan en PHABSIM, el parámetro de transporte de agua es expresado en unidades tradicionales mediante la ecuación:

$$WTP = \frac{1.49}{n} \sqrt{S}$$

donde:

S = la pendiente de energía

n = rugosidad de Manning

PHABSIM: (pronunciado P-HAB-SIM) - el sistema de simulación de hábitat físico. Calcula una relación entre flujos y hábitat físico para diversos niveles de vida de un organismo acuático o una actividad recreativa. PHABSIM es un componente de IFIM; PHABSIM no es IFIM.

RABIÓN: Rápidos poco profundos en un río abierto donde la superficie del agua se rompe en olas por obstrucciones totales o parcialmente sumergidas.

RADIO HIDRÁULICO: Relación del área transversal al perímetro mojado, $R=A/p$. Para canales superficiales relativamente amplias, R se aproxima a la profundidad hidráulica.

REMANSO: (1) Una región de un río donde el nivel de superficie de agua se rige por un control indirecto (ahí el término paso-remanso se aplica al modelo WSP, véase más abajo). (2) Una saliente del canal principal con poco flujo y donde la elevación de superficie de agua se mantiene por las condiciones en el canal principal.

RUGOSIDAD DE CANAL: Un coeficiente de resistencia al flujo, causada por el tamaño de las partículas que conforman el lecho y taludes del conducto o fricción por presencia de vegetación y características de canal, tal como sinuosidad alta y constricciones, que provocan pérdida de energía en el movimiento del flujo.

RUGOSIDAD DE MANNING o "n" DE MANNING: Un factor utilizado cuando se calcula la velocidad promedio de un flujo de agua en un canal que representa el efecto de la rugosidad del material confinando sobre las pérdidas de energía en el agua que fluye. También se refiere como "n" ó coeficiente de rugosidad.

SECCIÓN TRANSVERSAL: Una sección a través de un canal de un río que es perpendicular a la dirección del flujo.

SEGMENTO: Una corta longitud de un río, canal u orilla. La longitud real está definida por el propósito del estudio, sección relativamente homogénea de un río compuesta por dos o más segmentos longitudinales.

SUPERFICIE UTILIZABLE: Ver espacio, utilizable.

SUSTRATO: El material en la parte inferior del canal de un río, por ejemplo, rocas, vegetación, etc.

TENSIÓN DE CORTE, SUSTRATO: El estrés en el lecho del río causado por el agua que fluye.

THALWEG: La línea longitudinal que conecta los puntos de elevación del sustrato mínimo a lo largo del curso de un río.

TRANSECTO: Lo mismo que la sección transversal.

VELOCIDAD: La tasa de tiempo de movimiento; la distancia de viaje dividida entre el tiempo necesario para viajar esa distancia.

VELOCIDAD, ADYACENTE: Velocidad en una celda cerca de la celda que se está estudiando.

VELOCIDAD MEDIA, COLUMNA: La velocidad media de la parte superior a la parte inferior de un río. Generalmente medidos en profundidad de 6/10 o un promedio de valores medidos en 2/10 y 8/10 de la profundidad cuando la profundidad es superior a 2,5 metros.

$$\tilde{V} = \frac{1}{d} \int_0^d v * dy$$

donde:

\tilde{V} = la velocidad de columna media

v = la velocidad de punto

dy = pequeño incremento de la profundidad dy

d = profundidad total

VELOCIDAD, CORTE: La raíz cuadrada de la tensión de distorsión del lecho dividido por la densidad del agua y tiene la dimensión de longitud y tiempo:

$$\mu_* = \sqrt{\frac{\tau_*}{\rho}} = \sqrt{\frac{\tau_*}{\gamma_*/g}}$$

donde:

μ_* = velocidad de corte

τ_* = tensión al corte del fondo

γ_* = densidad de agua

VELOCIDAD, MEDIA: La velocidad media puede representar una celda o una sección transversal se calcula como:

$$Q = \frac{V}{A}$$

donde:

Q = la descarga en la sección transversal o celular, unidades cfs o m^3/s

A = el área de la sección transversal o celular, unidades sf o m^2

VELOCIDAD, NARIZ: Velocidad en el punto donde se encuentra un pez. Este es el punto de velocidad expresada en términos de un organismo.

VOLUMEN PONDERADO ÚTIL (WUV): El volumen de un río ponderado por su valor como hábitat.

VELOCIDAD, PUNTUAL: Velocidad a una profundidad de un río.

VERTICAL: Como se usa en PHABSIM, ubicaciones de muestreo a través de una sección transversal.

Nombres de Programas

STGQ: El Modelo de STGQ utiliza una relación nivel-descarga (curva de valoración) para calcular elevaciones superficiales de agua en cada sección transversal. En la relación nivel-descarga y su simulación, cada sección transversal es independiente de todas las demás en el conjunto de datos. El procedimiento de cálculo básico es realizado desarrollando una regresión log-log entre niveles observados y pares de descargas para cada sección transversal. La ecuación de regresión resultante se usa para estimar elevaciones de superficie de agua en todos los flujos de interés.

MANSQ: EL programa MANSQ utiliza la ecuación de Manning para calcular las elevaciones de superficie de agua en una sección transversal con base a su sección transversal, por lo tanto, trata a cada sección transversal como independiente. La calibración del modelo se realiza mediante el procedimiento de prueba y error para seleccionar un coeficiente β que minimice el error entre las elevaciones de las superficies de las aguas observadas y simuladas para todas las descargas medidas.

WSP: El programa perfil de superficie del agua (WSP) utiliza un método estándar paso-remanso para determinar las elevaciones superficiales de agua de una sección transversal mediante las bases de la sección transversal. El programa WSP requiere que todas las secciones transversales estén analizadas en una determinada ejecución del modelo para relacionar entre sí términos de controles de análisis y secuencia aguas arriba. Es decir, que las características hidráulicas de cada sección transversal en términos de geometría del sustrato y las elevaciones superficiales de agua se midan desde una referencia común. El modelo es calibrado inicialmente para un perfil longitudinal ya medido de elevaciones superficiales de agua ajustando la rugosidad de Manning, en primer lugar para el estudio completo del sitio y, a continuación, en cada una de las secciones transversales. A continuación la rugosidad de Manning, se ajusta para posteriormente medir los perfiles longitudinales de agua superficial en otras descargas para establecer los modificadores de rugosidad utilizados dentro del modelo. Este enfoque requiere que todos los controles

hidráulicos dentro de la modelación del sitio de estudio estén representados por secciones transversales.

VELSIM: El Programa VELSIM es la herramienta principal utilizada para simular la distribución de velocidades dentro de una sección transversal en la gama requerida de descargas (es decir, la velocidad media de la columna en cada celda en el estudio de sección transversal a cada simulación de descarga). La técnica se basa en un conjunto empírico de observaciones de velocidad (es decir, velocidades medidas) que actúan como una plantilla para distribuir las velocidades en un canal mediante la resolución de la ecuación 'n' de Manning (en este contexto 'n' actúa como un factor de distribución de rugosidad a través del canal). El canal está dividido en las celdas y la velocidad calculada para cada una de estas celdas. La práctica habitual es utilizar un conjunto de velocidades como un plantilla para simular velocidades para un determinado rango de descargas. Cuando más de un conjunto de las mediciones de velocidad empírica está disponible, un número proporcional de rangos de flujo se puede simular con plantillas de diferentes velocidades. El programa puede usarse cuando las mediciones de velocidad no están disponibles. En esta situación, se distribuirá velocidad a través de la sección transversal como una función de la profundidad de flujo.

HABTAE: El programa de simulación de hábitat principal en PHABSIM. Las opciones dentro de HABTAE permiten al usuario seleccionar el cálculo de hábitat suponiendo que la condición dentro de una celda establece el valor del hábitat en la celda. Las condiciones de la celda adyacente (por ejemplo de una "estación de alimentación") también se incluyen en HABTAE. Suponiendo que la condición en una celda simula las consideraciones de las condiciones de velocidad además de la velocidad en las celdas contiguas o en otra ubicación cerca establecen el valor del hábitat en la celda. El programa HABTAE también permite al hábitat ser determinado en términos de volumen (en lugar del área de superficie) y proporciona un método para determinar las condiciones del hábitat en cada sección transversal, así como el agregado para un sitio de estudio.

HABEF: Análisis de hábitat eficaz en PHABSIM se utiliza para determinar la disponibilidad de hábitat físico teniendo en cuenta dos flujos; en otras palabras, el hábitat que sigue siendo eficaz cuando dos corrientes se encuentran fuera de importancia. Esta situación a menudo se plantea, por ejemplo, en la evaluación de la reducción de flujos durante el periodo de desove y su subsecuente periodo de incubación ó en las operaciones de sobrecarga que tienen un flujo máximo y mínimo diario. En el caso de análisis del desove e incubación, el área de desove en una sección transversal no es "eficaz" a menos que el régimen de flujo del período de incubación mantenga el hábitat en condiciones adecuadas para la incubación de los huevos.

HABTAM: El segundo modelo de hábitat eficaz es el programa HABTAM. En HABTAM las especies se pueden mover de celda a celda entre cada transecto sobre una gama de descargas iniciales y finales. En este modelo, el hábitat eficaz se define como el hábitat que sigue siendo utilizable cuando las especies son obligadas a desplazarse debido a las fluctuaciones de flujo.

AVDEPTH/AVPERM: El modelo de parámetros promedio, AVDEPTH /AVPERM, calcula una variedad de características hidráulicas para cada sección transversal en adición al estudio de vista promedio del sitio. Estos incluyen ancho mojado, perímetro mojado y superficie de área mojada, área de sección transversal, velocidad media del canal y profundidad promedio. Estos también pueden ser utilizados para determinar el ancho de un río con agua por alguna(s) profundidad(es) arbitrarias especificadas por el usuario. Estos programas ofrecen una gran cantidad de información en una sección transversal ó un estudio del nivel agregado del sitio y deben ser examinados en la mayoría de las aplicaciones.

CALCF4: Este programa de utilería calcula el parámetro de transporte de agua (o transporte) (WTP) para cada sección transversal. El programa utiliza la ecuación de Manning en cada sección transversal, para calcular la WTP para cada elevación de la superficie de agua, se desarrolla la relación de energía entre el área WTP y la máxima profundidad, alto y ancho, velocidad y profundidad media. El exponente (B) en la ecuación de regresión WTP entre descarga y el factor de transporte del canal o WTP para cada sección transversal es una excelente estimación inicial para el coeficiente β de cada transecto en el programa MANSQ.

SLOP34: Un programa de utilería que proporciona los valores del thalweg, elevaciones superficiales de agua, y pendientes en las siguientes cuatro tablas: elevación superficial del agua, pendiente de superficie del agua, elevación de la línea del grado de energía y pendiente de la línea de grado de energía.

LSTWLF: Programa de utilería que calcula y muestra el número de Froude y las velocidades medias del canal para cada sección transversal y cada flujo.