



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA AMBIENTAL – AGUA

**CLASIFICACIÓN FUNCIONAL DE RÍOS DE DISTINTAS REGIONES DE MÉXICO PARA  
DISEÑAR PROPUESTAS DE CAUDAL AMBIENTAL**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
TALISIA ANAI DOMÍNGUEZ SÁNCHEZ

TUTOR PRINCIPAL  
DRA. MARÍA ANTONIETA GÓMEZ BALANDRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA-IMTA

COMITÉ TUTORAL  
DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA

DR. CARLOS A. ESCALANTE SANDOVAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO; SEPTIEMBRE DE 2017

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Carlos A. Escalante Sandoval

Secretario: Dr. Enrique César Valdez

Vocal: Dr. Manuel Martínez Morales

1<sup>er</sup>. Suplente: M.I. Pedro Manuel Núñez García

2<sup>do</sup>. Suplente: Dra. María Antonieta Gómez Balandra

Lugares donde se realizó la tesis: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos; Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, Ciudad de México; Guadalajara, Jalisco; Texcoco, Edo. De México.

**TUTOR DE TESIS:**

Dra. María Antonieta Gómez Balandra

-----  
**FIRMA**

## *Hidrología del amor*

*Las cuencas de tus ojos  
profundos valles dejan;  
parteaguas son tus cejas,  
vertientes de ojival;  
y en el llanto violento  
cascadas asemejan,  
tus lágrimas que brotan  
cual pingüe manantial.*

*Hagamos un torrente  
de múltiples caricias,  
y en avenidas juntas  
lleguemos hasta el mar.  
En lechos con arena  
formemos nuestro nido,  
vivamos siempre unidos  
sin dejarnos de amar.*

*El agua de tus ojos  
no requiere represas;  
enjuga tus tristezas  
y así te hace calmar;  
porque no quiero verte  
erosionar tu vida,  
siendo tu mi consentida,  
¡jamás de he de olvidar!*

*M.C. Luis Pimentel Bribiesca  
División de Ciencias Forestales  
Universidad Autónoma Chapingo*

## *Agradecimientos*

---

*A mi hermoso país y el CONACyT, por el financiamiento para cumplir una meta más en mi vida.*

*A la Dra. Ma. Antonieta Gómez B. y el Dr. Enrique César Valdez, por creer en mí y darme la confianza para realizar mis proyectos de vida.*

*Al Dr. Carlos A. Escalante S. y Dr. Pedro Núñez G. por compartir su gran pasión y conocimiento en la hidrología.*

*Al Dr. Domínguez y Dr. Agustín Breña del Instituto de Ingeniería por aclarar las dudas más básicas de una simple mortal en la hidrología, agradezco su amabilidad y paciencia.*

*Al Dr. Manuel Martínez M. por su tiempo y dedicación.*

## *Dedicatoria*

---

*A Jorge Lomeli, quien empezó este viaje conmigo como compañero y lo termina como esposo.*

*A mi abuela, por ser el mejor ejemplo de fuerza que puede haber.*

*A mi madre, por darme todo.*

*A mi padre por ponerme ejemplos académicos tan desafiantes.*

## Contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. JUSTIFICACIÓN</b> .....	4
<b>3. OBJETIVO GENERAL</b> .....	5
3.1. Objetivos específicos .....	5
<b>4. ALCANCES</b> .....	6
<b>5. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE</b> .....	7
<b>5.1. La cuenca como sistema hidrológico</b> .....	8
5.1.1. Cuenca hidrográfica .....	10
5.1.2. Régimen hidrológico.....	15
5.1.3. Geomorfología de ríos.....	17
<b>5.2. Caudal ambiental</b> .....	19
5.2.1. Concepto y desarrollo histórico .....	19
<b>5.2.2. Clasificación de metodologías</b> .....	27
<b>5.3. Límites Ecológicos de Alteración Hidrológica (ELOHA)</b> .....	47
5.3.1. Aplicaciones del marco ELOHA .....	51
5.3.2. Clasificación hidrológica regional .....	53
5.3.3. Clasificación geomorfológica regional.....	58
5.3.4. Alteración hidrológica.....	62
<b>5.4. Criterios para la clasificación regional de ríos</b> .....	63
5.4.1. Biodiversidad de ríos y seguridad de agua para consumo .....	63
5.4.2. Alteración ecohidrológica.....	65
5.4.3. Objetivos ambientales .....	67
<b>6. INFORMACIÓN Y METODOLOGÍA</b> .....	70
<b>6.1. Obtención y manejo de datos</b> .....	70

6.1.1.	Bases de datos .....	70
6.1.2.	Modelo de elevación digital .....	70
6.1.3.	Modelo de Elevación Digital tipo LiDAR de Terreno .....	70
6.1.4.	Software .....	71
6.1.5.	Cartografía digital .....	71
6.2.	Metodología .....	71
6.2.1.	Adaptación del marco ELOHA en México .....	72
6.2.2.	Paso 1. “Clasificación hidrológica regional” .....	75
6.2.3.	Paso 2. “Clasificación geomorfológica regional” .....	80
6.2.4.	Paso 3. “Alteración hidrológica” .....	89
7.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	94
7.1.	DEFINICIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO .....	95
7.2.	CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS .....	98
7.3.	PASO 1. “CLASIFICACIÓN HIDROLÓGICA REGIONAL” .....	99
7.3.1.	Análisis de consistencia, homogeneidad y complementación de series hidrometeorológicas. ....	100
7.3.2.	Análisis de frecuencias con diferentes técnicas de estimación de parámetros .....	110
7.3.3.	Análisis regional .....	112
7.4.	PASO 2. “CLASIFICACIÓN GEOMORFOLÓGICA REGIONAL” .....	128
7.4.1.	Identificación de MDE de alta resolución LiDAR, tipo terreno .....	129
7.4.2.	Mapas de pendiente media del cauce clasificada .....	130
7.4.3.	Localización de sitios ecológicos de importancia .....	133
7.4.4.	Determinación de número de tramos .....	133
7.4.5.	Geomorfología de cauce .....	136

---

<b>7.4.6. Geomorfología de valle .....</b>	<b>138</b>
<b>7.4.7. Clasificación de Rosgen para cada sección tipo.....</b>	<b>140</b>
<b>7.4.8. Integración de la información.....</b>	<b>143</b>
<b>7.5. PASO 3. “ALTERACIÓN HIDROLÓGICA” .....</b>	<b>146</b>
<b>7.5.1. Hidrogramas diarios de puntos de control .....</b>	<b>147</b>
<b>7.5.2. Selección de periodo natural y alterado.....</b>	<b>152</b>
<b>7.5.3. Selección de rangos de variación .....</b>	<b>159</b>
<b>7.5.4. Aplicación de Indicadores hidrológicos de alteración hidrológica (IHA) y Apéndice B NMX-159-SCFI-2012.....</b>	<b>160</b>
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>178</b>
<b>9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>182</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 5.1. Las tres dimensiones espaciales y la dimensión temporal de un sistema lótico (Ward et al., 2011). .....	7
Fig. 5.2. Estructura espacial en los ríos (Maddock, 1999). .....	8
Fig. 5.3. Zonas de una cuenca y efectos ambientales (SEMARNAT, 2013). .....	9
Fig. 5.4. Tipos de cuenca según la salida de sus escurrimientos (Aparicio, 1989). .....	10
Fig. 5.5. Microcuenca (UAQ, 2017). .....	12
Fig. 5.6. Diferentes comportamientos de escurrimiento: Regímenes hidrológicos (Robinson et al., 1997). .....	16
Fig. 5.7 Representación de los tipos de confinamiento en cortes transversales de varios tipos de canal (Rosgen, 1994-1996; traducido por López-Mora, 2007). .....	18
Fig. 5.8. Metodologías existentes (Villanueva et. al., 2011). .....	29
Fig. 5.9. Métodos hidrológicos (Elaboración propia). .....	30
Fig. 5.10. Enfoque de límites de sostenibilidad para establecer objetivos para la gestión sostenible del agua (Gopal, 2013; traducción propia). .....	32
Fig. 5.11. Métodos Hidráulicos (Elaboración propia). .....	35
Fig. 5.12. Métodos hidrobiológicos: PHASBIM (Maddock, 1999; traducción propia). .....	39
Fig. 5.13. Métodos holísticos (Villanueva et al., 2011). .....	41
Fig. 5.14. Metodología ELOHA (TNC, 2009). .....	51
Fig. 5.15. Paso 1: “Fundamento hidrológico”. .....	55
Fig. 5.16. Características geomorfológicas en ríos (Rosgen (1994, 1996); traducido por López-Mora, 2007). .....	59
Fig. 5.17. Niveles para la clasificación de ríos naturales (Rosgen (1994, 1996); traducido por López-Mora, 2007). .....	60

Fig. 5.18. Ubicación de ríos por su clasificación Nivel I dentro de la cuenca (Rosgen (1994, 1996).....	61
Fig. 5.19. Patrones prevalecientes de amenaza para la seguridad del agua de consumo humano y la biodiversidad en México (Vörösmonty, 2010).....	64
Fig. 5.20. Definición de variables para la clasificación de alteración ecohidrológica (Garrido et al., 2010).....	66
Fig. 5.21. Alteración ecohidrológica de los ríos de México. (Garrido et al., 2010).....	67
Fig. 5.22. Objetivo ambiental por cuenca hidrológica (WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte, et al., 2006).....	69
Fig. 6.1. Alcance de la presente investigación en la aplicación de ELOHA. ....	72
Fig. 6.2. Esquema de la metodología detallada para la aplicación de ELOHA en México, aplicación en CRA.....	74
Fig. 6.3. Clave de clasificación de Ríos Naturales Rosgen (1994). ....	82
Fig. 6.4. Interfaz de búsqueda de claves de cartas con MDE de alta resolución LiDAR, tipo terreno con resolución de 5m. ....	83
Fig. 6.5. Sección tipo para la medición de parámetros geomorfológicos. ....	86
Fig. 6.6. Esquema acotado de un cauce. ....	87
Fig. 7.1. Localización de las cuencas pre-seleccionadas. ....	96
Fig. 7.2. Localización de la cuenca del Río la Antigua en el área de estudio.....	97
Fig. 7.3. Correlograma, estación 27001. ....	104
Fig. 7.4. Eventos de diseño contra datos reales, estación 27001.....	112
Fig. 7.5. Ubicación de estaciones hidrométricas y las cuencas que drenan. ....	113
Fig. 7.6. Esquema de resultados obtenidos en la técnica de coeficiente de variación. ....	119
Fig. 7.7. Localización de la Cuenca no aforada dentro de la región 2. ....	126
Fig. 7.8. Cartas 1:10,000 que cuentan con MDE LiDAR tipo terreno.....	129

Fig. 7.9. Definición de área para clasificación geomorfológica en Región homogénea 2.....	130
Fig. 7.10. Clasificación de pendiente longitudinal en la CRA.....	131
Fig. 7.11 Distribución de frecuencia de pendiente Alta en el cauce principal de CRA. ....	131
Fig. 7.12. Distribución de frecuencia de pendiente Moderada Alta en el cauce principal de CRA. .....	132
Fig. 7.13 Distribución de frecuencia de pendiente Moderada baja en el cauce principal de CRA. .....	132
Fig. 7.14. Distribución de frecuencia de pendiente baja en el cauce principal de CRA.....	133
Fig. 7.15. Localización de los tramos y secciones tipo en subcuenca no aforada de CRA. ....	134
Fig. 7.16. Observación del lecho del cauce principal del CRA.....	136
Fig. 7.17. Sección transversal del tramo 4 en la CRA. ....	137
Fig. 7.18 Mapa de clasificación del área de estudio .....	144
Fig. 7.19. Datos históricos hidrométricos de la estación 27001 "Martínez de la Torre".....	148
Fig. 7.20. Datos históricos hidrométricos de la estación 27005 "Libertad".....	148
Fig. 7.21. Datos históricos hidrométricos de la estación 27006 "El Raudal". ....	149
Fig. 7.22. Datos históricos hidrométricos de la estación 28003 "Cardel". ....	149
Fig. 7.23. Datos históricos hidrométricos de la estación 28108 "El Naranjillo".....	150
Fig. 7.24. Datos históricos hidrométricos de la estación 28111 "Ídolos". ....	150
Fig. 7.25. Datos históricos hidrométricos de la estación 28125 "Carrizal". ....	151
Fig. 7.26. División en cuencas hidrográficas en el área de estudio y localización de infraestructura. ....	154
Fig. 7.27 Percentiles y RHN para la estación hidrométrica 27005.....	162
Fig. 7.28. Percentiles y RHN para la estación hidrométrica 27006. ....	164
Fig. 7.29. Caudales medios mensuales del RHN y RHA de la estación hidrométrica 28108. ...	165
Fig. 7.30. Análisis mensual del $P_{25}$ y $P_{75}$ en la estación 28108. ....	166

---

Fig. 7.31. Análisis de RVA para de los IHA del grupo I en la estación 28108. ....	167
Fig. 7.32. Percentiles, RHA y RHN para la estación hidrométrica 28108.....	168
Fig. 7.33. Resultados de la verificación de los caudales del RHA contenidos en entre el percentil 10 y 90 del RHN.....	170
Fig. 7.34. Caudales medios mensuales del RHN y RHA de la estación hidrométrica 28111. ...	171
Fig. 7.35. Percentiles, RHA y RHN para la estación hidrométrica 28111.....	173
Fig. 7.36. Análisis mensual del $P_{25}$ y $P_{75}$ en la estación 28111.....	173
Fig. 7.37. Análisis de RVA para de los IHA del grupo I en la estación 28111. ....	175
Fig. 7.38. Resultados de la verificación de los caudales del RHA contenidos en entre el percentil 10 y 90 del RHN de la estación 28111. ....	177

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1. Clasificación de una red de una cuenca según su tamaño. ....	13
Tabla 5.2. Análisis de las definiciones de caudal ambiental en la bibliografía internacional, la referencia bibliográfica correspondiente y las dimensiones explicitadas por las definiciones y el texto que las describe. ....	24
Tabla 5.3. Actualización de la revisión sobre metodologías de estimación de Caudales Ambientales en América Latina. ....	26
Tabla 5.4. Régimen de caudales según el Método de Tennant. ....	31
Tabla 5.5. Estudios realizados con ELOHA. ....	52
Tabla 5.6. Parámetros geomorfológicos propuestos por Reidy et al., 2012. ....	57
Tabla 5.7. Parámetros geomorfológicos propuestos por Orsini, 2012. ....	58
Tabla 7.1. Cuencas propuestas para aplicar la metodología ELOHA en México. ....	95
Tabla 7.2. Registro rellenado de gastos mínimos anuales promedio de 7 días consecutivos, para cada estación. ....	100
Tabla 7.3. Datos correlograma, estación 27001. ....	103
Tabla 7.4. Prueba de homogeneidad, Helmert. Estación 27001. ....	106
Tabla 7.5. Prueba de homogeneidad, Student. Estación 27001. ....	108
Tabla 7.6. Prueba de homogeneidad de Cramer. Estación 27001. ....	109
Tabla 7.7. Resumen de las pruebas de Homogeneidad. ....	109
Tabla 7.8. Estadísticos de la muestra, estación 27001. ....	110
Tabla 7.9. Errores estándar de ajuste y distribución seleccionada, estación 27001. ....	110
Tabla 7.10. Eventos de diseño de la FDP GVE, estación 27001. ....	111
Tabla 7.11. Subcuencas delimitadas contrastadas con lo reportado en BANDAS. ....	113
Tabla 7.12. Características fisiográficas. ....	114
Tabla 7.13. Parámetros de lluvia para cada estación de área de control. ....	117

Tabla 7.14. Regiones homogéneas resultantes de todas las técnicas. ....	118
Tabla 7.15. Características empleadas en la regresión.....	120
Tabla 7.16. Autocorrelación de características.....	121
Tabla 7.17. Resultados de los parámetros más importantes en el área de estudio. ....	122
Tabla 7.18. Matriz de datos para la regresión lineal múltiple para determinar $7Q_2$ Región 1. ...	122
Tabla 7.19. Matriz de datos para la regresión lineal múltiple para determinar $7Q_{10}$ Región 1..	122
Tabla 7.20. Matriz de datos para la regresión lineal múltiple para determinar $7Q_2$ Región 2. ...	123
Tabla 7.21. Matriz de datos para la regresión lineal múltiple para determinar $7Q_{10}$ Región 2..	123
Tabla 7.22. Modelos de regresión lineal múltiple estimados para las diferentes regiones homogéneas. ....	124
Tabla 7.23. Sección tipo característica en cada tramo seleccionado en CRA. ....	135
Tabla 7.24. Clasificación de pendiente longitudinal de cada tramo en CRA. ....	136
Tabla 7.25. Tipos de leche en los tramos característicos seleccionados en el cauce de la CRA. ....	137
Tabla 7.26. Concentración de información para determinación de sinuosidad. ....	137
Tabla 7.27. Concentración de características de los tramos seleccionados para caracterización geomorfológica en la CRV.....	138
Tabla 7.28. Descripciones generales de los tipos de ríos y criterios delineadores para la clasificación general (Rosgen, 1994, 1996). ....	140
Tabla 7.29. Descripción de la clasificación para los tramos característicos en la CRA.....	143
Tabla 7.30. Análisis funcional de los tramos característicos de la CRA de acuerdo a Rosgen (1994,1996).....	144
Tabla 7.31. Año de construcción, y subcuenca a la que pertenece cada una de las presas que se encuentran en la cuenca de estudio. ....	152
Tabla 7.32. Numeración de las cuencas en el área de estudio. ....	154

---

Tabla 7.33. Periodo de alteración para las cuencas del área de estudio.....	157
Tabla 7.34. Periodos de registro para las estaciones hidrométricas estudiadas.....	158
Tabla 7.35. Parámetros de IHA del grupo 1 (medianas de la serie) estación 27005. ....	161
Tabla 7.36. Parámetros de IHA del grupo 1 (medianas de la serie) estación 27006. ....	163
Tabla 7.37. Parámetros de IHA del grupo 1 (medianas de la serie) estación 28108. ....	165
Tabla 7.38. Cálculo mensual de percentiles 10 y 90 en RHN (1961-1973) y RHA (974-2011) estación 28108.....	168
Tabla 7.39. Parámetros de IHA del grupo 1 (medianas de la serie), con percentiles 25 y 75 estación 28111.....	172
Tabla 7.40. Cálculo mensual de percentiles 10 y 90 en RHN (1963-1968) y RHA (1969-2011), estación 28111.....	175

---

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 5.1 .....	14
Ecuación 5.2 .....	14
Ecuación 5.3 .....	15
Ecuación 5.4 .....	15
Ecuación 5.5 .....	45
Ecuación 5.6 .....	46
Ecuación 5.7 .....	46
Ecuación 5.8 .....	47
Ecuación 5.9 .....	47
Ecuación 6.1 .....	84
Ecuación 6.2 .....	90
Ecuación 7.1 .....	127
Ecuación 7.2 .....	127

---

## ANEXOS

Apéndice 6.1. Metodología detallada del Paso 1. “Fundamento Hidrológico”

Apéndice 6.1.1. Metodología para análisis de precipitación

Apéndice 7.1. Características fisiográficas del área de estudio

Apéndice 7.2. Pruebas de independencia

Apéndice 7.3. Pruebas de homogeneidad

Apéndice 7.4. Análisis de frecuencias con diferentes técnicas de estimación de parámetros

Apéndice 7.5. Funciones de Distribución de Probabilidad para gastos mínimos

Apéndice 7.6. “Pre-“ y “pos-“ análisis de series pluviométricas

Apéndice 7.7. Días con lluvia

Apéndice 7.8. Precipitación acumulada

Apéndice 7.9. Aplicación de técnicas para determinar regiones homogéneas

Apéndice 7.10. Aplicación de técnicas regionales

## 1. INTRODUCCIÓN

Hasta hace un siglo el hombre consideraba los recursos hídricos como algo inagotable, pero el aumento de la población, y por ende, el aumento de la demanda de recursos para los diferentes usos (agrícola, pecuario, industrial, público-urbano) demostraron lo contrario, muchos escurrimientos se volvieron insuficientes en calidad y en cantidad para cubrir las necesidades de la población humana y del propio ecosistema del que son parte, -fue así como se definió una demanda ecológica-.

En México y otros lugares del mundo existen varios retos que afectan nuestra relación con el medio ambiente, como la creciente contaminación de los suelos y del agua, la pérdida de la biodiversidad, la alteración del régimen hidrológico, la disminución de los niveles de agua subterránea y el decremento de recursos naturales (SEMARNAT, 2013).

Partiendo de la alteración del régimen hidrológico, la construcción de obras civiles, el crecimiento urbano, y la consecuente presión de uso de agua superficial y subterránea, la descarga de aguas residuales, la deforestación, entre muchas otras acciones, cambian el régimen de caudal y la distribución del agua en la cuenca, además con la aportación de nutrientes por parte de la agricultura, se modifica la composición química del agua y su temperatura, generan una ruptura en la continuidad del río y modifican la disponibilidad de agua y sedimentos en las zonas riparias, lo que a su vez altera los hábitats. Con ello, se da oportunidad de colonización a especies invasoras y pone en riesgo la supervivencia de la flora y fauna nativa. Es así como se ponen en riesgo los servicios ambientales que proveen los sistemas fluviales, como la provisión de agua para consumo humano (además para uso agrícola e industrial), el tratamiento de aguas residuales, la mitigación de inundaciones, el mantenimiento de la fertilidad de los suelos, la distribución de nutrientes a lo largo de las cuencas, el mantenimiento del equilibrio

en el balance salino de las zonas costeras, son esenciales para la generación de energía y sirven igualmente como medios de transporte (Garrido, 2010).

En este sentido, a nivel mundial se está tomando conciencia de la importancia de mantener un equilibrio entre los usos público urbano, industrial, pecuario y agrícola; y los niveles de agua reservada para preservar servicios ambientales, componentes, funciones y procesos de resiliencia en ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y sociales. Para lograr este equilibrio es necesario que a lo largo del año transite un gasto determinado a través de un cauce, a este gasto se le denomina caudal ecológico, cuando compite con otros usos y requiere ser asignado o conservado en el río (WWF, 2010).

Se reconoce que el régimen natural de variabilidad de un río o bien su caudal ambiental, representa la cantidad y duración de los flujos de agua necesaria para mantener las especies, y asegurar tanto las funciones y capacidad de recuperación de los ecosistemas de agua dulce, como los medios de subsistencia de las comunidades humanas que dependen de ecosistemas saludables (Poff et al., 2010; Dyson, M., Bergkamp, G., Scanlon, 2003; TNC, 2011 y Brisbane, 2007, citados por Rodríguez, 2012).

Se considera que el marco de Límites Ecológicos de Alteración Hidrológica (ELOHA), es una opción para evaluar las necesidades de caudal ambiental de muchas cuencas simultáneamente y así fundamentar el desarrollo y aplicación de normas de caudales ambientales a escala regional (Kendy et al., 2009).

ELOHA ofrece una solución flexible, científicamente defendible para la evaluación de caudal ambiental, necesaria cuando no se pueden realizar estudios a profundidad para todos los ríos en una región. Debido a la escasa información existente en México, ELOHA es una opción viable para la definición de propuesta de límites de alteración y caudal ecológico. ELOHA se basa en la riqueza de los

conocimientos adquiridos de décadas de estudios de ríos específicos, y aplica esos conocimientos a áreas geográficas tan grandes como un estado, provincia, nación, o grandes cuencas fluviales (TNC, 2010).

En los Estados Unidos, numerosos estados ya están aplicando elementos del marco ELOHA para apresurar la integración de los caudales ambientales en la gestión y planeación regional del aprovechamiento de los recursos hídricos. Algunos ejemplos en los Estados Unidos son: Michigan por Hamilton y Seelbach (2011); en Pennsylvania por DePhilip y Moberg (2010); en Arizona por Haney et al. (2008); en New Jersey por Kennen et al. (2007); en Colorado, Connecticut, Rhode Island, Ohio y Massachusetts recopilado por Kendy et al. (2012). Se ha probado también este método como marco en Australia por Hirji y Davis (2009); y China por Anon (2008); en Tanzania por Acreman et al. (2005) y en Sudáfrica por Hirji y Davis (2009).

## 2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, son pocos los estudios realizados sobre caudal ecológico en México y se considera que es de suma importancia contar con una clasificación que tome en cuenta la estructura y función con base en dos procesos: hidrológico y geomorfológico, que cumplan con la función de indicadores a diferentes escalas representativas de microcuencas, y que posteriormente, permita regionalizar y priorizar las cuencas para la conservación, protección, modificación y replanteamiento en el manejo y planeación de las obras hidráulicas y de restauración de ríos.

Con ello se pretende crear una metodología basada en el marco de trabajo ELOHA bajo las limitaciones de información y aprovechando los recursos de acceso público que tiene México, con el objetivo de definir algunas pautas en la determinación de caudales ecológicos a escala regional en cuencas aforadas y no aforadas. Se plantea una metodología en cada paso del ELOHA, que pretende orientar a aquellos actores y tomadores de decisiones que se interesan en la integridad de los sistemas fluviales del país para garantizar y mantener todos los servicios de los que se beneficia la sociedad y como estrategia ante el cambio climático.

Se describe un ejemplo de aplicación de la metodología en la Región del Golfo Norte, concretando en un análisis integrado de información viable y disponible de forma gratuita para el entendimiento de la funcionalidad de algunos sistemas fluviales en México.

### 3. OBJETIVO GENERAL

Aplicar la base científica del marco ELOHA (Límites Ecológicos de Alteración Hidrológica, siglas en inglés), para proponer caudales ambientales en cuencas a nivel regional.

#### 3.1. Objetivos específicos

- Determinar regímenes hidrológicos en cuencas aforadas y no aforadas para delimitar regiones homogéneas por medio de variables explicativas en la investigación.
- Analizar las características geomorfológicas más importantes para determinar zonas homogéneas con el fin de regionalizar cuencas no aforadas.
- Clasificar y agrupar los cauces de acuerdo con su hidrología y geomorfología.
- Identificar las alteraciones hidrológicas e importancia ecológica de las regiones analizadas.
- Realizar una propuesta de límites de alteración y caudales ambientales en las cuencas de la región estudiada.

## 4. ALCANCES

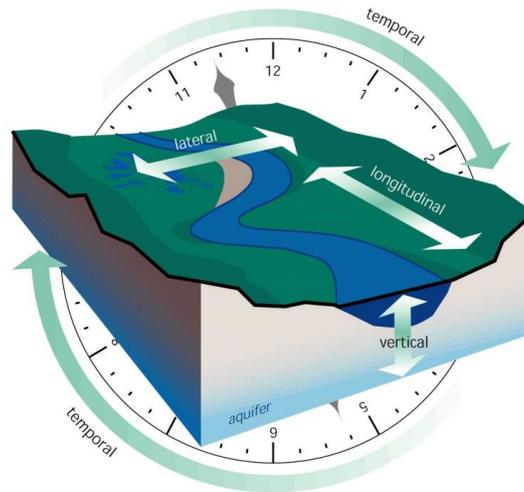
El trabajo de tesis propuesto, se basó en seleccionar una región hidrológica para lograr la aplicación de las primeras tres etapas del marco de trabajo ELOHA, con el fin de ejemplificar una metodología con posibilidad de ser aplicada en diferentes regiones del país con disponibilidad de datos para la clasificación de su régimen hidrológico, geomorfológico y alteración hidrológica que, como objetivo final, es la propuesta de un régimen de caudal ecológico, como estrategia fundamental de respuesta al cambio climático (COP-16, 2010).

Se pretende aplicar la estructura propuesta por ELOHA (2009), modificada para México en el uso de recursos actualmente gratuitos por diversas instituciones a nivel nacional; tal como bases de datos gubernamentales; o bien herramientas de análisis como software proveniente de Estados Unidos que se unen gracias a la revisión y los avances realizados por diferentes investigadores en otras partes del mundo.

Entre los alcances secundarios del presente estudio está señalar el origen de las alteraciones; por ejemplo, las alteraciones originadas por presencia de infraestructura hidráulica; identificar la importancia para la conservación por la existencia de áreas naturales protegidas, sitios RAMSAR, y especies con estatus de conservación, etc., en cada cuenca estudiada en una región. De igual forma se fundamenta por metodologías hidrológicas el funcionamiento de una región hidrológica para proceder a una clasificación geomorfológica a mayor detalle, donde se proponen manejos específicos para cada tipo de río de acuerdo con Rosgen (1996). Se calcula una serie de estadísticos que definen la alteración de los ríos en la región homogénea; así como los componentes principales de caudal ecológico. Finalmente, se define un régimen de caudal ecológico con base en Richter (1995) y a la NOM-159-SCFI-2012, que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas (SE, 2012); así como la incorporación de un límite anual definido como el  $7Q_{10}$  en cuencas no aforadas.

## 5. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Actualmente se hace énfasis en las cuatro dimensiones que mantienen la conectividad de los ríos: longitudinal que conecta los ecosistemas de las partes altas hasta la desembocadura en estuarios, manglares o zonas costeras y permite el transporte de materiales y nutrientes por la diferencia de pendiente. La dimensión lateral que conecta a la planicie de inundación y los ecosistemas riparios o ribereños, donde se acomodan los materiales, estabilizando los cauces y haciendo muy productivas estas zonas. La vertical hacia la zona que conserva el agua del caudal base de la época de estiaje y la infiltración a los acuíferos o zonas de descarga al mar y por último la dimensión temporal para que todos estos procesos ocurran en ciclos anuales y con diferencias interanuales que imprimen características particulares a una región (Locke et al., 2008).



**Fig. 5.1. Las tres dimensiones espaciales y la dimensión temporal de un sistema lótico (Ward et al., 2011).**

Para los propósitos de este trabajo, una región es una amplia área geográfica con un macroclima y esfera de actividades e intereses comunes, mientras que el paisaje es la unidad definida por la cubierta natural y el uso del suelo. Se distingue por un patrón de repetición de sus componentes

Un corredor ripario es un elemento espacial en las escalas de cuenca y de paisaje. Incluye dos elementos importantes, el canal y las comunidades de vegetación riparia.

Un canal es el área por donde fluye el agua al menos una parte del año y una corriente se considera únicamente el canal o la denominación del río.

El tramo es la unidad definida por un segmento de un canal, es la unidad de trabajo más frecuente, Fig. 5.2.

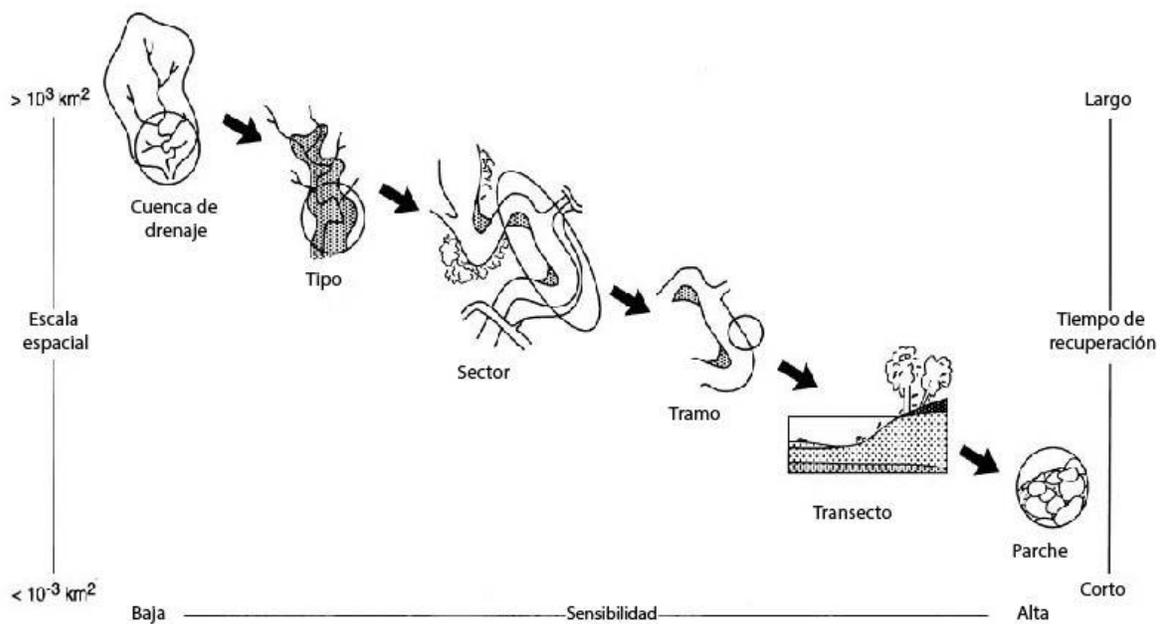


Fig. 5.2. Estructura espacial en los ríos (Maddock, 1999).

## 5.1. La cuenca como sistema hidrológico

La CONAGUA define el concepto de cuenca hidrológica como el territorio donde las aguas fluyen al mar a través de una red de cauces que convergen en uno principal, o bien el territorio en donde el escurrimiento forma una unidad autónoma o diferenciada de otras, aun sin que desemboken en el mar. La cuenca, conjuntamente con los acuíferos, constituyen la unidad de gestión del recurso hidráulico (CONAGUA, 2011).

La cuenca como sistema hidrológico es un complejo ecosistema asociado al ciclo del agua y sus interacciones con los recursos naturales. La cuenca como sistema hidrológico está formada por 3 zonas: **(1) La zona de captación, de cabecera o cuenca alta.** Son áreas aledañas a la divisoria de aguas o parteaguas en la porción altimétrica más elevada de la cuenca; abarca sistemas de montaña y lomeríos. En esta zona se forman los primeros escurrimientos (arroyos) luego que los suelos han absorbido y retenido toda el agua según su capacidad. **(2) La zona de almacenamiento, de transición o cuenca media.** Es una zona de transición entre la cuenca alta y la cuenca baja, donde los escurrimientos iniciales confluyen aportando diferentes caudales cuyas concentraciones de sedimentos, contaminantes y materia orgánica diferirán en función de las actividades que se realizan en cada subcuenca; es un área de transporte y erosión. **(3) La zona de descarga, de emisión o cuenca baja.** Es el sitio donde el río principal desemboca en el mar o bien en un lago. Se caracteriza por ser una zona de importantes ecosistemas, como los humedales terrestres y costeros; además de muy productiva para el uso agrícola y donde se acumulan los impactos de toda la cuenca (Garrido et. al., 2010 citado por la SEMARNAT, 2013).



Fig. 5.3. Zonas de una cuenca y efectos ambientales (SEMARNAT, 2013).

### 5.1.1. Cuenca hidrográfica

De igual forma se tiene que referenciar el concepto de cuenca hidrográfica, como una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

La cuenca hidrográfica es el área que contribuye al escurrimiento y que proporciona parte o todo el flujo de la corriente principal y sus tributarios (Campos, 1987). El parteaguas es una línea imaginaria formada por puntos de mayor nivel topográfico y que se separa la cuenca de las cuencas vecinas (Aparicio, 1989).

La definición anterior se refiere a una cuenca superficial (cuenca hidrográfica); asociada a cada una de estas existe también una cuenca de agua subterránea. Cuando se considera en su conjunto la cuenca hidrográfica y la cuenca de agua subterránea se le conoce con el nombre de cuenca hidrológica. Existen fundamentalmente dos tipos de cuencas: endorreicas y exorreicas. En las primeras el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago; en las segundas, el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o el mar (Aparicio, 1989).

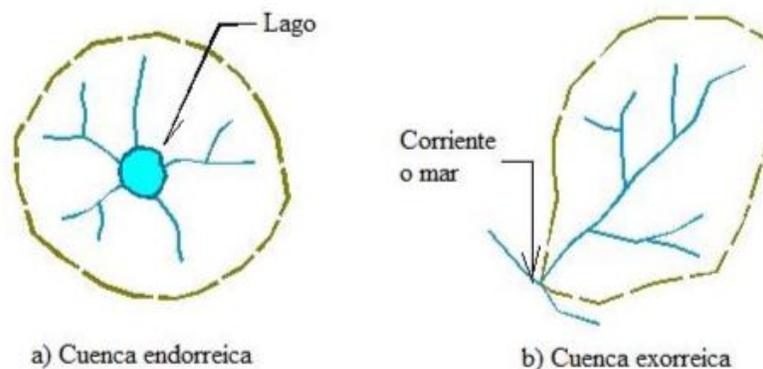


Fig. 5.4. Tipos de cuenca según la salida de sus escurrimientos (Aparicio, 1989).

Las cuencas hidrográficas son espacios territoriales delimitados por un parteaguas (partes más altas de montañas) donde se concentran todos los escurrimientos (arroyos y/o ríos) que confluyen y desembocan en un punto común llamado también punto de salida de la cuenca, que puede ser un lago o el mar. En estos territorios hay una interrelación e interdependencia espacial y temporal entre el medio biofísico (suelo, ecosistemas acuáticos y terrestres, cultivos, agua, biodiversidad, estructura geomorfológica y geológica), los modos de apropiación (tecnología y/o mercados) y las instituciones (organización social, cultura, reglas y/o leyes) (SEMARNAT, 2013).

El enfoque de cuencas es integrado y permite analizar, planear y actuar sobre el conjunto de componentes (suelo, agua, biodiversidad, gente) para buscar la mejora de sus funciones, esperando lograr así tener mejor calidad y cantidad de agua, conservar nuestros suelos y su capacidad productiva, y favorecer la conservación de un capital natural para un futuro común (SEMARNAT, 2013).

#### Subcuenca y microcuenca

Una vez identificado el concepto de cuenca; es fácil de entender el de subcuenca debido a que la cuenca hidrológica es subdividida en subcuencas. Es decir, cada afluente que desemboca en el cauce principal está asociado a una superficie de aportación conocida como subcuenca. Algunos autores acotan la definición a magnitud de área, sin embargo, de acuerdo con Cuevas *et al.*, 2010, del Instituto Nacional de Ecología; la cuenca hidrológica es mayor a 200 km<sup>2</sup>, por lo que un área de aportación menor a esta magnitud se identifica como subcuenca. Otros autores, definen que una cuenca es un territorio mayor a 50 mil hectáreas; las subcuencas cubren una superficie de cinco mil a 50 mil hectáreas; las microcuencas entre tres mil y cinco mil hectáreas, y cuando las condiciones orográficas lo permiten, existen microcuencas menores a tres mil hectáreas.

El concepto de la microcuenca debe ser considerado desde un principio como un ámbito de organización social, económica y operativa, además de la perspectiva territorial e hidrológica tradicionalmente considerada. De esta manera, la microcuenca se define como una pequeña unidad geográfica donde vive una cantidad de familias que utiliza y maneja los recursos disponibles, principalmente suelo, agua y vegetación. Cabe destacar que en la microcuenca ocurren interacciones indivisibles entre los aspectos económicos (relacionados a los bienes y servicios producidos en su área), sociales (asociados a los patrones de comportamiento de las poblaciones usuarias directas e indirectas de los recursos de la cuenca) y ambientales (vinculados al comportamiento o reacción de los recursos naturales frente a los dos aspectos anteriores). Por ello, la planificación del uso y administración de los distintos recursos en la microcuenca debe considerar todas estas interacciones (FAO, 2008).



Fig. 5.5. Microcuenca (UAQ, 2017).

Algunas características y/o parámetros referidos a cuenca hidrográfica que se consideran para desarrollar la presente investigación son:

1. Tamaño de la cuenca

El área de la cuenca se define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas, el cual, a su vez es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de las cuencas vecinas (Aparicio, 2001).

El área de una cuenca hidrográfica es considerada como el parámetro físico básico que define a una cuenca, siendo determinante de la escala de varios fenómenos hidrológicos tales como, el volumen de agua que ingresa por precipitación, la magnitud de los caudales, etc. (UAEM, [sin editar]).

Las investigaciones hidrológicas han puesto de manifiesto que existe una diferencia significativa entre una cuenca pequeña y una grande. En una cuenca pequeña la cantidad y distribución del escurrimiento son influenciadas principalmente por las condiciones físicas del suelo y cobertura, sobre las cuales el hombre tiene algún control (Chow, 1962, citado por Campos, 1987). En cambio, para grandes cuencas el efecto del almacenamiento en el cauce llega a ser pronunciado y habrá que darle más atención a la hidrología de la corriente principal (Campos, 1987).

Campos (1987) señala que de acuerdo con su tamaño pueden caracterizarse en pequeñas medianas o grandes, de acuerdo a la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1. Clasificación de una red de una cuenca según su tamaño.**

Tamaño de la cuenca (km <sup>2</sup> )	Descripción
< 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia-pequeña
500 a 2,500	Intermedia-grande
2,500 a 5,000	Grande
>5,000	Muy grande

Fuente: Campos, 1987

## 2. Pendiente media de la cuenca

La pendiente de la cuenca tiene una importante pero compleja relación con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea al flujo de los cauces. Es uno de los factores físicos que controlan el tiempo de flujo sobre el terreno y tienen influencia directa en la magnitud de las avenidas o crecidas (Campos, 1987).

### 3. Tiempo de concentración

Se denomina tiempo de concentración al tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio, y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca (Aparicio, 1989). Por otra parte, Ibáñez (sin fecha) indica que el tiempo de concentración es el tiempo que tarda en viajar el agua desde el punto hidráulicamente más distante de la cuenca hasta su salida.

Naturalmente, el tiempo de concentración,  $t_c$ , depende de la longitud máxima que debe recorrer el agua hasta la salida de la cuenca y la velocidad que adquiere en promedio, dentro de la misma. Esta velocidad está en función de las pendientes del terreno y los cauces, y de la rugosidad de la superficie de los mismos (Aparicio, 1989).

Se puede estimar el tiempo de concentración mediante la fórmula de Kirpich:

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

**Ecuación 5.1**

Donde:

$t_c$ : es el tiempo de concentración, en horas.

L: es la longitud del cauce principal, en metros.

S: es la pendiente del cauce principal, adimensional.

### 4. Longitud y pendiente del cauce

Las pendientes de los cauces se determinaron considerando el desnivel entre los extremos del tramo, dividido por la longitud horizontal de dicho tramo, de manera que:

$$S = \frac{H}{L}$$

**Ecuación 5.2**

Donde:

S= pendiente del tramo del cauce [adimensional]

H= desnivel entre los extremos del tramo del cauce [L]

L=longitud horizontal del tramo del cauce [L]

Dado que la relación entre la distancia recorrida en vertical y la distancia recorrida en horizontal para un mismo segmento de una recta se encuentra en las mismas unidades, la pendiente es una magnitud escalar.

Se puede expresar de forma decimal, la cual es el valor obtenido de la relación del desnivel entre los extremos del tramo del cauce (H), y la longitud horizontal del tramo del cauce (L), como se mencionó anteriormente.

También se puede medir a través del ángulo que forma la recta sobre la horizontal. En ese caso se expresa como:

$$S = \tan^{-1} \frac{H}{L}$$

**Ecuación 5.3**

En topografía se suele usar en forma de porcentaje, que se obtiene al multiplicar el valor decimal por 100, como se expresa en la ecuación:

$$S (\%) = \frac{H}{L} * 100$$

**Ecuación 5.4**

La pendiente del cauce principal es uno de los indicadores más importantes del grado de respuesta de una cuenca a una tormenta, es decir, si se tienen dos cuencas con la misma forma y área, pero con diferente pendiente del cauce principal, se producirá una respuesta más rápida y un caudal mayor en aquella cuenca con mayor pendiente ante una tormenta presentada (Rodríguez, 2012).

### 5.1.2. Régimen hidrológico

El concepto de régimen hidrológico está referido a los cambios con el tiempo en las tasas de flujo y en los niveles y volúmenes en aguas continentales. El régimen hidrológico se compone de un número de periodos característicos que varían con los cambios estacionales en las condiciones propias de cada río. Es decir, un

modelo predominante de flujo de agua en un periodo determinado de tiempo. El régimen hidrológico incluye la magnitud, duración, periodicidad, frecuencia y tasa de cambio (Poff et al., 1997). De acuerdo a Richter et al. (1997), los periodos clave en un régimen ecológico son cuando ocurren los caudales bajos, caudales extremadamente bajos, pulsos de caudal alto, las pequeñas inundaciones y las grandes inundaciones.

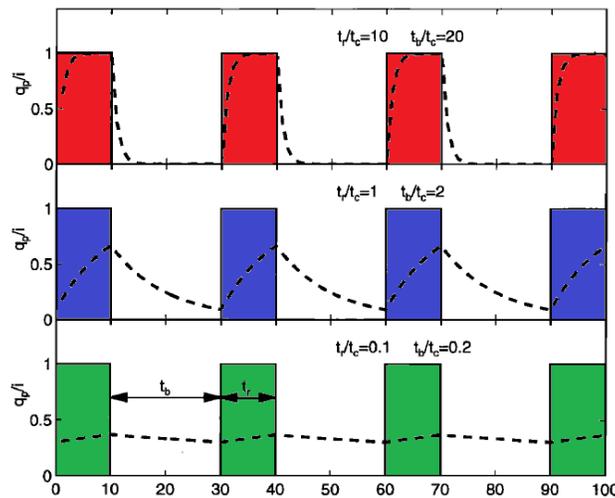


Fig. 5.6. Diferentes comportamientos de escurrimiento: regímenes hidrológicos (Robinson et al., 1997).

El punto central de estudios de escorrentía está íntimamente relacionado con el régimen y los componentes rivereños relacionados. El régimen hidrológico juega un papel importante en la composición, distribución y diversidad de ecosistemas acuáticos; debido a que la biota ha venido adaptándose de acuerdo al régimen de flujos (Bunn & Arthington, 2002). Es así como el régimen hidrológico determina en gran medida la calidad y la cantidad de hábitat físico para el desarrollo de organismos acuáticos. Las condiciones de hábitat son caracterizadas en términos de velocidad, profundidad y composición de sustrato; que en conjunto con la heterogeneidad del hábitat actúan para la definición de la diversidad de especies. Además, los regímenes de flujo influyen la geomorfología (componente físico) y la calidad de agua (componente químico) en los cuerpos de agua; que a su vez influyen los procesos biológicos.

Se concibe el régimen hidrológico para diferentes escalas de tiempo, ya sea diario, por 7 o 10 días; mensualmente, por estaciones; a largo plazo, sea anualmente o en algunos casos específicos en periodos de 90 o 180 días. El régimen hidrológico está estrechamente relacionado con los cambios estacionales en el clima. En las regiones con un clima cálido, el régimen hidrológico se ve afectado principalmente por las precipitaciones y la evaporación (radiación referida); en regiones con un clima frío o templado, la temperatura del aire es un factor importante. De igual forma las actividades económicas del hombre cambian el régimen de un río, el ejemplo más claro es una presa.

### 5.1.3. Geomorfología de ríos

Se define como una morfoestructura depresionaria y alargada entre dos vertientes. El concepto es ambiguo dado que una cuenca es considerada un valle, así mismo, un cauce es considerado un valle. Es decir, cualquier escorrentía forma un cauce o un valle desde su nacimiento hasta la desembocadura (Pérez-Alberti, 1981; Twidale, 1976; Pedraza, 1996; Dietrich y Dunne, 1993).

Tanto el cauce como el valle tienen elementos geomorfológicos de relevancia al realizar una clasificación hidrogeomorfológica fluvial, es así como se genera un equilibrio dinámico por las variaciones de gasto y sedimentos, en combinación con las otras características de la cuenca y de los procesos geomorfológicos en ella; provocando diferentes estilos fluviales: simple, rectilíneo, meandriforme, etc. (Petts y Amoros, 1996; Schumm, 1977; Conesa, 1999; Bravard y Gilvear, 1993; Schumm y Lichty, 1965; Werrity, 1997).

#### A. Encajamiento

Algunos autores también lo llaman índice de confinamiento. Se define como carácter morfológico causado por las condiciones ambientales en el cauce. En la Fig. 5.7 se describe a detalle el cálculo del parámetro.

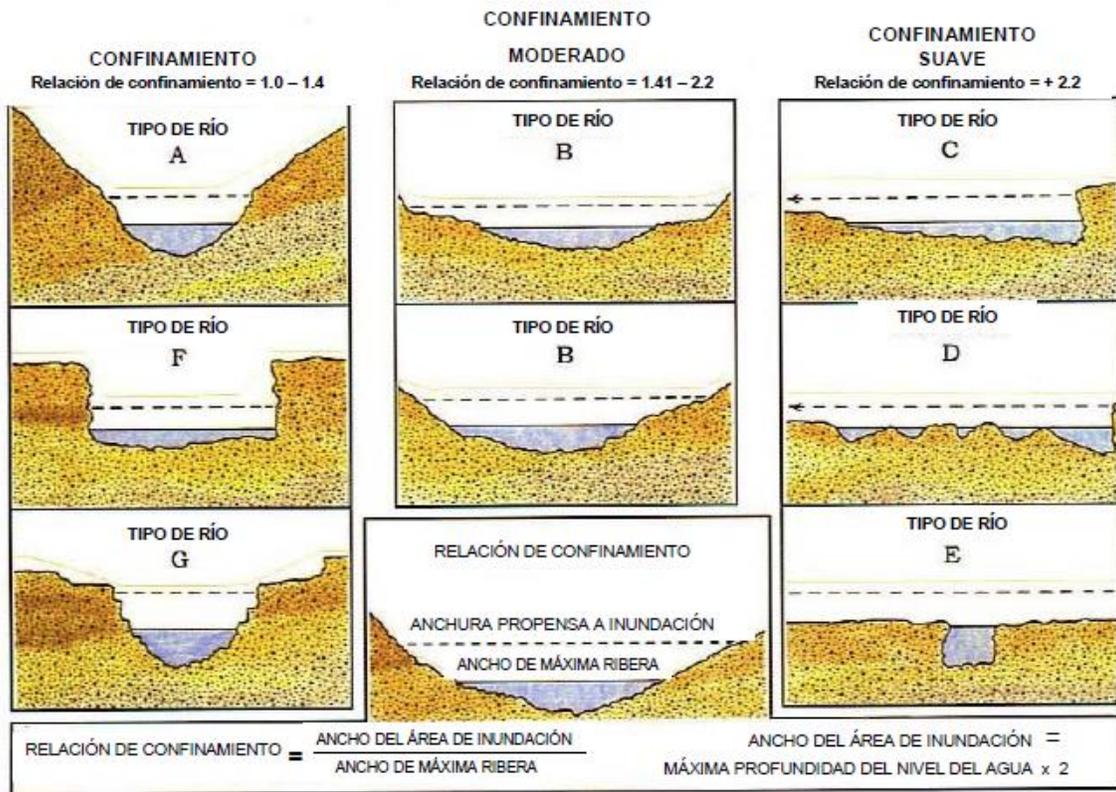


Fig. 5.7 Representación de los tipos de confinamiento en cortes transversales de varios tipos de canal (Rosgen, 1994-1996; traducido por López-Mora, 2007).

*B. Ancho del fondo del valle*

Indicador del grado de movilidad o confinamiento del cauce.

*C. Simetría del ancho del valle*

La variable se mueve dentro del intervalo (-1, 1). Los valores próximos a 1 indican asimetría del cauce mayor hacia la derecha; 0 señala simetría total; valores próximos a -1 indican asimetría del cauce mayor hacia la izquierda.

*D. Simetría del fondo de valle*

La variable se mueve dentro del intervalo (-1, 1). Los valores próximos a 1 indican asimetría del cauce mayor hacia la derecha; 0 señala simetría total; valores próximos a -1 indican asimetría del cauce mayor hacia la izquierda.

*E. Pendiente de la vertiente izquierda y derecha*

Carácter morfológico indicativo del tipo de interacción entre el canal y la vertiente izquierda y derecha del valle.

#### *F. Pendiente media vertientes*

Es un parámetro con gran utilidad para fijar umbrales tipológicos.

#### *G. Pendiente total del valle*

Parámetro donde se considera la pendiente de las vertientes y el ancho de valle. Sus resultados son menos dependientes de la desigualdad pendiente de las vertientes, por lo que puede resultar de utilidad para fijar umbrales tipológicos.

#### *H. Ratio*

Es el cociente de la anchura del valle y la base. Es la representación del grado de confinamiento desvirtuado por la anchura del valle.

#### *I. Litología*

La diferencia de unidades litológicas presenta un comportamiento diferenciado ante la erosión fluvial.

#### *J. Pendiente longitudinal del cauce*

Corresponde a la variación longitudinal de la pendiente del cauce en tramos homogéneos.

#### *K. Sinuosidad*

El índice de sinuosidad, se emplea para definir el ameandramiento de un cauce. Está formulado como el cociente entre la longitud del cauce y la longitud media del valle.

## **5.2. Caudal ambiental**

### **5.2.1. Concepto y desarrollo histórico**

El Cambio Climático (CC) podría tener consecuencias importantes sobre el ciclo hidrológico y éste sobre el funcionamiento de la infraestructura hidráulica asociada tanto al almacenamiento, regulación y distribución de caudales, como en el caso de aquella utilizada en la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento, en el uso de riego y en el uso industrial (COP-16, 2010).

En México la Ley de Aguas Nacionales (1992), introdujo el concepto de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos como el “proceso que promueve la gestión y desarrollo coordinado del agua, la tierra, los recursos relacionados con éstos y el

ambiente, con el fin de maximizar el bienestar social y económico equitativamente sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales. Dicha gestión está íntimamente vinculada con el desarrollo sustentable (SEMARNAT, 2013).

En el contexto mexicano, la aplicación de los caudales ecológicos para la gestión integrada de los recursos hídricos no sólo es una determinación técnico-científica del régimen de caudales para la funcionalidad ecológica, es asimismo un instrumento de gestión y administración del agua en una cuenca (SEMARNAT, 2014).

Los impactos que provoca el Cambio Climático sobre la dinámica natural de los ecosistemas y de las cuencas, imponen nuevos retos que deberá enfrentar la comunidad hídrica, los cuales no podrán ser atendidos si se deja de lado la dimensión ambiental del problema y el cuidado de los ecosistemas fundamentales para el ciclo hidrológico. Por otro lado, es importante destacar que una adecuada gestión del riesgo, ante las condiciones esperadas bajo el Cambio Climático en materia de agua, debe estar orientada a prevenir desastres y encaminar acciones que promuevan la seguridad hídrica a lo largo de la región. Ello implica la elaboración de los planes de desarrollo en concordancia con los límites que impone la naturaleza y enfatizar aspectos como el ordenamiento ecológico territorial, la implementación del caudal ecológico, la restauración de ecosistemas y el mantenimiento de su dinámica natural (COP-16, 2010).

El caudal ambiental o ecológico es una alternativa de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos que busca encontrar un equilibrio entre las necesidades del ambiente y las humanas, reconociendo que para conservar la diversidad y los bienes y servicios ambientales que brindan los sistemas acuáticos, se debe siempre considerar que la variabilidad natural de los caudales es la que mantiene la salud y resiliencia de los sistemas naturales acuáticos. Por ello, las propuestas modernas de cálculo de caudal ambiental buscan lo más posible esta variabilidad.

La implementación del uso de caudales ecológicos o ambientales es una estrategia que contrarresta el cambio climático.

En abundante literatura acerca del tema de caudal ecológico, se encuentran términos sinónimos de caudales ambientales tales como: “caudales de compensación”, “caudales medioambientales”, “caudales de mantenimiento”, “caudales mínimos” y “caudales de reserva” que generan una alta definición, sobre todo cuando se trata de aplicar a trabajos multidisciplinarios (García *et. al.*, 2006).

La COP-16 (2010), define como flujos ambientales o caudales ecológicos, al régimen de agua suministrada dentro de un río, humedal o zona costera para mantener los ecosistemas y los beneficios que brinda a la población.

La Ley de Aguas Nacionales (1992), en el artículo 3, Frac. LIV. lo refiere como agua para "Uso Ambiental" o "Uso para conservación ecológica" entendido como el caudal o volumen mínimo necesario en cuerpos receptores, incluyendo corrientes de diversa índole o embalses, o el caudal mínimo de descarga natural de un acuífero, que debe conservarse para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio ecológico del sistema.

La legislación francesa (LOI, 84/512) habla de caudales mínimos que garanticen la vida, circulación y reproducción de las especies que pueblan las aguas en el momento de la instalación de la obra (García *et. al.*, 2006).

El caudal ecológico podría definirse también como el régimen hídrico que provee un río, un humedal o algunas zonas costeras, y que permite mantener a otros ecosistemas, especialmente en aquellos lugares donde existe una competencia por el uso del agua y donde los flujos hídricos son regulados por presas, canales o bordos (Dyson *et al.*, 2003).

Los caudales ecológicos se definen como el agua que se deja correr en un ecosistema fluvial o el caudal que se libera dentro de él, con el propósito específico de manejar la condición del ecosistema. La falla en el manejo de los caudales ha conducido al deterioro en la estructura y función (salud) de muchos ríos del mundo (Tharme, 2003; Arthington et al., 2006 citados por Alonso-Eguía et al., 2007).

Gaviño citado por Alonso-Eguía et al., 2007, señala que se encuentra con frecuencia en la bibliografía el nombre de caudales ecológicos y caudales ambientales, y considera que en la cuantificación del caudal ecológico se busca un umbral que fije los valores por encima de los cuales la especie sensible se recupera de las perturbaciones ocasionadas por la falta de escorrentía, es decir, que los cambios originados en ella dejan de ser irreversibles y, más bien, depende de la duración de los mismos y de la resiliencia ecológica de la especie. Por otra parte, define caudal ambiental como aquel que es determinado por encima del establecido por el caudal ecológico, y que fija un umbral mínimo y/o máximo destinado a la satisfacción de las necesidades establecidas por la sociedad.

Algunos términos frecuentemente encontrados en la bibliografía son: caudales mínimos, básicos, aconsejables, óptimos, de mantenimiento, fluvio-ecológicos, ecológicos, regímenes ambientales de caudales, flujo ambiental, entre otros. Sin embargo, los dos términos más empleados son caudales ecológicos y caudales ambientales, los que si bien se utilizan como sinónimos tienen diferencias sustanciales. Los caudales ecológicos implican un umbral por encima del cual una especie se mantiene. Mientras que los caudales ambientales deben asegurar las necesidades de las especies y también aquellas fijadas por la sociedad (Gaviño 2007 citado por Rodríguez-Gallego et al., 2011).

El estadístico  $7Q_{10}$ , utilizado como estadístico en la determinación de propuestas de caudal ecológico, se define como el caudal mínimo promedio de 7 días consecutivos que ocurre al menos una vez cada 10 años (EPA, 2006), y que es

capaz de dispersar ciertos niveles de concentración de contaminantes letales para el ecosistema acuático en una corriente.

La **NMX-AA-159-SCFI-2012** establece que el caudal ecológico es la cantidad, calidad y variación del gasto o de los niveles de agua reservada para preservar servicios ambientales, componentes, funciones, procesos y la resiliencia de ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y sociales. Esto implica que además de proveer agua para los usos doméstico, público urbano, pecuario y agrícola, es posible mantener caudales provenientes tanto del escurrimiento, como de las descargas de los acuíferos para la conservación de los ecosistemas lóticos (ríos perenes, intermitentes y efímeros), lénticos (lagos, lagunas, y humedales) y riparios con la aportación de los acuíferos al ecosistema, que sirven para conservar la biodiversidad y los servicios ambientales (SE, 2012).

A manera de definición en la **NMX-AA-159-SCFI-2012**, el caudal ecológico es la calidad, cantidad y régimen del flujo o variación de los niveles de agua requeridos para mantener los componentes, funciones y procesos de los ecosistemas acuáticos epicontinentales. Para los fines de esta norma caudal y flujo ambiental se consideran sinónimos de caudal ecológico (SE, 2012).

El tópico caudal ecológico se ha posicionado en la vanguardia de la agenda ambiental internacional al ser discutido y analizado en el foro Diálogos por el Agua, en el 6° Foro Mundial del Agua, realizado del 12 al 17 de marzo de 2012 en la ciudad de Marsella, Francia, y en la 11ª Reunión de la Conferencia de las Partes de la Convención RAMSAR, efectuada en Bucarest, Rumanía, del 6 al 13 de julio de 2012, y en donde se propuso el tema como una decidida estrategia de adaptación ante el cambio climático (SEMARNAT, 2014).

En la Tabla 5.2 se muestra una recopilación de la evolución del concepto de caudal ecológico realizado por Rodríguez-Gallego et. al., 2011.

**Tabla 5.2. Análisis de las definiciones de caudal ambiental en la bibliografía internacional, la referencia bibliográfica correspondiente y las dimensiones explicitadas por las definiciones y el texto que las describe.**

Definición de Caudales Ambientales	Referencia	Variable		Sistema			Interés de mantener				Estado deseado		Gestión						
		Cantidad de agua	Régimen hidrológico	Calidad de agua	Río	Humedal o planicie de inundación	Estuarino y costero	Subterráneo	Recursos	Biota	Ecosistema	Valores ecosistema	Bienes y servicios	Predeterminado	Acordado	Objetivo	Dejar agua	Incorporar agua	A escala cuenca
Cantidad de agua que debe dejarse en el río para mantener los recursos acuáticos en determinado nivel.	Reiser et al., 1989	x			X				x				x				x		
Niveles del régimen hidrológico gestionados para mantener la biota del río y los bienes y servicios valorados socialmente asociados al ecosistema.	Richter et al., 1997		x		X					x		X				x			
Cantidad del régimen hidrológico original de un río que debería seguir fluyendo aguas abajo para mantener valores característicos específicos del ecosistema.	King et al., 1999	x	x		X		x	x				x	x				x	x	
Cantidad del régimen hidrológico original de un río que debería seguir fluyendo aguas abajo y hacia las planicies de inundación para mantener valores característicos específicos del ecosistema.	Tharme, 2003	x	x		X	X			x	x		x	x					x	
Régimen hídrico que se establece en un río, humedal o zona costera para sustentar ecosistemas y sus beneficios donde hay usos del agua que compiten entre sí y donde los caudales están regulados.	Dyson et al., 2003 (UICN)	x	x		X	X	x	x			x	x	x	x		x	x		x
Agua que se deja en el sistema río o se libera con un fin de gestión específico vinculado con las condiciones del ecosistema.	King et al., 2003, Brown & King 2003				X	X	x	x		x	x		x				x	x	x
Cantidad o volumen de agua, por tiempo, requerido para mantener la salud del río en un estado en particular, predeterminado o acordado en base a compensar otras consideraciones.	Acreman & Dunbar, 2004	x			X								x	x					
Cantidad, periodicidad y calidad del caudal de agua que se requiere para sostener los ecosistemas dulceacuicolas, estuarinos y el bienestar humano que depende de estos ecosistemas.	Declaración de Brisbane 2007	x	x	x	X	X	x				x		x						

Ritchter et al., (1996), Poff et al., (1977) y Lytle y Poff (2004) citados por Alonso-Eguía et. al., 2007, reconocen que el establecimiento de un caudal mínimo es inadecuado, ya que la estructura y la función de un ecosistema riverino y adaptaciones de su biota son generadas por patrones de variación temporal en los caudales fluviales (el paradigma de régimen de caudales naturales). Actualmente, la comunidad de ecólogos reconoce que para proteger la biodiversidad de los ecosistemas fluviales y mantener las condiciones esenciales de salud y servicios que proveen los ríos, se requiere imitar la variabilidad natural de los componentes esenciales de caudales, considerando la magnitud, frecuencia, periodicidad, duración y grado de cambio de los eventos de flujo en los ríos (Fischer y Kummer, 2000; King *et al.*, 2003; Arthington *et al.*, 2006; King y Brown, 2006 citados por Alonso-Eguía *et. al.*, 2007).

Asimismo, se reconocen sus implicaciones socioeconómicas por la alteración hidrológica de los ecosistemas fluviales a escalas globales relevantes, con impactos en el aislamiento genético a través de la fragmentación de los hábitats, en el decremento de la biodiversidad y en el abatimiento de las pesquerías (Rchter *et al.*, 1997; Rosenberg *et al.*, 2000; Tharme, 2003 citados por Alonso-Eguía *et. al.*, 2007).

En la declaración de Brisbane, Australia durante el 10th Internacional River symposium and International Environmental Flows Conference, celebrada en septiembre de 2007 y a la que asistieron más de 750 científicos, economistas, ingenieros, gestores del agua y políticos de más de 50 países, acordaron señalar que los caudales ambientales deben proveer de los caudales necesarios para sostener a los ecosistemas de agua dulce y los ecosistemas costeros en coexistencia con la agricultura, la industria y las ciudades. El objetivo de la administración de los caudales ambientales consiste en restaurar y mantener la integridad del ecosistema, los bienes y servicios y la resiliencia de los mismos, puntos que deberán ser evaluados socialmente a través de la participación de

equipos bien informados y científicamente sustentados (Alonso-Eguía *et. al.*, 2007).

De acuerdo con Stalnaker (1985) y Trihey y Stalnaker (1985) citados por Alonso-Eguía *et. al.*, 2007; los primeros indicios de evaluaciones de caudal ambiental surgen en la década de los años cuarenta, en los Estados Unidos de América.

Según la revisión de Tharme (2003), a partir de los años 70's se dio un rápido desarrollo de diferentes metodologías, principalmente asociado a los cambios de normativa en torno a la legislación ambiental y de agua dulce. En algunos países el desarrollo se produjo a partir de los 80` (Australia, Inglaterra, Nueva Zelanda y Sud África) o posterior.

De esta manera, actualmente se abarca la mayoría de los componentes biofísicos del ecosistema, y también las implicancias sociales y económicas de la modificación del régimen hidrológico (King *et al.* 1999, citado por Rodríguez-Gallego *et. al.*, [sin fecha]). En otros países del Este de Europa, Latinoamérica, África y Asia los trabajos aún son escasos.

En la Tabla 5.3 se encuentra la recopilación hecha por Rodríguez-Gallego *et. al.*, 2011, de las aplicaciones realizadas en América Latina.

**Tabla 5.3. Actualización de la revisión sobre metodologías de estimación de Caudales Ambientales en América Latina.**

País	Método	Autor o fuente
Argentina	DRIFT	Porcel <i>et al.</i> , 2005
	50% o 70% del 7Q10, 10% del Q90, 5-20% del Q90	Benetti <i>et al.</i> , 2002
Brasil	IFIM	Tharme, 2003
	MESA	Modificado de Richter <i>et al.</i> 2003 por Collischonn <i>et al.</i> , (sin año).
	Eco-hidráulicos	Tharme, 2003

País	Método	Autor o fuente
Chile	10% del flujo medio mensual	Davis & Riestra 2002 citado por Tharme 2003
	PHABSIM	Compers citado por Tharme, 2003
	Building Block Methodology	Compers citado por Tharme, 2003
	IFIM	Espinoza et al., (sin fecha)
Colombia	Eco-hidráulico	Diez Hernández & Ruiz Cobo, 2007
	Régimen Ambiental de Caudales	Diez Hernández 2008
	Recopilación metodológica	MAVDT 2008
Costa Rica	Holístico	Jiménez 2005
	Q min. Aceptable (RANA)	Instituto Costaricense de Electricidad
	MESA (Richter et al., 2003)	Calvo Alvarado et al., 2008
Honduras	IHA, conocimiento tradicional para sustituir la falta de información	Esselman & Opperman, 2010 (TNC)
México	IFIM	Compers. In Tharme 2003
	Hidrológica	Rodríguez T., S. UNAM.
	BBM	WWF-IMTA-PROFAUNA, 2007
	PHABSIM	García-Rodríguez et al., 1999; González Villela & Banderas, 2007; Santacruz de León & Aguilar-Robledo, 2009
	Tennant	Gómez-Balandra et al., 2007, García-Rodríguez et al., 1999, Santacruz de León & Aguilar-Robledo, 2009
	Holístico	Barrios et al., 2007
	Holístico	Alonso-Eguía, 2007
Panamá	Hidrológicos	UNESCO, 2005
Uruguay	Índice de Alteración Hidrológica (IHA, Richter et al., 1997)	Failache & Motta (sin año)

Fuente: Tharme, 2003. Modificado.

### 5.2.2. Clasificación de metodologías

De acuerdo con Tharme (2003), se han desarrollado alrededor de 207 distintas metodologías enfocadas al cálculo del caudal ecológico, aplicadas en 44 países. Estas van desde el uso simple de registros hidrológicos que establecen un mínimo

de caudal constante, como propuesta de requerimiento de caudal ambiental, o desde cálculos simples de especificaciones de cierta profundidad que permita un cierto perímetro húmedo en el flujo con la finalidad de asegurar la permanencia de alguna especie de interés económico, hasta las complejas y sofisticadas que relacionan los cambios en las descargas con respuestas en la morfología y ecología del cauce, a partir del análisis de un sistema completamente modificado de su estado natural, y que busca dar opciones para mantener un sistema fluvial completo y sus sistemas asociados. Siendo ésta la metodología más parecida al objetivo principal de la presente investigación, bajo el marco de trabajo ELOHA. De acuerdo a Tharme (2003), el marco ELOHA sería considerado en la cuarta categoría (Metodologías combinadas y otros enfoques).

Según la información encontrada, puede considerarse que, en la actualidad, básicamente existen cinco métodos, a partir de los cuales se perfilan todas las metodologías existentes de cálculo de caudales ecológicos, estos son:

- Métodos hidrológicos.
- Métodos hidráulicos.
- Métodos hidrobiológicos.
- Métodos holísticos.
- Métodos eco hidrológicos.

En la Fig. 5.8, se observa la evolución a través del tiempo y algunas características de ellos.

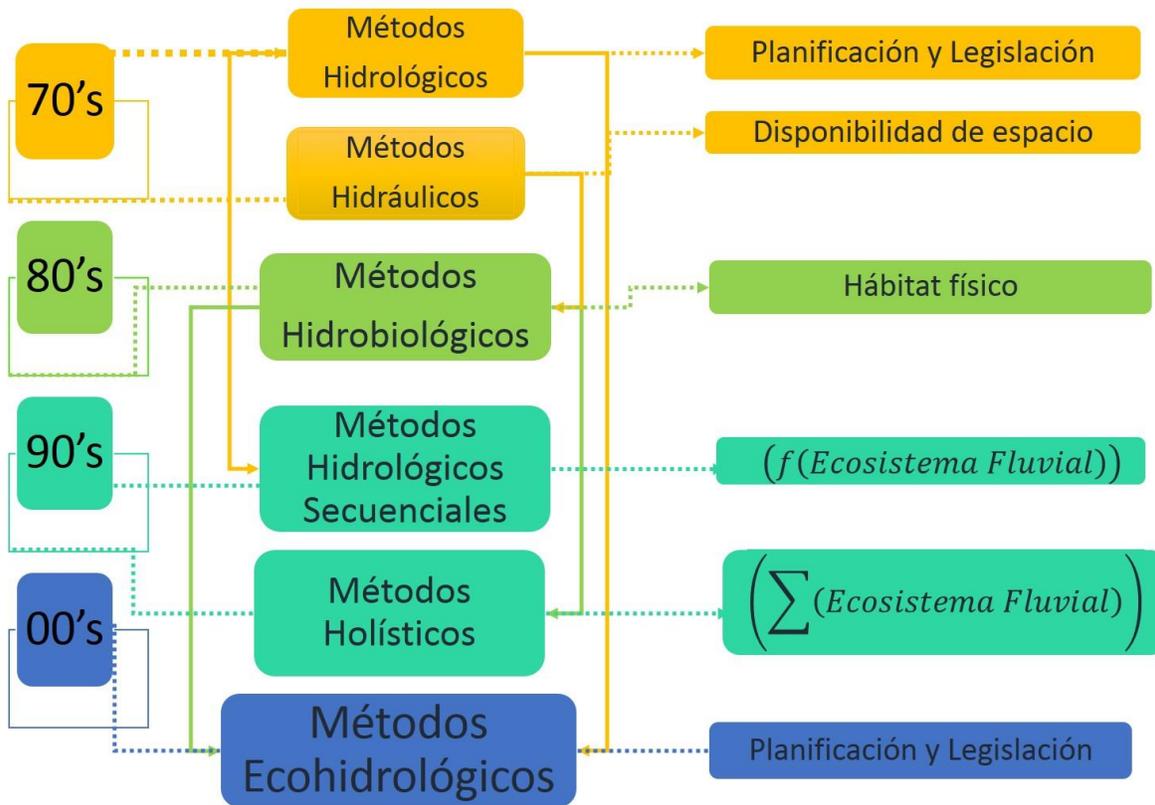


Fig. 5.8. Metodologías existentes (Villanueva et. al., 2011).

#### A. Métodos hidrológicos

El caudal ecológico se determina a partir de datos hidrológicos tratados de distintas formas (caudales promedios, tanto por ciento del caudal medio, análisis de series temporales, etc.). Basados generalmente en índices hidrológicos (% del caudal promedio) o comportamiento histórico (estadísticas) del comportamiento del caudal; utilizan los registros históricos de caudal, como datos diarios, mensuales, medias, etc. para derivar directamente de ellos las recomendaciones de caudal ecológico (Villanueva et. al., 2011).

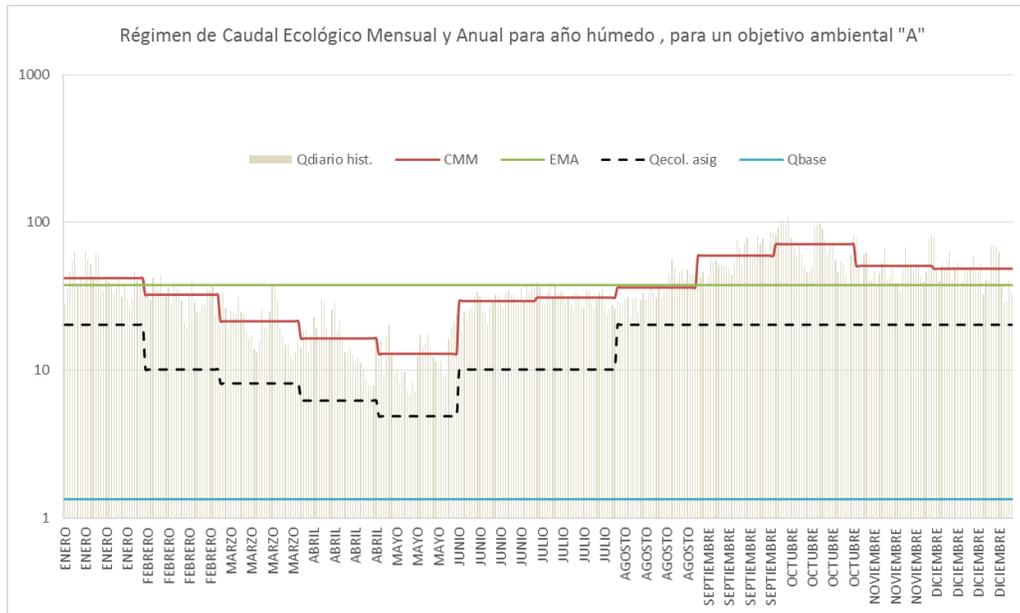


Fig. 5.9. Métodos hidrológicos (Elaboración propia).

Los métodos desarrollados dentro de este enfoque son (Villanueva et. al., 2011; Gopal, 2013):

#### I. Método de Tennant

En este método los caudales de reserva o ecológicos se calculan a partir de los escurrimientos históricos del tramo del río en estudio y de una serie de criterios cualitativos, de tal manera que los caudales corresponden a diferentes porcentajes del caudal medio según la época del año.

Se fundamenta en estudios de campo realizados en 11 corrientes distribuidas en los estados de Montana, Wyoming y Nebraska, de los Estados Unidos de América (EUA). Los estudios fueron planeados, conducidos y analizados por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los EUA.

El trabajo incluyó análisis físicos, químicos y biológicos de 38 diferentes corrientes, realizados en 58 secciones transversales ubicadas en 196 millas de estas mismas; incluyendo pesquería de aguas frías y templadas. Los estudios mostraron que las

condiciones del hábitat acuático son considerablemente semejantes en la mayoría de los ríos en los que circula una porción similar del caudal medio.

Este método proporciona, de una manera rápida y económica, una primera aproximación en la determinación de los caudales ecológicos, los caudales deberán ir siendo afinados tomando en cuenta el comportamiento de la flora y fauna, la topografía del cauce, así como la calidad del agua. El método de Tennant se resume en la Tabla 5.4.

**Tabla 5.4. Régimen de caudales según el Método de Tennant.**

Criterio cualitativo para fijar caudales de reserva ecológica	Caudales recomendados	
	Octubre – Marzo	Abril – Septiembre
<b>Máximo</b>	200% de caudal medio	200% de caudal medio
<b>Rango óptimo</b>	60% al 100% del caudal medio	60% al 100% del caudal medio
<b>Excepcional o sobresaliente</b>	40%	60%
<b>Excelente</b>	30%	50%
<b>Bueno</b>	20%	40%
<b>Aceptable o en degradación</b>	10%	30%
<b>Mínimo o pobre</b>	10%	10%
<b>Degradación severa</b>	<10%	<10%

Fuente: Villanueva et. al., 2011

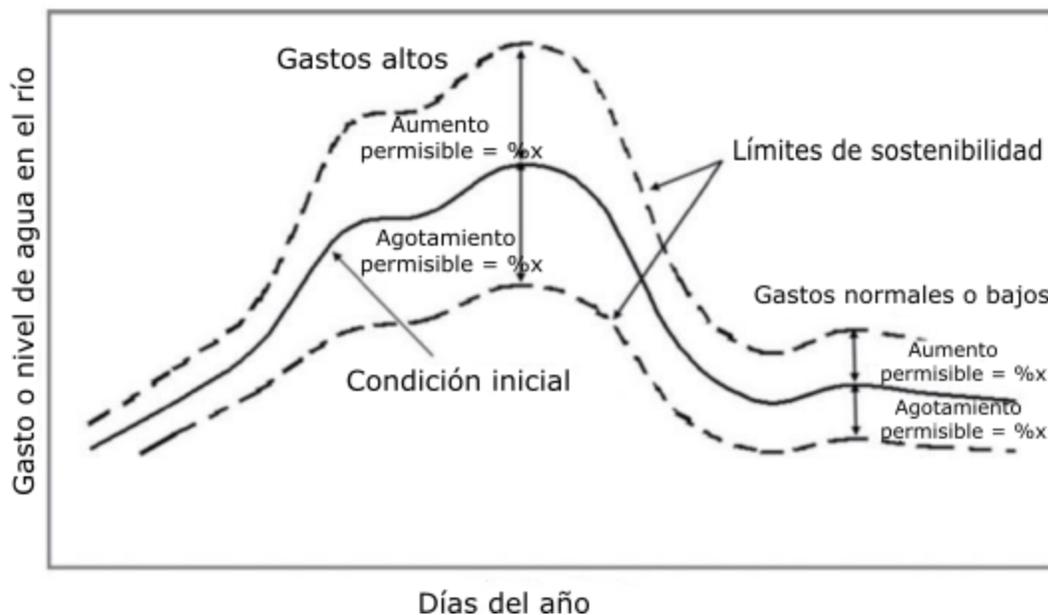
La desventaja para su aplicación en otros lugares es que se requiere calcular de nuevo, los índices y estudios de especies.

## II. Método de Hoppe

Reconoce la relación entre los percentiles de la curva de duración de caudales y las condiciones favorables para la biota. Este método usa valores de porcentaje de excedencia de la curva de duración de caudales para definir ciertos caudales mínimos asociados a diferentes estados de crecimiento de los peces.

### III. Método de rango de variabilidad (IHA-RVA)

El flujo es alterado por un cierto porcentaje de aumento o reducción permisible del flujo. La alteración permisible, que puede variar a lo largo del año, se determina aplicando algunos métodos de evaluación del flujo ambiental y consultando a los interesados. El enfoque de límites sostenibles considera la restricción de las alteraciones hidrológicas dentro de un rango basado en porcentajes alrededor de la variabilidad del flujo natural o histórico y el mantenimiento del hidrograma natural con la debida consideración de los flujos bajos y altos en lugar de recomendar el flujo ambiental mismo. Según sus propios autores, este método ha sido ideado para casos en que se tenga como primer objetivo la administración de la conservación de los ecosistemas.



**Fig. 5.10. Enfoque de límites de sostenibilidad para establecer objetivos para la gestión sostenible del agua (Gopal, 2013; traducción propia).**

Richter (2010), evoluciona el concepto del RVA con los Índices de Alteración Hidrológica (IHA, por sus siglas en inglés). IHA-RVA son una base anual del comportamiento hidrológico y su variabilidad estadística que consiste en tener una descripción del flujo natural a través de 32 parámetros definidos por Richter (1996)

como claves en el funcionamiento del ecosistema para luego estimar un rango de variación máximo y mínimo de estos parámetros. Los 32 parámetros son agrupados en 5 grupos que a su vez toman en cuenta:

- Caudales máximos y mínimos.
- Periodicidad de los eventos.
- Frecuencia o cantidad de eventos.
- Duración con promedios máximos y mínimos.

Con este método se recomienda un sistema de administración con objetivos anuales intentando emular o “imitar” las características del flujo natural después del funcionamiento de la represa o hidroeléctrica. En esta metodología, el monitoreo continuo es necesario para la definición o adaptación de los objetivos buscados en el área de estudio.

Los límites de RVA-IHA son retomados por Poff et al. (2010) en el marco (o método) ELOHA, un método que será tratado a profundidad posteriormente.

#### IV. Método Escoses

Consiste en tomar el 20% del caudal medio mensual de 3 meses críticos consecutivos, es usado también por varios países de América Latina. Este método considera la importancia del factor ecológico, como la conservación de las especies de la zona, a fin de preservar el ecosistema.

#### V. Métodos estadísticos de frecuencia de flujo bajo

Como parte de los métodos hidrológicos para determinar caudal ecológico, están los estadísticos de gastos bajos. El  $7Q_{\min}$  es el gasto anual mínimo consecutivo de 7 días, abreviado en inglés como MAM7 (Mean Annual 7-day Minimum flow). De acuerdo con investigaciones previas, el  $7Q_{\min}$  es un estadístico que asegura la calidad ecológica, al lograr dispersar ciertas concentraciones de contaminantes. Algunas de las propiedades de la utilización de este estadístico son que elimina la

variación diaria por algún componente artificial en el gasto del río; además un análisis basado en series de tiempo de gastos mínimos de 7 días es menos sensible a los errores de medición. Por otro lado, está comprobado que no existe mucha variación entre 1 a 7 días de flujos mínimos (Smakhtnin, 2001).

El gasto mínimo anual de 7 días consecutivos no superado cada 10 años,  $7Q_{10}$ , ha sido ampliamente aplicado como un umbral de gasto mínimo en inferencia de evaluaciones de gastos ambientales; si bien ha sido criticado por la comunidad científica por la limitante de conceder solo una magnitud, en lugar de un régimen. Tanto el  $7Q_{10}$  y su variante el  $7Q_2$ , han sido criticados por carecer de apoyo científico para su uso en el establecimiento de estándares de gastos ambientales (Linnansaari, Monk, Baird, & Curry, 2013).

En la metodología de la regionalización hidrológica es necesario la obtención de un parámetro estadístico de acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2008). A manera de ejemplo, el  $7Q_2$ , ha sido utilizado en el estado de Texas, USA para regionalizar cuencas no aforadas (USGS, 1999).

### *B. Métodos hidráulicos*

El caudal ecológico de la relación entre algún parámetro hidráulico (normalmente el perímetro mojado o la profundidad máxima del río) y el caudal.

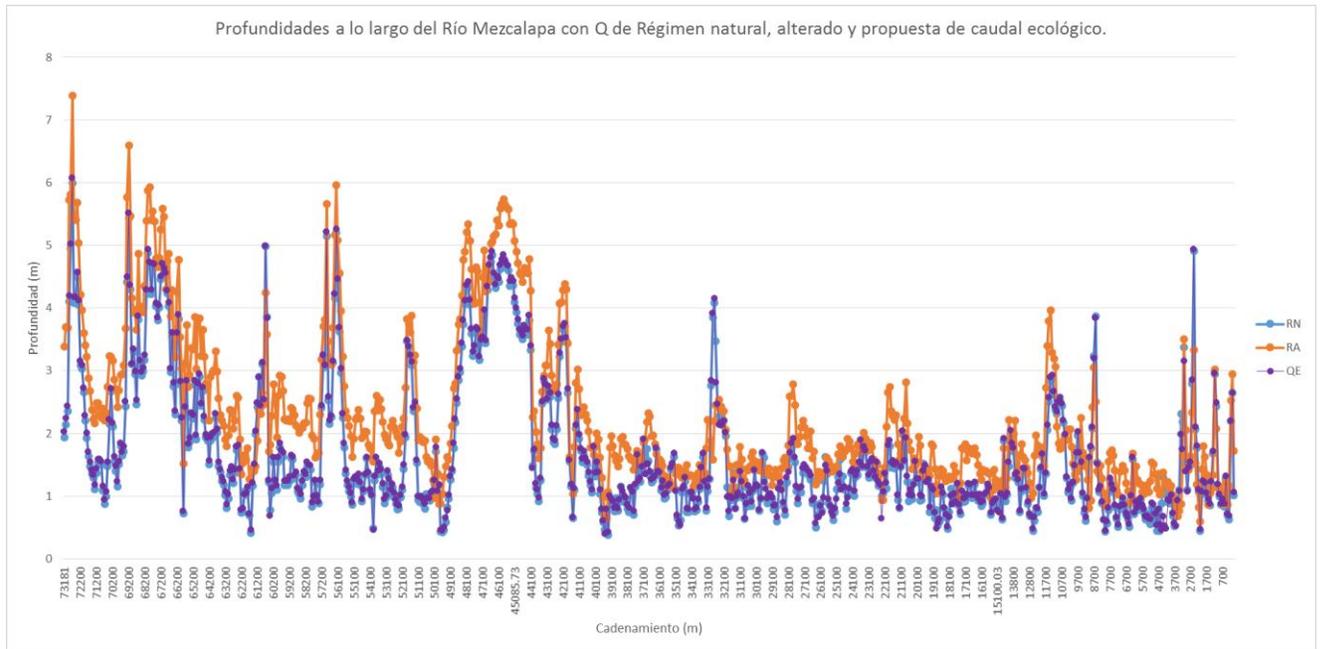


Fig. 5.11. Métodos Hidráulicos (Elaboración propia).

Los métodos desarrollados dentro de este enfoque son (Tharme, 2003; Villanueva et. al., 2011; Gopal, 2013):

#### I. Método del perímetro mojado

Este método asume que la integridad del hábitat está directamente relacionada con el área húmeda. Consiste, básicamente, en la construcción de curvas que muestren la relación entre el caudal y el perímetro mojado.

A partir de ellas puede observarse que hasta un cierto volumen de agua el perímetro crece rápidamente a medida que aumenta la descarga, pero sobrepasado este volumen el perímetro se mantiene casi constante.

Generalmente el flujo recomendado es aquel cerca de este punto de inflexión pues se presume es el nivel óptimo para el desove de peces o para la producción de invertebrados bentónicos.

## II. Método de variación hidráulica

Utiliza cambios en variables hidráulicas, como perímetro húmedo o área de lecho sumergido, para definir el caudal ecológico. De tal manera que los ríos anchos y poco profundos tienden a ser más sensibles a cambios en el caudal en su perímetro húmedo que los ríos angostos y profundos.

Existen problemas en la determinación del umbral de descarga por debajo de los cuales el perímetro húmedo se reduce con rapidez.

### *Desventaja de los métodos hidrológicos e hidráulicos*

- Resulta difícil e incluso imposible derivar índices bióticos que sean solo sensibles a caudales y no a otros factores, como estructura del hábitat y calidad del agua.
- La ausencia tanto de datos hidrológicos como biológicos o datos no adecuados se convierte en un factor limitante para la aplicación de los métodos en países de América Latina.
- Las series temporales de caudales y los índices ecológicos pueden no ser independientes, lo cual puede infringir los supuestos de la estadística descriptiva.
- Asume que una variable hidráulica o un grupo de ellas pueden representar adecuadamente las necesidades de caudal de las especies de un río.
- No tienen en cuenta la variación del régimen de caudales.

### *C. Métodos hidrobiológicos*

El caudal se deduce a partir de una cuantificación previa del hábitat físico de una especie de referencia (normalmente peces) y del análisis de su relación con el caudal mediante simulación hidráulica (Villanueva et. al., 2011). También conocidos como métodos de simulación de hábitat o ecohidráulicos, se fundamentan principalmente en que cada especie tiene determinadas tolerancias ante ciertos parámetros del caudal (velocidad de flujo, profundidad, tipo de

sustrato, etc.); los límites de las tolerancias pueden ser determinados de manera detallada para cada especie y a partir de las características del cauce, se puede determinar la cantidad y calidad de hábitat de las especies en función del caudal (Tharme, 2003). La simulación hidráulica comienza a tener mayor importancia en estas metodologías.

### **Ventajas**

- Permite predecir los cambios en el micro hábitat físico asociadas a modificaciones en la disminución del caudal.
- Acopla modelos biológicos e hidrológicos para evaluar los cambios en las comunidades biológicas consecuentes a la modificación de las condiciones hidrológicas.

### **Desventajas**

- Requiere para su manejo de un profesional con experiencia tanto en el manejo del modelo como de la información que requiere.
- Es específico para evaluar el hábitat disponible para especies de peces en el tramo de interés.
- Está muy desarrollado para el salmón, pero no se ha probado para especies como la trucha, bocachico, bagre, etc.
- Es muy exigente en información tanto hidráulica como de la especie, lo que restringe su aplicación en nuestro medio.

Entre los métodos más reconocidos de esta clasificación son IFIM, PHabsim, CASIMIR, RiHabsim y MesoHabsim.

#### **I. InstreamFlow Incremental Methodology (IFIM)**

Se trata de un método hidrobiológico que se basa en los conceptos de la metodología IFIM (InstreamFlow Incremental Methodology), creada por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos de América para relacionar los

valores ecológicos de los ríos con los usos potenciales de sus aguas en términos comparables, y de esta forma objetiva la utilización de los recursos hídricos. En IFIM se pueden aplicar modelos hidráulicos 1D o 2D (Hernández et al., 2005).

Parte de los siguientes principios elementales:

- a) El caudal ecológico de un río es el flujo necesario para mantener las condiciones del ecosistema en niveles ambientales aceptables.
- b) El caudal más deseable es aquel que satisface numerosos usos a la vez.
- c) Debe darse una consideración preferencial a aquellos usos de mayor relevancia.
- d) Resalta la importancia del efecto de la alteración del caudal sobre los recursos biológicos.

El IFIM (Bovee, 1982), al ser una de las primeras metodologías que toman en cuenta la demanda de oxígeno disuelto, ha sido considerado en esta clasificación. En el posterior desarrollo de esta metodología se evolucionó a la utilización de diverso software como PHabsim y RHabsim.

## II. Método Physical Habitat Simulation (PHASBIM)

Los modelos biológicos están basados en la ecología de organismos indicadores (macro-invertebrados acuáticos, peces). Se desarrollan a partir de datos ecológicos que pueden tener un valor local (adaptación de los modelos para cada caso) o regional (un modelo por cada región)

Sobre un tramo del río y por un rango de caudal, evalúa la calidad del hábitat relacionando las estimaciones de condiciones físicas del hábitat y el valor ecológico de esas condiciones para los organismos.

Analiza temporalmente las condiciones del hábitat. Luego adecua para cada temporada del ciclo hidrológico natural, el caudal mínimo que asegura la realización de los ciclos biológicos de los organismos más sensibles.

Se fundamenta en la caracterización del hábitat a través de curvas que representen el comportamiento de la fauna acuática, asociados a caudales y velocidades, profundidades y sustratos en los tramos del cauce del río.

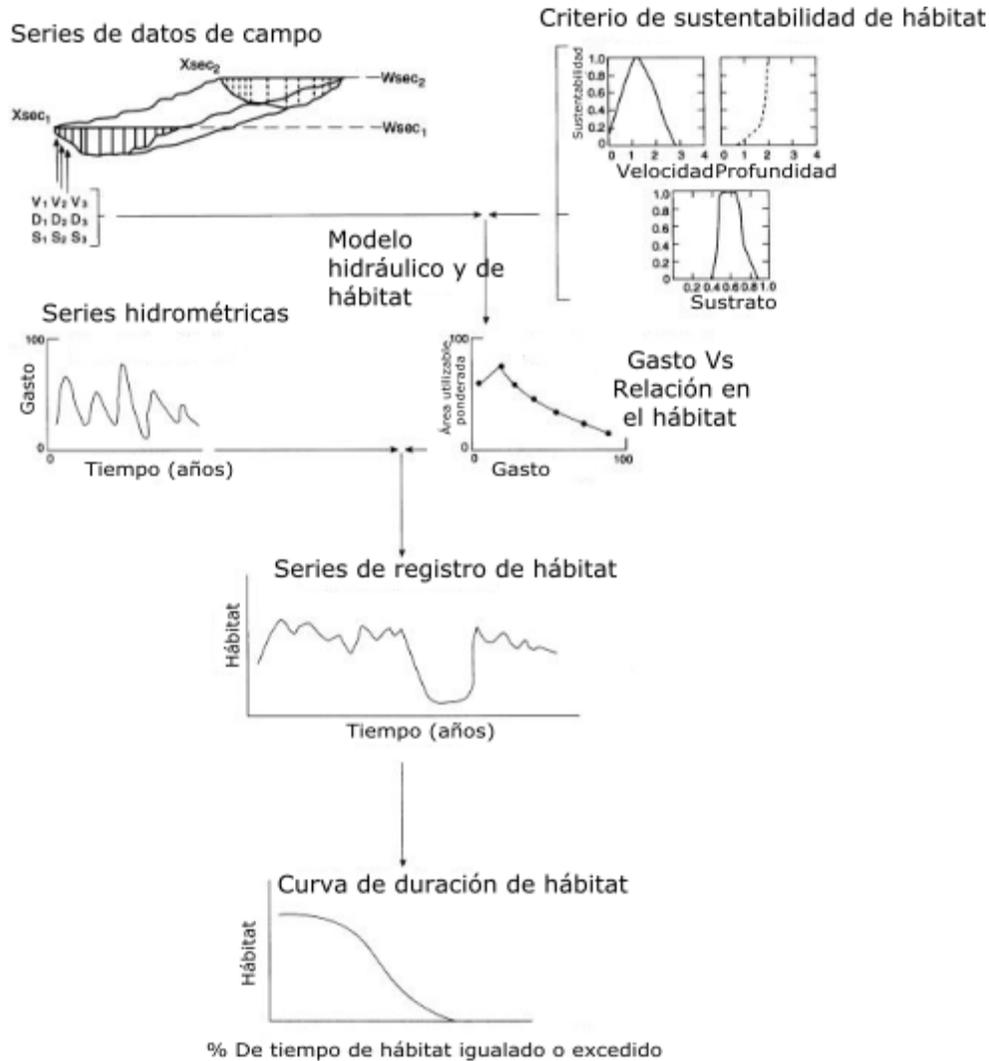


Fig. 5.12. Métodos hidrobiológicos: PHASBIM (Maddock, 1999; traducción propia).

Para autores como Gopal (2013), los métodos hidrobiológicos, son el antecedente de los métodos holísticos.

#### *D. Métodos holísticos*

Se asume que, si se identifican las características esenciales del flujo hídrico que pueden generar un impacto ecológico y estas son incorporadas dentro de un régimen de flujo modificado, entonces se mantendrá la biota y la integridad funcional del ecosistema. Su principio básico es similar al de los métodos hidrológicos secuenciales, pero más que un método, es un procedimiento donde el caudal ecológico se deduce buscando una solución consensuada a partir de un análisis independiente de la magnitud y distribución de caudal que necesitan los componentes del ecosistema fluvial, sean aspectos abióticos, ecológicos, perceptuales, socioeconómicos o todos en conjunto.

En resumen, sigue un modelo participativo de consenso, basado en un panel de expertos, por lo que es de aplicación local. Los métodos holísticos consideran dos aspectos: el hidrológico y el ecológico (Villanueva et. al., 2011):

##### ➔ **Aspectos Hidrológicos**

Se busca conservar la estacionalidad natural y la variabilidad de caudales, incluyendo inundaciones y el régimen de caudales de estiaje.

##### ➔ **Aspectos Hidráulicos**

Definen las características físicas del hábitat asociados al desarrollo de especies.

##### ➔ **Aspectos Ecológicos**

Cifras de población o índices de estructura comunitaria calculados a partir de listas de especies.

##### ➔ **Aspectos hidroquímicos**

La calidad de agua es sustancial para conocer las condiciones de desarrollo y salud del hábitat a analizar.

### ➔ Aspectos sociales

La demanda de agua y su extracción, son un factor fundamental en la planeación del uso ecológico del agua.

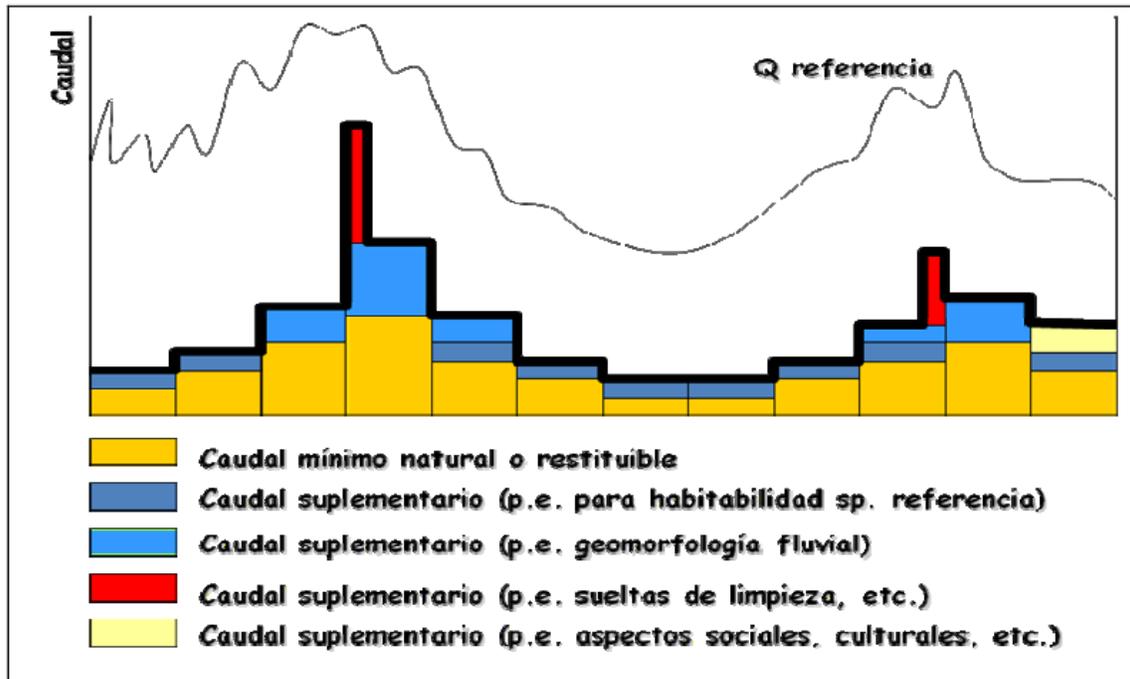


Fig. 5.13. Métodos holísticos (Villanueva et al., 2011).

Algunos métodos desarrollados dentro de este enfoque son:

#### I. Método de bloques de construcción, BBM

Se realiza en base a grupos de trabajo multidisciplinarios, tomando en cuenta trabajos de investigación ya realizados, modelos para entender la respuesta del caudal, características hidráulicas y juicios de expertos. Uno de los pasos críticos es la estimación de la importancia económica y social del área de estudio, realizándose una evaluación de la dependencia social y económica de los ecosistemas ribereños en conjunto con la comunidad. Se determinan y describen en términos de duración y magnitud los flujos que se recomendarán. Las descripciones de cada uno de los componentes del flujo son consideradas como los "building block", conformando los requerimientos de flujo para una cuenca o

río. Se denomina de tipo Bottom-Up ya que el caudal recomendado es estimado a partir de un flujo mínimo hacia los valores más altos (King and Louw, 1998).

El BBM fue la base conceptual para que en Sudáfrica se diseñara el Downstream Response to Imposed Flow Transformation [DRIFT] que también es considerado como un método holístico (King *et al.*, 2003).

Este método es considerado con alta posibilidad de aplicación en México (comparando IFIM y DRIFT), debido a que varias cuencas cuentan con todos los datos requeridos, es de bajo costo y se apega a condiciones ecológicas de mantenimiento, así como consideraciones sociales y requerimientos de trabajo multidisciplinario (IMTA, CONAGUA, WWF-FGA). Recientemente, la determinación de caudal ecológico del río Conchos se llevó a cabo con esta metodología (Alonso-Eguía, 2007).

## II. Método de Benchmarking o aproximación Top-Down

Se basa en principios similares al método Building Block. A diferencia del mismo, el caudal es determinado a partir de un flujo máximo aceptable hasta valores menores (aproximación Top-Down). Con información disponible, modelos conceptuales y juicio de experto se identifican indicadores hidrológicos que son considerados ecológicamente relevantes.

Con estos indicadores son caracterizados cauces escogidos dentro de un río como *benchmark* o de referencia. En estos cauces de referencia no existe necesariamente un flujo natural, pero cubren variados tipos y niveles de flujo que se registran en la cuenca. Posteriormente en estos sitios se relacionan impactos ecológicos en función de cambio en el flujo hídrico, de esta manera se investiga cuánto puede cambiar el flujo del agua antes de que el ecosistema sea degradado (Villanueva *et. al.*, 2011).

### III. Método de caudal de garantía ambiental, EPM

Mediante siete pasos se definen los límites mínimos de caudal ecológico, que pueden ser tolerados por un curso de agua, contemplando aspectos físicos, químicos, bióticos, sociales y estéticos, como:

1. Definición del caudal ambiental natural.
2. Evaluación ambiental multivariable.
3. Determinación del caudal de garantía ambiental.
4. Determinación de los caudales de recuperación.
5. Determinación de caudal adicional.
6. Determinación de requerimientos excepcionales.
7. Presupuesto de agua.

### IV. Método Savannah

La metodología Savannah es la adaptación interdisciplinaria The Nature Conservancy y el enfoque científico basado en la evaluación de caudal ambiental específica del sitio, la aplicación y el manejo adaptativo. Debido a que se demostró primero en el río Savannah, en Georgia, EE.UU. (Richter et al., 2006) ha tomado este nombre; sin embargo, ha venido aplicándose en diversas partes del mundo.

Considerado holístico porque aborda los vínculos entre un rango completo de características de flujo y diversos componentes del ecosistema. Es parecido a algunos otros métodos holísticos (dependen en gran medida del consenso de expertos para prescribir los caudales ambientales).

El desarrollo de modelos hidrobiológicos de hábitat físico, acoplados a modelos de simulación hidráulica, son más complejos y precisos, con tendencia a convertirse en herramientas de comprobación, más que de cálculo, de los caudales de mantenimiento (Palau, 2003).

### *E. Métodos Eco-hidrológicos*

Es un enfoque entre el hidrológico y el hidrobiológico. El caudal de mantenimiento o caudal ecológico, se calcula a partir de datos hidrológicos, pero adoptando como referente los requerimientos de una o varias especies objetivo, definibles para cada caso, y para los que el caudal mínimo establecido debe permitir su conservación. No utiliza simulación hidráulica. Es un enfoque muy adecuado para la planificación.

Entre los más usados tenemos (Villanueva et. al., 2011):

- El método Suizo
- El método Asturiano

#### *I. Método Suizo*

La legislación se basa en un método que utiliza fórmulas empíricas para la cuantificación del caudal mínimo, pero con unas premisas de carácter cualitativo, a saber:

- El caudal mínimo debe permitir el mantenimiento de la calidad de las aguas superficiales, contando con los vertidos de aguas utilizadas y los existentes en los planes futuros.
- Se debe mantener los niveles de los acuíferos, de manera que no se vean perjudicados ni la vegetación ni los usos de agua potable actuales y previstos en el futuro.
- Se deben conservar los biotopos y biocenosis raras y los lugares de esparcimiento particularmente bellos, cuyo aspecto y estética ambiental dependan de la cantidad de agua circulante. Para no entorpecer el movimiento de los peces migratorios y si el caudal es superior a 50 L/s, es obligatorio mantener una profundidad de al menos 20 cm en el cauce.

Para el establecimiento del caudal mínimo se hace una distinción entre aguas piscícolas y no piscícolas (o bien aguas sin interés piscícola aunque tengan peces, por las escasas dimensiones de los cauces). Así tendríamos:

➔ **Aguas no piscícolas**

Un mínimo de 50 L/s o el 35% del caudal que es superado 347 días al año (Qps) siempre que sea menor o igual a 1 m<sup>3</sup>/s.

➔ **Aguas piscícolas**

Se hacen distinciones en función de Q<sub>ps</sub>

- Para Qps > 60 l/s; el caudal ecológico mínimo sería 50 l/s, añadiéndose 8 L/s por cada 10 l/s adicionales.
- Para Qps > 160 l/s; el caudal ecológico mínimo sería 130 l/s, añadiéndose 4.4 l/s por cada 10 l/s adicionales.
- Para Qps > 560 l/s; el caudal ecológico mínimo sería 280 l/s, añadiéndose 31 l/s por cada 100 l/s adicionales.
- Para Qps > 2500 l/s; el caudal ecológico mínimo sería 900 l/s, añadiéndose 21.3 l/s por cada 100 l/s adicionales.
- Para Qps > 10000 l/s; el caudal ecológico mínimo sería 2500 l/s, añadiéndose 150 l/s por cada 1000 l/s adicionales.
- Para Qps > 60000 l/s; el caudal ecológico mínimo sería de 10000 l/s.

Para calcular el valor de Qps se propone la siguiente ecuación:

$$Q_{ps} = \frac{a * Q_{M-A}}{10}$$

**Ecuación 5.5**

Siendo “QM-A” el caudal medio anual y “a” un coeficiente que toma los valores entre: 0.9, 1.8 y 2.7; dependiendo la variedad de peces que el río tenga.

Puede observarse, que para los casos de turbinación a pie de presa, los caudales mínimos obtenidos son suficientes para dimensionar un dispositivo de franqueo eficaz, pero claramente insuficientes para mantener un tramo de río en condiciones habitables.

La base de aplicación de estos métodos y fórmulas consiste en que si no se sobrepasan (por debajo) los mínimos alcanzados naturalmente en el estiaje, la biocenosis original puede mantenerse. Sin embargo, hay que tener en cuenta que esto no es del todo cierto. Las distintas poblaciones estarán adaptadas para tolerar unas condiciones de sequía durante un cierto tiempo, pero no de forma continuada.

La exposición momentánea de un individuo a condiciones desfavorables no tiene graves consecuencias, pero la exposición prolongada a las mismas condiciones tiene efectos muy diferentes. Un estiaje estacional y temporal se traduce en unas condiciones de profundidad, velocidad y temperatura de las aguas más o menos desfavorables para algunas especies. Se producirán unos reajustes en el ecosistema, que durarán tanto como dure el estiaje. Si el estiaje es mantenido de forma artificial, y es permanente, los reajustes seguirán hasta que se alcance un nuevo equilibrio, con el resultado final de un ecosistema totalmente diferente al de partida.

## II. Método Asturiano

La normativa asturiana establece tres niveles de protección de los cauces, basando el cálculo del caudal mínimo en el método suizo. El caudal mínimo se calcula a partir del  $Q_{ps}$ , obtenido mediante la fórmula aceptada por la legislación suiza antes mencionada. Este método es utilizado también por la Confederación Hidrográfica del Norte de España (CHNE).

Para el nivel de protección, el caudal ecológico mínimo será el mayor de los valores obtenidos a partir de las siguientes ecuaciones:

$$Q_{ECO} = 50 \text{ l/s}$$

**Ecuación 5.6**

$$Q_{ECO} = 0.35 * Q_{ps}$$

**Ecuación 5.7**

$$Q_{ECO} = (15 * Q_{ps}) / (\ln Q_{ps})^2$$

**Ecuación 5.8**

$$Q_{ECO} = 0.25 * Q_{ps} + 75 \text{ l/s}$$

**Ecuación 5.9**

El abandono progresivo de los métodos hidrológicos simples y la expansión de los métodos hidráulicos que se soporten en un fundamento ecológico y en el análisis de las series de caudales circulantes, con una tendencia a la fusión con los métodos ecohidrológicos han desarrollado lo que ahora conocemos como “marcos de trabajo” y no metodologías estrictas.

Es importante destacar que las tres propuestas metodológicas más recientes (hidrológica secuencial, holística y ecohidrológica) tienen un factor en común: todas apuestan por el principio de que el caudal circulante es el referente organizativo básico de cualquier ecosistema fluvial, por lo que una perspectiva multidisciplinaria originará una mejor aproximación (Palau A., 2003).

### **5.3. Límites Ecológicos de Alteración Hidrológica (ELOHA)**

El régimen de flujo es un determinante primario de la estructura y la función de ecosistemas acuáticos y riparios para corrientes y ríos. La alteración hidrológica cobra su lugar al perjudicar ecosistemas rivereños a una escala global, el ritmo y la intensidad de desarrollo humano exceden enormemente la capacidad de los científicos de evaluar los efectos río por río, cuenca por cuenca. El marco ELOHA conjunta la comprensión científica de estudios hidrológicos sobre ecosistemas rivereños y experiencia ganada en estudios individuales de ríos apoyados en estándares de caudal ambiental a escala regional (Poff et al., 2010).

ELOHA presenta una vista general de acuerdo a un grupo de científicos internacionales sobre un nuevo marco para evaluar necesidades de flujo ambientales de muchas corrientes y ríos, simultáneamente, para promover el

desarrollo y la puesta en práctica de estándares de flujos ambientales en la escala regional. ELOHA es una síntesis de numerosas técnicas existentes hidrológicas y de métodos de flujo ambiental que actualmente son usados a varios grados y que apoyan la comprensión de la administración regional de caudales. El acercamiento flexible permite a científicos, directores del recurso agua y tomadores de decisiones analizar y sintetizar información científica disponible en objetivos ecológicos y sociales aceptables para la aplicación de normas en la administración de caudales ambientales (Poff et al., 2010).

A manera técnica ELOHA sintetiza bases de datos hidrológicos y ecológicos existentes de muchos ríos dentro de una región definida por el usuario para desarrollar relaciones científicamente defendibles y empíricamente probadas entre la alteración del flujo y las respuestas ecológicas. Estas relaciones sirven como la base para el manejo del proceso social para desarrollar normatividad de caudales regionales. ELOHA presenta las siguientes fases:

Primero, se usan modelos hidrológicos que se requieren para construir fundamentos hidrológicos e hidrogramas actuales por corriente y segmentos del río en toda la región.

Segundo, usando un conjunto de variables de flujo ecológicamente relevantes, los segmentos del río dentro de la región son clasificados de acuerdo al régimen de flujo, donde se espera tener diferentes características ecológicas. Estos tipos de ríos se pueden subdividir aún más de acuerdo a las características geomorfológicas importantes que definen las características hidráulicas del hábitat. De acuerdo a Poff et al., (2010), una sub-clasificación de tramos o segmentos de río puede proveer una herramienta útil en la integración de microcuencas y características geomorfológicas locales como geología, índice de confinamiento del cauce, pendiente del cauce, entre otras. Diferenciar ríos por características físicas contribuye al desarrollo de alteración de flujo – respuestas ecológicas, relaciones que reflejan, directa e indirectamente, influencias de

alteración hidrológica tanto en procesos ecológicos como en la estructura de ecosistema y sus funciones.

Tercero, ELOHA se fundamenta en la premisa de que el aumento de grados de alteración del flujo desde la condición base está asociado con el incremento de cambio ecológico. Cada grado de alteración en cada variable hidrológica difiere entre la línea de base y la condición desarrollada y puede ser analizado para cada nodo de análisis utilizando software disponible. Este análisis produce un conjunto de valores de alteración hidrológica expresados como porcentaje de desviación desde la condición base para cada nodo de análisis para cada hidrométrica usada para definir el tipo de río. Estos valores se utilizan, en conjunto con otras variables hidrológicas, para desarrollar la alteración de flujo – respuestas ecológicas que forman una base para el desarrollo de estándares de caudal ambiental-. Se menciona la particularidad del uso del software Sistema de Evaluación y Planificación de Agua (WEAP, por sus siglas en inglés), para la generación de hidrogramas inalterados, en los casos donde no existe información, siendo útil para estimar las condiciones no alteradas en lugares no aforados; el grado de alteración hidrológica, puede adaptarse para incluir previsiones hidrológicas. De igual modo, se menciona otro software para generar condiciones naturales y alteradas, pero muchos de estos modelos requieren numerosos parámetros, por lo que resulta costosa su obtención.

La cuarta fase de ELOHA, consiste en la integración del factor biótico. Consiste en desarrollar relaciones entre cualquier cambio en la condición ecológica (se pueden considerar varias variables ecológicas) y la alteración del flujo. Las relaciones deben ser lo suficientemente fuertes para la validación con los datos de monitoreo y fácilmente comprensibles para las partes interesadas.

ELOHA se complementa con un proceso social, cuyo objetivo principal es considerar los intercambios entre los usos humanos del agua y la degradación ecológica basados en la decisión colectiva, científicamente informada de los

interesados sobre la condición ecológica deseada del río, que será nombrada objetivo. Los objetivos definen los gastos ambientales que integran una planificación de desarrollo.

Al aplicar el marco ELOHA, la incertidumbre científica siempre existirá en la definición de la alteración del flujo- relaciones de respuesta ecológicas-, en parte debido a la confusión de alteración hidrológica con otros determinantes ambientales importantes de la condición ecosistémica del río. El uso del marco ELOHA por lo tanto debería ocurrir en un contexto donde de acuerdo a los interesados y a los funcionarios con poder de decisión se evalué el riesgo aceptable como un balance entre el valor percibido de los objetivos ecológicos, los gastos económicos y las incertidumbres científicas en relaciones funcionales entre respuestas ecológicas y la alteración de flujo (Poff et al., 2010).

El marco ELOHA también debe proceder en un contexto adaptativo de administración, donde con una recolección de datos de monitoreo o con datos de muestreo de campo realizar una prueba de relaciones de respuesta de alteración ecológica de flujo. Este proceso de validación empírica permite un ajuste fino de los objetivos de gestión de caudales ambientales. El marco ELOHA se puede utilizar tanto para guiar la investigación básica en hidroecología como para promover la aplicación de la gestión de los caudales ambientales más integral de la sostenibilidad de agua dulce a escala mundial (Poff et al., 2010).

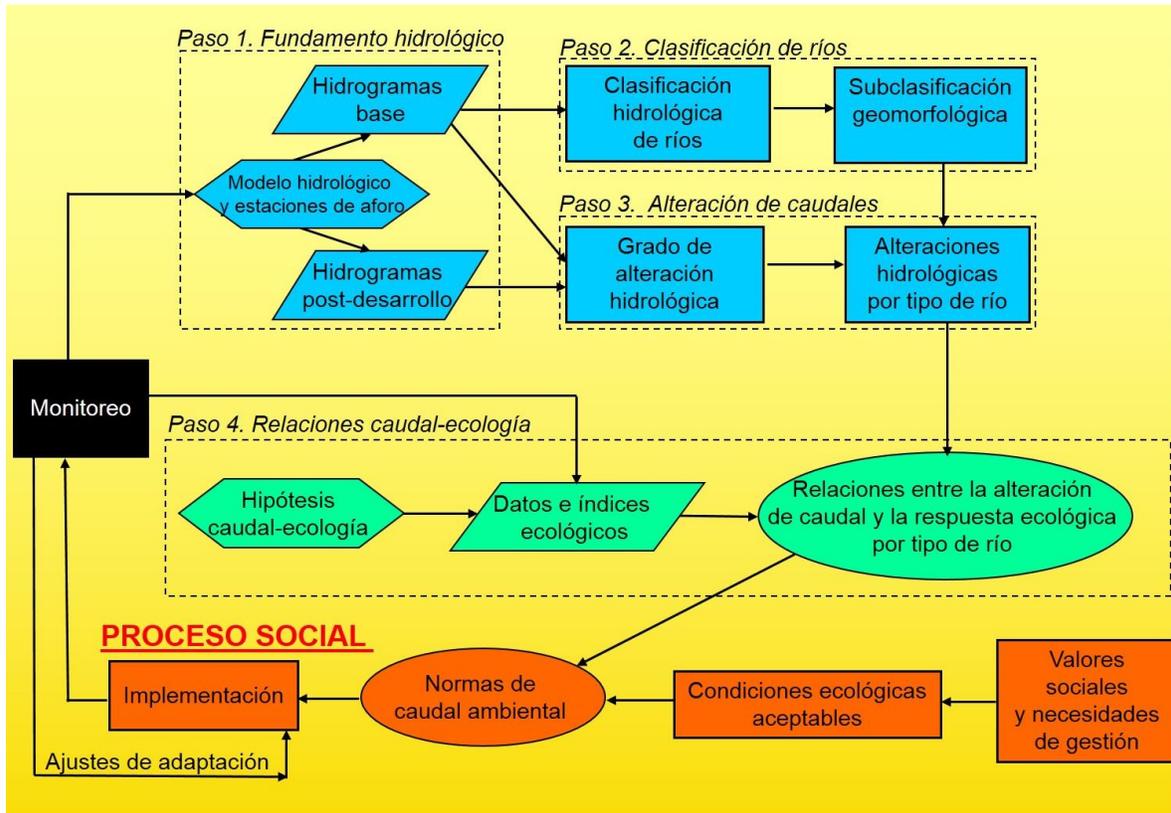


Fig. 5.14. Metodología ELOHA (TNC, 2009).

Los principales pasos del ELOHA que se pretenden realizar para la presente investigación son: (1) construir una base hidrológica, (2) caracterizar los tipos de ríos de acuerdo con sus regímenes de flujo y las características geomorfológicas, (3) Calcular el grado actual de alteración del flujo. Estos tres pasos son nombrados la base hidrológica del proceso científico.

Definir las relaciones de respuesta de alteración ecológica de flujo (4), y (5) utilizar la alteración del flujo - relaciones ecológicas de respuesta para gestionar los caudales ambientales, que a través de un proceso social informado; son los pasos que completan el marco ELOHA.

### 5.3.1. Aplicaciones del marco ELOHA

A continuación, se muestra la concentración de algunas investigaciones publicadas bajo el uso del marco ELOHA.

Tabla 5.5. Estudios realizados con ELOHA.

Título	País	Año	Autores	Revista de Publicación
<b>Clasificación y comparación de régimen de flujo natural y alterado como apoyo para un tratado australiano del marco ELOHA. (Classification and comparison of natural and altered flow regimes to support an Australian trial of the Ecological Limits of Hydrologic Alteration framework)</b>	Australia	2014	Mackay, Stephen J.; Arthington, Angela H.; JAMES & Cassandra S.	Ecohydrology
<b>Una prueba de los límites ecológicos de Alteración Hidrológica (ELOHA) método para la determinación de los caudales ambientales en la cuenca del río Potomac, EE.UU. (A test of The Ecological Limits of Hydrologic Alteration (ELOHA) method for determining environmental flows in the Potomac Riverbasin, U.S.A.)</b>	Estados Unidos	2013	Buchanan, C., Moltz, H. L., Haywood, H. C., Palmer, J. B., & Griggs, A. N.	Fresh Water Biology
<b>El desarrollo de modelos hidroecológicos para informar de los estándares de caudal ambiental: un estudio de caso de Inglaterra. (Developing hydroecological models to inform environmental flow standards: a case study from England)</b>	U.K.	2014	Klaar, M. J., Dunbar, M. J., Warren, M., & Soley, R. (2014).	Wiley Interdisciplinary y Reviews: Water
<b>Comunicado corto para un presunto estándar de protección caudal ambiental. (Short communication a presumptive standard for environmental flow protection)</b>	Estados Unidos	2012	RICHTER B. D., DAVIS M. M., APSE C. & KONRAD C.	River research and applications
<b>Obtencion de escala para la evaluación del caudal ambiental: una herrameinta para la evaluacion de flujo en cuencas. (Getting to scale with environmental flow assessment: the watershed flow evaluation tool)</b>	Estados Unidos	2012	Sanderson, J. S., Rowan, N., Wilding, T., Bledsoe, B. P., Miller, W. J., & Poff, N. L.	River Research and Applications

<p><b>Evaluación de capacidad y disponibilidad de agua en cuerpos no regulados basado en ELOHA. (Assessment of water capacity and availability from unregulated Stream flows based on ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA) environmental flow standards)</b></p>	<p>Estados Unidos</p>	<p>2015</p>	<p>Z. Zhang, J. W. Balay, K. M. Bertoldi &amp; P. O. Macoy</p>	<p>River Research and Applications</p>
--	-----------------------	-------------	--	--

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.2. Clasificación hidrológica regional

El concepto más importante del paso 1 es la construcción de hidrogramas que forman el "fundamento hidrológico", que consta de bases de datos lo más completas posible de todos los días, tiempo de registro en donde la serie represente la línea de base simulada y condiciones desarrolladas en toda la región durante un período de tiempo común. Condiciones de línea de base, se refieren a condiciones mínimamente alteradas o mejor disponibles (el enfoque de referencia del sitio), mientras que las condiciones desarrolladas se refieren al flujo alterado, regímenes asociados tanto de forma directa e indirecta (Poff et al., 2010).

El fundamento hidrológico sirve para varios propósitos importantes. En primer lugar, facilita el uso de información ecológica recopilada en toda la región, para ampliar el número de sitios que se puede utilizar en el desarrollo de relaciones de respuesta de alteración ecológica de flujo, más allá de sólo los sitios que tienen caudales medidos.

En segundo lugar, proporciona una base para comparar regímenes de caudales actuales a las condiciones de base, es decir, aquello que sirvió de modelo para la evolución reciente de especies nativas y para dar forma a los procesos del ecosistema, así como las dependencias socioculturales sobre las condiciones y procesos ecológicos.

En tercer lugar, mejora la capacidad de los gestores del agua y planificadores para comprender los impactos acumulativos de la alteración hidrológica que ya han

tenido lugar en la región, de modo que dichas alteraciones se pueden vincular a los cambios observados en las condiciones ecológicas y de servicios de ecosistemas como base para la futura predicción de cambio ecológico en el contexto regional de planificación y gestión de agua.

La línea de trabajo y la hidrología desarrollada en series de tiempo constituye el fundamento hidrológico. La cual debe de desarrollarse en todas las regiones donde las decisiones con respecto al agua, incluyendo al medio ambiente, requieran protección del flujo o se prevea esta necesidad (Poff et al., 2010).

Los gestores del agua utilizarán el fundamento hidrológico para entender y gestionar la asignación de agua y los caudales ambientales. La línea de base y el desarrollo de la condición de los hidrogramas sirven como variables independientes en el entendimiento de la alteración del caudal en respuesta a las relaciones ecológicas (descritos en la formulación alteración del flujo y las relaciones ecológicas de respuesta para caudales ambientales).

Por lo tanto, el análisis también se debe establecer para todos los sitios en el que los datos ecológicos prevén una alteración del flujo en respuesta a las relaciones ecológicas en donde se cuente con datos y así incluir una gama de características geomorfológicas en el segmento del río, de acuerdo a la escala que se haya medido, contemplando la forma en la disponibilidad y diversidad de hábitats que se expresan por un régimen de flujo dado. Toda esta información es almacenada en una base de datos e importados en un sistema de información geográfica (SIG) para permitir a los usuarios acceder fácilmente a los hidrogramas y las estadísticas de flujos asociados (Poff et al., 2010).

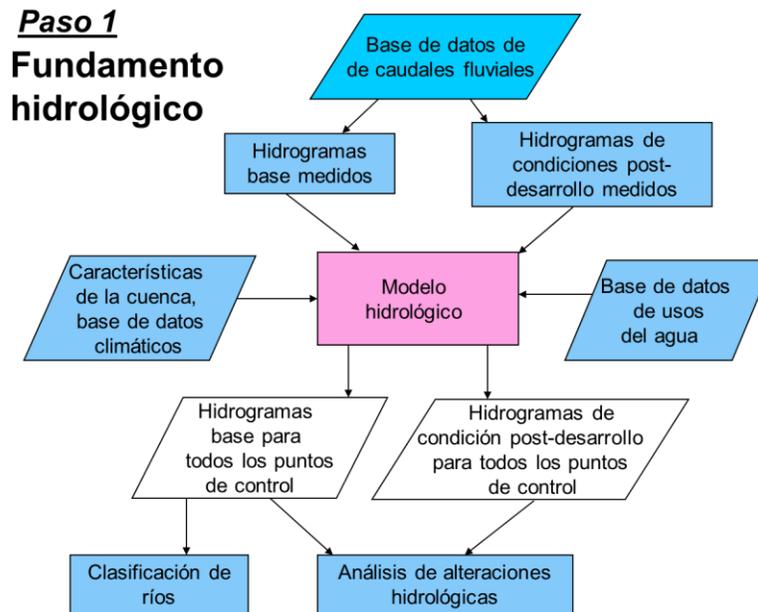


Fig. 5.15. Paso 1: “Fundamento hidrológico”.

El paso 1 de ELOHA contempla los casos en los que no exista registro, o que este sea muy corto para ser tomado como base, proponiendo técnicas estadísticas o modelos lluvia escurrimiento, contemplando el cambio de uso de suelo y cambio climático. La serie de datos a nivel diario, semanal o mensual permite observar diferentes respuestas ecológicas que pueden servir como punto de partida para la clasificación (Paso 2). Se recomienda que se utilice un mismo periodo de tiempo, ya que así se considera una misma referencia climática, y su relación con los efectos humanos (Poff et al., 2010).

Un prerequisite para utilizar la metodología ELOHA u otra metodología regional de caudal ecológico es que la hidrología y geomorfología de la región de interés sea similar.

Las clasificaciones hidrológicas permiten identificar grupos de corrientes y ríos que podrían ser gestionados de manera similar y para distinguir ampliamente los posibles cambios ecológicos asociados con la alteración de flujo donde se carece de datos específicos del sitio.

La aportación de Reidy *et al.*, 2012, fue la elaboración de una clasificación hidrológica para el estado de Washington basándose en caudales aforados con importancia ecológica, identificando respuestas ecológicas a ciertos patrones de clases hidrogeomorfológicas. Mediante la asignación de clase de flujo de los ríos no aforados o regulados, el objetivo fue llenar los vacíos de datos significativos sobre los flujos normativos para muchos ríos en el estado, lo que permite su inclusión tanto en los análisis que exploran las relaciones ecológicas entre las distintas clases de flujo, así como en los esquemas de gestión regionalizados. La clasificación hidrológica se llevó a cabo utilizando el modelado mezcla Bayesiano, utilizando el programa AUTOCLASS C (NASA, Washington, DC, EE.UU. citado por Reidy *et al.*, 2012) (v 3.3.4.; Cheeseman *et al.*, 1988 citado por Reidy *et al.*, 2012), en el que la distribución observada de los datos se modela como una mezcla de un número finito de distribuciones de componentes para determinar el número de distribuciones, sus parámetros y la pertenencia de objetos (Hanson *et al.*, 1991; Cheeseman y Stutz, 1996 citados por Reidy *et al.*, 2012). Requiere que el usuario especifique la incertidumbre de medición para cada atributo y los atributos con menor incertidumbre tienen más influencia en la clasificación final (Webb *et al.*, 2007 citados por Reidy *et al.*, 2012).

La forma de los hidrogramas anuales en el estado de Washington resultó marcadamente diferente entre las clases hidrológicas con clases que se caracterizan por su fuente de flujo dominante y que se refiere de la siguiente manera: el agua subterránea (GW), la precipitación (RF), la lluvia-con-nieve (RS), la nieve-y-lluvia (SandR), nieve-lluvia (SR), la nieve derretida (SM) y ultra-deshielo (US). La distribución geográfica de las clases hidrológicas mostró agrupación espacial notable consistente con una fuerte influencia orográfica de la cordillera de la cascada, con cada una de las siete clases predominantemente (aunque no exclusivamente) representado en sólo uno u otro lado de la división. US y los sitios SM están dominados por unas fuertes señales de deshielo de primavera de diferente duración y tiempo pico en comparación con los sitios de RF que están controladas por las lluvias de invierno con influencia insignificante de nieve. Las

clases de transición reflejan un hidrograma híbrido que contiene una mezcla de la fusión de la nieve en primavera y en el invierno la lluvia, ya sea en contribuciones relativamente iguales (SandrR) o con grandes aportaciones de la nieve (SR) o la lluvia (RS). Los sitios GW se caracterizan por la descarga media mensual relativamente uniforme, destacando un papel insignificante de precipitación o caída de nieve en los patrones de flujo dentro de la clase (Reidy et al., 2012).

Tomando en cuenta la investigación de Reidy et al., en 2012 y como primera propuesta se toman las siguientes características geomorfológicas para poder correlacionar el 7Q<sub>10</sub>, como parámetro hidrológico en la regionalización requerida por el marco ELOHA para una propuesta de caudal ecológico en cuencas aforadas y no aforadas.

**Tabla 5.6. Parámetros geomorfológicos propuestos por Reidy et al., (2012) y fuente en México.**

PARÁMETRO	UNIDAD	FUENTE
Área de drenaje	km <sup>2</sup>	MDE (INEGI)
Elevación media	M	MDE (INEGI)
Pendiente	(Adim)	MDE (INEGI)
Suelo poroso	%	Carta de Geología (INEGI)
Suelo no poroso	%	Carta de Geología (INEGI)
Vegetación	%	Carta de uso de suelo (INEGI)
Zona urbana	%	Carta de uso de suelo (INEGI)
Agricultura	%	Carta de uso de suelo (INEGI)
Precipitación media mensual	Mm	SMN (CONAGUA)
Precipitación media anual	Mm	SMN (CONAGUA)
Temperatura media mensual	°C	SMN (CONAGUA)
Relación entre mes más húmedo a mes más seco (precipitación)		SMN (CONAGUA)
Temperatura media mínima de invierno	°C	SMN (CONAGUA)
La radiación solar media anual	kJm <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>	SMN (CONAGUA)
Presas		SIGAGIS (CONAGUA)
Volumen comprometido	hm <sup>3</sup>	REPDA (CONAGUA)

En México, específicamente para las cuencas de la costa de Chiapas, Orsini (2011) concluyó con el análisis de correlación y regresión múltiple que las características fisiográficas y climatológicas más influyentes en la formación del  $7Q_{10}$ , como estadístico base para caudal ecológico, son 4:

- Área drenada, km<sup>2</sup>
- Días con lluvia apreciable: enero-febrero-marzo, día
- Elevación media de la cuenca, msnm
- Lluvia antecedente: enero-febrero-marzo, mm

**Tabla 5.7. Parámetros geomorfológicos propuestos por Orsini, 2012.**

PARÁMETRO	UNIDAD	FUENTE
Área de drenaje	km <sup>2</sup>	MDE (INEGI)
• Días con Lluvia Apreciable: enero-febrero-marzo	día	CLICOM (CONAGUA)
Elevación media de la cuenca	m	MDE (INEGI)
• Lluvia Antecedente: enero-febrero-marzo	mm	CLICOM (CONAGUA)

### 5.3.3. Clasificación geomorfológica regional

La morfología del cauce del río y de la llanura de inundación también influye fuertemente en los tipos y cantidades de los hábitats disponibles. Clasificaciones de acoplamiento de la hidrología y geomorfología basados en estos tipos de datos pueden ayudar a distinguir aún más potencial de respuesta ecológica y mejorar los esfuerzos de la regionalización de caudales ambientales (Snelder y Biggs, 2002; Capilla et al., 2010).

La aplicación de la clave de Rosgen (1994,1996) para la clasificación geomorfológica ha sido aplicada en diferentes países. Se fundamenta en la experiencia adquirida por su autor durante 31 años de investigación en ríos naturales; desarrolló un esquema práctico y aplicable universalmente en la clasificación de ríos. La metodología consiste en la definición de los principales

parámetros que funcionan en los procesos mecánicos de mantenimiento del río a través del tiempo.

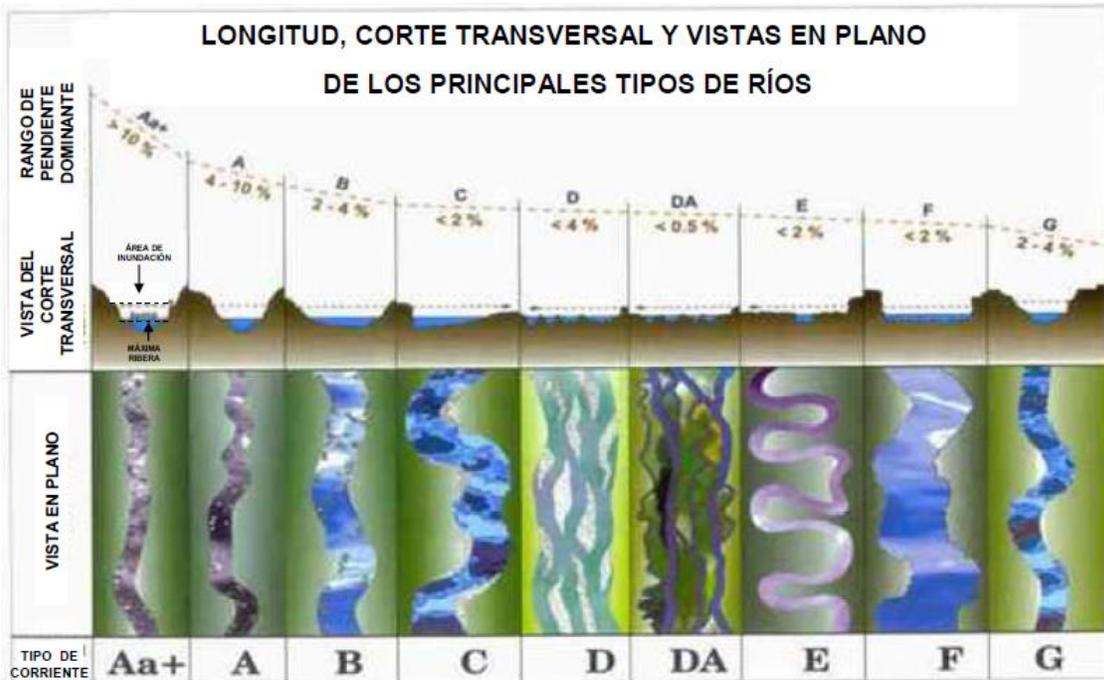


Fig. 5.16. Características geomorfológicas en ríos (Rosgen (1994, 1996); traducido por López-Mora, 2007).

Rosgen concluye en estrategias para la restauración de ríos, planeación de control y mantenimiento del canal en orden a la clasificación obtenida.

Su metodología permite la clasificación de la corriente mediante cuatro niveles bajo el concepto de cuenca, considerando su red de drenaje, complejidad de la cuenca (influenciados por el relieve, formas de la tierra y morfología del valle) que son determinados por la interacción de controles estructurales litológicos, procesos fluviales, materiales de depósito, influencia climática y una zona de vida amplia. Los niveles de clasificación de Rosgen (1994,1996) se esquematizan en la figura 5.17.

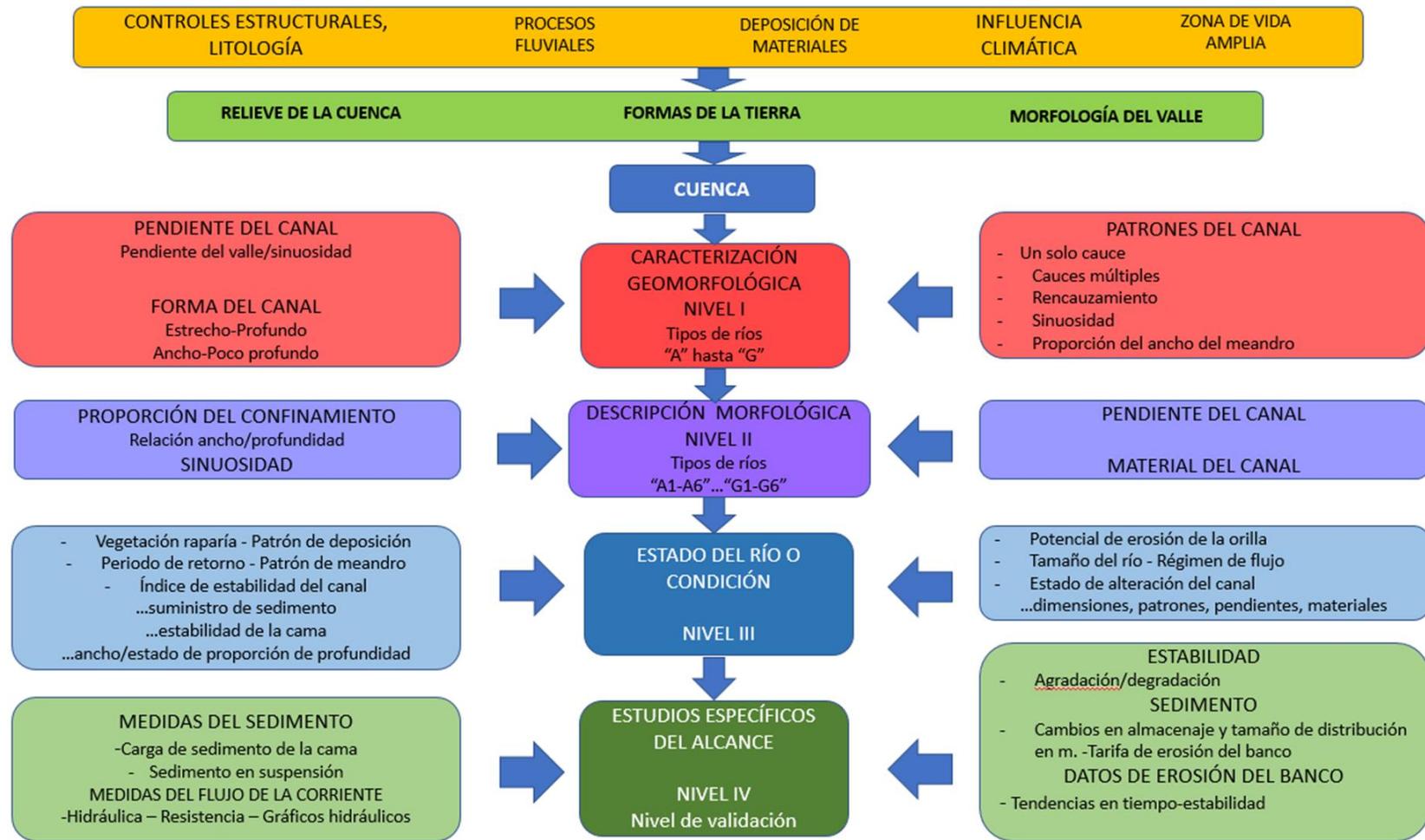


Fig. 5.17. Niveles para la clasificación de ríos naturales (Rosgen (1994, 1996); traducido por López-Mora, 2007).

La etapa I de clasificación describe las características geomorfológicas y se utiliza para delinear tipos geomorfológicos a una escala gruesa, se puede determinar mediante mapas topográficos y fotografía aérea/satelital. En la Etapa II, se describe la morfología detallada de los tipos de la corriente y una clasificación con base en el sedimento que procesa, lo que permite obtener o llegar a la “Clave de Rosgen”, mediante datos de campo basados en ocho variables (máxima ribera, ancho de la ribera, área de inundación, la tasa de la relación ancho/profundidad, la tasa de confinamiento, el material de sustratos del canal, gradiente de la pendiente y la sinuosidad). De acuerdo a Rosgen, el parámetro más importante es la longitud del ancho de máxima ribera; sin embargo, de acuerdo a la metodología propuesta con SIG, se define a la pendiente media longitudinal como el parámetro principal.

A continuación, se esquematizan los tipos de cauce propuestos por Rosgen en el nivel I.

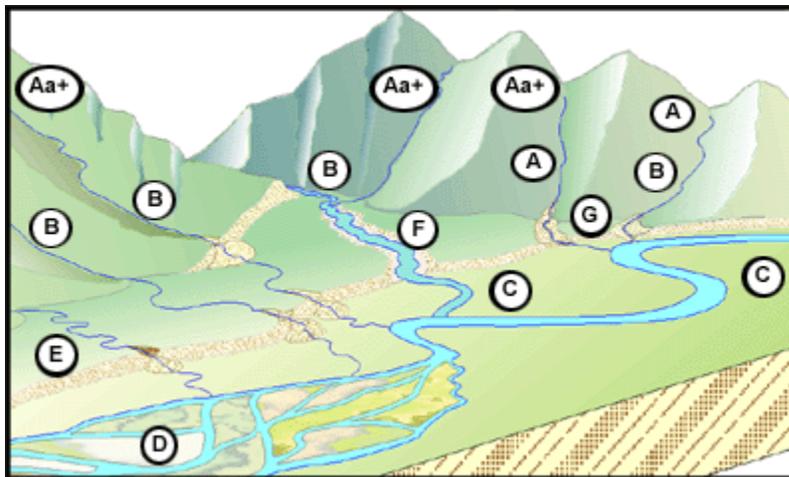


Fig. 5.18. Ubicación de ríos por su clasificación Nivel I dentro de la cuenca (Rosgen (1994, 1996).

De acuerdo a López-Mora (2007) el modelo de Rosgen (1996), tiene como objetivo general el clasificar la corriente con base en la morfología del canal, fijando categorías de tipo discretos de la corriente para desarrollar descripciones y

gravámenes constantes, reproductivos de la condición y del potencial. Los objetivos específicos son básicamente:

1. Predecir el comportamiento de un río por su apariencia,
2. Desarrollo hidráulico específico de los tipos de canal y su estado con relación al sedimento,
3. Provee datos que puedan extrapolarse a corrientes con características similares y,
4. Provee un marco de referencia que enlace a la morfología del canal con las disciplinas y participantes interesados.

Para la integración de la información se sugiere una clasificación bayesiana. Tanto AutoClass, como muchos otros softwares libres, establecen de forma automática el número de combinaciones posibles basándose en la teoría de clasificación bayesiana. AutoClass se ha aplicado para clasificaciones hidrológicas y paisajes por la escuela australiana (Kennard *et al.*, 2010; Webb *et al.*, 2007).

#### **5.3.4. Alteración hidrológica**

El conocimiento de las condiciones naturales de una cuenca es fundamental para la determinación de un régimen de caudal ecológico en la zona de estudio. Se requiere analizar si las condiciones de un régimen han sido modificadas por diversas actividades directas o indirectas de manera negativa o si han favorecido al ecosistema. Algunos factores que generan alteración hidrológica definidos para México según la CONAGUA son:

- Presencia de infraestructura hidráulica
- Actividades agrícolas
- Urbanización y demografía

El análisis de la alteración hidrológica toma en cuenta diversos parámetros que impactan el desarrollo del hábitat y que han sido propuestos, definidos y

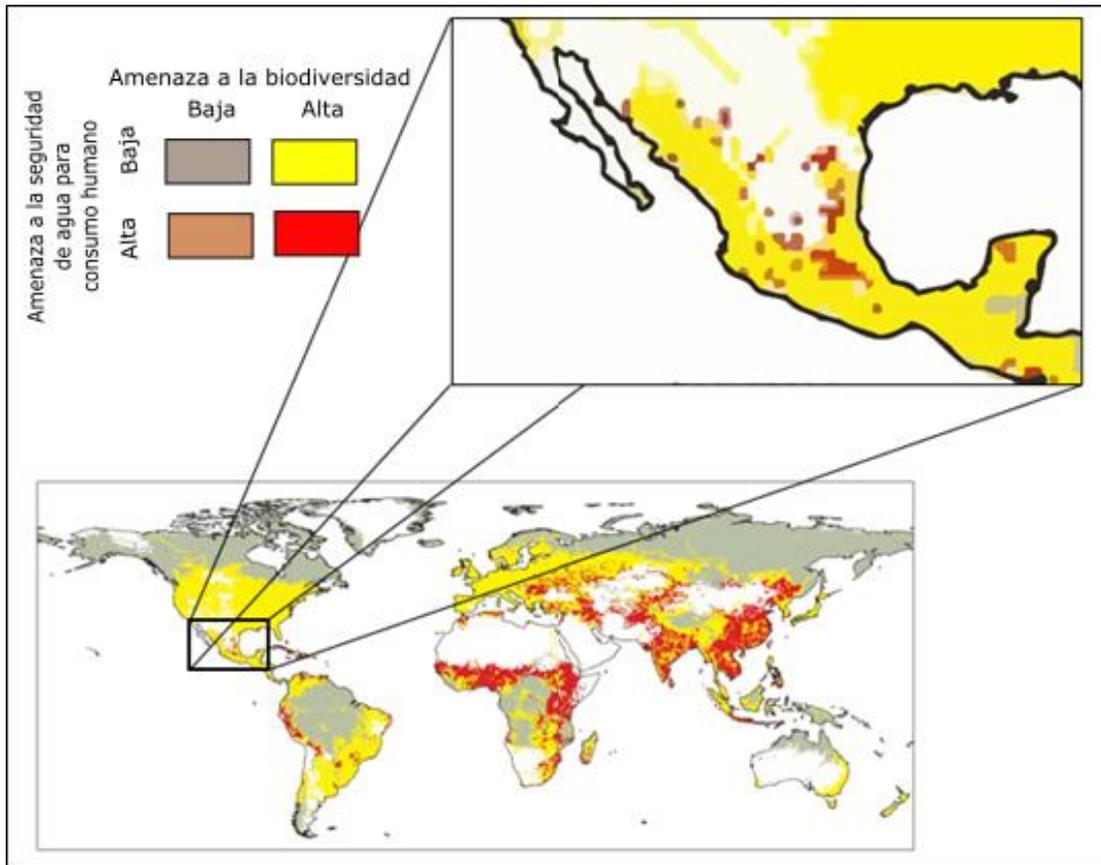
verificados por investigadores en diferentes partes del mundo. Las variables para este análisis están ligadas a los componentes del régimen ya descritos con anterioridad; de igual forma se relacionan con la dinámica del ecosistema para años secos, medios y húmedos.

Richter (1996), propuso 33 parámetros para caracterizar la alteración hidrológica y 34 para la definición de los componentes de caudal ecológico, que son la base del software IHA. La norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 presenta su propia metodología para evaluar la alteración en los ríos con base en los percentiles (90 y 10) de las aportaciones mensuales y anuales de las series de registro de las estaciones hidrométricas. Los dos métodos anteriores fueron aplicados en la presente investigación; sin embargo, se considera de suma importancia mencionar que Martínez y Fernández (2006), responsables del software de Índices de Alteración Hidrológica en Ríos [IAHRIS], resumen los 64 parámetros de Richter, al evaluar tres factores: 1) magnitud y variabilidad de caudales anuales; 2) variabilidad y estacionalidad de caudales mensuales; y 3) variabilidad de los valores extremos máximos y mínimos.

## 5.4. Criterios para la clasificación regional de ríos

### 5.4.1. Biodiversidad de ríos y seguridad de agua para consumo

Vörösmonty et al., (2010) utilizando un marco cuantifica múltiples factores de estrés y de impactos aguas abajo de las presas. El 80% de la población mundial está expuesto a altos niveles de amenaza a la seguridad del agua. La falta de precaución pone en riesgo al 65% de los ríos del mundo, que están de moderadamente a sumamente amenazados. Siendo así, crea un instrumento para priorizar la política y la gestión de esta crisis y subraya la necesidad de limitar las amenazas en su origen en lugar de costosas remediaciones de los síntomas con el fin de garantizar la seguridad mundial del agua para los seres humanos y la biodiversidad de los ecosistemas de agua dulce.



**Fig. 5.19. Patrones prevalecientes de amenaza para la seguridad del agua de consumo humano y la biodiversidad en México (Vörösmonty, 2010).**

En la Fig. 5.19, se observa que, para la mayor parte de México, es más alta la amenaza a la biodiversidad que la amenaza que se presenta sobre el agua de consumo humano. Sin embargo, también se presentan las dos amenazas en algunas porciones del territorio mexicano. Exactamente, se describe que casi el 80 % (4.8 mil millones) de la población líder mundial (hacia 2000) vive en áreas donde la seguridad del agua de consumo humano es incidente con la amenaza de diversidad biológica que excede el 75 %, y que en el centro de México se presenta esta situación. Además, se observa que este grupo de investigadores no obtuvo información para clasificar gran parte del norte de México.

Esta clasificación toma en cuenta los siguientes factores, que se desglosan en 23 variables:

- **Alteración de cuencas:** Desconectividad en la cuenca, presencia de ganado, superficies impermeables y tierras de cultivo.
- **Desarrollo de los recursos hídricos:** Densidad de presas, fragmentación de ríos, pérdida de agua por uso consuntivo, presión de uso por humanos, presión de uso por uso agrícola e interrupción de flujo.
- **Contaminación:** Salinización de suelos, carga de nitrógeno, carga de fósforo, deposición de mercurio, carga de pesticidas, carga de sedimentos, carga de materia orgánica, acidificación potencial y alteración térmica.
- **Factores bióticos:** % de peces no nativos, número de peces no nativos, presión pesquera, y presión por acuacultura.

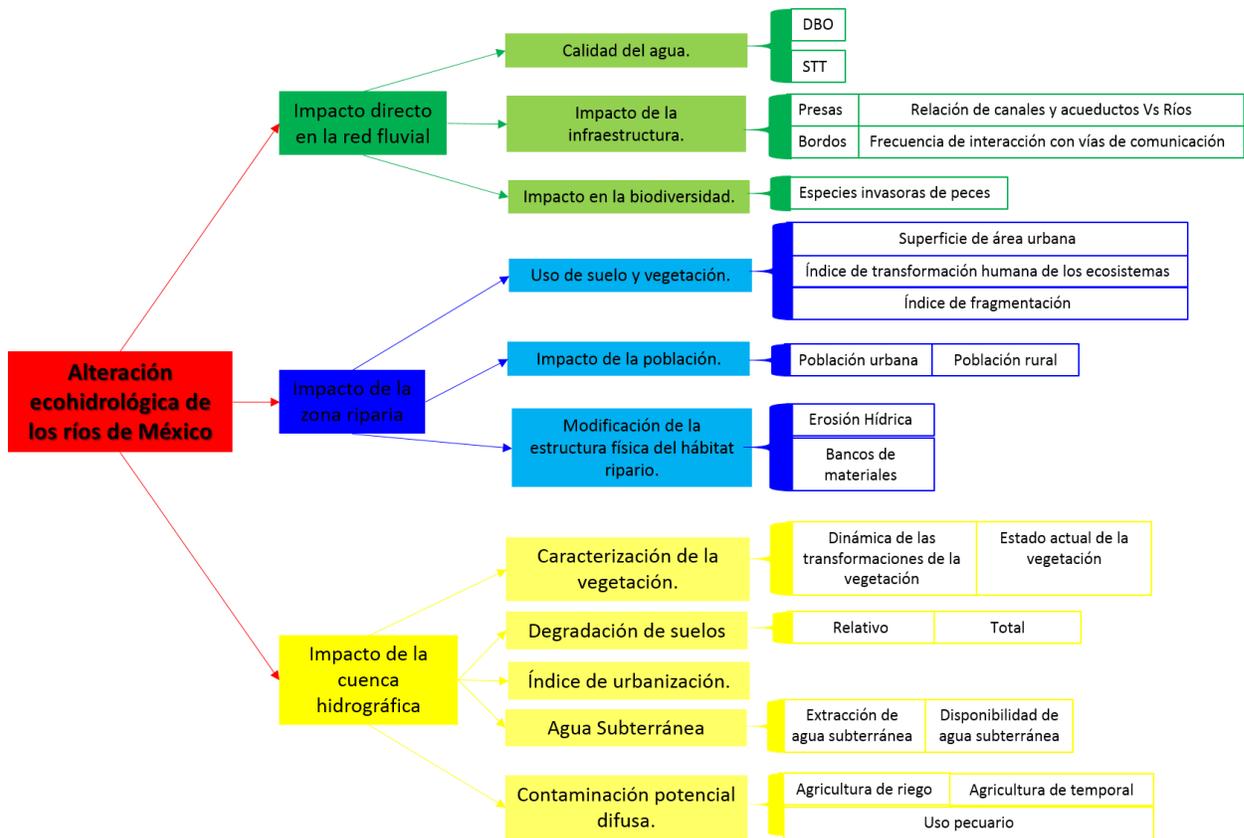
Vörösmonty *et al.*, (2010) comenta que la información es insuficiente para realizar ajustes y re-escalar.

#### 5.4.2. Alteración ecohidrológica

En el 2010, el equipo de investigadores del actual Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INEEC), dirigidos por Garrido-Pérez y Cotler, publicó una clasificación de alteración hidrológica para México, en donde se genera un escenario nacional que aproxima al estado de alteración ecohidrológica de los ríos del país, a través de una evaluación ambiental robusta basada en el análisis geográfico de la información espacial disponible, que toma en cuenta 75 variables ambientales (Fig. 5.20). Se determinó que siete ríos junto con sus afluentes, presentan un grado de alteración ecohidrológica Muy Alto (31% del total de la red fluvial nacional), 77 fueron categorizados dentro de los niveles Alto y Medio (42% del total de la red fluvial nacional) y 312 fueron clasificados dentro de los niveles Bajo y Muy Bajo de alteración (27% del total de la red fluvial nacional) (Garrido *et al.*, 2010).

Los propios autores consideran que es indispensable re-escalar la perspectiva de análisis y obtener datos más detallados y específicos para identificar los

segmentos problemáticos y de mayor importancia para la cuenca. Por lo que se justifica el estudio de regiones tal y como se pretende en la presente investigación. Se presentan las variables consideradas y su organización para el análisis realizado como resultado final en la Fig. 5.20. Los resultados de la clasificación de Garrido et al. (2010) se observan en la Fig. 5.21.



**Fig. 5.20. Definición de variables para la clasificación de alteración ecohidrológica (Garrido et al., 2010).**



- Presencia de Áreas Naturales Protegidas (federales, estatales, municipales y certificadas).
- Presencia de humedales de importancia internacional (Convención de RAMSAR).
- Presencia de sitios prioritarios para la conservación de los ecosistemas acuáticos epicontinentales (CONABIO-CONANP, 2010).
- Presión de uso para aguas superficiales y subterráneas (esta última para el caso de la Península de Yucatán) conforme a las disponibilidades publicadas en el Diario Oficial de la Federación.

Con esta combinación de criterios se clasifican las 723 cuencas superficiales por objetivos ambientales (Figura 5.22) para asignarles un porcentaje del volumen del escurrimiento medio anual, siendo más demandante por su mejor condición el objetivo A y menor el D. En el apéndice A aparece el listado de cuencas hidrológicas y sus objetivos ambientales.

A nivel Nacional la NMX-AA-159-SCFI-2012, analiza la presión de uso y la importancia ecológica a escala muy amplia. La aplicación de los métodos hidrológicos recomendados por la NMX requieren refinarse para una mejor gestión del caudal ecológico.

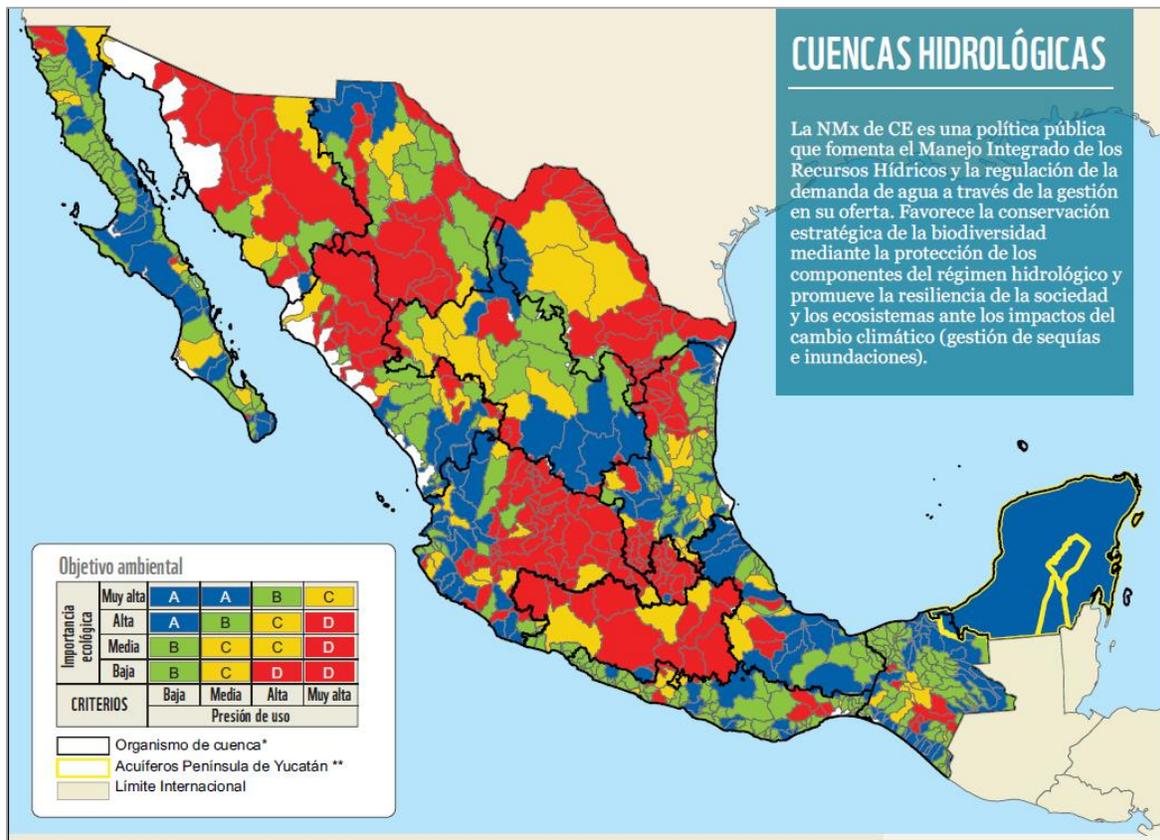


Fig. 5.22. Objetivo ambiental por cuenca hidrológica (WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte, et al., 2006).

## 6. INFORMACIÓN Y METODOLOGÍA

En el presente capítulo se detalla los insumos utilizados en cada paso del marco ELOHA como bases de datos, información geoespacial, software y metodologías. De igual manera, se indica el autor, institución, empresa, distribuidor y/o procedencia de cada uno de ellos.

### 6.1. Obtención y manejo de datos

#### 6.1.1. Bases de datos

La información hidrométrica, específicamente gastos diarios y anuales, se obtuvo del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la página de CONAGUA, fundamental en el paso 1 del ELOHA.

En el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), se revisaron los títulos de concesión para el cálculo del parámetro volumen demandado, utilizado en el paso 1 del ELOHA.

La información meteorológica se obtuvo de CLICOM, requerida en el paso 1 del ELOHA.

#### 6.1.2. Modelo de elevación digital

El MDE se obtuvo del sitio electrónico del INEGI con una resolución de pixel de 15 m. Fue utilizado para los pre-cálculos en la caracterización del área de estudio.

#### 6.1.3. Modelo de Elevación Digital tipo LiDAR de Terreno

Se utilizó los LiDAR de INEGI escala 1:10,000 para la clasificación Geomorfológica del paso 2.

#### 6.1.4. Software

SIG (QGIS). Se usó como plataforma para la delimitación de la cuenca, posteriormente para la caracterización de la cuenca; y finalmente, para la creación de planos.

HEC-GeoHMS y SWAT. Se utilizó para la delimitación de la cuenca y sus características fisiográficas, requeridas en el paso 1.

IHA. Empleado para la caracterización de los regímenes y los índices de alteración del paso 3

Procesador de Matrices (Calc). Se utiliza para el análisis de la información, creación de macros y procesamiento de la información de todos los pasos.

Google Earth, para la corroboración de la clasificación geomorfológica del paso 2.

Programas propios creados en Python, para facilitar el procesamiento de los gastos diarios en el paso 1.

Análisis de Frecuencias (AFA v.1.1). Utilizado en el procesamiento de los parámetros de lluvia requeridos en el paso 1.

HecRAS y HEC-GeoRAS. Modelación hidráulica requerido para determinar parámetros geomorfológicos en el paso 2.

#### 6.1.5. Cartografía digital

Se utilizaron cartas temáticas escala 1:250 000 de INEGI de la serie IV. Las cartas temáticas que se utilizaran son de Geología, Clima, Uso de Suelo y Vegetación; y Edafología en formato vectorial de CONABIO e INEGI.

### 6.2. Metodología

Una vez definida el área de estudio se realizaron los siguientes pasos del proceso científico del ELOHA: (1) construir una base hidrológica, (2) caracterizar los tipos

de ríos de acuerdo con sus regímenes de flujo y las características geomorfológicas, (3) Calcular el grado actual de alteración del flujo.

### 6.2.1. Adaptación del marco ELOHA en México

En la Fig. 6.1 se observa el proceso científico que se realiza en la presente investigación con respecto al proceso completo del marco de trabajo ELOHA (Poff *et al.*, 2010).

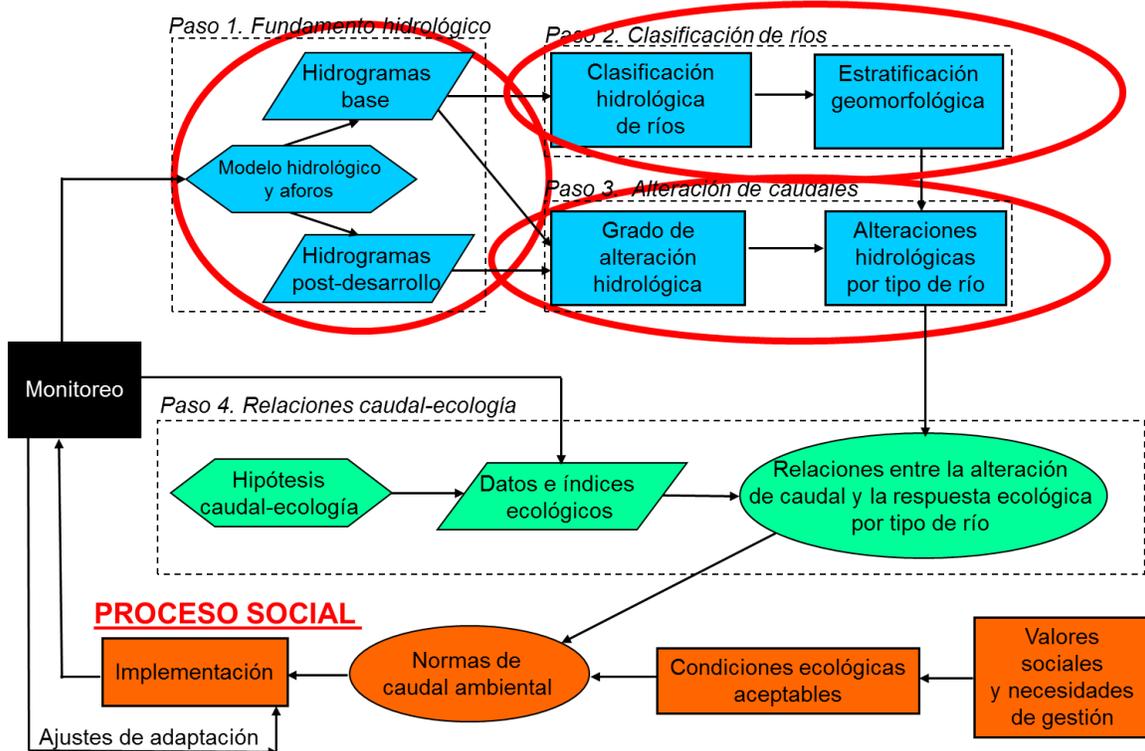


Fig. 6.1. Alcance de la presente investigación en la aplicación de ELOHA.

Fuente: The Nature Conservancy

Si bien es cierto que aplicar el marco de trabajo ELOHA implica una fuerte inversión en recursos de diversos tipos; es claro que las diversas tecnologías han avanzado y cada vez son más accesibles para todos. Es por ello que el objetivo principal de la presente investigación es idear las adaptaciones necesarias para hacer uso de los actuales recursos públicos disponibles en México. En la Fig. 6.2. se observa la metodología realizada para cada uno de los pasos desarrollados del ELOHA, con ejemplo de aplicación en la Cuenca del Río la Antigua (CRA).

Toda la información fue analizada con diferente software de uso libre para el análisis de matrices, análisis de información vectorial y series de tiempo, caracterización de cuencas y área de control con SIG, y modelación hidráulica.

Las características de la cuenca se han definido con el uso de Modelos de Elevación Digital (MDE) con definición de 15 m y tipo LiDAR con definición de 5 m. Con el mismo nivel de importancia y utilidad, se utilizó la información geográfica emitida por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Para identificar los usos de agua y su disponibilidad actual se analizaron los estudios de disponibilidad de agua superficial y subterránea en el área de estudio (realizados en base a NOM-011-CNA-2000), información oficial publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF); que a su vez toma en cuenta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa). Este análisis se concentró en dos variables utilizadas en la regionalización hidrológica, nombradas “Volumen superficial comprometido” y “Volumen subterráneo comprometido”.

Los pasos realizados del proceso científico de ELOHA se esquematizan en la Fig. 6.2.

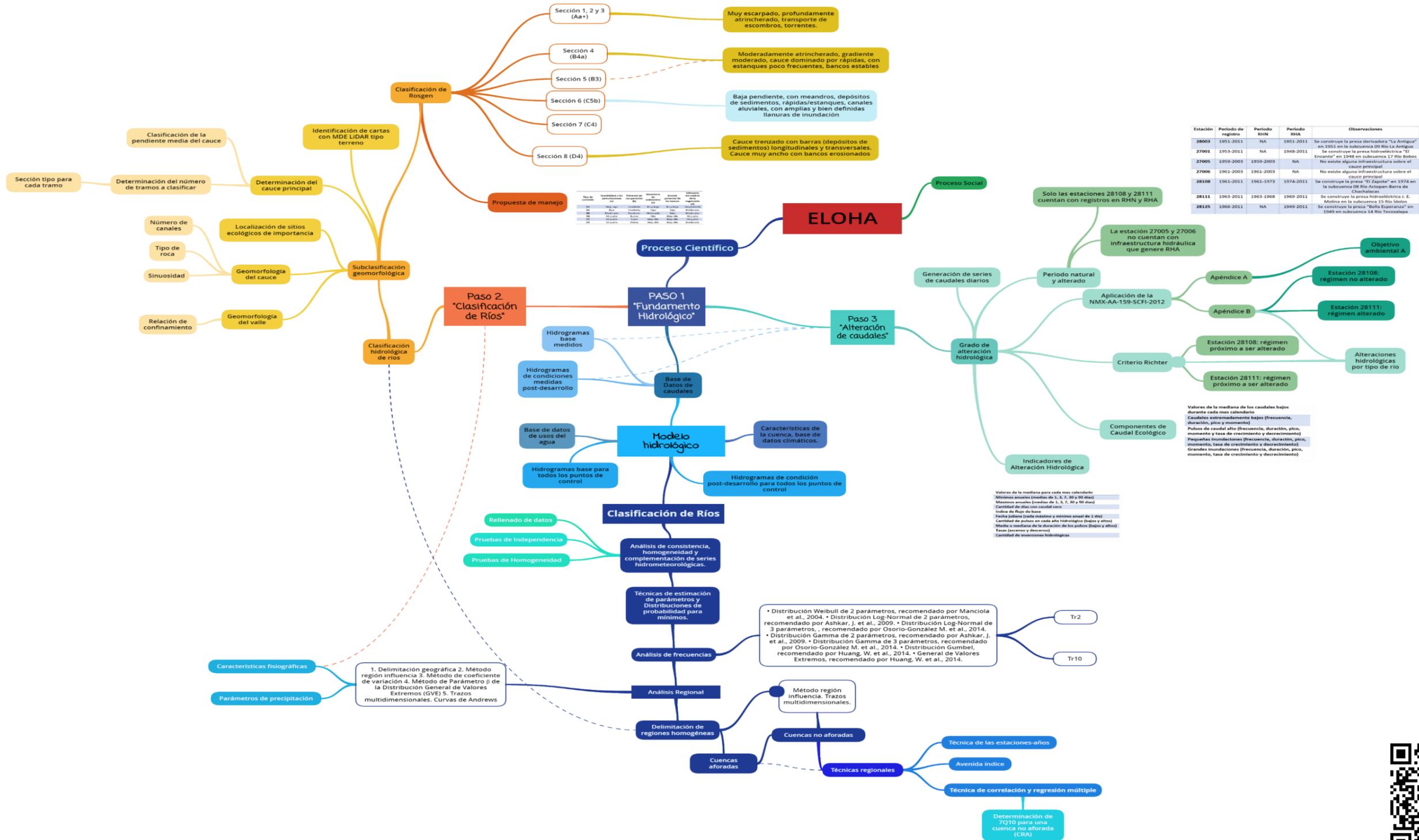


Fig. 62 Esquema de la metodología detallada para la aplicación de ELOHA en México, aplicación en CRA.



Fuente: Fuente propia  
Disponible en:  
<https://www.gcoconq.com/es-ES/p/7463998/>

### 6.2.2. Paso 1. “Clasificación hidrológica regional”

Actualmente, en casi todo el mundo, existen sistemas de toma de datos para poder realizar el fundamento hidrológico. La precisión es sumamente importante, especialmente en regiones con pocas estaciones hidrométricas, o deficiencias en ellas. Es por ello que técnicas de regionalización de características de caudal permiten generar estadísticas del flujo (Poff et al., 2010).

Para precisar más sobre las técnicas utilizadas en nuestro caso de estudio y siguiendo las recomendaciones realizadas por Poff et al., 2010 se describirán las técnicas estadísticas aplicadas para realizar el fundamento hidrológico en la zona de estudio.

El paso 1 definido como “funcionamiento hidrológico”, se adaptó para determinar una “Clasificación hidrológica regional” usando bases de datos hidrométricas que en conjunto con la base de datos meteorológica son la médula central del paso 1.

El objetivo general del paso 1 es fundamentar que ciertas cuencas funcionan hidrológicamente de manera similar. El soporte estadístico para la regionalización conlleva a diferentes etapas que van desde el análisis de la consistencia de las series de tiempo hidrométricas y meteorológicas, funciones de distribución de probabilidad corroboradas para gastos mínimos, técnicas de delimitación de regiones homogéneas y técnicas regionales para cuencas aforadas y no aforadas; corroborando las regiones de funcionamiento hidrológico similar.

La metodología realizada en este paso 1 del ELOHA se resume en:

Se selecciona una estación principal y a partir de ella una selección de estaciones hidrométricas a una distancia no mayor a 80 km de la zona de estudio, que contaran con un periodo de registro continuo de 10 años como mínimo y que más del 50% de los valores mínimos anuales fueran distintos de 0. La información hidrométrica se obtuvo del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS).

Con la finalidad de depurar y complementar la información hidrométrica disponible se realizó el siguiente proceso:

1. Complementación de series hidrométricas

Las series de tiempo presentaron una considerable falta de datos, los cuales se estimaron a través de modelos de regresión lineal simple a nivel diario. Una vez que se logró completar la serie de gastos (Q) para un mismo período común, se obtuvieron los gastos mínimos anuales promedio de 7 días consecutivos ( $7Q_{min}$ ).

En las cuencas aforadas, además se determina el  $Q_{med}$  anual (-mensual, dependiendo el nivel de detalle requerido) con el fin de calcular los parámetros geomorfológicos Rosgen (1994) para realizar el paso 2.

\*Nota\*. El cálculo de  $7Q_{10}$  se puede realizar para periodos de tiempo diferentes (anual, mensual, inclusive diario) dependiendo del objetivo del estudio. En este caso se decidió hacerlo a nivel anual.

2. Análisis de independencia (Prueba de Anderson). Sirve para verificar que los cauces aforados, no pertenezcan a una corriente regulada aguas arriba, es decir, que los escurrimientos son aleatorios y por lo tanto pueden ser modelados mediante una función de probabilidad y no por una función determinística (en este caso la política de operación de la estructura aguas arriba).

3. Análisis de homogeneidad. El análisis de homogeneidad nos permite identificar puntos de ruptura o cambio en la serie de tiempo, ya sea a causa de modificaciones en el proceso de toma de datos (cambio del personal, incorporación de nuevos aparatos de medición, reubicación de la estación), cambios antropogénicos (urbanización, deforestación), o modificaciones en

el patrón climático. Debido a que el análisis de frecuencias se realiza empleando métodos estacionarios, es necesario que las series de tiempo sean homogéneas (estacionarias) para poder extrapolar las funciones de distribución a los distintos periodos de retorno. Se requieren de diferentes pruebas debido a que cada una de ellas analiza la homogeneidad de las series con base en diferentes parámetros.

- i. Prueba estadística de Helmer, analiza los cambios de las desviaciones estándar con respecto a su media de toda la serie.
- ii. Prueba estadística de “t” de Student, analiza los cambios abruptos de la media dividiendo a la serie en dos bloques.
- iii. Regla de Cramer, analiza los cambios de la media, diferenciando tres bloques de la serie histórica.

En las tres pruebas se busca verificar si existe un cambio significativo en la serie de tiempo, para un nivel de significancia del 5%

4. Análisis de frecuencias, Requerido para estimar con la menor incertidumbre, el caudal mínimo para distintas probabilidades de no excedencia o periodos de retorno (especialmente,  $Tr_2$  y  $Tr_{10}$ ), se busca encontrar la población (función de distribución de probabilidad) a la cual pertenece la muestra tomada, siendo esta aquella con el menor error estándar de ajuste. Es por ello que cada FDP se realiza la estimación de parámetros por tres diferentes técnicas:

- i. Estimación por momentos
- ii. Método de máxima verosimilitud
- iii. Estimación por momentos “L”

Las FDP realizadas y comprobadas para mínimos son las siguientes.

- i. Distribución Weibull de 2 parámetros, recomendado por Manciola et al., 2004.
- ii. Distribución Log-Normal de 2 parámetros, recomendado por Ashkar, J. et al., 2009.
- iii. Distribución Log-Normal de 3 parámetros, recomendado por Osorio-González M. et al., 2014.
- iv. Distribución Gamma de 2 parámetros, recomendado por Ashkar, J. et al., 2009.
- v. Distribución Gamma de 3 parámetros, recomendado por Osorio-González M. et al., 2014.
- vi. Distribución Gumbel, recomendado por Huang, W. et al., 2014.
- vii. General de Valores Extremos, recomendado por Huang, W. et al., 2014.

Para seleccionar cuál análisis de frecuencias es el más adecuado para cada una de las estaciones analizadas se utiliza el método de selección de distribuciones nombrado Error Estándar de Ajuste (EEA). Una vez que se selecciona la FDP con el menor EEA, se procede al cálculo de los gastos asociados al periodo de retorno de 2 años y 10 años. El  $Tr_2$  y  $Tr_{10}$  son insumos necesarios en las técnicas de regionalización y técnicas regionales, así como en la determinación de parámetros geomorfológicos del paso 2.

5. De acuerdo al principal objetivo del paso 1 del ELOHA “Fundamento hidrológico”, se procede a aplicar diferentes técnicas para la regionalización. Se aplican cinco técnicas, debido a que se requiere definir la más adecuada en el área de estudio.
  - i. Delimitación Geográfica
  - ii. Método de región de influencia
  - iii. Método de Coeficiente de Variación

- 
- iv. Método del parámetro  $\beta$  de la Distribución General de Valores Extremos (GVE)
  - v. Trazos multidimensionales.

Debido a que estas técnicas requieren como insumos características fisiográficas y meteorológicas se hace un arduo proceso con SIG para su obtención. Con respecto a los datos de precipitación útiles en la regionalización se realiza un proceso de complementación y depuración de series hidrométricas y pluviométricas.

Al analizar los parámetros de precipitación recomendados por Reidy (2012) y Orsini (2011), se concluyó en sintetizarlos en sólo dos parámetros: Días con precipitación y la precipitación “antecedente”, siendo las sumas continuas del dato mensual de enero a abril el conteo de días con lluvia y lámina de precipitación de dichos días la precipitación antecedente.

Para definir una región homogénea en cuencas no aforadas solo es posible aplicar las técnicas de región de influencia y trazos multidimensionales. Debido a que únicamente requieren información de las características fisiográficas o climatológicas de la cuenca, otras técnicas requieren datos de gasto.

Cada técnica interpreta de manera diferente la homogeneidad de una región, y obtiene resultados diferentes, por ello el método de selección fue mínimo error estándar de ajuste al aplicar la técnica de correlación y regresión lineal múltiple al construir modelos para aquellas regiones homogéneas de las técnicas ii a v, que contuvieran al menos 3 estaciones hidrométricas. Los modelos se crean a partir de características fisiográficas y meteorológicas de las áreas drenadas por estas estaciones. La selección de los atributos o variables independientes se consiguió para las

combinaciones, de al menos  $n - 1$  características, que proporcionaron el menor error estándar de ajuste.

Para comprobar si una región es homogénea y que el modelo regional es capaz de estimar el  $7Q_{10}$  en cuencas no aforadas, se extrae, de una en una, cada una de las estaciones pertenecientes a esta región y se infieren los valores de  $7Q_{10}$  correspondientes a través de un nuevo modelo regional estimado con las estaciones restantes. El  $7Q_{10}$  estimado con el modelo regional se compara con los registros hidrométricos de las cuencas aforadas para verificar que los resultados que se obtienen son adecuados.

6. Específicamente para determinar el  $7Q_{10}$ , como límite mínimo para caudal ecológico en cuencas no aforadas dentro de la región homogénea se propone la aplicación de técnicas regionales.
  - i. Técnica de estaciones-año
  - ii. Técnica de Avenida Índice
  - iii. Técnica de correlación y regresión lineal múltiple. Misma que se aplica en el paso anterior.

En el apéndice 6.1. se encuentra la metodología detallada de cada uno de los procedimientos descritos.

### **6.2.3. Paso 2. “Clasificación geomorfológica regional”**

Al establecer un análisis con técnicas de regionalización, se parte de esta primera clasificación que toma las características fisiográficas principales de cada cuenca. Sin embargo, la presente investigación, pretende un análisis más detallado al proponer el método de cálculo de diversos parámetros geomorfológicos. La obtención de parámetros geomorfológicos se determina con análisis espacial con SIG.

---

#### Cuencas aforadas

Se logra detallar el parámetro de ancho/profundidad con resultados de modelación hidráulica en 1D de los gastos asociados a los Tr de 2 y 10 años. Ortofotos con escala 1:10,000 (INEGI), software como Google Earth, permiten consolidar una clasificación de río con la clave de Rosgen (1994,1996). Con la clasificación de Rosgen se finaliza con una propuesta de gestión de manejo para el área de estudio.

#### Cuencas no aforadas

Se realiza de la misma manera que en cuencas aforadas sin la obtención del parámetro de ancho/ profundidad, debido a que no se cuenta con alguna metodología segura para la definición de la “profundidad”.

Debido a la magnitud del área de estudio, se definió como alcance del presente estudio, realizar solo la clasificación del cauce principal de la cuenca hidrográfica del Río La Antigua, con la finalidad de aplicar las mismas propuestas de manejo y caudal ecológico en toda el área homogénea a la que pertenece.

Se procedió a utilizar la clave de Rosgen, 1996; traducido por López-Mora, 2007. Con la finalidad de ejemplificar la metodología para realizar la clasificación geomorfológica a menor escala, y llevar la propuesta de manejo de Rosgen a toda la Región Homogénea.

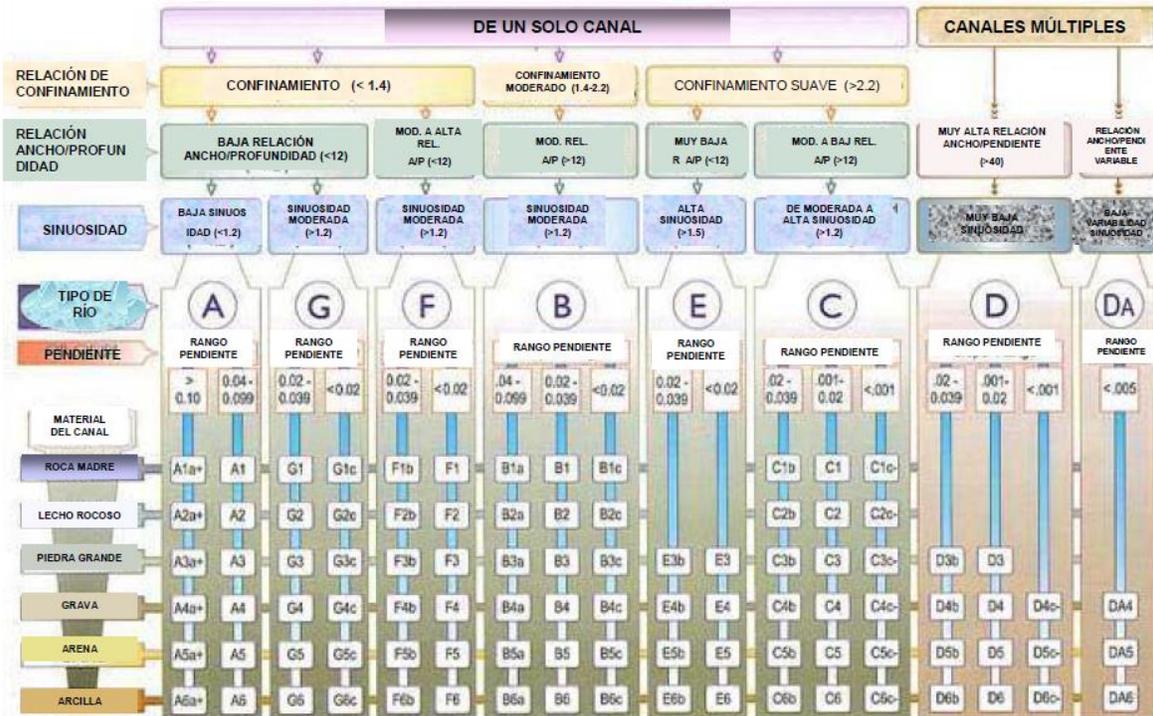


Fig. 6.3. Clave de clasificación de Ríos Naturales Rosgen (1994).

Para determinar los parámetros descritos en la Clave, se utilizó como base fundamental el modelo LiDAR tipo Terreno en el área de estudio e imágenes de satélite históricas y actuales de Google Earth.

### 6.2.3.1. Identificación de MDE de alta resolución LiDAR, tipo terreno

De acuerdo con las recomendaciones de Horacio & Ollero, 2011, se acredita como óptima una resolución de 10 m x 10 m en el modelo digital de elevación (MDE), para proceder a una clasificación geomorfológica con herramientas referidas a Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se definió que el MDE utilizado en esta etapa, es de tipo terreno con tecnología LiDAR (detección y medición a través de la luz) con una resolución horizontal de 5 m, obtenido del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía).

Debido a que el territorio nacional no cuenta con toda su superficie cubierta con MDE escala 1:10,000 es necesario determinar cuáles de las 413 cartas que conforman la cuenca cuentan con MDE tipo terreno.

Para determinarlo se consultó cada una de las claves cartográficas en la página de internet del INEGI en la sección de descargas de Datos de Relieve como se muestra en la Fig. 6.4.

The screenshot shows the INEGI website search interface. At the top, the INEGI logo and name are visible, along with navigation links for 'Inicio' and 'Contacto', and social media icons for 'Siguenos' on various platforms. Below the header, there is a 'Productos' section with a search bar containing the text 'E15A51A3' and a 'Buscar' button. The search results show 'Aproximadamente 4 resultados. (0.02 segundos)'. On the left, there are filter categories: 'Temas' (Relieve (4)), 'Entidad federativa' (Veracruz de Ignacio de la Llave (4)), and 'Tipo'. On the right, the search results are displayed in a table format. The first result is 'Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, Terreno Grid, con resolución de 5m Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m, Terreno, GRID, E15A51A3 - 2012 clave: E15A51A3 escala...'. The table details include: Edición: 2012, Escala: 1:10 000, Tema: Relieve, Clave: E15A51A3, and Descripción: Un Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LiDAR, es un registro de las elevaciones existentes sobre el nivel del mar derivado de la obtención de puntos. A small thumbnail image of a LiDAR point cloud is also visible next to the first result.

Edición	2012
Escala	1:10 000
Tema	Relieve
Clave	E15A51A3
Descripción	Un Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LiDAR, es un registro de las elevaciones existentes sobre el nivel del mar derivado de la obtención de puntos

**Fig. 6.4. Interfaz de búsqueda de claves de cartas con MDE de alta resolución LiDAR, tipo terreno con resolución de 5m.**

Se determinó el cauce principal con ayuda del software Soil and Water Assessment Tool (SWAT, 2012), que entre sus capacidades básicas obtiene características del sistema de drenaje en las subcuencas al contar con un algoritmo que analiza la dirección de flujo en base al MDE, mediante la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se corroboró con la red de drenaje de INEGI e imágenes en Google Earth.

### 6.2.3.2. Pendiente longitudinal

Posterior a la identificación del cauce principal de la cuenca en estudio, con ayuda de software libre como es el caso de SWAT, se continúa con el cálculo de la pendiente longitudinal del cauce.

Se inicia asignándole altimetría al eje del cauce. El proceso empieza con la descomposición de éste en puntos equidistantes, argumentado en 5 m, debido a la resolución del pixel del MDE. A estos puntos creados, se le adjudican valores de “z” (Altimetría del terreno); es decir, la elevación del pixel del MDE en cada punto con ayuda de SIG. Se procede a utilizar un procesador de matrices, para aplicar la Ecuación 6.1, para calcular la pendiente longitudinal.

$$P_L = \frac{z_i - z_{i+1}}{d}$$

**Ecuación 6.1**

Donde

$P_L$  = Pendiente

$z_i$  = Elevación en el punto  $i$

$z_{i+1}$  = Elevación en el punto  $i + 1$

$d$  = Distancia entre  $z_i$  y  $z_{i+1}$

Una vez calculado  $P_L$ , se agrupa cada punto en función de los intervalos de pendiente (%) del cauce definidos a continuación.

Rosgen (1994,1996), para la utilización de su clave propone la siguiente clasificación de rangos de pendiente, para agrupar cauces.

- <0,5% baja
- 0,5-2% moderada-baja
- 2-10% moderada alta
- >10% alta

### 6.2.3.3. *Geomorfología del cauce*

En la geomorfología del cauce se consideran los parámetros siguientes:

Lecho del canal:

- Ríos en roca
- Ríos de cantos y gravas
- Ríos arcillo-arenosos

El número de canales en el lecho:

- Ríos de canal único
- Ríos de canal múltiple
- En transición

Tanto el lecho del canal como el número de cauces, se identifican por medio de imágenes de Google Earth.

Para identificar el índice de sinuosidad se identifican tramos aguas abajo y aguas arriba de las secciones tipo. Para cada tramo se propone una longitud diferente.

El índice de sinuosidad. Se procederá a utilizar el modulo “Sinuosity” para SIG, en los tramos clasificados por la pendiente longitudinal.

- <1.05, recto
- 1.05-1.3, sinuoso
- 1.3-1.5, ameandremiento moderado
- >1.5, meandriforme

### 6.2.3.4. *Geomorfología del valle*

Para las cuencas no aforadas se requiere un análisis regional de gastos medios para proponer una profundidad y lograr determinar la relación ancho/profundidad requerida en la clave; luego de obtener estos valores de gastos se procede de la

misma manera que en cuencas aforadas. Para las cuencas aforadas se procede a modelar en HecRAS el gasto medio de  $Tr_2$  para identificar la profundidad promedio del tramo, que de manera paralela proporcionará el ancho de ribera (bankfull). Asimismo, se requiere el ancho máximo de la ribera, que se obtiene al modelar el  $Q_{med}$  de un  $Tr_{10}$ . Tanto la profundidad como ambos anchos son resultado de la modelación hidráulica.

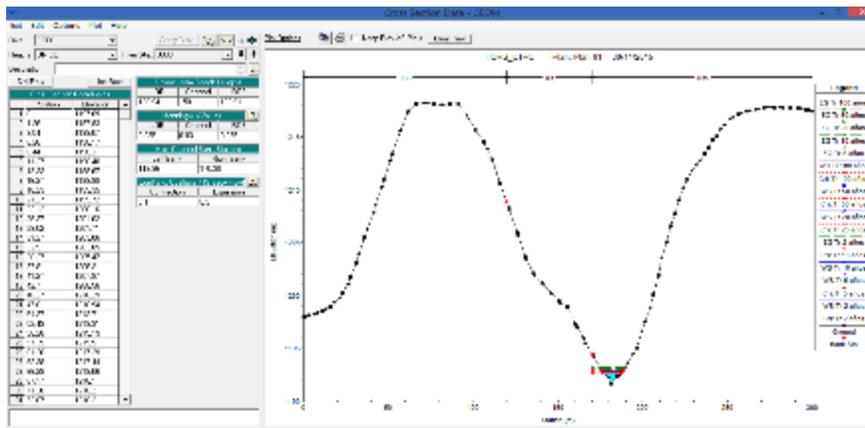


Fig. 6.5. Sección tipo para la medición de parámetros geomorfológicos.

Referido a la modelación, se procede a extraer la información geométrica del cauce del MDE con ayuda del software HEC GeoRAS y HEC-RAS. Con dicho software se procede a trazar secciones transversales sobre el tramo de cauce que se intersectan con el MDE adquiriendo datos altimétricos y planimétricos de éste. Acto seguido se calcula un conjunto de medidas básicas que sirven en la caracterización geomorfológica de la sección transversal de un río que, complementadas con otros parámetros de utilidad morfológica, sirven para la caracterización detallada (Horacio & Ollero, 2011). Simultáneamente se corrobora la información obtenida con Google Earth. Estas magnitudes se enumeran a continuación, refiriendo su ubicación en la Fig. 6.6:

1. Cota del máximo detectado a la izquierda del eje sobre el perfil transversal.
2. Distancia horizontal entre el máximo a la izquierda y el eje del cauce en el perfil transversal.
3. Cota del máximo detectado a la derecha del eje sobre el perfil transversal.

4. Distancia horizontal entre el máximo a la derecha y eje del cauce en el perfil transversal.
5. Diferencia de cota entre el máximo a la izquierda y la cota del eje del cauce en el perfil transversal.
6. Diferencia de la cota entre el máximo a la derecha y la cota del eje del cauce en el perfil transversal.
7. Distancia horizontal entre los dos máximos (izquierda y derecha), magnitud requerida en la clasificación de Rosgen.
8. Distancia horizontal del fondo de valle, magnitud requerida en la clasificación de Rosgen.
9. Distancia horizontal entre el punto inicial del fondo (izquierda) y la cota del eje del cauce en el perfil transversal.
10. Distancia horizontal entre el punto inicial del fondo (derecha) y la cota del eje del cauce en el perfil transversal.

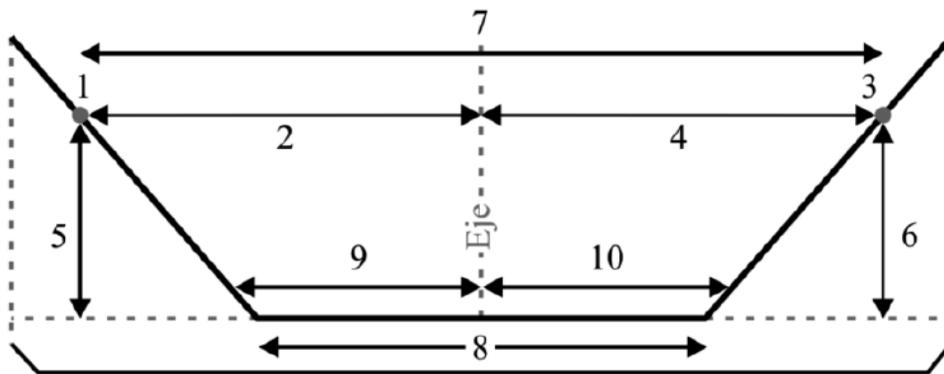


Fig. 6.6. Esquema acotado de un cauce.

Las anteriores magnitudes son la base de los siguientes parámetros referidos a la geomorfología del valle:

- Media de las diferencias de cota entre el eje del cauce y los máximos por la izquierda y por la derecha (5 y 6).
- Índice de encajamiento, fundamental en la clasificación de Rosgen.
- Simetría del ancho de valle

- Simetría de fondo de valle
- Pendiente talud izquierdo
- Pendiente talud derecho
- Pendiente media de taludes
- Pendiente total del valle

Para la utilización de la clave de Rosgen 1996, se procede a determinar clasificaciones en estos parámetros obtenidos.

El nivel de encajamiento (anchura/profundidad):

- <3 escarpe
- 3-12 muy encajado
- 12-22 moderadamente encajado
- 22-40 suavemente encajado
- >40 abierto

La anchura del fondo:

- Nula
- <50 m estrecho
- 50-250 m medio
- 250-1000 m ancho
- >1000 m muy ancho

#### 6.2.3.5. Clasificación de Rosgen (1994, 1996)

Finalmente, al contar con todos los parámetros para la utilización de la guía de Rosgen (1994) a Nivel II, se procede a nombrar y comparar cada clasificación obtenida, así como encontrar la propuesta de administración.

Cuando el análisis incluya más de 20 tramos a clasificar, se propone el uso de la teoría del sistema de clasificación bayesiana para proceder a árboles de combinaciones siendo una manera más eficiente. Existe diverso software que realiza esta actividad con un algoritmo muy amigable con el usuario. A continuación, se enlistan algunos ejemplos:

- Bayesian Classification and Feature Selection (BAYDA), Universidad de Helsinki, Finlandia
- AutoClass, Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA), Estados Unidos.
- Weka, de Universidad de Waikato, Hamilton, Nueva Zelanda.

#### **6.2.4. Paso 3. “Alteración hidrológica”**

Una vez definida la región hidrológicamente homogénea en el paso 1, y de manera paralela a la clasificación geomorfológica, se procede a la aplicación de un software libre llamado IHA, con el cual se pretende definir los Índices de Alteración hidrológica (Richter et al., 1995). Como insumo a la aplicación del IHA se analiza la información oficial de CONAGUA y el sistema nacional de seguridad de presas, del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), de infraestructura actual, permitiendo establecer un comportamiento hidrológico post impacto al determinar periodos para régimen hidrológico natural (RHN) y régimen hidrológico alterado (RHA) dividiendo la serie de tiempo a partir del año en que se construye la infraestructura. De igual forma, se utiliza la metodología establecida en la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 (SE, 2012) para evaluar la alteración de los ríos en México. Se comparan diferentes rangos de variación natural del régimen hidrológico ( $P_{33}$ ,  $P_{67}$ ,  $P_{25}$ ,  $P_{75}$ ), para estaciones con registro de presunto régimen natural; como umbrales de propuesta de régimen de caudal ambiental. El paso 3, sólo se aplica en cuencas aforadas.

#### 6.2.4.1. Generación de series de datos diarios

En ocasiones se puede contar con información suficiente para realizar un análisis de precipitación en un sitio de proyecto; sin embargo, en la mayoría de los casos dicha información es escasa o nula.

En los casos de datos de caudal, se procedió con un método basado en datos hidrométricos, en el siguiente orden:

1. Análisis de independencia y homogeneidad a detalle anual.
2. Análisis de correlación de estaciones vecinas.
3. Se procede a realizar una regresión lineal simple (RLS) de datos mensuales de la estación que mayor coeficiente de correlación tenga con respecto a la estación a rellenar.
4. Se rellena con la aplicación de los modelos de RLS.
5. Se verifica la homogeneidad e independencia anual con las series rellenadas diarias, para verificar que no se alteró el registro.

Para datos de lluvia utilizados en la regionalización, es necesario estimar valores intermedios entre las magnitudes conocidas, en lo que se conoce como *interpolación*, posterior a un análisis de independencia y homogeneidad.

Sean  $X_i$  e  $Y_i$  coordenadas en el punto  $i$  de  $n$  estaciones de medición.  $P_e$  es una estimación del proceso en un punto con coordenadas  $X_e$  e  $Y_e$ . Donde  $\omega_i$  son los factores de peso. El factor de peso, depende del método utilizado. La estimación puntual se hace a través de una combinación lineal del tipo:

$$P_e = \sum_{i=1}^n \omega_i P_i$$

**Ecuación 6.2**

En la presente aplicación se describe con mayor detalle en el Apéndice 6.2.1.A.

#### 6.2.4.2. Selección de rangos de variación

##### A. IHA-RVA

El rango de variación seleccionado para el análisis no paramétrico realizado (estadísticas en función de percentiles) fue comprendido entre el percentil 25 y 75, según las recomendaciones de Armstrong & Parker, 2003. De igual manera, se realiza un análisis de acuerdo a los umbrales definidos por Richter (1995), basado en el percentil 33 y 67, nombrado análisis de rangos de Variabilidad (RVA, siglas en inglés).

##### B. NMX-AA-159-SCFI-2012

La NMX-AA-159-SCFI-2012, considera el percentil 10 y percentil 90 como límites para clasificar la variación en el flujo de una corriente.

#### 6.2.4.3. Selección de periodo natural y alterado para cada serie

Existen 51 presas en la cuenca de estudio. Para realizar la selección del periodo natural y alterado se debe conocer la fecha de construcción de cada una de ellas.

El principal medio para conocer este tipo de información es a través del Sistema de Seguridad de Presas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Dicho sistema cuenta con datos actualizados del Inventario Nacional de Presas y sus componentes, que comprende ubicación, uso del agua, dimensiones, características y estado físico y operativo de las estructuras, en permanente proceso de verificación y actualización.

La consulta se realiza a través de la página de internet <http://201.116.60.136/inventario/hinicio.aspx> en la que proporcionando el nombre oficial o común de la presa se despliega la información con la que cuenta. En este sistema se consultó la información de las 51 presas generando una tabla con la fecha de construcción de cada una de ellas.

Para la determinación de la fecha de alteración del cauce, por subcuenca se tomaron en cuenta las características de las presas, principalmente:

- Volumen almacenado
- Superficie regada
- Gasto de la obra de toma

Tomando así la de mayor impacto para la cuenca.

#### *6.2.4.4. Indicadores hidrológicos de alteración hidrológica IHA*

Se utilizaron las series de caudales diarios empleadas en el paso 1 de la presente metodología.

Se procedió a la caracterización del rango natural de variación de caudales utilizando los parámetros hidrológicos del grupo I de los Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA, por sus siglas en inglés; Richter *et al.*, 1996).

#### *6.2.4.5. Definición de alteración NMX-AA-159-SCFI-2012*

Se realizó el análisis de alteración hidrológica siguiendo el apéndice B de la NMX-AA-159-SCFI-2012, la cual considera el  $P_{10}$  y  $P_{90}$ . Al igual que IHA, se requiere de datos a escala diaria con un mínimo de 20 años para cada régimen (natural, alterado o probablemente alterado). Está acotado a que si se cuenta con menos de 20 años, el análisis se realizará para años tipo húmedo, medio, seco y muy seco.

El procedimiento para determinar la alteración hidrológica de una corriente con base en los volúmenes mensuales y anuales de agua es el siguiente:

- i. Identificar las corrientes donde se realizará el estudio de los caudales ecológicos.

- ii. A partir de la estación hidrométrica más representativa de la zona de estudio, se determina el régimen de caudales ordinarios (máximos y mínimos) según el procedimiento que se detalla a continuación:
  - i. Ordenar a partir de la información hidrológica de la serie diaria, los caudales medios mensuales, separando las series en RHN; y en régimen actual o presumiblemente alterado (RHA).
  - ii. Organizar los caudales mensuales en años naturales para ambas series.
  - iii. Calcular para cada mes del año en la serie de RHN los percentiles 90 y 10, tanto mensuales como anuales.
- iii. Verificar si los caudales medios (RHA) a manera mensual y anual se encuentran contenidos en el régimen de caudal ordinario máximo (P90) y mínimo (P10) sugeridos por el RHN, en donde:
  - Si el régimen actual (RHA) cumple en magnitud mensual y anual más de un 50 % con relación al RHN, se considerará hidrológicamente no alterado.
  - Si el cumplimiento del régimen actual (RHA) es  $< 50\%$  en su magnitud mensual y anual con relación al RHN, se considerará alterado.

# 7. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

CASO DE ESTUDIO CUENCAS DEL GOLFO NORTE DE  
MÉXICO

## 7.1. DEFINICIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO

Para plantear la cuenca de estudio para la aplicación de la metodología adaptada de ELOHA para México en la propuesta de caudales ambientales, se aplicaron los criterios de la CONAGUA, 2011 para la Identificación de reservas potenciales de agua para el medio ambiente en México. Por ejemplo, presencia de presas, cuencas donde actualmente hay disponibilidad del recurso; es decir, no se encuentra concesionado el total del escurrimiento natural; la presión por uso agrícola y urbano, así como la presencia de áreas naturales protegidas. De este análisis, se identificaron las zonas de mayor factibilidad para la conservación del caudal ambiental y volúmenes anuales de reserva. Partiendo de las subcuencas de CONAGUA, se analizaron regiones que no están contempladas en las reservas, debido a que son áreas que ya tienen asignado presupuesto federal para determinar su caudal ecológico por metodologías holísticas. El análisis también tomó en cuenta las clasificaciones de acuerdo a la *Alteración Ecohidrológica de las cuencas de México*, de Cotler et al., 2010; los objetivos ambientales de la NMX-AA-159-SCFI-2012; y a gran escala la clasificación hecha por Vörösmonty et al., 2010.

Las cuencas preliminares propuestas se muestran en la Tabla 7.1. con un concentrado de características que ayudaron a la definición de una sola cuenca.

**Tabla 7.1. Cuencas propuestas para aplicar la metodología ELOHA en México.**

Región	Estado	Unidad	Territorio		Clima	Hp	Elv. media	Ob-A
			Costera	Continental				
NORTE	Dur	Los Ángeles		X	Seco-Estepario (bsw)	Verano	Alta	B
CENTRO	Ver	La antigua		X	Húmedo (Aw)	Verano	Media	A
SUR	Chis	Huehuetán	X		Húmedo (Af)	Todo el año	Media	B
CENTRO	Jal	Canoas		X	Templado (Cw)	Verano	Alta	C

Ob-A, refiere al objetivo ambiental publicado en la NMX-AA-159-SCFI-2012 (SE, 2012).

En la Fig. 7.1 se muestra la localización de cada una de las cuencas de la Tabla 7.1

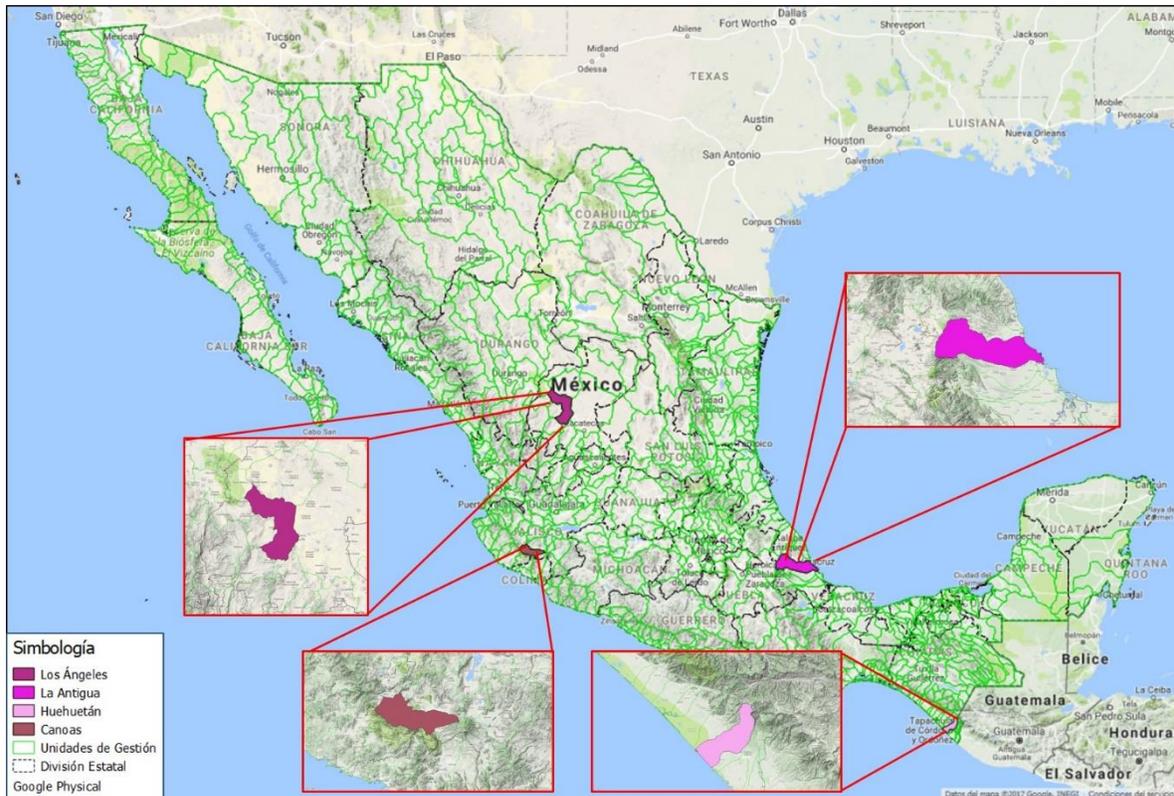


Fig. 7.1. Localización de las cuencas pre-seleccionadas.

Finalmente; se seleccionó la cuenca Río La Antigua, para aplicar el marco de trabajo ELOHA. Es importante mencionar, que es la cuenca del Río la Antigua el punto de partida para la aplicación de ELOHA, dado que esta metodología pretende analizar toda una región.

### *Cuenca Río la Antigua*

La cuenca del río La Antigua es una de las más importantes del centro del estado de Veracruz, abarca un área de 2 827 km<sup>2</sup>; se ubica entre los 19°05' y 19°34' de latitud norte, 96°06' y 97°16' de longitud oeste; pertenece a la región hidrológica número 28 del río Papaloapan y se localiza en la porción sudoccidental del Golfo de México (CONAGUA, 2001). Esta cuenca es de gran importancia por la agricultura, en ella se cultiva café, caña de azúcar, maíz, mango, entre otros



## 7.2. CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS

Una vez definida el área de estudio, se realizó un análisis exhaustivo del área de estudio. Los parámetros analizados a fondo se enlistan a continuación:

- Localización geográfica detallada
- Marco fisiográfico
- Geomorfología
- Clima
- Marco hidrológico
- Estaciones hidrométricas y meteorológicas
- Cuencas aforadas y no aforadas
- Marco ecológico
  - Uso de suelo y vegetación
  - Áreas naturales protegidas y Sitios RAMSAR
  - Sitios prioritarios acuáticos epicontinentales para la conservación de la biodiversidad (SPAECB)
  - Unidades de gestión y disponibilidad de agua
  - Objetivo ambiental NMX-AA-159-SCFI-2012
- Infraestructura hidráulica
- Distritos de riego

La descripción de cada uno de estos factores en el área de estudio está contenida en el apéndice 7.1.

## 7.3. PASO 1. “CLASIFICACIÓN HIDROLÓGICA REGIONAL”

### 7.3.1. Análisis de consistencia, homogeneidad y complementación de series hidrometeorológicas.

#### A. Rellenado de datos de gastos anuales ( $7Q_{min}$ )

Una vez rellenos los datos para cada serie de tiempo de las estaciones hidrométricas se calculó el gasto mínimo para 7 días consecutivos y se seleccionó el menor de cada año, los resultados se muestran en Tabla 7.2

Tabla 7.2. Registro relleno de gastos mínimos anuales promedio de 7 días consecutivos, para cada estación.

AÑO	27001	27005	27006	28003	28030	28039	28040	28069	28108	28111	28125	28134
1951				8.785	8.86							
1952				9.139	9.05	9.3	1.25					
1953	12.899			12.6	11.9	9.151	1.83					
1954	11.399			4.76	9.77	7.948	1.385					
1955	8			4.199	11.6	9.77	2.09	9.32				
1956	17.1			7.14	14.5	12.16	2.029	9.4				
1957	18.5			3.56	11.4	10.24	3.34	10				
1958	11.399			2.45	10	8.4	2.75	10.333				
1959	21.18			5.179	13.2	16.5	2.97	11.4				
1960	25.7	2.5		3.64	9.69	12.2	2.15	11.23				
1961	15.974	1.2		1.059	10.8	11.5	1.799	9.04				12.8
1962	13.5	2.107	3	2.5	10.3	11	1.854	7.1	1.208			19.6
1963	14	1.375	2.285	0.991	9.47	8.8	1.776	11.1	1.002			15.8
1964	16	2.25	1	0.767	5.11	10.44	2.549	10.2	1.005	0.091		15.6
1965	12	1.65	1.5	1.459	5	8.679	1.5	9.59	0.65	0.2		16.2
1966	19.2	1.1	3	9.599	6.055	14	3.163	9.125	1.198	0.103		23.4
1967	13	1.5	2.7	2	8.914	8.281	0.64	6.2	0.984	0.266	13.629	22.7
1968	14.188	1.92	4.2	5.099	9.473	8	0.574	4.333	1.133	0.311	12.783	22.4
1969	13.97	1.47	2.5	9	9.424	6.4	2.349	7.857	1.08	0.26	11.969	22.8
1970	12.29	0.354	2.514	3.441	10.825	8.105	2.6	6.8	1.47	0.31	12.499	20.4

AÑO	27001	27005	27006	28003	28030	28039	28040	28069	28108	28111	28125	28134
1971	12.957	0.83	2.5	3.28	10.3	5.833	1.5	5.315	1.462	0.147	10.5	17.4
1972	16.999	0.8	2.501	7.4	10.27	7	2.268	7.5	1.36	0.219	10.829	19
1973	16.4	2.7	3.324	6.866	12.18	5.7	2.269	7.648	2.2	0.17	10.6	18.5
1974	11.379	0.64	2.4	5.674	10.07	8.91	2.297	8.8	1.365	0.476	13.4	22.8
1975	9.171	1.834	2.667	2.232	11.33	9.4	1.805	7.389	1.273	0.138	11.22	19
1976	13.8	0.151	3.869	3.2	12.4	6.684	2.295	8.053	1.502	0.268	10.099	19.7
1977	14.027	1.232	1.5	5.7	11.37	7.11	1.79	10.92	1.133	0.328	9.134	20.4
1978	11.5	0.483	2.3	0.7	10.35	7.1	1.558	8.165	0.336	0.239	7.08	18.1
1979	18.035	2.2	4.499	1.823	10.14	8.2	2.094	10.24	1.4	0.547	17.169	14.2
1980	15.025	0.819	2.8	1.793	11.089	6.44	2.193	10.709	1.855	0.385	13.35	15.5
1981	14.6	2.15	3.023	7	13.07	4.51	1.94	8.42	1.654	0.712	16.7	18.3
1982	16	1.392	2.7	4.746	12.41	4.52	1.95	7.195	2.066	0.605	15.56	17.5
1983	8.199	0.179	2.288	0.544	9.69	2.48	0.515	5.78	1.417	0.289	12.079	14
1984	10.339	1.28	2.379	1.88	10.833	1.28	0.12	5.96	0.62	0.109	11.35	12.7
1985	12.286	1.9	5.399	5.1	10.13	2.15	0.376	7.56	1.04	0.6	11.85	16
1986	15.67	1.892	2.8	5.065	10.088	0.946	2.014	7.386	1.482	0.353	15.3	14.1
1987	15.785	2.326	3.078	7.718	10.505	0	1.596	7.887	1.641	0.643	16	15.7
1988	13.676	2.252	3.2	4.837	9.841	6.022	1.32	7.62	1.176	0.545	15.6	13.2
1989	10.917	0.945	2.9	1.158	8.96	3.33	0.993	7.017	0.84	0.264	13.375	12.6
1990	15.433	2.614	4.183	3.119	9.697	3.01	0.793	6.398	1.062	0.368	14.9	12.6
1991	15.335	1.607	2.519	0	10.19	6.774	1.63	5.518	0.847	0.402	14.5	14
1992	18.72	0.356	2.239	17.83	12.917	9.777	2.898	10.194	5.064	1.466	16.5	19.4
1993	11.3	1.64	1.83	5.49	10.6	3.068	1.827	7.82	2.13	0.567	11.5	13.2
1994	16.6	1.21	2.11	4.31	10.9	6.459	0	10.7	2.53	0.694	13	15.9
1995	13.833	0.989	1.67	0.299	10.5	3.01	0.791	6.21	1.33	0.345	11.2	13.2
1996	18.5	1.32	4.558	0.796	13.3	3.56	1.15	4.1	1.47	0.62	11.24	14
1997	9.5	1.65	4.51	3.3	11.8	3.06	0.82	7.15	1.21	0.538	13.9	15.5

AÑO	27001	27005	27006	28003	28030	28039	28040	28069	28108	28111	28125	28134
1998	7.25	1.083	1	0.322	10.838	6.076	0.433	4.311	1.44	0.299	12.688	13.8
1999	4.289	0.923	3.3	0.148	12.419	5.11	0.501	0.002	1.323	0.441	8.05	10.4
2000	19.166	1.7	5.616	0.5	13.165	7.374	0.378	2.443	1.944	0.55	5.675	12.5
2001	6	1.593	1.59	0.998	10.866	5.146	0.632	5.765	3.269	0.703	16.138	16
2002	23.216	0.996	1.176	0.738	11.624	6.751	0.68	5.783	1.003	0.45	13.635	14.1
2003	0.532			0.743	10.628	4.5	0.34	3.409	0.152	0.415	15.264	13.5
2004	8.18			8.447	10.86	10.252	1.686	4.783	2.274	0.787	16.285	22
2005	3.014			0.616	9.544	8.015	0.115	5.598	2.427	0.524	14.23	15.6
2006	10.5			3.792	8.506	4.961	0.123	7.978	1.365	0.36	13.816	
2007	18.132			14.624	8.202	0	0		0.887	0.457	17.79	
2008	16.908			1.463	7.306	0	0.143		1.37	0	15.38	12.9
2009	26.492			2.275	9.855	4.84	0		1.942	0.45	16.811	
2010	26.24			2.55	10.976	4.596	0.514		1.79	0	19.083	
2011	23.183			4.34	10.556	6.05	0.974		8.498	0	18.031	

*B. Independencia de las series*

A continuación, se muestran los datos y la gráfica del correlograma de la estación 27001, analizados para corroborar la independencia de eventos con respecto al tiempo. Los resultados que se muestran son para las series una vez rellenadas. Las gráficas y correlogramas para cada estación se colocaron en el apéndice 7.2.

**Tabla 7.3. Datos correlograma, estación 27001.**

K	rk	LS	LI
1	0.115	0.238	-0.272
2	0.065	0.240	-0.275
3	-0.172	0.242	-0.277
4	-0.022	0.244	-0.280
5	-0.188	0.246	-0.283
6	0.061	0.248	-0.286
7	0.059	0.250	-0.288
8	0.244	0.252	-0.291
9	-0.014	0.254	-0.294
10	0.085	0.257	-0.298
11	-0.052	0.259	-0.301
12	-0.010	0.262	-0.304
13	-0.014	0.264	-0.308
14	0.127	0.267	-0.311
15	-0.072	0.269	-0.315
16	-0.058	0.272	-0.319
17	0.005	0.275	-0.323
18	-0.066	0.278	-0.327
19	-0.015	0.281	-0.331
20	0.023	0.284	-0.335
<b>N=59</b>			
<b>K=20</b>			

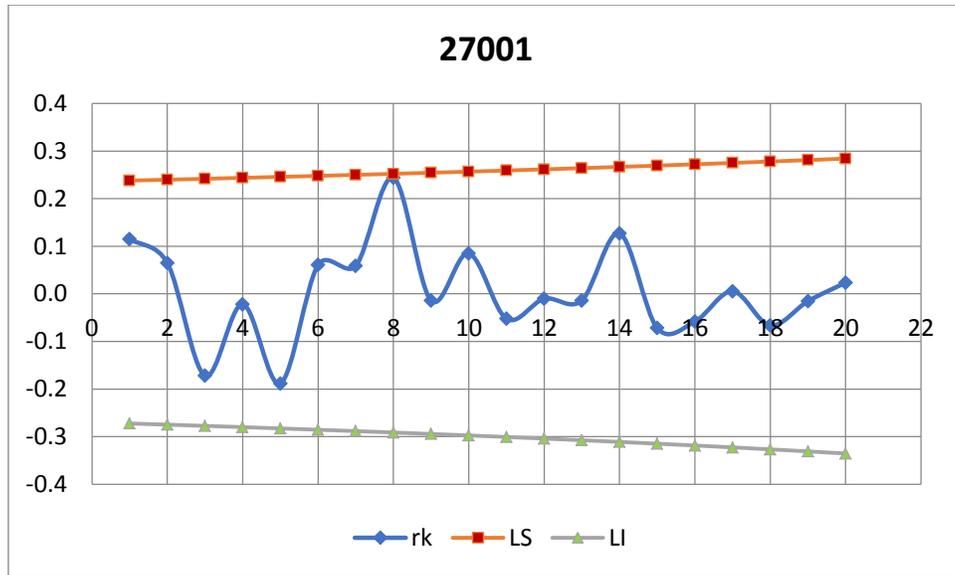


Fig. 7.3. Correlograma, estación 27001.

Observando los correlogramas correspondientes a cada estación se concluye que 7 estaciones son independientes ya que menos del 10 % de los puntos graficados están fuera de los límites de confianza. 5 estaciones son dependientes.

a) Estaciones independientes

Las estaciones que son estadísticamente independientes son las siguientes:

- 27001
- 27005
- 27006
- 28003
- 28108
- 28111
- 28125

Sólo con estas series de tiempo procedentes de estaciones hidrométricas, se procede a la aplicación de algunas técnicas estadísticas con la finalidad de definir algún comportamiento homogéneo en el área de estudio.

b) Estaciones dependientes

En seguida se mencionan las 5 estaciones que resultaron dependientes. Se recomienda hacer mayor análisis de ellas, como identificar si existe un control

aguas arriba, debido a que se identifica que no tiene un comportamiento completamente aleatorio.

- 28030
- 28039
- 28040
- 28069
- 28134

Las pruebas de Independencia son utilizadas para demostrar que los valores que conforman la serie son aleatorios. Esta afirmación implica que la probabilidad de ocurrencia de cualquiera de ellos no depende significativamente de la ocurrencia del o de los valores precedentes, y su efecto en la probabilidad de ocurrencia de los datos posteriores es mínima. En las estaciones no independientes, los valores de  $7Q_{min}$  son recurrentes desde abril a mayo en los registros analizados; para algunos casos se extiende desde diciembre hasta agosto.



Fig. 7.4. Mes de ocurrencia de  $7Q_{min}$  en estaciones no independientes.

### C. Homogeneidad de las series

Las pruebas de Homogeneidad evalúan si todos los valores que conforman la muestra, provienen estadísticamente de una misma población. Para ello es necesario dividir la muestra en dos o más grupos, y se comparan los estadísticos de la muestra: media, mediana, varianza, entre otros.

Se presentan las pruebas de homogeneidad para la estación 27001. Los resultados de las estaciones restantes se concentraron en el apartado 7.3.

Los resultados de la aplicación de la prueba estadística de Helmert se encuentran en la Tabla 7.4.

**Tabla 7.4. Prueba de homogeneidad, Helmert. Estación 27001.**

Estación 27001			
Prueba de homogeneidad			
Helmert			
Año	7QMIN (m3/s)	Signo	Resultado
1952	294.38	+	
1953	136.45	-	C
1954	122.78	-	S
1955	85.11	-	S
1956	160.95	+	C
1957	144.31	+	S
1958	122.24	-	C
1959	185.06	+	C
1960	210.71	+	S
1961	126.24	-	C
1962	152.47	+	C
1963	117.10	-	C
1964	136.58	-	S
1965	125.64	-	S
1966	161.25	+	C
1967	108.04	-	C
1968	101.47	-	S
1969	127.84	-	S
1970	134.22	-	S

<b>Estación 27001</b>			
<b>Prueba de homogeneidad</b>			
<b>Helmert</b>			
<b>Año</b>	<b>7QMIN (m3/s)</b>	<b>Signo</b>	<b>Resultado</b>
1971	127.16	-	S
1972	136.21	-	S
1973	163.84	+	C
1974	123.90	-	C
1975	127.76	-	S
1976	127.02	-	S
1977	120.27	-	S
1978	121.73	-	S
1979	160.30	+	C
1980	136.61	-	C
1981	135.22	-	S
1982	131.00	-	S
1983	105.85	-	S
1984	138.72	+	C
1985	118.79	-	C
1986	122.94	-	S
1987	126.77	-	S
1988	114.01	-	S
1989	89.71	-	S
1990	133.92	-	S
1991	120.23	-	S
1992	150.53	+	C
1993	131.43	-	C
1994	128.66	-	S
1995	109.64	-	S
1996	150.07	+	C
1997	98.62	-	C
1998	194.43	+	C
1999	130.93	-	C
2000	141.87	+	C
2001	152.99	+	S
2002	172.08	+	S
2003	78.29	-	C
2004	112.11	-	S
2005	74.68	-	S
2007	148.61	+	C
2008	183.62	+	S

Estación 27001			
Prueba de homogeneidad			
Helmert			
Año	7QMIN (m3/s)	Signo	Resultado
2009	189.11	+	S
2010	190.71	+	S
2011	163.86	+	S

S, sin cambio  
 C, con cambio

MEDIA	137.92	NO HOMOGÉNEA	
S	34		
C	24		
S-C	10		
-7.62	≤	10	≤ 7.62

Al analizar los cambios con respecto a la media (mayor [+] o menor [-]), y consecutividad de los cambios con respecto al inmediato anterior (con cambio “c” y sin cambio “s”); se identifica que la estación 27001, no es homogénea.

Ahora bien, también se aplica el test de homogeneidad de Student, con el fin de identificar cambios abruptos en la media al ser dividido en dos partes el registro hidrométrico. Los resultados se presentan en la Tabla 7.5.

Tabla 7.5. Prueba de homogeneidad, Student. Estación 27001.

Prueba T-Student			
Total		59	
Serie 1		Serie 2	
n <sub>1</sub>	29	n <sub>2</sub>	30
x <sub>1</sub>	141.30	x <sub>2</sub>	134.65
S <sub>1</sub> <sup>2</sup> =Var	1485.98	S <sub>2</sub> <sup>2</sup> =Var	987.48

td	0.72
t	2.00
Homogénea	

Se interpreta que la primera mitad es homogénea con respecto a la media de la segunda mitad. Es decir, el cambio en las medias no es estadísticamente significativo, para un nivel de significancia del 5%.

**Tabla 7.6. Prueba de homogeneidad de Cramer. Estación 27001.**

Prueba de Cramer			
Total		59	
Serie 1		Serie 2	
$n_{60}$	35	$n_{30}$	17
<b>Media 60</b>	134.44	Media 30	142.37
<b>S<sub>60</sub></b>	29.57	S <sub>30</sub>	38.24
$\tau_{60} =$	-0.099	$\tau_{30} =$	0.127
<b>t<sub>60</sub></b>	0.914	t <sub>30</sub>	0.614
<b>Homogénea</b>		Homogénea	

Se consideran 3 bloques, el primero, del tamaño total de la muestra  $n$ ; el segundo de tamaño  $n_{60}$  (60% de los últimos valores de la muestra  $n$ ); y el tercero de tamaño  $n_{30}$  (30% de los últimos valores de la muestra  $n$ ). Se interpreta que no existe diferencia significativa en la media de cada uno de los tres bloques, para un nivel de significancia del 5%.

a) Resumen

El resumen por cada estación, cada prueba y el resultado final de las pruebas de homogeneidad se presenta en la Tabla 7.7.

**Tabla 7.7. Resumen de las pruebas de Homogeneidad.**

CLAVE	Helmert	T-Student	Cramer	Resultado
<b>27001</b>	No homogénea	Homogénea	No homogénea	No homogénea
<b>27005</b>	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
<b>27006</b>	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
<b>28003</b>	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
<b>28108</b>	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
<b>28111</b>	No homogénea	Homogénea	No homogénea	No homogénea
<b>28125</b>	No homogénea	Homogénea	No homogénea	No homogénea

La variación de los resultados para cada prueba es significativa, mientras que para la prueba de Helmert resultó solo una estación homogénea, 27006; para la prueba T-Student todas son homogéneas; y para Cramer cuatro son homogéneas: 27005, 27006, 28003, 28108; sin embargo, ya que ninguna prueba es superior a las demás, en la combinación de resultados 3 de las 7 estaciones fueron no homogéneas.

Como consecuencia de este análisis, pese que se había planteado el análisis con base al  $7Q_{10}$ , pero se cuenta con áreas de control no homogéneas se propone el  $7Q_2$ , dado que  $7Q_2 > 7Q_{10}$ , como propuesta para reducir la incertidumbre.

En cualquier análisis hidrológico es básico analizar la inconsistencia de la información con las pruebas de independencia y homogeneidad.

### 7.3.2. Análisis de frecuencias con diferentes técnicas de estimación de parámetros

A manera de ejemplo se colocan los estadísticos de la muestra y los errores estándar de ajuste de la estación 27001, bajo las diferentes técnicas de estimación de parámetros y el cálculo del parámetro de selección EEA. Los cálculos para todas las estaciones, se encuentran en el apéndice 7.4.

**Tabla 7.8. Estadísticos de la muestra, estación 27001.**

n =	59
Media $\bar{X}$ =	137.91 m <sup>3</sup> /s
Varianza $S^2$ =	1222.35
Desviación estándar $S$ =	34.96
Coefficiente de asimetría $g$ =	1.67
Coefficiente de curtosis $K$ =	8.99
Coefficiente de variación $CV$ =	0.25

**Tabla 7.9. Errores estándar de ajuste y distribución seleccionada, estación 27001.**

Análisis de distribución por momentos	
1. Distribución normal.	21.09
2. Distribución log normal (2 parámetros).	10.98
3. Distribución log normal (3 parámetros).	9.31

4. Distribución de valores extremos tipo I Gumbel).	9.45
5. Weibull-2.	141.73
6. Distribución gamma (2 parámetros).	11.22
7. Distribución gamma (3 parámetros).	9.80
8. General de valores extremos	8.99
<b>Análisis de distribución por máxima verosimilitud</b>	
9. Distribución normal.	21.09
10. Distribución log normal (2 parámetros).	10.98
11. Distribución log normal (3 parámetros).	29.36
12. Distribución de valores extremos tipo I (Gumbel).	9.40
14. Distribución gamma (2 parámetros).	11.66
15. Distribución gamma (3 parámetros).	11.93
<b>Análisis de distribución por momentos-L</b>	
16. Distribución normal.	24.55
17. Distribución gamma (2 parámetros).	32.95
18. Distribución de valores extremos tipo I (Gumbel).	32.78

A. Funciones de Distribución de Probabilidad para gastos mínimos

Se calcularon los eventos mínimos de diseño para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, -para efectos gráficos se calculó el Tr de 100, 500, 1000, 5000 y 10000 años- de la distribución seleccionada para cada una de las estaciones y se graficaron junto con los datos originales contra los periodos de retorno en escala logarítmica, a manera de ejemplo se coloca la estación 27001, la totalidad de estaciones se encuentran en el apéndice 7.5.

El menor EEA se obtuvo en la FDP GVE, con análisis de distribución por momentos, misma que permite el cálculo de los gastos asociados para diferentes Tr, Tabla 7.10.

**Tabla 7.10. Eventos de diseño de la FDP GVE, estación 27001.**

T <sub>r</sub> (años)	F(x)	Q min (m <sup>3</sup> )
2	0.50	130.99
5	0.80	110.37
10	0.90	101.98
20	0.95	95.95
50	0.98	89.94

En la Fig. 7.5, se observan los gastos 7Q del registro de la estación 27001 y los gastos calculados con la FDP GVE por momentos.

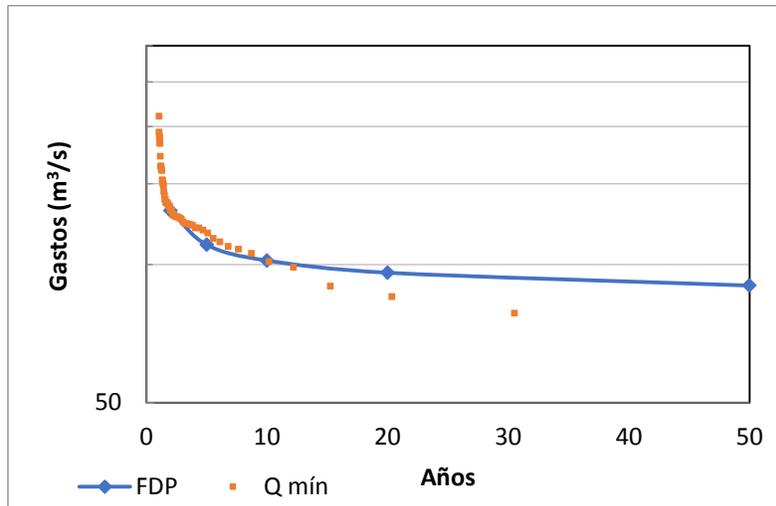


Fig. 7.5. Eventos de diseño contra datos reales, estación 27001.

### 7.3.3. Análisis regional

#### A. Características fisiográficas

El primer paso fue obtener las características fisiográficas de la subcuenca de estudio de cada estación. Esto se hizo con ayuda del programa de sistemas de información geográfica, apoyándose en información de INEGI, como son los shape files de redes hidrográficas asociadas a cada subcuenca de la zona de estudio y el modelo digital de elevaciones con elevaciones a cada 15 m. Se empleó la metodología descrita en el libro de *Técnicas estadísticas en Hidrología* (Escalante, 2008) para la definición de algunas características fisiográficas.

A continuación, se describen las características de la cuenca y los cauces de mayor importancia por sus efectos en la relación precipitación-escorrentamiento.

En la Fig. 7.6 se muestra la cuenca donde se encuentran ubicadas las estaciones, sobre la región hidrológica 28 y 27.

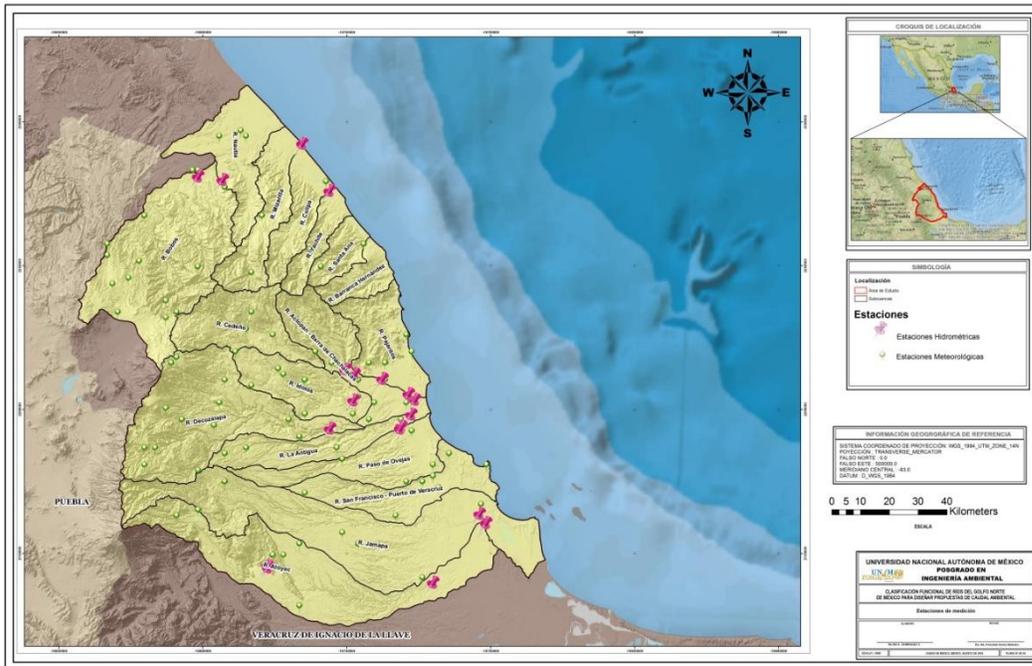


Fig. 7.6. Ubicación de estaciones hidrométricas y las cuencas que drenan.

Para determinar las características de cada subcuenca lo primero que se hizo fue delimitar la cuenca en SIG, corroborándose que la delimitación fuera correcta con lo reportado en BANDAS que afora cada estación hidrométrica, Tabla 7.11. Verificándose que la delimitación tuvo algunas variaciones, pero estuvo en general en un orden adecuado con respecto a lo reportado.

Tabla 7.11. Subcuencas delimitadas contrastadas con lo reportado en BANDAS.

No.	Clave	Área drenada BANDAS [km <sup>2</sup> ]	Área drenada SIG [km <sup>2</sup> ]	Diferencia [km <sup>2</sup> ]
1	27001	1467	1512.59	45.59
2	27005	173	167.33	-5.67
3	27006	456	433.79	-22.21
4	28003	2234	2136.42	-97.58
5	28108	1933	1887.64	-45.36
6	28111	455	475.70	20.70
7	28125	1644	1563.02	-80.98

En la Tabla 7.12 se presenta un resumen con las características fisiográficas determinadas para cada una de las subcuencas.

**Tabla 7.12. Características fisiográficas.**

Núm. m.	Descripción	Unidades	Estaciones hidrométricas						
			27001	27005	27006	28003	28108	28111	28125
1	Área	km <sup>2</sup>	1512.59	167.33	433.79	2136.42	1887.64	475.70	1563.02
2	Longitud del parteaguas	km	321.67	106.51	216.62	386.69	398.90	162.27	295.26
3	Coef. de desarrollo del parteaguas	Ad	2.33	2.32	2.93	2.36	2.59	2.10	2.11
4	Parámetro de forma	km <sup>-1</sup>	0.21	0.64	0.50	0.18	0.21	0.34	0.19
5	Longitud de la cuenca	km	69.62	27.96	54.38	88.91	81.29	41.23	76.96
6	Ancho medio	km	21.73	5.98	7.98	24.03	23.22	11.54	20.31
7	Pendiente media de la cuenca	Ad	0.31	0.24	0.35	0.31	0.21	0.16	0.34
8	Elevación máxima de la cuenca	m.s.n.m.	4204.00	1943.00	2682.00	4204.00	3339.00	1584.00	4204.00
9	Elevación media de la cuenca	m.s.n.m.	2074.50	952.00	1347.00	2105.00	1664.50	731.50	2011.50
10	Elevación mínima de la cuenca	m.s.n.m.	55.00	39.00	-12.00	-6.00	10.00	121.00	181.00
11	Longitud del cauce principal	km	94.69	29.78	65.54	160.10	106.43	62.96	108.58
12	Coef. de sinuosidad	Ad	1.36	1.06	1.21	1.80	1.31	1.53	1.41
13	Pendiente media del cauce principal	Ad	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
14	Tiempo de concentración	h	9.15	4.93	8.35	16.66	10.32	6.84	10.98
15	Relación de elongación	Ad	0.63	0.52	0.43	0.59	0.60	0.60	0.58
16	Centroide x	km	691523.00	713946.00	725708.00	716759.00	734998.00	736546.00	707818.00
17	Centroide y	km	2188891.00	2205090.00	2200546.00	2139434.00	2164309.00	2153293.00	2141714.00
18	Elevación del centroide de la cuenca	km	1534.09	469.45	820.61	1404.60	1023.25	753.47	1719.40
19	Precipitación media mensual Enero	mm	57.88	75.38	71.18	27.81	31.82	22.83	42.90
20	Precipitación media mensual Febrero	mm	53.59	71.81	69.31	25.26	30.22	21.16	38.44
21	Precipitación media mensual Marzo	mm	45.70	62.21	59.69	26.81	28.23	19.09	42.79
22	Precipitación media mensual Abril	mm	63.45	80.43	75.53	34.56	37.15	26.06	57.10
23	Precipitación media mensual Mayo	mm	82.63	90.23	87.02	76.57	60.42	55.55	105.49
24	Precipitación media mensual Junio	mm	200.88	175.44	185.54	232.09	200.52	192.98	289.62

<b>25</b>	Precipitación media mensual Julio	mm	179.65	174.80	186.24	243.67	211.49	207.61	285.48
<b>26</b>	Precipitación media mensual Agosto	mm	198.05	189.24	192.87	202.84	186.97	168.93	264.52
<b>27</b>	Precipitación media mensual Septiembre	mm	307.76	304.56	300.13	225.14	224.94	194.43	299.87
<b>28</b>	Precipitación media mensual Octubre	mm	215.25	215.17	191.69	104.36	105.96	81.23	152.91
<b>29</b>	Precipitación media mensual Noviembre	mm	114.71	140.26	126.38	45.85	50.11	34.71	69.15
<b>30</b>	Precipitación media mensual Diciembre	mm	68.31	89.92	82.63	27.40	33.25	23.09	47.09
<b>31</b>	Precipitación Anual promedio	mm	1573.88	1636.67	1611.15	1267.97	1207.37	1052.66	1695.90
<b>32</b>	Precipitación antecedente (Enero-Marzo)	mm	157.43	210.67	201.03	79.42	90.00	62.27	121.50
<b>33</b>	Días con lluvia antecedente (Enero-Marzo)	días	28.96	32.13	33.11	17.69	21.93	19.89	25.48
<b>34</b>	Volumen superficial comprometido	hm3	878.75	1.15	2.22	7.40	139.52	18.96	141.91
<b>35</b>	Volumen subterráneo comprometido	hm3	7.07	0.02	0.06	4.73	10.56	1.59	0.90
<b>36</b>	Volumen represado	hm3	0.25	0.00	0.00	0.00	0.25	1.15	0.32

## B. Parámetros de precipitación

Al igual que la información hidrométrica, se le realizó un proceso para verificar la consistencia, homogeneidad y complementación de las series de datos pluviométricos. La particularidad en los datos pluviométricos radica en que las pruebas de independencia y homogeneidad se hacen antes y después de la complementación. Los resultados de este análisis se encuentran en el apéndice 7.6.

### *Días con precipitación*

En el apéndice 7.7 se muestran los resultados obtenidos para los días con lluvia: de enero, febrero, marzo y abril de cada una de las 64 estaciones, datos con los que se realizaron los rasters para determinar el valor para cada área drenada de las estaciones depuradas en las correspondientes regiones homogéneas.

### *Precipitación antecedente*

En el apéndice 7.8 se muestran los resultados para la lluvia antecedente (mm): enero, febrero, marzo y abril de cada una de las 64 estaciones, datos con los que se realizaron los rasters para determinar el valor para cada área drenada de las estaciones depuradas en las correspondientes regiones homogéneas.

Tabla 7.13. Parámetros de lluvia para cada estación de área de control.

Num. Pmtr.	Descripción	Und.	Estaciones hidrométricas						
			27001	27005	27006	28003	28108	28111	28125
19	Precipitación media mensual Enero	mm	57.88	75.38	71.18	27.81	31.82	22.83	42.90
20	Precipitación media mensual Febrero	mm	53.59	71.81	69.31	25.26	30.22	21.16	38.44
21	Precipitación media mensual Marzo	mm	45.70	62.21	59.69	26.81	28.23	19.09	42.79
22	Precipitación media mensual Abril	mm	63.45	80.43	75.53	34.56	37.15	26.06	57.10
23	Precipitación media mensual Mayo	mm	82.63	90.23	87.02	76.57	60.42	55.55	105.49
24	Precipitación media mensual Junio	mm	200.88	175.44	185.54	232.09	200.52	192.98	289.62
25	Precipitación media mensual Julio	mm	179.65	174.80	186.24	243.67	211.49	207.61	285.48
26	Precipitación media mensual Agosto	mm	198.05	189.24	192.87	202.84	186.97	168.93	264.52
27	Precipitación media mensual Septiembre	mm	307.76	304.56	300.13	225.14	224.94	194.43	299.87
28	Precipitación media mensual Octubre	mm	215.25	215.17	191.69	104.36	105.96	81.23	152.91
29	Precipitación media mensual Noviembre	mm	114.71	140.26	126.38	45.85	50.11	34.71	69.15
30	Precipitación media mensual Diciembre	mm	68.31	89.92	82.63	27.40	33.25	23.09	47.09
31	Precipitación Anual promedio	mm	1573.88	1636.67	1611.15	1267.97	1207.37	1052.66	1695.90
32	Precipitación antecedente (Enero-Abril)	mm	157.43	210.67	201.03	79.42	90.00	62.27	121.50
33	Días con lluvia antecedente (Enero-Abril)	días	28.96	32.13	33.11	17.69	21.93	19.89	25.48

### C. Delimitación de regiones homogéneas

Para la delimitación de las regiones homogéneas en el proyecto, se emplearon las siguientes técnicas:

- Delimitación geográfica
- Técnica del parámetro de forma de la Distribución General de Valores Extremos (GVE)
- Método de los Coeficientes de Variación (Cv)
- Método región de influencia
- Método de Trazos Multidimensionales. Curvas de Andrews

Los resultados de la aplicación de cada una de las técnicas descritas, se describen en el apéndice 7.9.

A continuación, se presenta un concentrado de las regiones homogéneas de todas las técnicas aplicadas, Tabla 7.14.

**Tabla 7.14. Regiones homogéneas resultantes de todas las técnicas.**

Estación/Técnica	Delimitación geográfica	Método región influencia	Método de distribución GVE	Método de coeficiente de variación CV	Trazos multidimensionales.
27001	1	1	1	1	1
27005	1	2	2	1	2
27006	1	2	1	1	2
28003	1	1	2	2	1
28108	1	1	1	2	1
28111	1	2	2	2	2
28125	1	1	2	1	1

Se seleccionaron las regiones delimitadas por la técnica del CV Fig. 7.77. al ser congruentes con los límites de las regiones hidrológicas 27 y 28 establecidos por CONAGUA. Además de ser congruente con la ubicación geográfica de la delimitación, dirección de flujo y fisiografía.

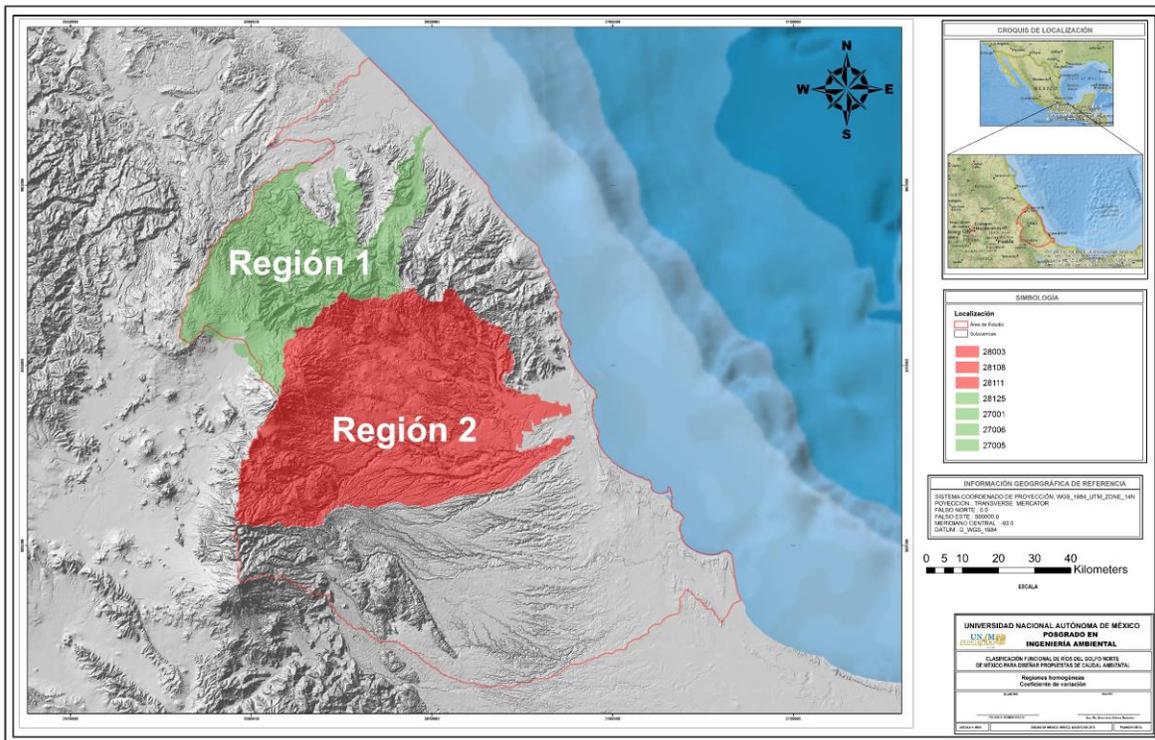


Fig. 7.7. Esquema de resultados obtenidos en la técnica de coeficiente de variación.

#### D. Técnicas regionales

El análisis regional suministra la forma de inferir eventos asociados a diferentes periodos de retorno en sitios con escasa o nula información, a través del empleo de las características fisiográficas y meteorológicas de la cuenca en estudio y/o las cuencas vecinas. En las dos regiones homogéneas definidas se aplicaron tres técnicas regionales:

- Estaciones-años
- Avenida índice
- Correlación y regresión múltiple

La técnica que proporcionó el menor EEA fue la de Correlación y Regresión Múltiple. Los resultados de las técnicas restantes se encuentran en el apéndice 7.10.

i. Técnica de correlación y regresión múltiple

En la Tabla 7.16 se presentan los resultados de la autocorrelación. En la Tabla 7.15 se concentraron las seis características - en orden de importancia- que mejor correlación tuvieron.

**Tabla 7.15. Características empleadas en la regresión.**

No. de atributo	Parámetro	Jerarquía
1	Área drenada	1
33	Precipitación antecedente mensual (Enero-Abril)	2
7	Pendiente media de la cuenca	3
4	Parámetro de forma	4
5	Longitud de la cuenca	5
8	Elevación máxima de la cuenca	6

Se realizó la regresión múltiple tomando como variable independiente el gasto de diseño calculado para cada periodo de retorno y como variables independientes las seis características de la Tabla 7.15.

En la Tabla 7.16, se observan de color rojo las autocorrelaciones que dieron valores del coeficiente de determinación ( $r^2$ ) mayores a 0.5; de color verde las mayores a 0.8 y de color azul las mayores a 0.9. Finalmente se seleccionaron las de  $r^2$  mayor a 0.9. La primera columna de la Tabla 7.16 corresponde al número del parámetro analizado de la Tabla 7.12. Características fisiográficas.

Tabla 7.16. Autocorrelación de características fisiográficas.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36				
1	1																																							
2	0.97	1.00																																						
3	-0.11	0.13	1.00																																					
4	-0.90	-0.86	0.31	1.00																																				
5	0.96	0.97	0.07	-0.88	1.00																																			
6	0.98	0.94	-0.20	-0.95	0.93	1.00																																		
7	0.23	0.26	0.34	-0.11	0.39	0.15	1.00																																	
8	0.86	0.83	-0.04	-0.76	0.88	0.84	0.64	1.00																																
9	0.87	0.84	0.01	-0.75	0.89	0.84	0.65	1.00	1.00																															
10	-0.07	-0.22	-0.78	-0.25	-0.10	0.04	-0.09	0.02	-0.05	1.00																														
11	0.94	0.89	-0.08	-0.86	0.94	0.89	0.31	0.81	0.82	-0.10	1.00																													
12	0.63	0.54	-0.37	-0.71	0.61	0.63	-0.01	0.43	0.42	0.08	0.81	1.00																												
13	0.34	0.36	-0.32	-0.64	0.30	0.50	-0.31	0.21	0.19	0.42	0.18	0.20	1.00																											
14	0.86	0.82	0.00	-0.74	0.89	0.78	0.38	0.76	0.78	-0.20	0.98	0.80	-0.02	1.00																										
15	0.61	0.49	-0.68	-0.73	0.43	0.73	-0.38	0.40	0.37	0.37	0.46	0.50	0.71	0.30	1.00																									
16	-0.22	-0.12	0.25	0.17	-0.17	-0.26	-0.61	-0.61	-0.59	-0.18	-0.14	0.05	-0.04	-0.11	-0.24	1.00																								
17	-0.64	-0.52	0.54	0.77	-0.62	-0.65	0.12	-0.40	-0.37	-0.44	-0.73	-0.83	-0.31	-0.69	-0.56	-0.19	1.00																							
18	0.78	0.71	-0.29	-0.85	0.81	0.81	0.55	0.93	0.90	0.35	0.76	0.52	0.41	0.68	0.51	-0.58	-0.57	1.00																						
19	-0.56	-0.50	0.44	0.72	-0.50	-0.60	0.46	-0.17	-0.15	-0.26	-0.61	-0.80	-0.50	-0.53	-0.65	-0.42	0.89	-0.32	1.00																					
20	-0.58	-0.51	0.48	0.74	-0.52	-0.63	0.44	-0.20	-0.18	-0.29	-0.63	-0.81	-0.51	-0.54	-0.68	-0.38	0.91	-0.36	1.00	1.00																				
21	-0.51	-0.46	0.42	0.68	-0.43	-0.57	0.55	-0.09	-0.08	-0.19	-0.55	-0.77	-0.56	-0.46	-0.68	-0.43	0.81	-0.24	0.99	0.98	1.00																			
22	-0.49	-0.45	0.37	0.65	-0.42	-0.54	0.55	-0.06	-0.05	-0.15	-0.54	-0.77	-0.50	-0.47	-0.62	-0.50	0.81	-0.20	0.99	0.98	1.00	1.00																		
23	-0.06	-0.13	-0.03	0.16	0.02	-0.12	0.80	0.39	0.37	0.28	-0.05	-0.30	-0.42	0.02	-0.35	-0.66	0.18	0.37	0.61	0.57	0.71	0.73	1.00																	
24	0.58	0.45	-0.45	-0.65	0.62	0.57	0.44	0.67	0.63	0.61	0.61	0.46	0.16	0.58	0.31	-0.30	-0.73	0.81	-0.38	-0.41	-0.23	-0.22	0.50	1.00																
25	0.57	0.44	-0.43	-0.63	0.61	0.54	0.26	0.53	0.49	0.55	0.64	0.56	0.09	0.63	0.28	-0.02	-0.86	0.67	-0.56	-0.58	-0.41	-0.41	0.30	0.95	1.00															
26	0.39	0.28	-0.28	-0.39	0.45	0.36	0.65	0.65	0.61	0.55	0.37	0.10	-0.03	0.36	0.07	-0.49	-0.39	0.73	0.03	-0.01	0.18	0.20	0.79	0.91	0.78	1.00														
27	-0.24	-0.23	0.21	0.35	-0.18	-0.26	0.71	0.24	0.24	0.05	-0.32	-0.62	-0.29	-0.29	-0.40	-0.72	0.61	0.16	0.87	0.85	0.91	0.93	0.86	0.08	-0.18	0.47	1.00													
28	-0.38	-0.35	0.27	0.50	-0.35	-0.38	0.54	0.07	0.07	-0.13	-0.47	-0.69	-0.31	-0.43	-0.39	-0.68	0.81	-0.06	0.94	0.93	0.92	0.95	0.67	-0.23	-0.49	0.16	0.94	1.00												
29	-0.54	-0.48	0.40	0.69	-0.50	-0.57	0.44	-0.14	-0.12	-0.27	-0.60	-0.77	-0.45	-0.53	-0.57	-0.49	0.90	-0.30	0.99	0.99	0.96	0.97	0.57	-0.41	-0.61	-0.01	0.87	0.97	1.00											
30	-0.57	-0.51	0.42	0.72	-0.52	-0.61	0.44	-0.18	-0.16	-0.24	-0.63	-0.81	-0.48	-0.55	-0.63	-0.43	0.90	-0.33	1.00	1.00	0.98	0.98	0.59	-0.39	-0.57	0.02	0.87	0.95	1.00	1.00										
31	-0.20	-0.21	0.16	0.32	-0.12	-0.24	0.76	0.28	0.27	0.12	-0.25	-0.56	-0.37	-0.20	-0.43	-0.69	0.49	0.21	0.82	0.79	0.88	0.90	0.94	0.22	-0.01	0.60	0.98	0.87	0.80	0.81	1.00									
32	-0.56	-0.49	0.46	0.73	-0.49	-0.61	0.47	-0.17	-0.15	-0.26	-0.60	-0.80	-0.52	-0.52	-0.67	-0.41	0.88	-0.32	1.00	1.00	0.99	0.99	0.62	-0.36	-0.54	0.05	0.87	0.93	0.99	1.00	0.82	1.00								
33	-0.60	-0.51	0.44	0.68	-0.52	-0.62	0.44	-0.20	-0.19	-0.14	-0.68	-0.86	-0.34	-0.62	-0.64	-0.37	0.88	-0.30	0.97	0.97	0.96	0.96	0.58	-0.35	-0.54	0.06	0.87	0.92	0.96	0.97	0.81	0.97	1.00							
34	0.30	0.31	-0.12	-0.39	0.24	0.42	0.22	0.50	0.49	0.09	0.12	-0.05	0.61	-0.02	0.51	-0.73	0.20	0.51	0.15	0.12	0.08	0.16	0.09	0.01	-0.25	0.08	0.38	0.44	0.25	0.17	0.25	0.12	0.20	1.00						
35	0.72	0.79	0.12	-0.63	0.63	0.76	-0.23	0.46	0.48	-0.32	0.51	0.22	0.57	0.38	0.64	0.01	-0.20	0.32	-0.42	-0.42	-0.47	-0.45	-0.50	-0.05	-0.05	-0.19	-0.34	-0.28	-0.37	-0.41	-0.42	-0.43	-0.42	0.47	1.00					
36	-0.21	-0.26	-0.55	-0.18	-0.26	-0.07	-0.67	-0.43	-0.47	0.59	-0.19	0.26	0.64	-0.29	0.42	0.40	-0.38	-0.11	-0.59	-0.58	-0.64	-0.62	-0.56	-0.01	0.09	-0.27	-0.59	-0.57	-0.57	-0.57	-0.61	-0.60	-0.45	-0.02	-0.05	1.00				

Se identificaron las siguientes características como las más importantes, en la primera columna se presentan ordenadas por jerarquía para cada estación.

**Tabla 7.17. Resultados de los parámetros más importantes en el área de estudio.**

N o.	Descripción	Unidad	27001	27005	27006	28003	28108	28111	28125
1	Área	km <sup>2</sup>	1512.59	167.33	433.79	2136.42	1887.64	475.70	1563.02
2	Precipitación antecedente mensual (enero-abril)	mm	220.61	289.82	275.71	114.45	127.42	89.14	181.22
3	Pendiente media de la cuenca	Ad	0.31	0.24	0.35	0.31	0.21	0.16	0.34
4	Parámetro de forma	km <sup>-1</sup>	0.21	0.64	0.50	0.18	0.21	0.34	0.19
5	Longitud de la cuenca	km	69.62	27.96	54.38	88.91	81.29	41.23	76.96
6	Elevación máxima de la cuenca	m.s.n.m.	4204	1943	2682	4204	3339	1584	4204

Se consideraron las dos regiones, obtenidas en el método de Coeficiente de variación, de las cuales se obtuvieron las siguientes matrices de datos que fueron analizadas con una regresión lineal múltiple entre los gastos ( $7Q_{10}$  y los dos atributos más significativos).

Se analizó para obtener el  $7Q_2$  y  $7Q_{10}$ , respectivamente de cada región.

**Tabla 7.18. Matriz de datos para la regresión lineal múltiple para determinar  $7Q_2$  Región 1.**

Estación	$7Q_2$ [m <sup>3</sup> /s]	$A_{d_2}$ [km <sup>2</sup> ]	$\sum_{i=1}^4 \overline{H_p}$ [mm]
27001	130.99	1512.59	220.61
27005	12.72	167.33	289.82
27006	22.73	433.79	275.70

**Tabla 7.19. Matriz de datos para la regresión lineal múltiple para determinar  $7Q_{10}$  Región 1.**

Estación	$7Q_{10}$ [m <sup>3</sup> /s]	$A_{d_2}$ [km <sup>2</sup> ]	$\sum_{i=1}^4 \overline{H_p}$ [mm]
27001	101.98	1512.58	220.61
27005	7.94	167.33	289.82
27006	13.21	433.78	275.71

Tabla 7.20. Matriz de datos para la regresión lineal múltiple para determinar  $7Q_2$  Región 2.

Estación	$7Q_2$ [m <sup>3</sup> /s]	$A_{d_2}$ [km <sup>2</sup> ]	$\sum_{i=1}^4 \overline{H_p}$ [mm]
28003	25.21	2136.42	114.45
28108	9.16	1887.64	127.42
28111	3.26	475.70	89.14
28125	104	1563.02	181.22

Tabla 7.21. Matriz de datos para la regresión lineal múltiple para determinar  $7Q_{10}$  Región 2.

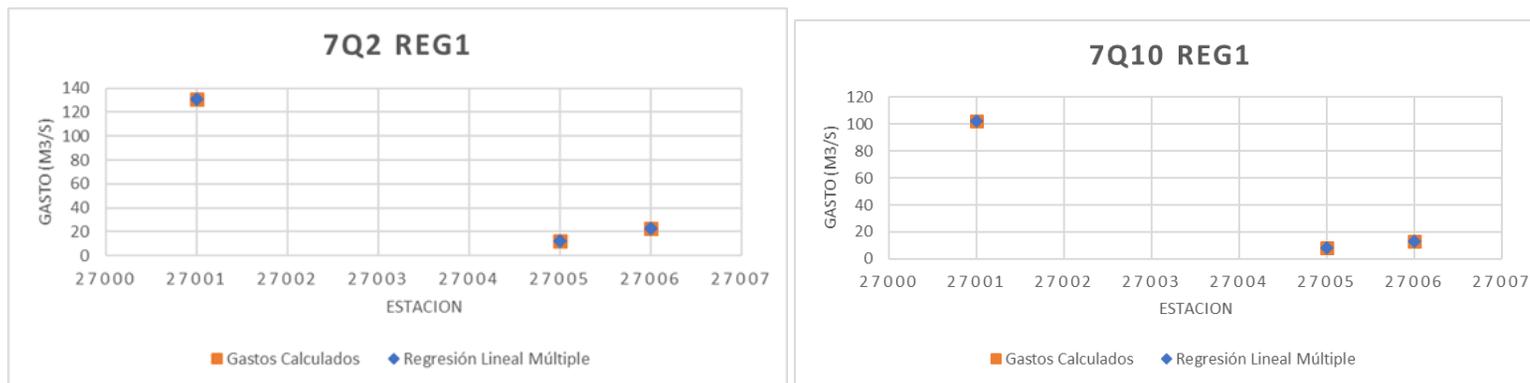
Estación	$7Q_{10}$ [m <sup>3</sup> /s]	$A_{d_2}$ [km <sup>2</sup> ]	$\sum_{i=1}^4 \overline{H_p}$ [mm]
28003	5.99	2136.42	114.45
28108	8.19	1887.64	127.42
28111	1.79	475.70	89.14
28125	78.44	1563.02	181.22

En la siguiente tabla se concentran los modelos de regresión lineal resultantes de cada una de las condiciones descritas en la Tabla 7.20, Tabla 7.21, Tabla 7.18 y Tabla 7.19 , respectivas a cada región y Tr.

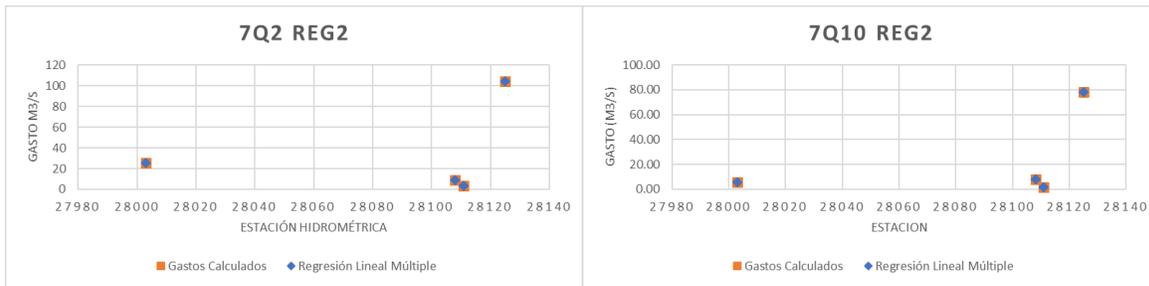
Tabla 7.22. Modelos de regresión lineal múltiple estimados para las diferentes regiones homogéneas.

TR	Región 1	EE	Región 2	EE
2	$7Q_2 = -9780.03 + 1.773A_d + 32.764 \left[ \sum_{i=1}^4 \overline{H_p} \right]$	0.002	$7Q_2 = -100.39 - 0.013A_d + 1.26 \left[ \sum_{i=1}^4 \overline{H_p} \right]$	0.0002
10	$7Q_{10} = -9742.112 + 1.749A_d + 32.632 \left[ \sum_{i=1}^4 \overline{H_p} \right]$	0.0014	$7Q_{10} = -81.12 - 0.016A_d + 1.009 \left[ \sum_{i=1}^4 \overline{H_p} \right]$	0.0013

Todos los modelos presentan un mínimo EEA -con respecto a los gastos calculados con la FDP seleccionada- inferior a 1%, mismo que se puede observar en las siguientes gráficas.



Gráfica 7.1. Región 1: 7Qmin<sub>n</sub> calculado con las respectivas ecuaciones para un Tr de 2 años y 10 años, respectivamente.



**Gráfica 7.2. Región 2: 7Qmin<sub>n</sub> calculado con las respectivas ecuaciones para un Tr de 2 años y 10 años, respectivamente.**

La técnica regional más apta se define en base al menor EEA, realizando el cálculo con las características fisiográficas propias de una cuenca aforada y comparando con el resultado del Q definido por la FDP más apropiada para el Tr en análisis; una vez que se valida de esta manera, se plantea la misma ecuación de la región para estimar gastos en cuencas no aforadas, en este caso para definir el  $7Q_{10}$ , o en su caso el  $7Q_2$ , como límites para establecer un gasto ambiental.

#### E. Determinación de $7Q_{10}$ para una cuenca no aforada

Debido a que la cuenca del Río La Antigua (CRA) se encuentra en la región homogénea No. 2, pero no está aforada al punto de delimitación de la microcuenca (Fig. 7.8), se pretende ejemplificar el proceso de la técnica regional aplicada con el objetivo de calcular el límite mínimo de caudal ambiental.

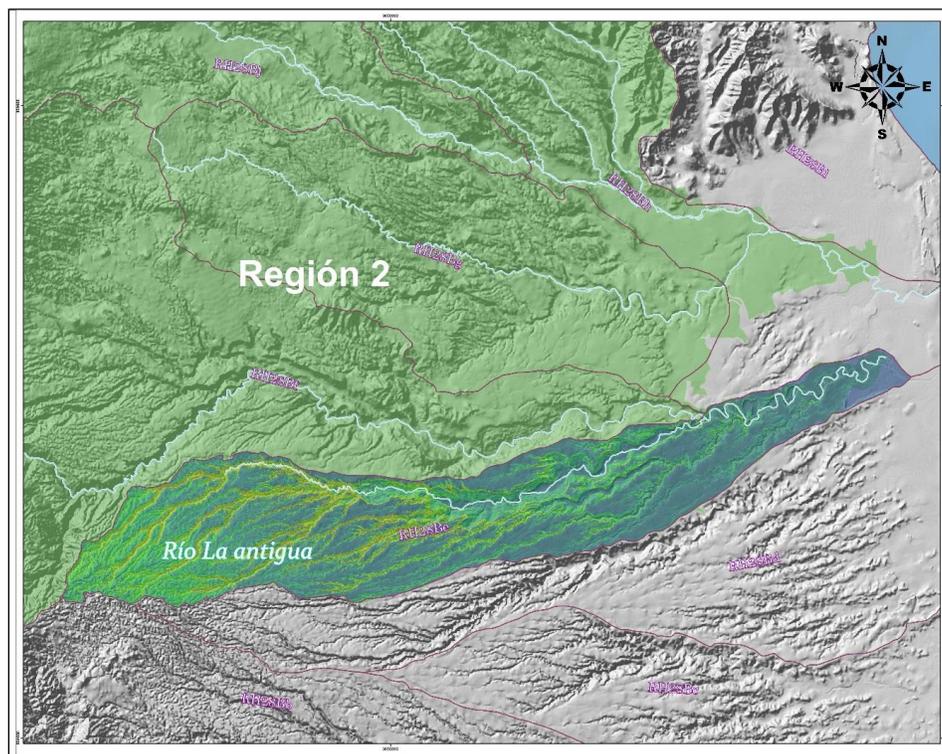


Fig. 7.8. Localización de la Cuenca no aforada dentro de la región 2.

Con el MDE tipo LiDAR de la CRA se determinó el área en SIG; además con los datos de las estaciones climatológicas consistentes se interpoló la lámina media de precipitación de enero a abril, obteniendo los siguientes resultados.

$$A_d = 515.027 \text{ km}^2$$
$$\sum_{i=1}^4 \overline{H_p} = 119.51 \text{ mm}$$

Sustituyendo los valores anteriores en las siguientes ecuaciones para los respectivos periodos de retorno para el estadístico 7Q:

$$7Q_2 = -100.39 - 0.013A_d + 1.26 \left[ \sum_{i=1}^4 \overline{H_p} \right]$$

**Ecuación 7.1**

$$7Q_{10} = -81.12 - 0.016A_d + 1.009 \left[ \sum_{i=1}^4 \overline{H_p} \right]$$

**Ecuación 7.2**

Se obtuvieron los siguientes valores.

$$7Q_2 = 38.166 \text{ m}^3/\text{s}$$
$$7Q_{10} = 31.168 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se aclara que estos son los gastos mínimos como límite para una propuesta de caudal ambiental. Se puede aplicar la misma metodología si se requiriera detallar en régimen mensual, e inclusive con alguno otro estadístico.

## 7.4. PASO 2. “CLASIFICACIÓN GEOMORFOLÓGICA REGIONAL”

#### 7.4.1. Identificación de MDE de alta resolución LiDAR, tipo terreno

Del proceso de revisión de claves consultado en INEGI se determinó que solo 245 de 413 cartas 1:10,000 cuentan con MDE LiDAR. Como se muestra en la Fig. 7.9 la concentración de las mismas se da en la parte centro-sur y centro-este de la cuenca y un pequeño número en la parte oeste correspondiente al estado de Puebla.

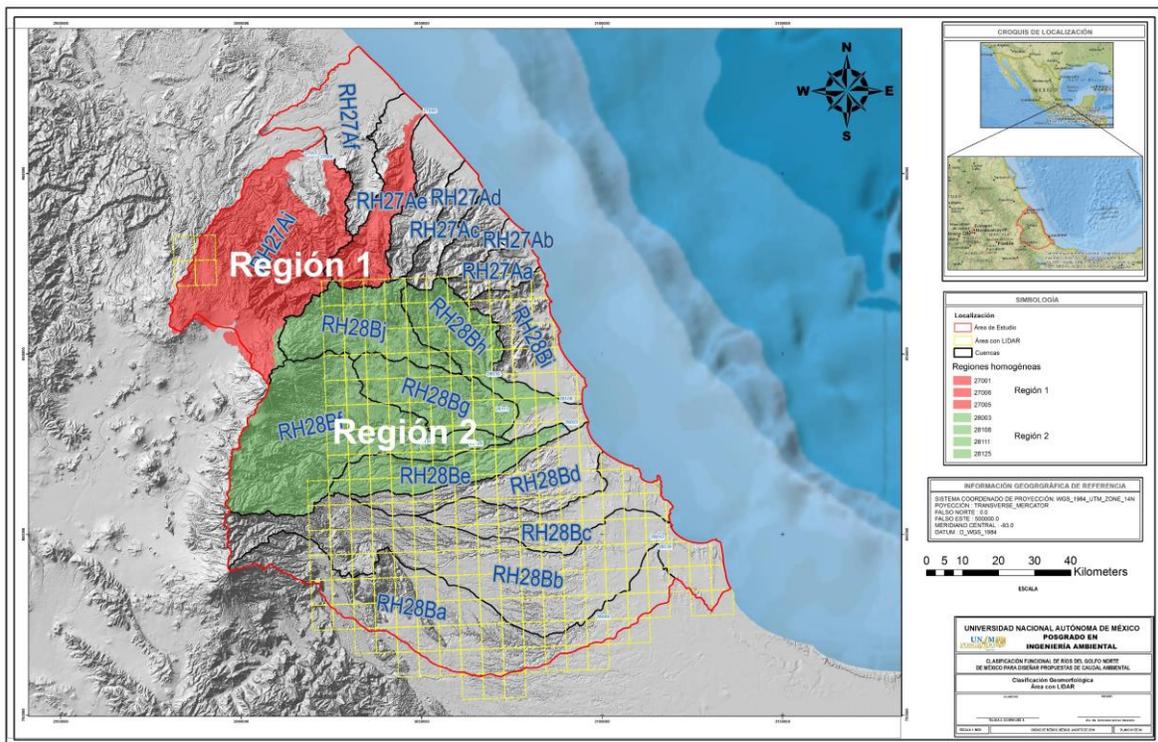


Fig. 7.9. Cartas 1:10,000 que cuentan con MDE LiDAR tipo terreno.

Acotando el trabajo a las dos regiones homogéneas determinadas en los pasos anteriores del apartado 7.3., se observa que solo existen dos MDE LiDAR, en la región 1; por el contrario, existen 28 en la región 2.

La presente clasificación geomorfológica, se limita a los cauces principales de las cuencas que tienen LiDAR. Se ejemplificará la metodología propuesta con el río objetivo: La Antigua, que presenta la condición de ser no aforada hasta antes de

unirse con el Río Decozolapa. Justo en el punto donde el cauce del río pasa a hacer de la cuenca Actopan-Barra de Chachalacas.

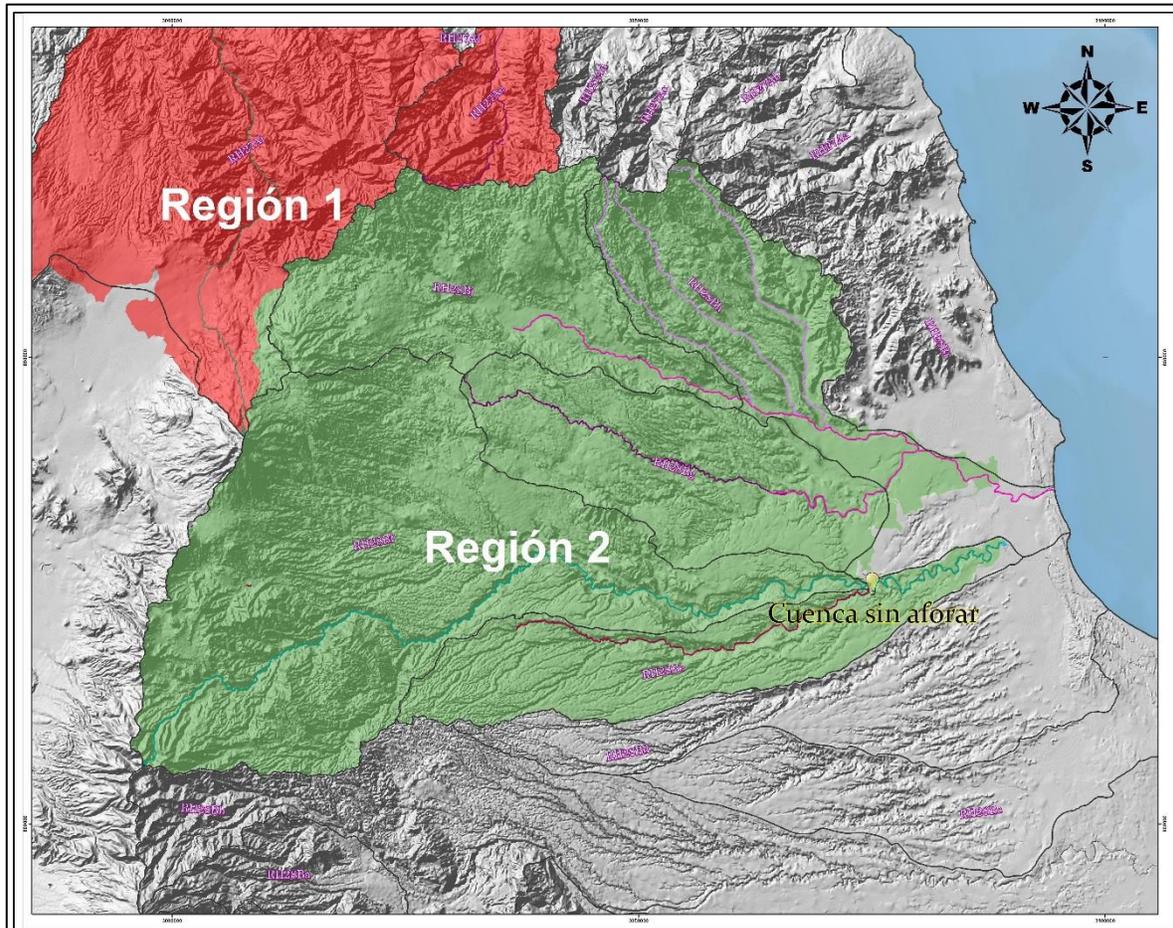


Fig. 7.10. Definición de área para clasificación geomorfológica en Región homogénea 2.

#### 7.4.2. Mapas de pendiente media del cauce clasificada

En la Fig. 7.11, se observa que la mayor parte del cauce presenta una “pendiente alta” con un promedio de 0.36. Se observa que la que menos se presenta es la “pendiente baja” con un promedio de 0.002, al menos en el tramo seleccionado. Se observa que existe pendiente baja posterior a la confluencia con el Río Decozolapa.

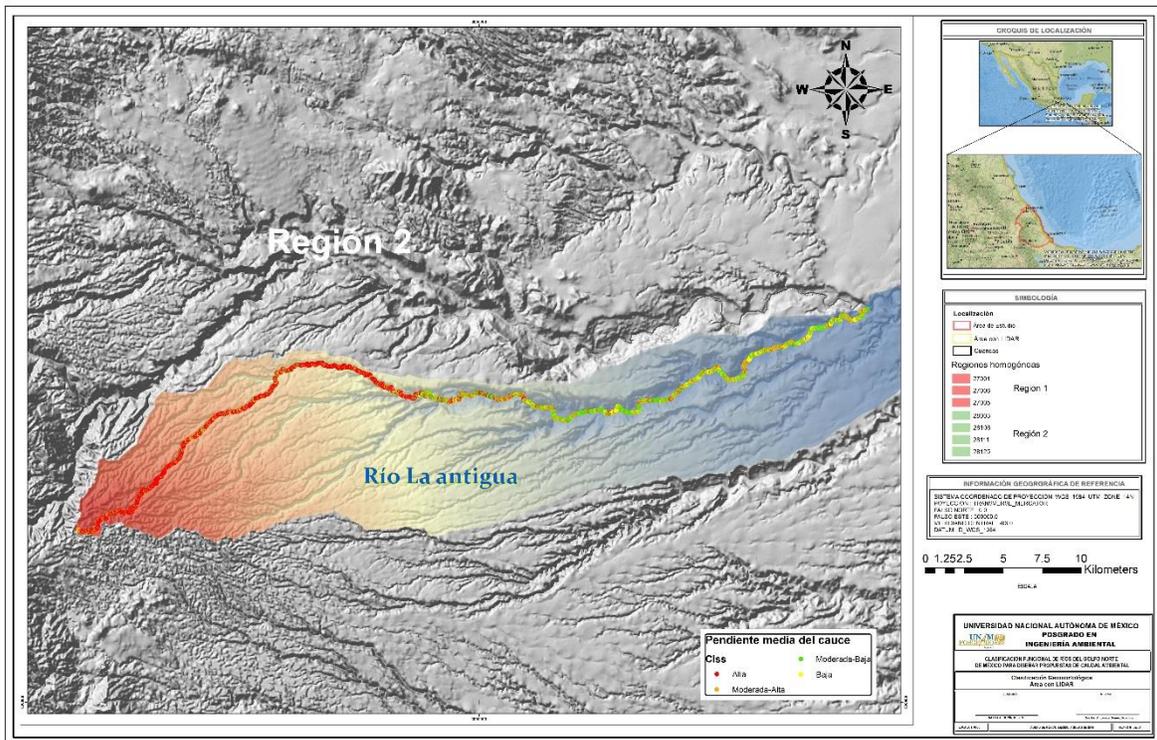


Fig. 7.11. Clasificación de pendiente longitudinal en la CRA.

A continuación, se presentan las estadísticas principales para cada clase agrupada.

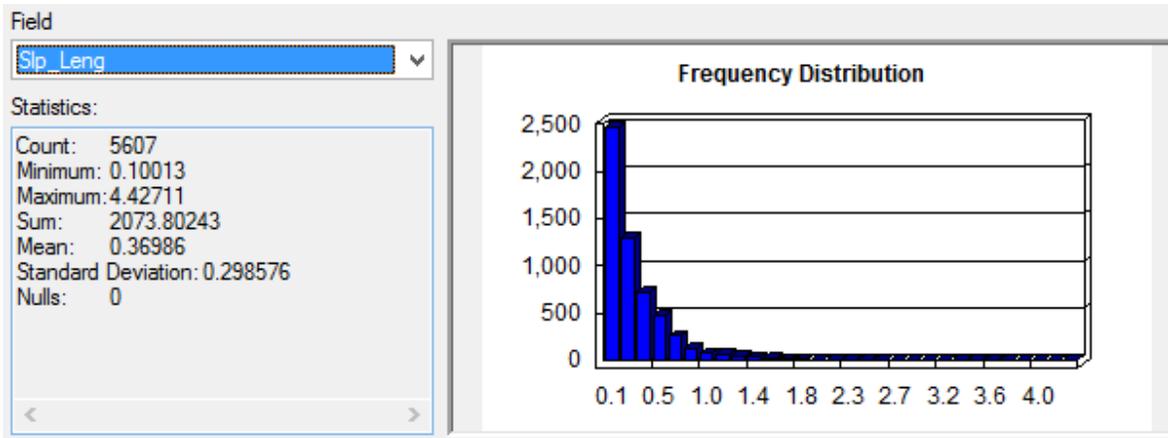
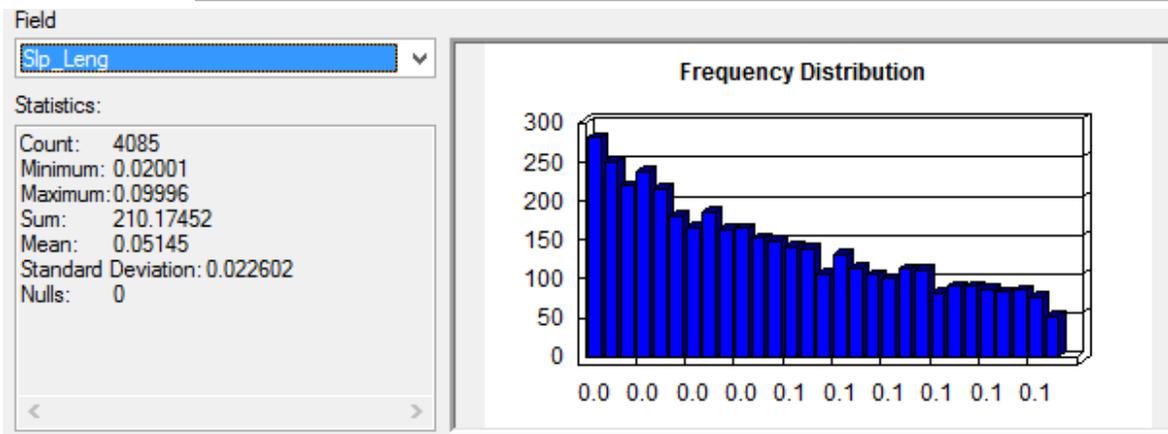


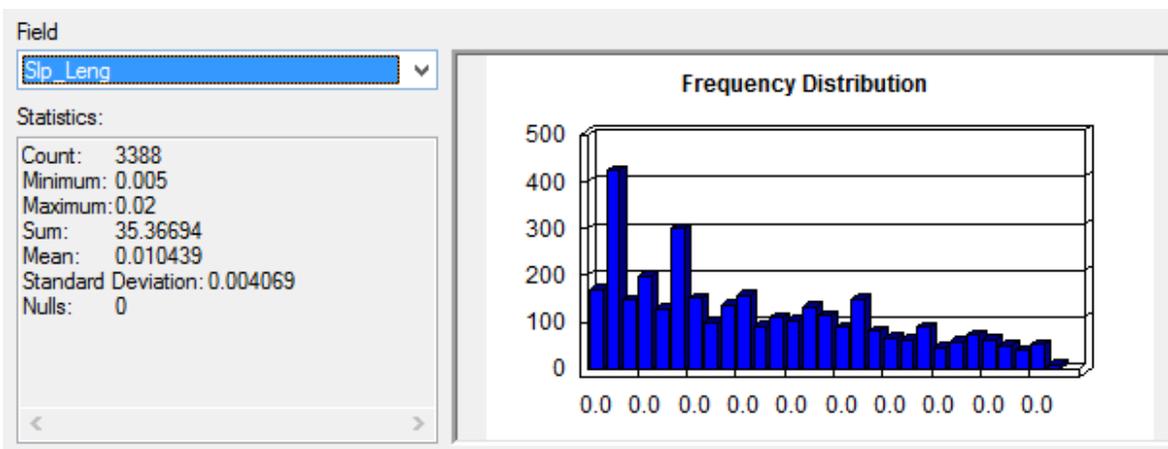
Fig. 7.12 Distribución de frecuencia de pendiente Alta en el cauce principal de CRA.

La pendiente media de la clase "Pendiente alta" es de 0.36.



**Fig. 7.13. Distribución de frecuencia de pendiente Moderada Alta en el cauce principal de CRA.**

La pendiente media de la clase “Moderada alta” es de 0.05.



**Fig. 7.14 Distribución de frecuencia de pendiente Moderada baja en el cauce principal de CRA.**

La pendiente media de la clase “Moderada baja” es de 0.01.

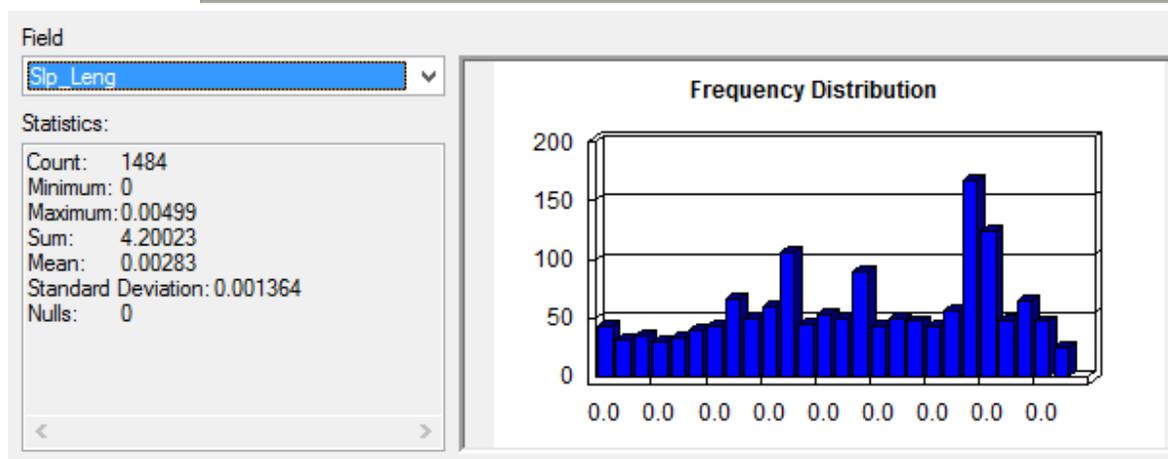


Fig. 7.15. Distribución de frecuencia de pendiente baja en el cauce principal de CRA.

La pendiente media de la clase “Baja” es de 0.002.

#### 7.4.3. Localización de sitios ecológicos de importancia

La unidad de gestión nombrado Río La Antigua tiene presencia de ANP, debido a que agrupa en ella a las cuencas hidrográficas de los ríos Decozolapa, Río Paso de Ovejas y R. San Francisco-Puerto de Veracruz. Exactamente, la cuenca hidrográfica donde se ubica el Parque Natural Pico de Orizaba es la del Río Decozolapa. Sin embargo, la cuenca hidrográfica Río La Antigua, presenta una vegetación de bosque mesófilo de montaña, mismo que es considerado de los más biodiversos por la comunidad científica (Webster et al., 1993; CONABIO, 2010).

#### 7.4.4. Determinación de número de tramos

##### Cuencas aforadas

Se procedió a determinar una muestra representativa de secciones de acuerdo a la longitud del cauce principal y la escala a la que se requiera el estudio. El número de secciones, se recomienda a cada 100 m como máximo y a cada 20 m como mínimo; para efectos de la modelación del gasto medio con un  $Tr_2$  y  $Tr_{10}$  para determinar el parámetro de confinamiento. Se recomienda trabajar con el

mayor número de tramos que represente la cuenca aforada, con el mayor detalle y si es posible corroborar la sección tipo en campo.

### Cuencas No aforadas: Caso Cuenca Río La Antigua

De acuerdo con la tipología de pendientes observada en la CRA, y con base en la clasificación de la pendiente media longitudinal, se obtuvieron 8 tramos a clasificar de diferente longitud. Mismos que se observa su localización en la Fig. 7.16.

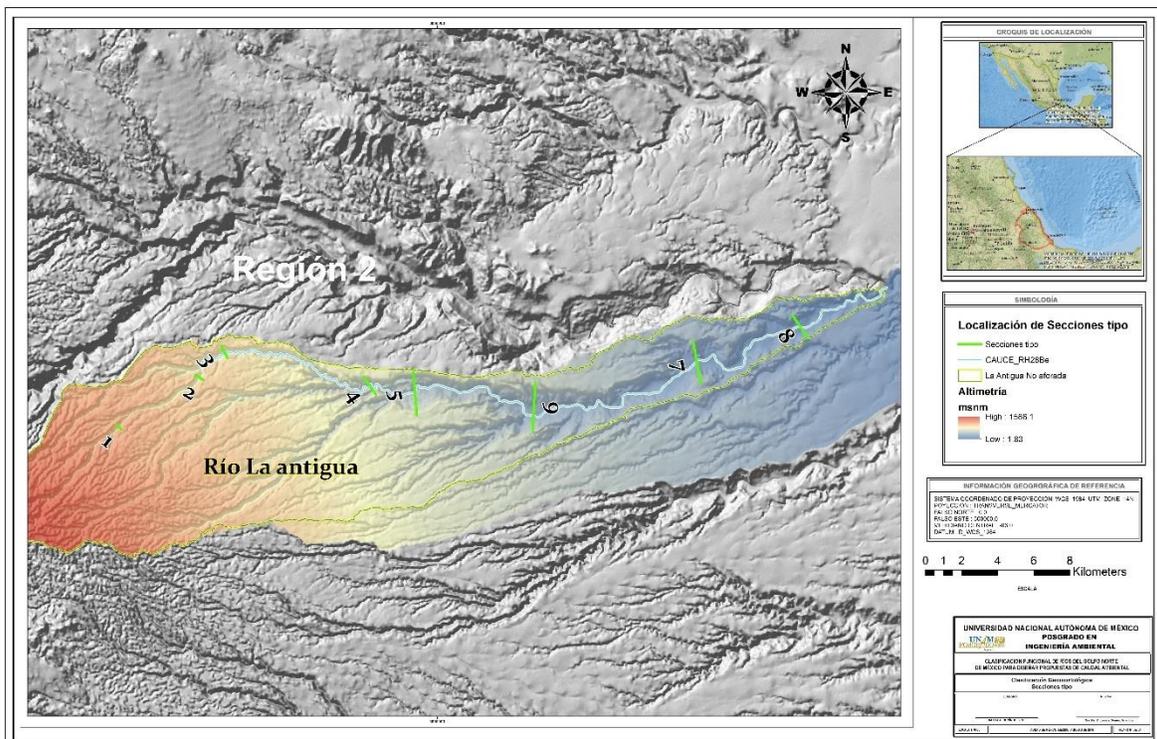


Fig. 7.16. Localización de los tramos y secciones tipo en subcuenca no aforada de CRA.

Al determinar los tramos se identificó una sección tipo representativa para cada tramo y se procedió a corroborar con ayuda de Google Earth, Tablas 7.23 y 7.24.

Tabla 7.23. Sección tipo característica en cada tramo seleccionado en CRA.

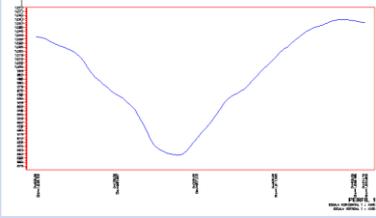
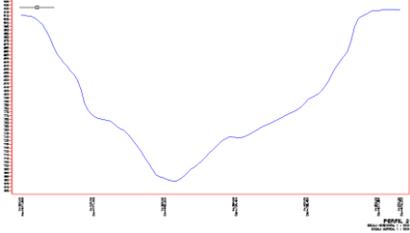
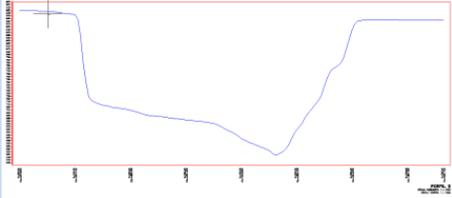
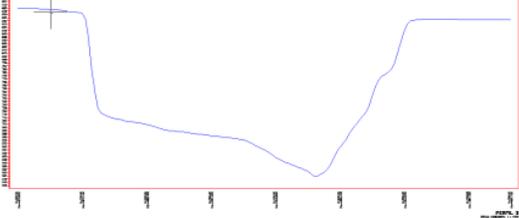
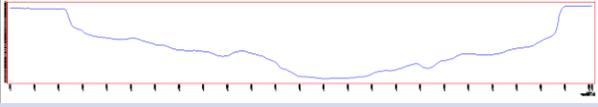
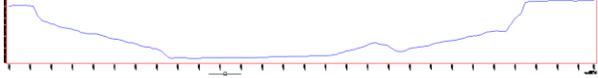
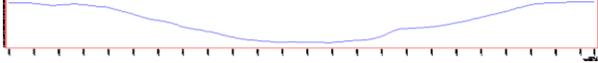
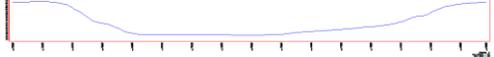
No. de Tramo	Sección tipo
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	

Tabla 7.24. Clasificación de pendiente longitudinal de cada tramo en CRA.

No. de Tramo	Pendiente media Longitudinal	Clasificación pendiente
1	0.13	Alta
2	0.25	Alta
3	0.15	Alta
4	0.076	Moderada Alta
5	0.035	Moderada Alta
6	0.029	Moderada Alta
7	0.019	Moderada Baja
8	0.005	Moderada baja

Se observa que existe pendiente baja después del punto de confluencia con el río Decozolapa.

#### 7.4.5. Geomorfología de cauce

##### A. Tipo de roca

En la Fig. 7.17, se observa la clasificación realizada con Google Earth sobre el lecho del cauce principal de la CRA. Se definió la más frecuente en los tramos a clasificar.

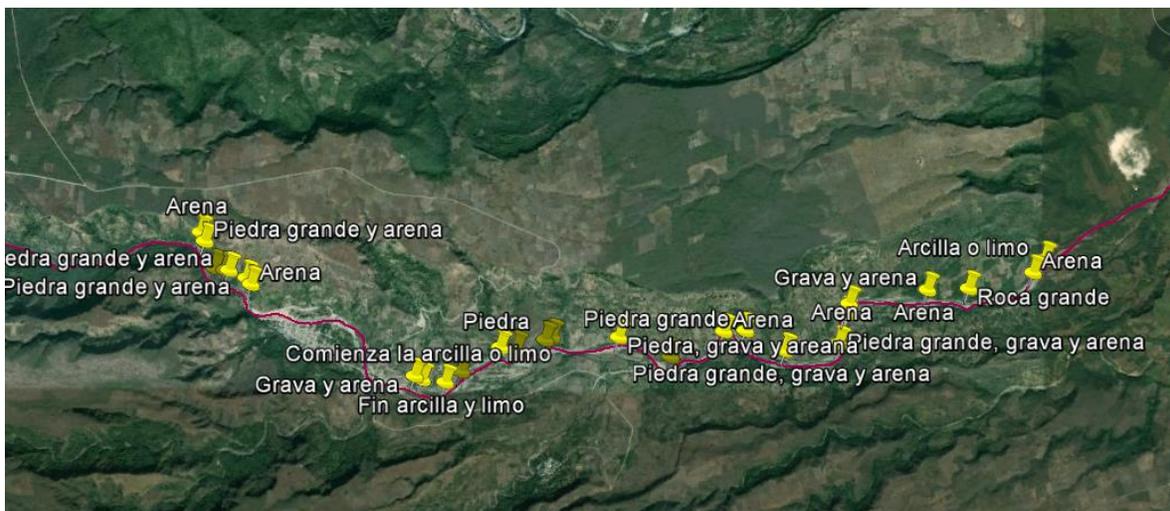


Fig. 7.17. Observación del lecho del cauce principal del CRA.

Se identificaron los siguientes lechos sobre los tramos a clasificar.

Tabla 7.25. Tipos de lecho en los tramos característicos seleccionados en el cauce de la CRA.

No. de tramo	Lecho
1	Lecho Rocoso
2	Lecho Rocoso
3	Lecho Rocoso
4	Gravas y piedras
5	Piedras grandes
6	Gravas y Arenas
7	Gravas y Arenas
8	Gravas y arenas

### B. Número de canales

En todas las secciones tipo existe sólo un canal. Excepto la sección característica del tramo 4, Fig. 7.18.

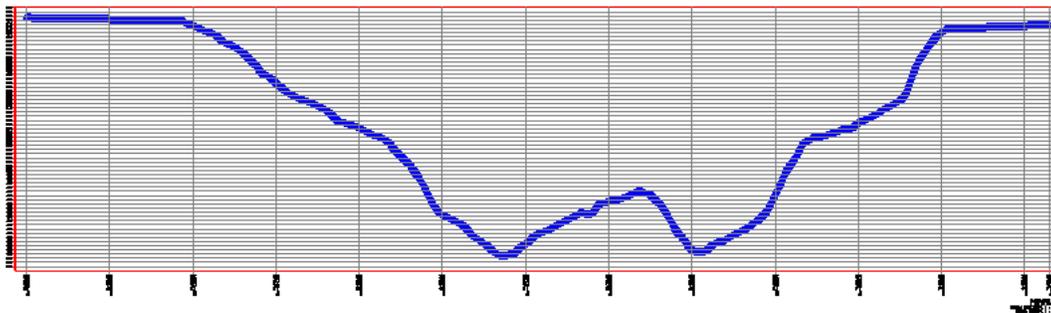


Fig. 7.18. Sección transversal del tramo 4 en la CRA.

### C. Sinuosidad

En la Tabla 7.26 se concentran las magnitudes previas al cálculo de sinuosidad en cada tramo a clasificar.

Tabla 7.26. Concentración de información para determinación de sinuosidad.

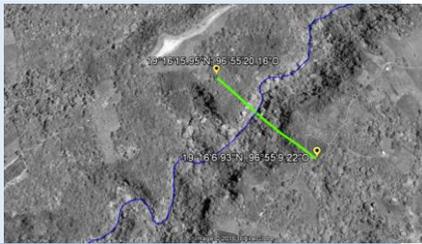
No. de Tramo	Ls [m]	Lv [m]	Sinuosidad (k)
1	2142	1795	1.193
2	2799	2357	1.188
3	2452	2065	1.187

No. de Tramo	Ls [m]	Lv [m]	Sinuosidad (k)
4	3045	2038	1.494
5	2771	2207	1.256
6	2893	2303	1.256
7	2562	2200	1.165
8	2966	2615	1.134

#### 7.4.6. Geomorfología de valle

Los parámetros medidos en cada tramo referidos a geomorfología de valle se concentran en la Tabla 7.27.

Tabla 7.27. Concentración de características de los tramos seleccionados para caracterización geomorfológica en la CRV.

No. de Sección	Anchura de fondo [m]	Ancho de cauce [m]	Relación de confinamiento	Vista aérea de la sección
1	5	6.5	1.30	
2	6	8	1.33	
3	8	11	1.38	

No. de Sección	Anchura de fondo [m]	Ancho de cauce [m]	Relación de confinamiento	Vista aérea de la sección
4	6	11.5	1.92	
5	25	47	1.88	
6	45	169	3.76	
7	39	156	4.00	
8	12	40	3.33	

### 7.4.7. Clasificación de Rosgen para cada sección tipo

En la Tabla 7.28 se concentra la aplicación de la clave de Rosgen en la CRA.

Tabla 7.28. Descripciones generales de los tipos de ríos y criterios delineadores para la clasificación general (Rosgen, 1994, 1996).

Sección	Clasificación	Tipo de corriente	Descripción general	Relación de confinamiento	Relación W/D	Sinuosidad	Pendiente	Forma de relieve/ Suelos/ Características
1, 2 y 3	A2a+	Aa+	Muy escarpado, profundamente atrincherado, transporte de escombros, torrentes.	<1.4	<12	1.0 a 1.1	>0.10	Relieve muy alto. Características erosionales, rocosas o deposicionales; flujo potencial de escombros. Corrientes profundamente arraigadas. Pasos verticales con estanques de drenaje profundo; Cascadas.
4	B4a	B	Moderadamente atrincherado, gradiente moderado, cauce dominado por rápidas, con estanques poco frecuentes, planta y perfil muy estables, bancos estables	1.4 a 2.2	>12	>1.2	0.02 a 0.039	Relieve moderado, deposición coluvial y / o estructural. Confinamiento y relación ancho/profundidad moderados. Valles estrechos y de pendiente suave. Predominan los rápidos con estanques de drenaje.

Sección	Clasificación	Tipo de corriente	Descripción general	Relación de confinamiento	Relación W/D	Sinuosidad	Pendiente	Forma de relieve/ Suelos/ Características
5	B3	B	Moderadamente atrincherado, gradiente moderado, cauce dominado por rápidas, con estanques poco frecuentes, planta y perfil muy estables, bancos estables	1.4 a 2.2	>12	>1.2	0.02 a 0.039	Relieve moderado, deposición coluvial y / o estructural. Confinamiento y relación ancho/profundidad moderados. Valles estrechos y de pendiente suave. Predominan los rápidos con estanques de drenaje.
6	C5b	C	Baja pendiente, con meandros, depósitos de sedimentos, rápidas/estanques, canales aluviales, con amplias y bien definidas llanuras de inundación	>2.2	>12	>1.2	<0.02	Amplios valles con terrazas, en asociación con llanuras de inundación, suelos aluviales. Ligeramente atrincherado con canales de meandros bien definidos. Morfología del lecho con rápidas y estanques.
7	C4	C	Baja pendiente, con meandros, depósitos de sedimentos, rápidas/estanques, canales aluviales, con amplias y bien definidas llanuras de inundación	>2.2	>12	>1.2	<0.02	Amplios valles con terrazas, en asociación con llanuras de inundación, suelos aluviales. Ligeramente atrincherado con canales de meandros bien definidos. Morfología del lecho con rápidas y estanques.

Sección	Clasificación	Tipo de corriente	Descripción general	Relación de confinamiento	Relación W/D	Sinuosidad	Pendiente	Forma de relieve/ Suelos/ Características
8	D4	D	Cauce trenzado con barras (depósitos de sedimentos) longitudinales y transversales. Cauce muy ancho con bancos erosionados	n/a	>40	n/a	<0.04	Amplios valles con aluvión, abanicos más abiertos. Escombros glaciales y características deposicionales. Ajuste lateral activo con abundancia de sedimentos. Convergencia. Divergencia de las características del lecho, procesos agradacionales, alta carga de fondo y erosión de los bancos.

#### 7.4.8. Integración de la información

La clasificación de los tramos característicos de la aplicación en la CRA de acuerdo a la clave de Rosgen (1994,1996), se concentran en la tabla 7.29.

**Tabla 7.29. Descripción de la clasificación para los tramos característicos en la CRA.**

No. de tramo	Clasificación	Descripción
1	A2a+	Cauce en lecho rocoso. Muy escarpado, profundamente atrincherado, fondo estrecho, transporte de escombros, torrentes.
2	A2a+	
3	A2a+	
4	B4a	Cauce en grava. Moderadamente atrincherado, gradiente moderado, cauce dominado por rápidas, con estanques poco frecuentes, planta y perfil muy estables, bancos estables.
5	B3	Cauce en piedra grande. Moderadamente atrincherado, gradiente moderado, cauce dominado por rápidas, con estanques poco frecuentes, planta y perfil muy estables, bancos estables.
6	C5b	Cauce en arena. Baja pendiente, con meandros, depósitos de sedimentos, rápidas/estanques, canales aluviales, con amplias y bien definidas llanuras de inundación.
7	C4	Cauce en grava. Baja pendiente, con meandros, depósitos de sedimentos, rápidas/estanques, canales aluviales, con amplias y bien definidas llanuras de inundación.
8	D4	Cauce en grava. Cauce trenzado con barras (depósitos de sedimentos) longitudinales y transversales. Cauce muy ancho con bancos erosionados.

Se procede a establecer las combinaciones de todos los parámetros posibles de acuerdo a los resultados obtenidos. Debido que la aplicación en la CRA, solo se

definieron 8 tramos. Se procede a crear el árbol de combinaciones de manera manual que se muestra en la Fig. 7.19.

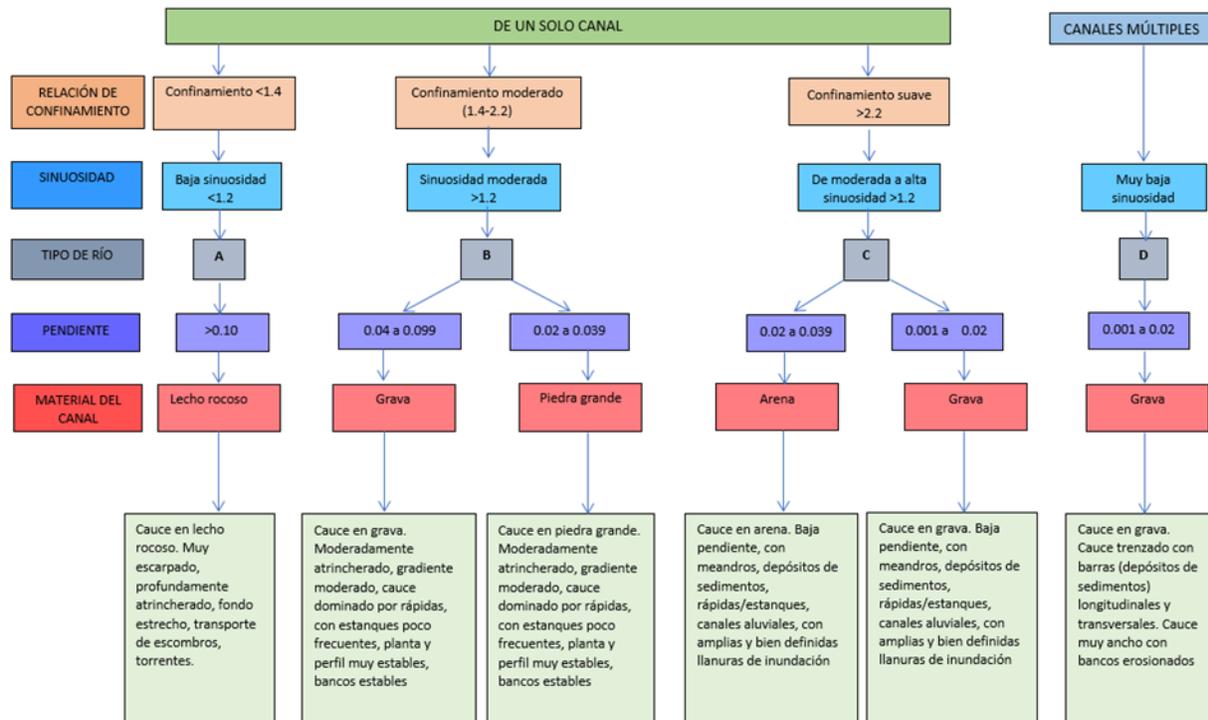


Fig. 7.19 Mapa de clasificación del área de estudio

### Análisis funcional de acuerdo a la clasificación

De acuerdo a Rosgen (1994, 1996), se muestran las interpretaciones del funcionamiento para los tipos de ríos en la CRA que pueden ser utilizados para gestionar la conservación o recuperación del río (Tabla 7.30).

Tabla 7.30. Análisis funcional de los tramos característicos de la CRA de acuerdo a Rosgen (1994,1996).

Tipo de corriente	Sensibilidad a las perturbaciones (a)	Potencial de recuperación (b)	Suministro de sedimentos (c)	Erosión potencial de los bancos	Influencia del control de la vegetación (d)
A2	Muy bajo	Excelente	Muy bajo	Muy bajo	Despreciable
B3	Bajo	Excelente	Bajo	Bajo	Moderado
B4	Moderado	Excelente	Moderado	Bajo	Moderado

Tipo de corriente	Sensibilidad a las perturbaciones (a)	Potencial de recuperación (b)	Suministro de sedimentos (c)	Erosión potencial de los bancos	Influencia del control de la vegetación (d)
<b>C4</b>	Muy alto	Bueno	Alto	Muy alto	Muy alto
<b>C5</b>	Muy alto	Justo	Muy alto	Muy alto	Muy alto
<b>D4</b>	Muy alto	Pobre	Muy alto	Muy alto	Moderado

Se tomaron en cuenta las siguientes condiciones

- a) Incluye aumentos en la magnitud del flujo y en el momento y / o aumentos de sedimentos.
- b) Asume la recuperación natural una vez que se corrigió la causa de inestabilidad.
- c) Incluye suspensión y carga de lecho de fuentes derivadas de canales y / o de pendientes adyacentes a arroyos.
- d) Vegetación que influye en la relación-estabilidad anchura / profundidad.

## 7.5. PASO 3. “ALTERACIÓN HIDROLÓGICA”

### 7.5.1. Hidrogramas diarios de puntos de control

Para el relleno de datos se aplicaron las mismas técnicas descritas en el apéndice 6.1 en el apartado “Análisis de consistencia, homogeneidad y complementación de series hidrometeorológicas” inciso A “Complementación de series hidrometeorológicas”.

A continuación, se observan los hidrogramas a nivel diario de los registros hidrométricos en los puntos de control que cumplieron con el test de independencia en el paso 1.

Análisis RH  
Componentes del caudal ecológico (1953-2011)

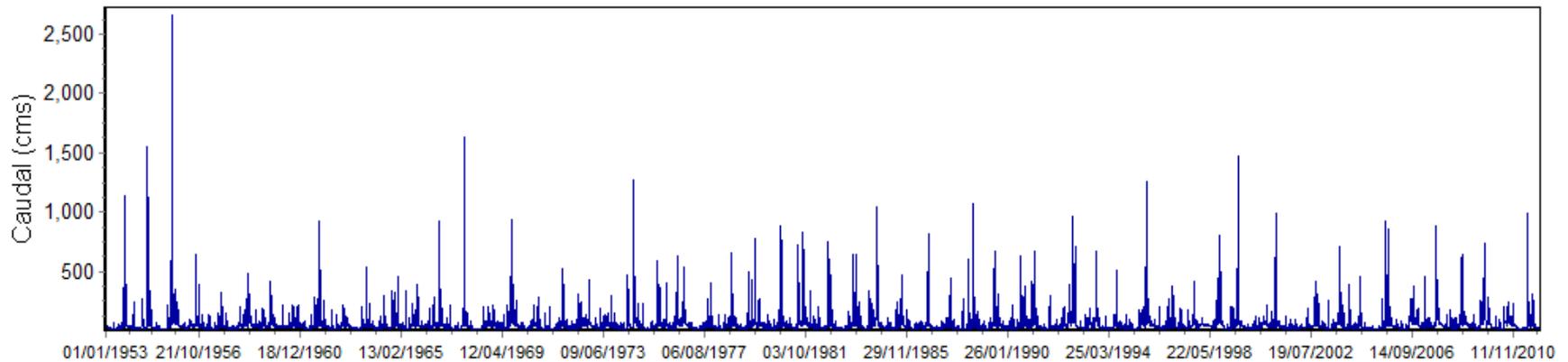


Fig. 7.20. Datos históricos hidrométricos de la estación 27001 "Martínez de la Torre".

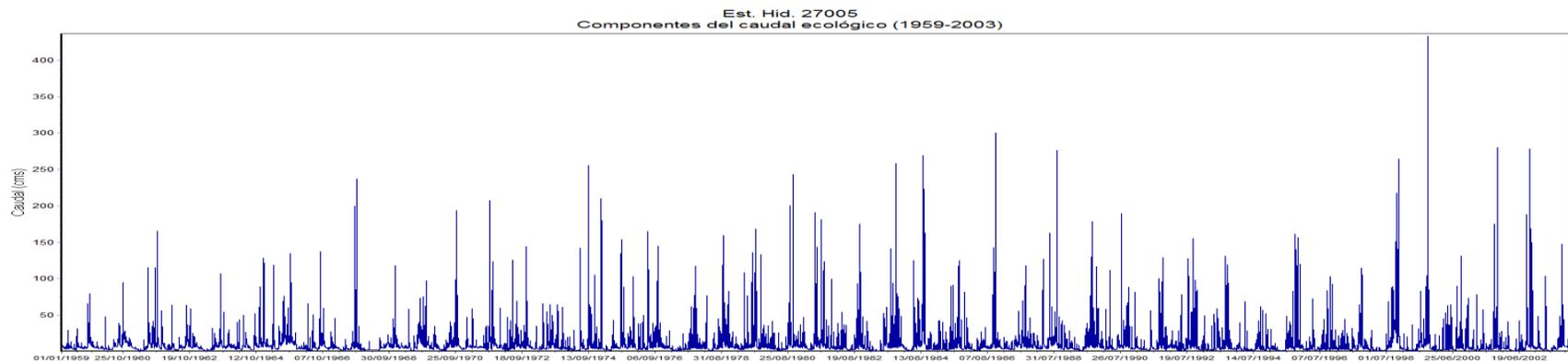


Fig. 7.21. Datos históricos hidrométricos de la estación 27005 "Libertad".

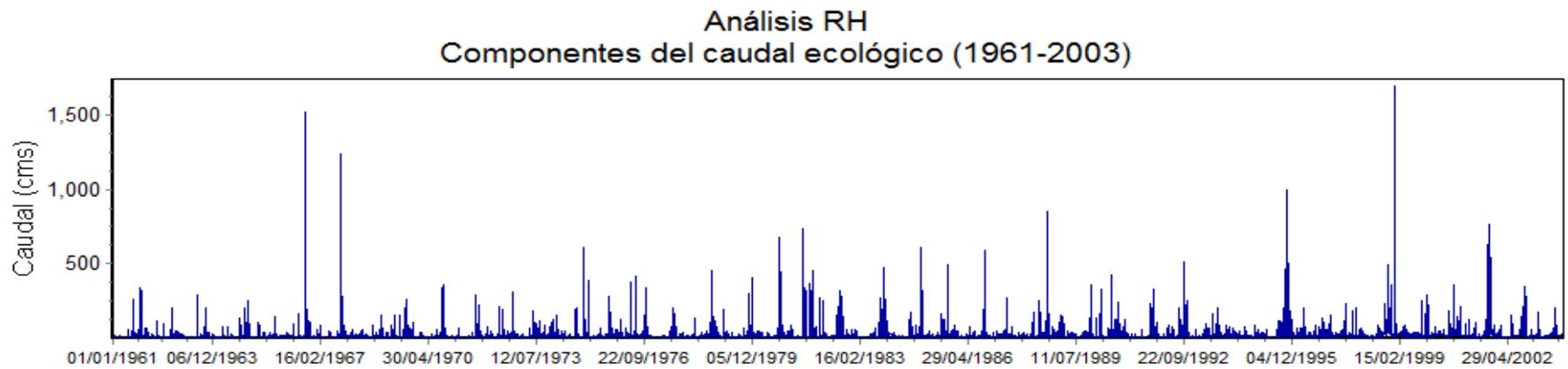


Fig. 7.22. Datos históricos hidrométricos de la estación 27006 "El Raudal".

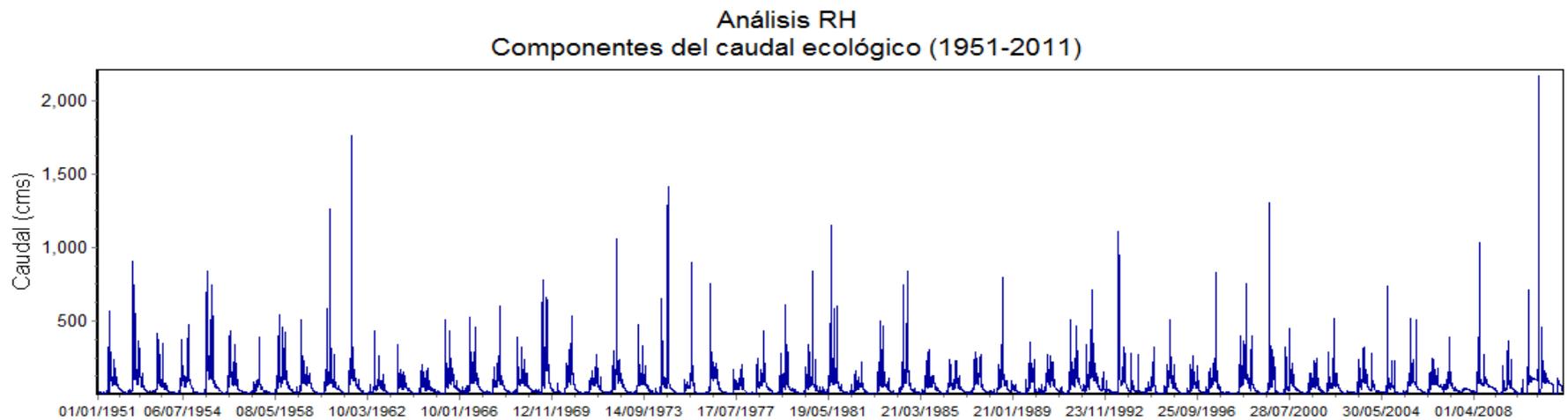


Fig. 7.23. Datos históricos hidrométricos de la estación 28003 "Cardel".

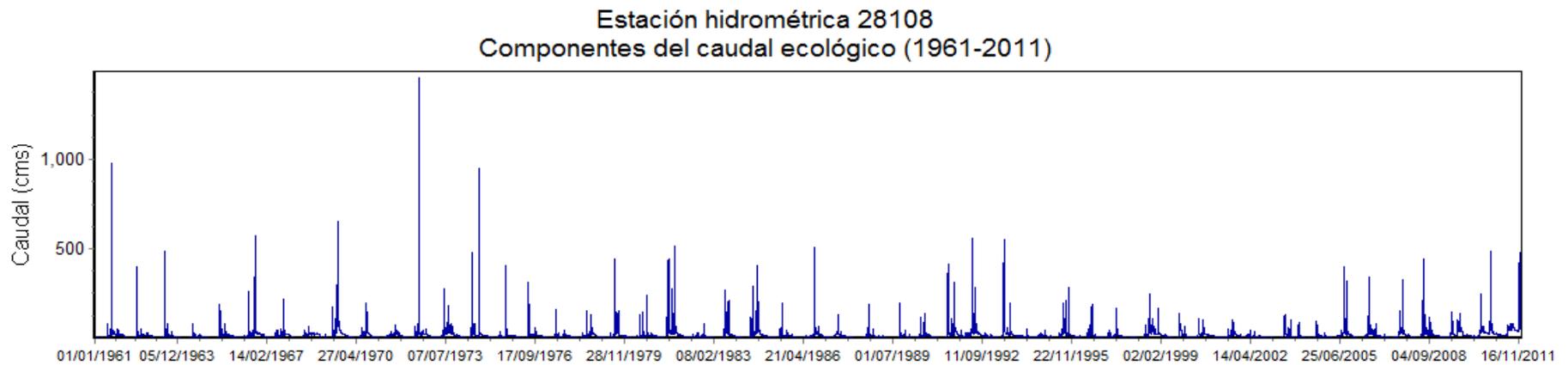


Fig. 7.24. Datos históricos hidrométricos de la estación 28108 "El Naranjillo".

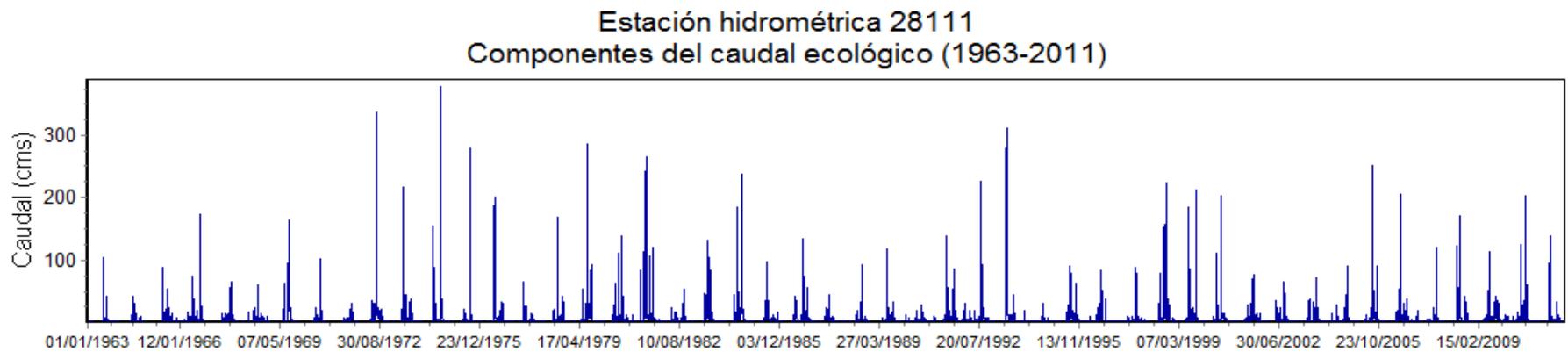


Fig. 7.25. Datos históricos hidrométricos de la estación 28111 "Ídolos".

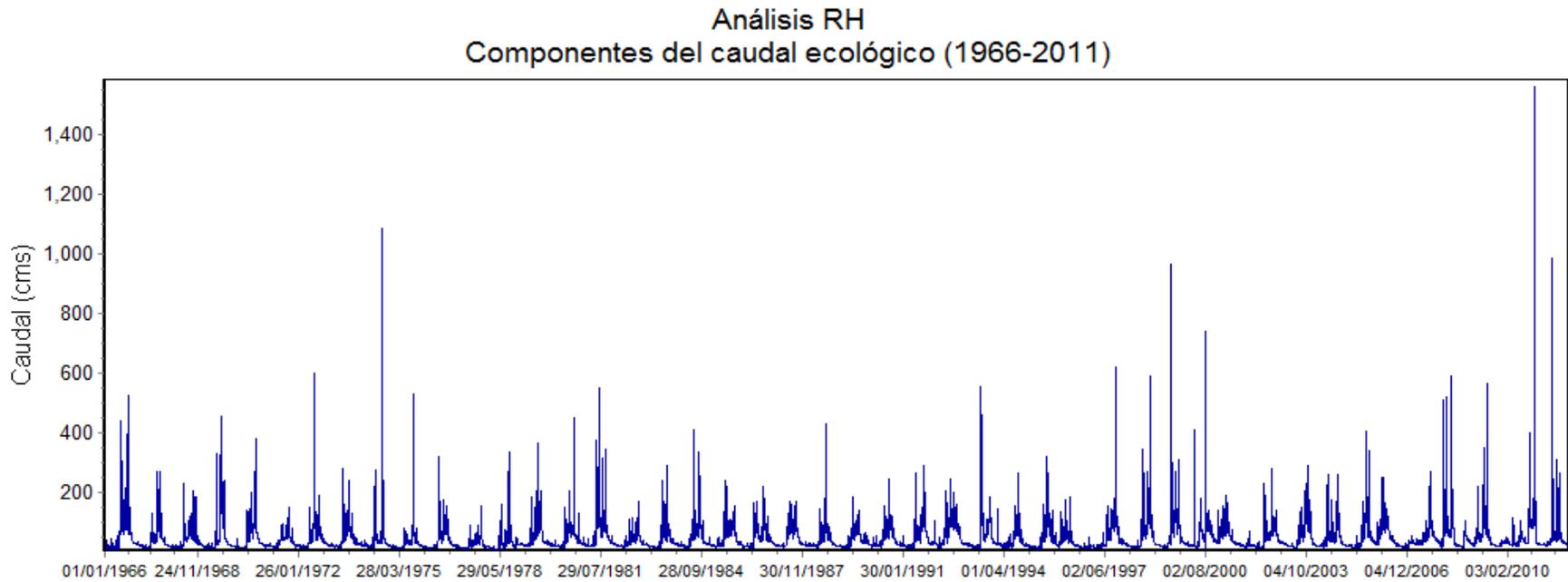


Fig. 7.26. Datos históricos hidrométricos de la estación 28125 "Carrizal".

## 7.5.2. Selección de periodo natural y alterado

### A. Análisis de alteración por infraestructura hidráulica en área de estudio

De la información recabada en el Sistema de Seguridad de Presas (2012) se genera la Tabla 7.31 de la que se destaca principalmente el año de construcción de la presa. Debido a que la zona está en constante riesgo de sufrir el embate de algún fenómeno meteorológico como lo son: los huracanes, ciclones o tormentas tropicales se hizo un análisis por cuenca de las presas que han sido dañadas por algún fenómeno meteorológico y presentan fecha de reconstrucción. En la Tabla 7.31, se presenta un concentrado del análisis realizado en cada cuenca.

Tabla 7.31. Año de construcción, y subcuenca a la que pertenece cada una de las presas que se encuentran en la cuenca de estudio.

Nom. Oficial	Nom. Común	Cuenca	Nom. C	Año Cons	Año Recon
Hornitos	Mozomboa	7	R. Pajaritos	1958	2005
Cedro I	Cañizal o La Raya	7	R. Pajaritos	1960	NA
El Cañizal	San Isidro o La Raya	7	R. Pajaritos	1971	NA
El Cedro II	San Isidro II	7	R. Pajaritos	1960	NA
Chalahuite	Calahuite	8	R. Actopan- Barra de Chachalacas	1958	NA
Der El Zapote	El Zapote	8	R. Actopan- Barra de Chachalacas	1974	NA
Der La Esperanza	Esperanza La	8	R. Actopan- Barra de Chachalacas	1979	NA
Ojite, El	El Ojite	8	R. Actopan- Barra de Chachalacas	ND	ND
Der Santa Rosa	Derivadora Santa Rosa	8	R. Actopan- Barra de Chachalacas	1956	NA
Der El Bobo	Derivadora El Bobo	8	R. Actopan- Barra de Chachalacas	ND	ND
Der La Antigua	Derivadora La Antigua	9	R. La Antigua	1951	NA
San Francisco Nacaxtle	San Francisco Nacaxtle	11	R. San Francisco- Puerto de Veracruz	1985	NA
Espinal Santa Bárbara	S/N	11	R. San Francisco- Puerto de Veracruz	1967	1979
Loma Triste	Loma Triste	12	R. Jamapa	1976	NA
Oaxaquilla La	Oaxaquilla La	12	R. Jamapa	1977	NA
Loma Pedregosa	Loma Pedregosa	12	R. Jamapa	1976	NA
Tejar El	Santa Anita	12	R. Jamapa	1958	NA
Mata de Gallo	S/N	13	R. Atoyac	1972	NA

Nom. Oficial	Nom. Común	Cuenca	Nom. C	Año Cons	Año Recon
<b>Alfredo V. Bonfil</b>	S/N	13	R. Atoyac	1970	NA
<b>Santa Anita</b>	Ojo Chico	13	R. Atoyac	1958	NA
<b>El Chiquihuite</b>	S/N	13	R. Atoyac	1982	NA
<b>Los Limos</b>	Los Limos	13	R. Atoyac	1980	NA
<b>Hermanos Calderón</b>	Hermanos Calderón	13	R. Atoyac	1980	NA
<b>Alto Pixquiac</b>	Alto Pixquiac	14	R. Decozalapa	1979	NA
<b>Bella Esperanza</b>	Puente del Diablo	14	R. Decozalapa	1949	NA
<b>Carrizal El</b>	Carrizal El	14	R. Decozalapa	1971	NA
<b>Sol El</b>	El Sol	14	R. Decozalapa	1979	NA
<b>Der Los Colibríes</b>	Derivadora Los Colibríes	14	R. Decozalapa	1990	NA
<b>José Evaristo Molina</b>	Tiradores o Miradore	15	R. Ídolos	1969	NA
<b>Aguaje I, El</b>	Bruno Pérez	15	R. Ídolos	1955	NA
<b>Buena Vista</b>	S/N	15	R. Ídolos	1945	NA
<b>Ídolos</b>	S/N	15	R. Ídolos	1950	NA
<b>Naranjos</b>	S/N	15	R. Ídolos	1942	NA
<b>Aguaje II, El</b>	El Aguaje II	15	R. Ídolos	1970	NA
<b>Der Almolonga II</b>	El Copal	16	R. CedePo	1971	NA
<b>Azafrán</b>	S/N	16	R. CedePo	1934	NA
<b>Temascalapa</b>	Concepción La	16	R. CedePo	ND	ND
<b>Tenampa</b>	Tenampa	16	R. CedePo	1952	NA
<b>Almolonga 1</b>	El Nacimiento	16	R. CedePo	1974	NA
<b>El Paisano</b>	El Paisano	16	R. CedePo	1977	NA
<b>El Encanto</b>	Encanto El	17	R. Bobos	1948	NA
<b>Altotonga</b>	Santa Cruz	17	R. Bobos	1980	NA
<b>Santa Cruz</b>	Santa Cruz	17	R. Bobos	1980	NA
<b>Animas Las</b>	Las Animas	17	R. Bobos	1952	NA
<b>Atzalán</b>	Canal Hank González	17	R. Bobos	1972	NA
<b>Minas</b>	Minas Las	17	R. Bobos	1956	NA
<b>Borregos, Canal De</b>	Canal de Borregos	17	R. Bobos	1952	NA
<b>Rio Puerco</b>	Rio Puerco	17	R. Bobos	1952	NA
<b>El Sauce</b>	El Sauce	17	R. Bobos	1952	NA
<b>Tenepanoya</b>	Tenepanoya	17	R. Bobos	1952	na
<b>Rio Frio</b>	Rio Frio	17	R. Bobos	1952	NA
<b>Zacapoaxtla I y II</b>	Zacapoaxtla I y II	17	R. Bobos	1952	NA

\*Nom. Oficial: Nombre Oficial; Nom. Comun: Nombre Común; Nom C: Nombre de la cuenca; Año Cons: Año de Construcción; Año Recon: Año de reconstrucción; NA: No aplica; ND: No disponible.

La infraestructura de la Tabla 7.31, se observa su localización en la Fig. 7.26.

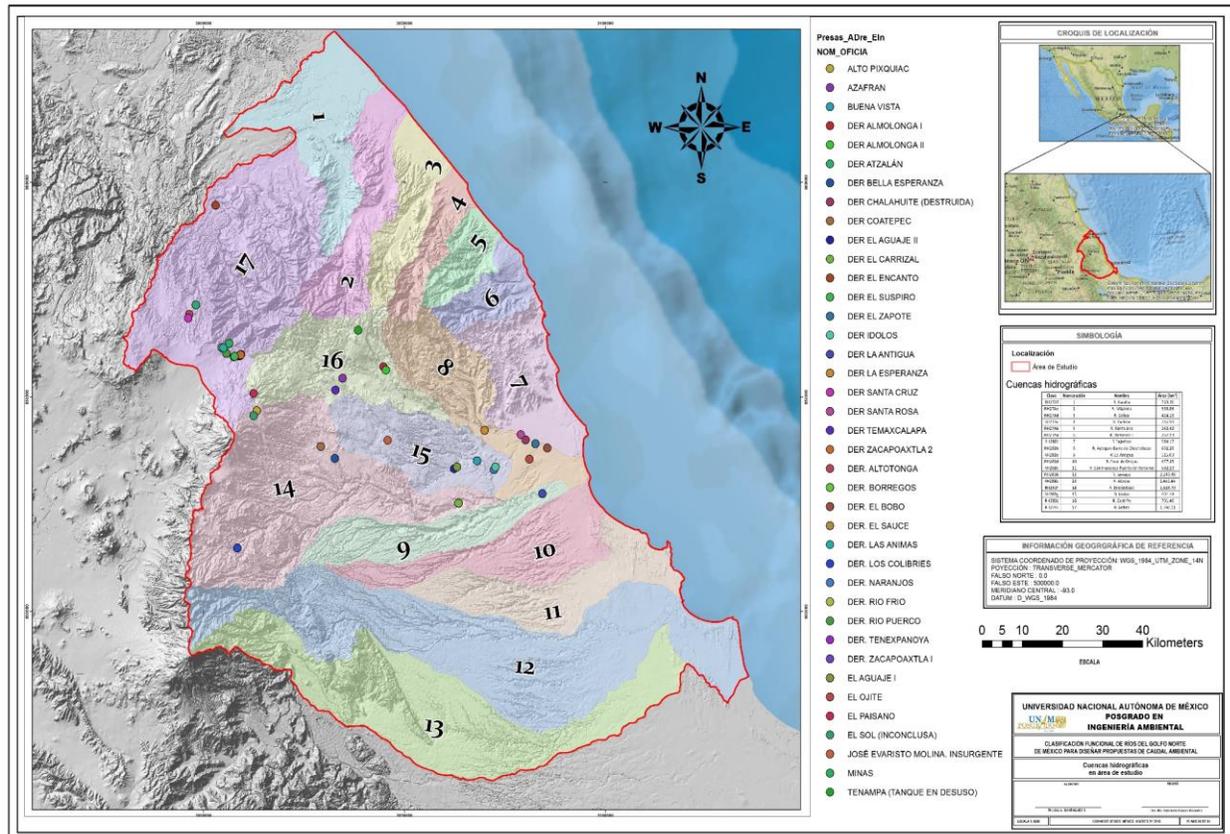


Fig. 7.27. División en cuencas hidrográficas en el área de estudio y localización de infraestructura.

Se observa en la Fig. 7.27 el área de estudio dividida en 17 cuencas de las cuales la número 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 10 no cuentan con ninguna presa dentro de su superficie.

Tabla 7.32. Numeración de las cuencas en el área de estudio.

Clave	Numeración	Nombre	Área [km <sup>2</sup> ]
RH27Af	1	R. Nautla	720.20
RH27Ae	2	R. Mizantla	585.86
RH27Ad	3	R. Colipa	424.18
RH27Ac	4	R. Yachite	265.59
RH27Ab	5	R. Santa Ana	242.42
RH27Aa	6	R. Barranca H	267.23
RH28Bi	7	R Pajaritos	584.17
RH28Bh	8	R. Actopan-Barra de Chachalacas	692.28
RH28Be	9	R. La Antigua	515.03
RH28Bd	10	R. Paso de Ovejas	677.25

Clave	Numeración	Nombre	Área [km <sup>2</sup> ]
RH28Bc	11	R. San Francisco-Puerto de Veracruz	682.23
RH28Bb	12	R. Jamapa	2,243.46
RH28Ba	13	R. Atoyac	1,681.65
RH28Bf	14	R. Decozalapa	1,628.70
RH28Bg	15	R. Idolos	601.18
RH28Bj	16	R. Cedero	701.40
RH27Ai	17	R. Bobos	1,790.11

En la cuenca 7 “Río Pajaritos” existen 4 presas derivadoras, de las cuales la presa “Hornitos” que se construyó en 1958 fue rehabilitada en 1975 ya que fue dañada por el huracán Fifi en 1974, para 2005 la presa fue reconstruida totalmente. La presa derivadora “Hornitos” es la de mayor antigüedad (1958) en esta cuenca. Además, es la que cuenta con mayor superficie regada (250 ha) y presenta una capacidad de 0.4 m<sup>3</sup>/s en la obra de toma. Las tres presas restantes no han sufrido daños que ameriten modificaciones.

De las seis presas existentes en la cuenca 8 “Río Actopan-Barra de Chachalacas”, cinco de ellas son derivadoras, y solo la presa “El Ojite” es de almacenamiento, misma que no tiene algún tipo de información en el Sistema Nacional de Presas. La presa derivadora “Chalahuite” que se construyó en 1958 y “La Esperanza” fueron parcialmente destruidas por el huracán “Fifi” en 1974, la derivadora Chalahuite no se ha reconstruido, mientras que “La Esperanza” fue rehabilitada en 1979 y la derivadora “El Bobo” no se encontró información en el Sistema de Seguridad de Presas.

La presa derivadora “La Esperanza” construida en 1979, se considera el inicio del regimen alterado en esta cuenca. Cuenta con una capacidad de 10 m<sup>3</sup>/s en la obra de toma. Además, aguas abajo de ella se encuentran 3 presas derivadoras de menores dimensiones.

En la cuenca 9 “Río La Antigua” solo existe la presa derivadora “La Antigua” que fue construida en 1951 y a la fecha no ha tenido ningún daño considerable que amerite reconstrucción.

Existen dos presas dentro de la cuenca 11 “Río San Francisco-Puerto de Veracruz”, una de almacenamiento y otra derivadora. La derivadora “Espinal Santa Bárbara” se construyó en 1967, en años posteriores fue destruida (Se desconoce el motivo y año de la destrucción, puede atribuirse tal vez al huracán Fifi) y en el periodo 1977-1979 fue reconstruida. La presa de almacenamiento “San Francisco Nexactle” cuenta con un volumen útil de  $0.2 \text{ hm}^3$ . Aguas abajo se encuentra la presa derivadora “Espinal Santa Bárbara” que juntas conforman las dos presas existente en esta subcuenca.

Dentro de esta cuenca 12 “Río Jamapa” existen cuatro presas: tres son de almacenamiento y una es derivadora. Dos de ellas, la presa de almacenamiento “La Oaxaquilla” construida en 1977 y “Loma Triste” construida en 1976 con un un volumen útil de  $1.35 \text{ hm}^3$ , cuando se considera el inicio de la alteración del régimen en la cuenca. Ambas son consideradas como grandes presas. Ninguna de las 4 presas ha sufrido modificaciones.

Existen seis presas en la cuenca 13 “Río Atoyac”: dos son derivadoras y cuatro son de almacenamiento. La presa de almacenamiento Mata de Gallo construida en 1972, presuntamente el inicio de la alteración en la cuenca, es considerada como una de las grandes presas. Ninguna ha sufrido modificaciones.

Cinco presas existentes en la cuenca 14 “Río Decozolapa”: dos almacenamientos, dos de derivación; además de la presa “El Sol” que es para control de avenidas. Ninguna ha sufrido modificaciones. Una de las presas de derivación es la presa “El Carrizal” construida en 1971. Se riegan  $5\ 026 \text{ ha}$  de uso agrícola y cuenta con una capacidad de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  en la obra de toma.

En la cuenca 15 “Río Ídolos”, de seis presas existentes en la cuenca, cinco son derivadoras y una es de almacenamiento. Las presas derivadoras: El Aguaje I, Buena Vista e Ídolos fueron destruidas parcialmente en 2010 por el huracán “Karl”; hasta la fecha no se ha reconstruido la presa El Aguaje I e Ídolos, mientras que la presa Buena Vista fue reconstruida en 2011. La derivadora Naranjos fue afectada en 2010 en la

margen derecha por el mismo huracán; sin embargo, sigue funcionando con normalidad, aunque se desconoce la fecha de rehabilitación. Dentro de la cuenca se encuentra la presa de almacenamiento “José Evaristo Molina” considerada dentro de las grandes presas, cuenta con un volumen útil de 1.15 hm<sup>3</sup>. La presa “José Evaristo Molina” se construyó en 1969, inicio del periodo de alteración en la cuenca.

En la cuenca 16 “Río Cedero” existen seis presas; de las cuales, cuatro son derivadoras y dos de almacenamiento. Ninguna ha sufrido modificaciones. La presa de almacenamiento “EL Paisano” fue construida en 1977 marcando, presuntamente, el inicio de la alteración.

En la cuenca 17 “Río Bobos” se encuentran 12 presas; de las cuales 11 son derivadoras y una es hidroeléctrica “El Encanto” construida en 1948 por la CFE, es considerada dentro de las grandes presas. Ninguna ha sufrido cambios.

Como se puede notar, la mayor parte de las presas son de derivación. Además, 5 son consideradas dentro de las grandes presas.

En la Tabla 7.33 se muestra el resumen de periodo de alteración por cuenca:

**Tabla 7.33. Periodo de alteración para las cuencas del área de estudio.**

Núm. Cuenca	Nombre Subcuenca	Fecha de alteración	Presa
7	R Pajaritos	1958-1973 1975-2004 2006-	Hornitos
8	R. Actopan-Barra de Chahalacas	1979-	La Esperanza
9	R. La Antigua	1951-	La Antigua
11	R. San Francisco-Puerto de Veracruz	1985-	San Francisco Necaxtle
12	R. Jamapa	1976-	Loma triste
13	R. Atoyac	1972-	Mata de gallo
14	R. Decozalapa	1971-	El Carrizal

Núm. Cuenca	Nombre Subcuenca	Fecha de alteración	Presa
15	R. Idolos	1969-	José Evaristo Molina
16	R. CedePo	1977-	El Paisano
17	R. Bobos	1948-	El Encanto

En la Tabla 7.32, se muestra la cuenca 7 con diferentes periodos, esto debido a los daños causados en la presa Hornitos por el huracán Fifi en 1974, lo que generó que se detuviera su funcionamiento para rehabilitarla. Posteriormente, en 2005 la presa fue reconstruida. El periodo de alteración de las cuencas restantes es a partir de la fecha de construcción de las presas.

Se procede a realizar el análisis de las series de tiempo de las áreas drenadas que se mostraron independientes en el análisis del Paso 1, y que ahora son agrupadas en las regiones homogéneas 1 y 2, respectivamente.

*B. Análisis de alteración por infraestructura hidráulica en los puntos de control*

Para llevar a cabo la evaluación se utilizaron los datos de las estaciones hidrométricas, que resultaron estadísticamente independientes en el análisis.

**Tabla 7.34. Periodos de registro para las estaciones hidrométricas estudiadas.**

Estación	Periodo de registro	Periodo RHN	Periodo RHA	Observaciones	Características de la infraestructura
28003	1951-2011	NA	1951-2011	Se construye la presa derivadora "La Antigua" en 1951 en la subcuenca 09 Río La Antigua.	Altura: 2.64 m Uso: Agrícola Tipo: Derivadora
27001	1953-2011	NA	1948-2011	Se construye la presa derivadora hidroeléctrica "El Encanto" en 1948 en subcuenca 17 Río Bobos.	Altura: 27.25 m Uso: Generación eléctrica Tipo: Derivadora
27005	1959-2003	1959-2003	NA	No existe alguna infraestructura sobre el cauce principal.	
27006	1961-2003	1961-2003	NA	No existe alguna infraestructura sobre el	

Estación	Periodo de registro	Periodo RHN	Periodo RHA	Observaciones	Características de la infraestructura
				cauce principal.	
28108	1961-2011	1961-1973	1974-2011	Se construye la presa "El Zapote" en 1974 en la subcuenca 08 Río Actopan-Barra de Chachalacas.	Altura: 2.00 m Uso: Agrícola Tipo: Derivadora
28111	1963-2011	1963-1968	1969-2011	Se construye la presa hidroeléctrica J. E. Molina en la subcuenca 15 Río Ídolos.	Altura: 15.00 m Uso: Agrícola Tipo: Almacenamiento
28125	1966-2011	NA	1949-2011	Se construye la presa "Bella Esperanza" en 1949 en subcuenca 14 Río Tecozalapa.	Altura: 4.5 m Uso: Agrícola Tipo: Derivadora

Los periodos fueron determinados de acuerdo a la fecha de construcción de la presa que afectara el cauce principal correspondiente a la estación hidrométrica. Para las estaciones que no cuentan con registros previos a la construcción de la presa se analizó como un solo periodo. En el caso de la estación 27005 y 27006 no se han construido presas sobre sus cauces que generen alteraciones hidrológicas, por lo que las posibles alteraciones se deben a cambios de uso de suelo y/o extracciones menores. De acuerdo a la definición de ICOLD (2011), la presa derivadora El Encanto y de almacenamiento J.E. Molina, ambas para producción de energía hidroeléctrica, son clasificadas como grandes presas conforme a la altura de la cortina.

### 7.5.3. Selección de rangos de variación

#### $P_{33}$ y $P_{67}$

Richter (1995) en el análisis de rangos de variabilidad (RVA, siglas en inglés) considera que los umbrales mínimo y máximo de caudales corresponden a los valores determinados por el percentil 33 y 67, respectivamente.

Sólo es posible realizar el análisis de rangos de variabilidad para las estaciones que tienen registro antes y después de la construcción de infraestructura hidráulica que pudiera generar alteración en el régimen hidrológico.

### *P<sub>25</sub> y P<sub>75</sub>*

Por otro lado IHA, también analiza los  $P_{25}$  y  $P_{75}$  como umbrales de caudales, mismos que fueron analizados para fines de comparación en estaciones que presentan un periodo y dos periodos.

### *P<sub>10</sub> y P<sub>90</sub>*

La norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 (SE, 2012) es más tolerante a los límites inferior y superior de la determinación de alteración del régimen hidrológico por lo que considera al percentil 10 y 90, respectivamente para el análisis. A continuación, se muestran las gráficas con los rangos de variabilidad de  $P_{90}$  y  $P_{10}$  anual para las estaciones que tienen registro antes y después de la construcción de infraestructura hidráulica que pudiera generar alteración en el régimen hidrológico.

## **7.5.4. Aplicación de Indicadores hidrológicos de alteración hidrológica (IHA) y Apéndice B NMX-159-SCFI-2012**

De acuerdo a la Tabla 7.34 del apartado 7.5.2. “Selección del periodo natural y alterado”, se procede a realizar el análisis con el software IHA, con el objetivo de analizar los umbrales a nivel mensual del grupo I de indicadores denominado “Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales”.

### *Estación hidrométrica 27001*

Debido a que no se cuenta con información previa al impacto de la construcción de la presa solo se presenta un periodo de análisis. Se sugiere un análisis para la naturalización del régimen con modelos lluvia-escurrimiento, considerándose fuera de los alcances de la presente investigación.

### *Estación hidrométrica 28003*

Debido a que no se cuenta con información previa al impacto de la construcción de la presa no se tienen resultados con los cuales comparar, se sugiere proceder de igual forma para la estación 27001.

### Estación hidrométrica 28125

Debido a que no se cuenta con información previa al impacto de la construcción de la presa no se tiene una forma de comparar los resultados. Por lo que solo se sugiere proceder de igual forma para la estación 27001.

### Estación hidrométrica 27005

En el cauce donde se encuentra la estación hidrométrica, y en toda la superficie de aportación, no se han construido presas que generen una alteración al régimen hidrológico. En la Tabla 7.35, se presentan las magnitudes de los estadísticos  $P_{25}$ ,  $P_{75}$  y  $P_{10}$ ,  $P_{90}$  para cada mes como umbrales posibles para una propuesta de régimen ambiental por caracterizar el periodo natural.

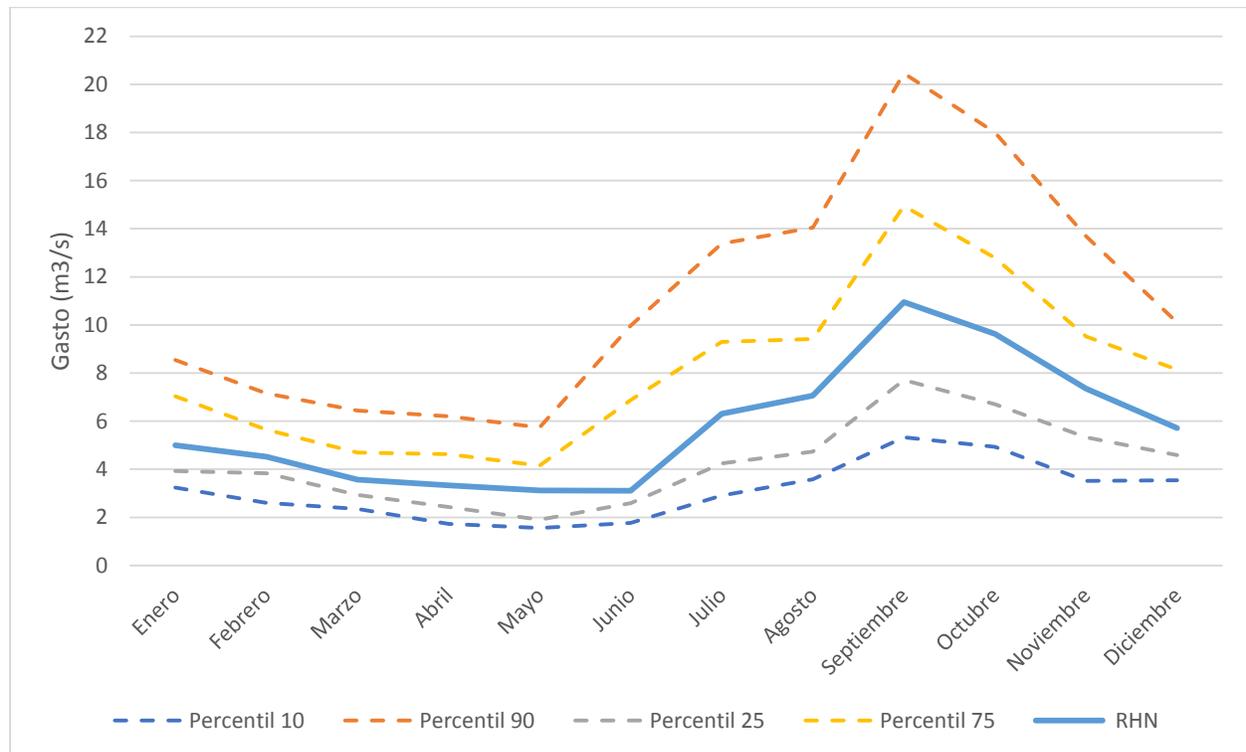
#### A. Condición hidrológica mensual

El caudal medio anual determinado para la serie de datos con registros (1959-2003) es de  $10.07 \text{ m}^3/\text{s}$ . En la Tabla 7.35 se muestran los resultados de los parámetros IHA del grupo 1.

Tabla 7.35. Parámetros de IHA del grupo 1 (medianas de la serie) estación 27005.

Parámetros IHA Grupo 1	Caudal 1959-2003	Percentil 25	Percentil 75	Percentil 10	Percentil 90
Mes	( $\text{m}^3/\text{s}$ )				
Enero	5.00	3.92	7.03	4.49	10.83
Febrero	4.53	3.83	5.65	3.23	7.42
Marzo	3.57	2.93	4.70	2.44	6.02
Abril	3.33	2.44	4.62	1.79	3.71
Mayo	3.12	1.91	4.16	1.75	4.28
Junio	3.11	2.59	6.88	4.13	10.83
Julio	6.31	4.24	9.30	9.13	29.27
Agosto	7.06	4.73	9.42	11.71	23.7
Septiembre	10.95	7.71	14.94	11.14	29.75
Octubre	9.63	6.70	12.79	13.03	26
Noviembre	7.35	5.33	9.53	10.05	17.7
Diciembre	5.72	4.58	8.15	7.58	14.55

En la Fig. 7.28 se muestran los percentiles 10 y 90 que marca la NMX 159 y los percentiles 25 y 75; igualmente, se presentan los mensuales del RHN para la estación 28108. De su análisis se determina que el RHN no se encuentra alterado, debido a que se encuentra dentro de los umbrales marcados por la NMX 159 en todos los meses del régimen anual.



**Fig. 7.28 Percentiles y RHN para la estación hidrométrica 27005.**

### *Estación hidrométrica 27006*

Al igual que la estación 27005, en el cauce donde se localiza la estación hidrométrica y en el área de aportación de la cuenca no se han construido presas que generen una alteración al régimen hidrológico. Por lo que los parámetros del grupo 1 de parámetros del software IHA, que caracterizan al régimen natural se sugieren para una propuesta de caudal ambiental.

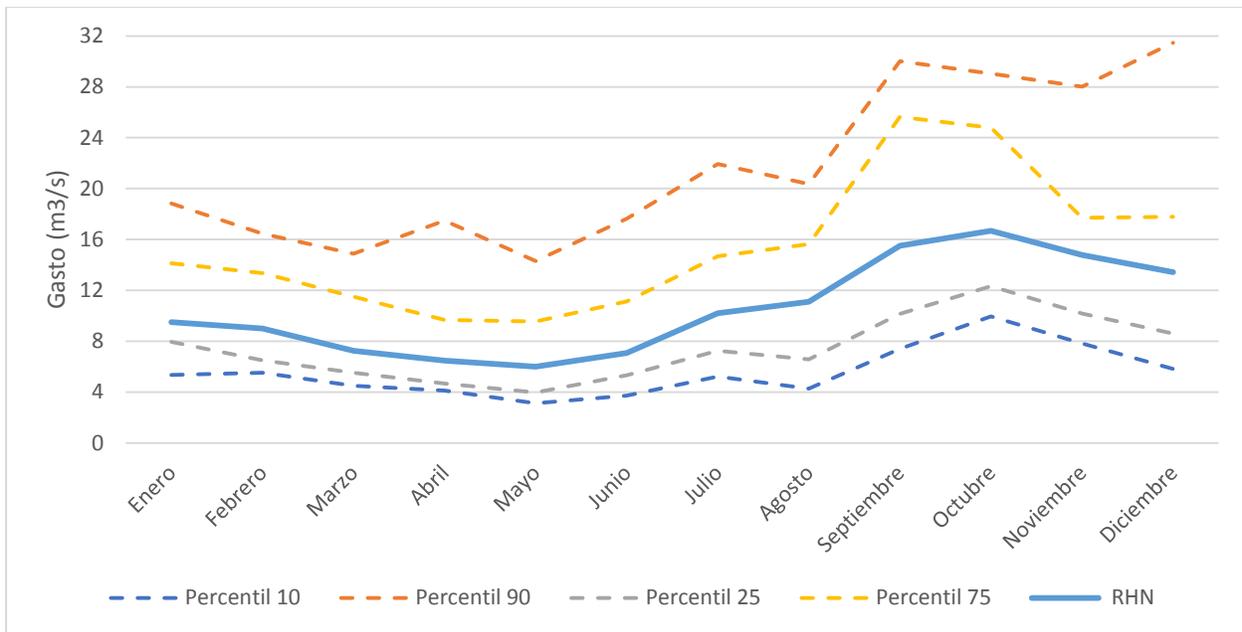
### A. Condición hidrológica mensual

El caudal medio anual determinado para la serie de datos con registros (1961-2003) es de 19.26 m<sup>3</sup>/s. En la Tabla 7.36 se muestran los resultados de los parámetros IHA del grupo 1.

Tabla 7.36. Parámetros de IHA del grupo 1 (medianas de la serie) estación 27006.

Parámetros IHA Grupo 1	Caudal 1961-2003	Percentil 25	Percentil 75	Percentil 10	Percentil 90
Mes	(m <sup>3</sup> /s)				
Enero	9.50	7.94	14.14	5.343	18.84
Febrero	8.99	6.50	13.34	5.511	16.45
Marzo	7.24	5.52	11.51	4.494	14.87
Abril	6.46	4.66	9.67	4.132	17.47
Mayo	5.99	3.97	9.55	3.111	14.31
Junio	7.07	5.32	11.12	3.71	17.64
Julio	10.19	7.24	14.67	5.209	21.93
Agosto	11.11	6.57	15.63	4.265	20.35
Septiembre	15.51	10.15	25.64	7.395	30.01
Octubre	16.69	12.33	24.79	9.938	29.03
Noviembre	14.79	10.18	17.70	7.835	28.01
Diciembre	13.42	8.60	17.78	5.83	31.46

En la Fig. 7.29 se muestran los percentiles 10 y 90 que marca la NMX 159 y los percentiles 25 y 75; igualmente, se presentan los mensuales del RHN para la estación 28108. De su análisis se determina que el RHN no se encuentra alterado, debido a que se encuentra dentro de los umbrales marcados por la NMX 159 y Richter durante todos los meses.



**Fig. 7.29. Percentiles y RHN para la estación hidrométrica 27006.**

### Estación hidrométrica 28108

La estación hidrométrica 28108 “El Naranjillo” se encuentra en la corriente del río Actopan, que corresponde a la subcuenca Río Actopan-Barra de Chachalacas. En esta estación hidrométrica se considera el régimen hidrológico natural (RHN) de 1961 a 1973 y el régimen hidrológico alterado (RHA) de 1974 a 2011. Esto debido a que en el año 1974 se construyó la presa derivadora “El Zapote” con lo que se dio inicio a la alteración del régimen hidrológico. Una vez definidos ambos periodos se procedió a su análisis del Grupo I, con el software IHA7-1. Considérese que no se cuenta con al menos de 20 años de registro en el régimen natural.

### Condición hidrológica mensual

El caudal medio anual determinado antes de la construcción de la presa El Zapote (periodo de pre-impacto) es de 15.49 m<sup>3</sup>/s y de 16.25 m<sup>3</sup>/s después de la construcción de la misma (periodo de post-impacto).

A continuación, se muestran los resultados del análisis interanual de los dos periodos (RHN y RHA) a nivel mensual. En la Fig. 7.30 se muestran los caudales medios para el

RHN y el RHA, determinándose que para los meses de febrero a julio y septiembre el RHA se encuentra sobre los valores de los caudales medios mensuales del RHN, mientras que los meses de enero, agosto y octubre a diciembre se mantienen por debajo de los valores del RHN.

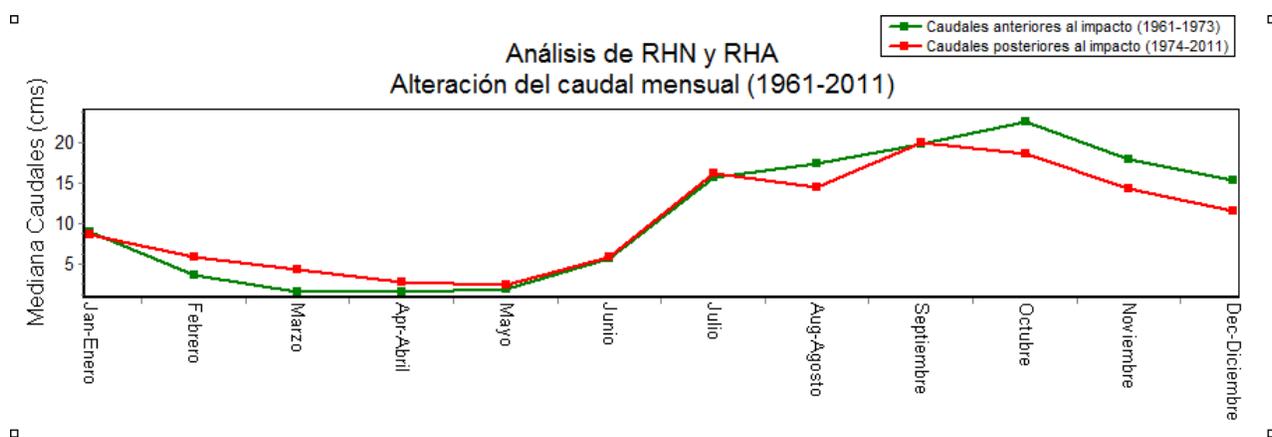


Fig. 7.30. Caudales medios mensuales del RHN y RHA de la estación hidrométrica 28108.

Los caudales mensuales de la cuenca, registrados en la estación 28108, se muestran levemente alterados, (Tabla 7.37). Las modificaciones que ha sufrido dan como resultado un aumento en el caudal de febrero a abril y una disminución del mismo en agosto y octubre a diciembre, mientras que para los meses enero, mayo, junio, julio y septiembre el gasto se mantiene prácticamente similar en ambos periodos.

Tabla 7.37. Parámetros de IHA del grupo 1 (medianas de la serie) estación 28108.

Parámetros IHA Grupo 1	Caudal 1961-1973	Percentil 25	Percentil 75	Caudal 1974-2011	Percentil 25	Percentil 75
Mes	(m <sup>3</sup> /s)					
Enero	8.86	6.90	12.37	8.53	4.49	10.83
Febrero	3.55	1.62	4.36	5.89	3.23	7.42
Marzo	1.61	1.28	3.33	4.26	2.44	6.02
Abril	1.53	1.21	1.83	2.70	1.79	3.71
Mayo	1.80	1.45	2.11	2.34	1.75	4.28
Junio	5.66	1.42	7.94	5.84	4.13	10.83
Julio	15.70	11.38	23.48	16.15	9.13	29.27
Agosto	17.33	10.44	24.72	14.40	11.71	23.70

Parámetros IHA Grupo 1	Caudal 1961-1973	Percentil 25	Percentil 75	Caudal 1974-2011	Percentil 25	Percentil 75
Mes	(m <sup>3</sup> /s)					
Septiembre	19.69	15.91	31.08	19.89	11.14	29.75
Octubre	22.52	14.07	26.93	18.55	13.03	26.00
Noviembre	17.93	12.01	21.66	14.18	10.05	17.70
Diciembre	15.36	9.48	17.92	11.43	7.58	14.55

En un análisis de toda la serie de tiempo para cada mes, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Fig. 7.30.

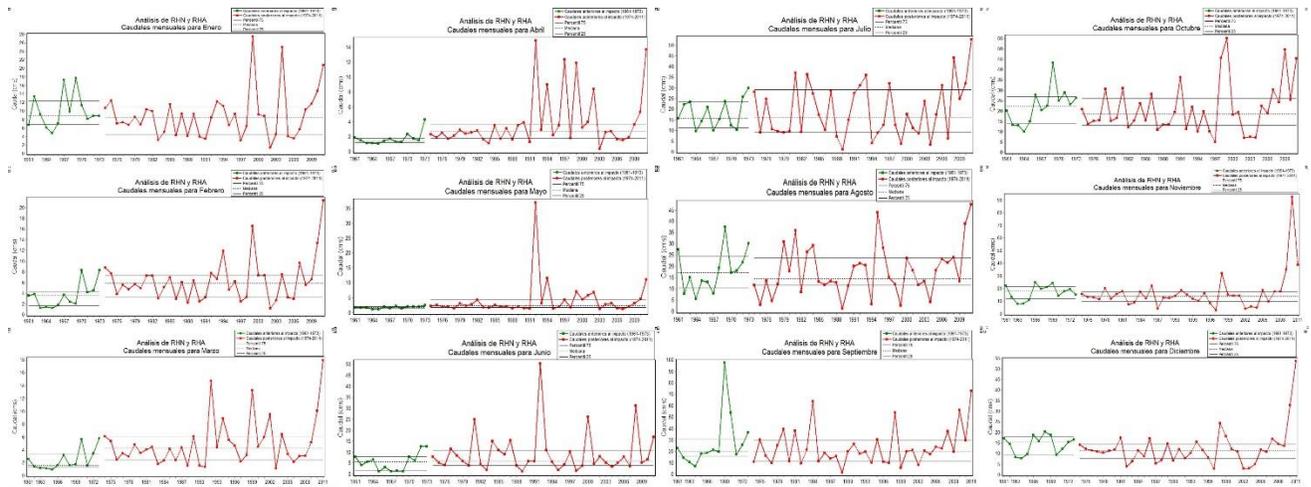


Fig. 7.31. Análisis mensual del P<sub>25</sub> y P<sub>75</sub> en la estación 28108.

Se observa en la Fig. 7.30 mes de enero gastos registrados superiores al P<sub>75</sub>, con mayor frecuencia desde 1992; además que el valor de gasto correspondiente al P<sub>75</sub> del régimen alterado con respecto al P<sub>75</sub> del régimen natural es menor. Mismo efecto se observa en el P<sub>25</sub>, siendo el del régimen alterado mucho más bajo. En el mes de febrero se presenta el P<sub>75</sub> del régimen alterado mucho mayor que en el supuesto régimen natural, de igual manera para el P<sub>25</sub>. Se presenta la misma situación en los meses de marzo, abril y mayo; mismos meses que reconocen al periodo de secas; se presenta la misma situación pero con menor severidad en el mes de junio. A partir del mes de julio los percentiles 25 y 75 del régimen alterado son mayores a los del régimen natural. En los meses de agosto a diciembre, los percentiles 25 y 75 son similares en

los dos regímenes por lo que se infiere que en la temporada de avenidas no hay alteración.

En el análisis de rangos de variabilidad (RVA), donde los percentiles 33 y 67 definen los umbrales, se obtuvo el gráfico de la Fig. 7.32 donde los índices de magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales los gastos correspondientes a los meses de febrero a mayo superan valores de alteración hidrológica mayores a 1, p. e. el mes de abril se incrementan hasta 150%.

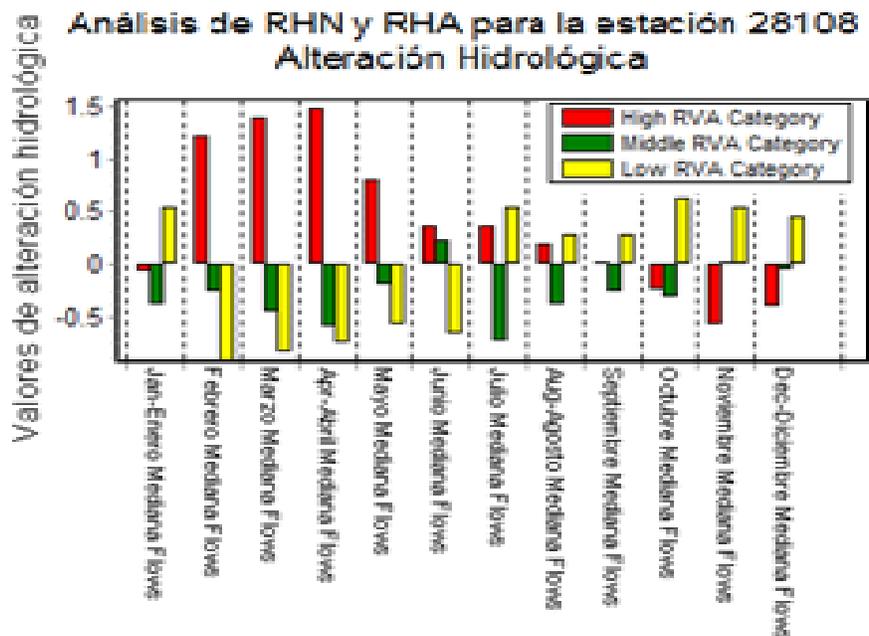
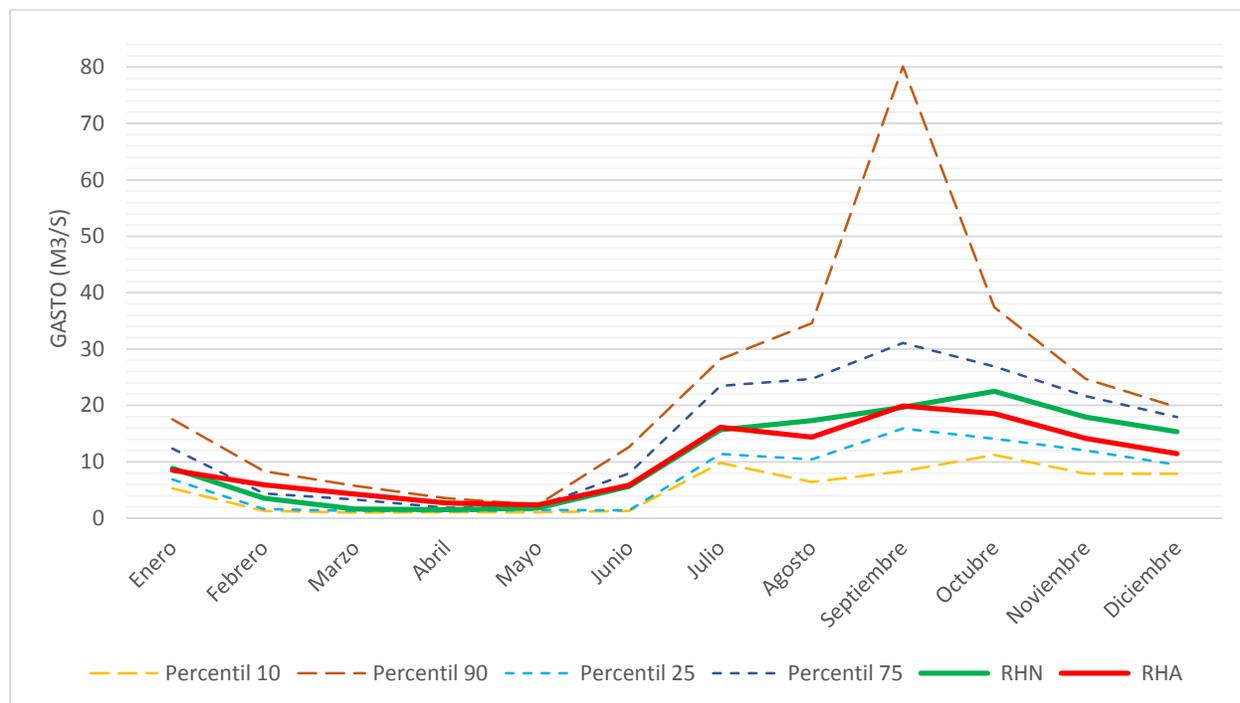


Fig. 7.32. Análisis de RVA para de los IHA del grupo I en la estación 28108.

De acuerdo con Richter (1995), los parámetros de gasto mensual influyen en las siguientes condiciones en el ecosistema:

- Disponibilidad del hábitat para organismos acuáticos
- Disponibilidad de humedad del suelo para las plantas
- Disponibilidad de agua para los animales terrestres
- Disponibilidad de alimentos/ cobertura para mamíferos con pelo
- Confiabilidad del abastecimiento de agua para los animales terrestres
- Acceso de los depredadores a los sitios de anidación

- Influye en la temperatura del agua, los niveles de oxígeno y la fotosíntesis en la columna de agua



**Fig. 7.33. Percentiles, RHA y RHN para la estación hidrométrica 28108.**

En la Fig. 7.33 y Tabla 7.38 se muestra los percentiles 10 y 90 del RHN que marca la NMX 159, igualmente se presentan los mensuales del RHA para la estación 28108.

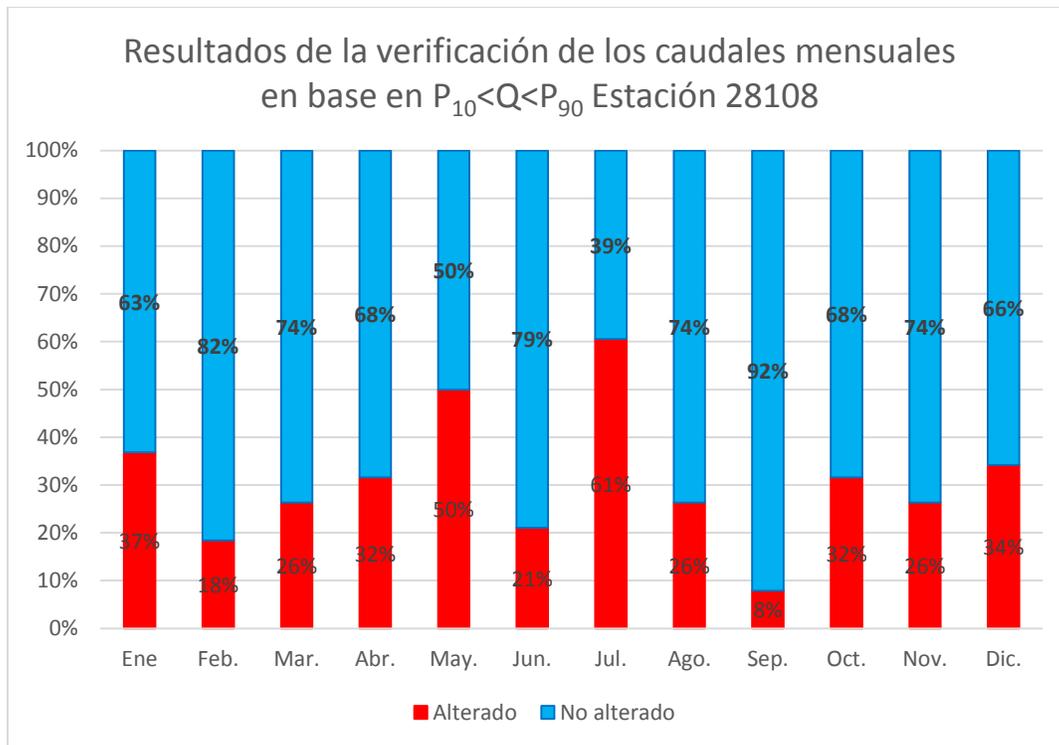
**Tabla 7.38. Cálculo mensual de percentiles 10 y 90 en RHN (1961-1973) y RHA (974-2011) estación 28108.**

Mes	RHN		RHA	
	Percentil 10	Percentil 90	Percentil 10	Percentil 90
<b>Enero</b>	5.31	17.56	3.48	15.35
<b>Febrero</b>	1.26	8.34	2.50	12.12
<b>Marzo</b>	1.01	5.75	1.57	10.40
<b>Abril</b>	1.08	3.53	1.55	11.97
<b>Mayo</b>	1.07	2.38	1.44	7.46
<b>Junio</b>	1.30	12.61	1.94	25.08
<b>Julio</b>	9.81	28.21	3.91	36.43
<b>Agosto</b>	6.44	34.57	3.14	36.18
<b>Septiembre</b>	8.35	80.12	9.47	54.26
<b>Octubre</b>	11.23	37.42	7.50	45.38

<b>Noviembre</b>	7.91	24.70	4.91	32.40
<b>Diciembre</b>	7.91	19.68	3.80	18.84

A continuación, se muestran los resultados de la metodología desarrollada para la aplicación del apéndice B de la NMX 159 en la estación 28108.

Concluido el cálculo de los percentiles 10 y 90 de la serie de datos del periodo del RHN se procedió a verificar si los caudales mensuales de cada mes de cada año del RHA, segunda parte de la serie, se encontraban dentro del rango del percentil 10 y el percentil 90 del RHN, o fuera de ese intervalo. La gráfica de resultados que se muestra en la Fig. 7.34 indica que el régimen hidrológico no se ha visto afectado por la construcción de la presa derivadora “El Zapote” de acuerdo a lo que se indica en el punto 3 del apéndice B de la norma, dado que de los 456 datos mensuales con los que se cuenta solo 141 se muestran fueran del rango que comprende el percentil 10 y 90 para cada mes. Para los promedios anuales, solo 3 de 38 datos se encuentra fuera del rango de los percentiles 10 y 90. Sin embargo, se obtiene que en los meses de mayo y julio existe una alteración, dado que al menos el 50 % de los registros se encuentran fuera del umbral definido por el  $P_{10}$  y  $P_{90}$ .



**Fig. 7.34. Resultados de la verificación de los caudales del RHA contenidos en entre el percentil 10 y 90 del RHN.**

No obstante, para el caso de Richter que tiene los límites más acotados se tiene mayor proximidad a encontrarse alterado ya que un tercio de los meses se encuentra fuera del umbral. Lo anterior es una conclusión con un análisis mensual promedio.

#### *Estación hidrométrica 28111*

La estación hidrométrica 28111 “Ídolos” se encuentra sobre la corriente y cuenca que llevan el mismo nombre. Se asume que la corriente se vio alterada con la construcción de la presa hidroeléctrica José Evaristo Molina en 1969, por lo que se consideró el régimen hidrológico natural (RHN) de 1963 a 1968 y el régimen hidrológico alterado (RHA) de 1969 a 2011. Una vez definidos ambos periodos se procedió a su análisis del Grupo I, con el software IHA7-1.

### Condición hidrológica mensual

El caudal medio anual determinado antes de la construcción de la presa de almacenamiento José Evaristo Molina (periodo de pre-impacto) es de 2.93 m<sup>3</sup>/s y de 4.83 m<sup>3</sup>/s después de la construcción de la misma (periodo de post-impacto).

En la Fig. 7.34, se muestran los caudales medios para el RHN y el RHA, determinándose que solo el mes de octubre el RHA se encuentra por debajo del valor del RHN. En los meses restantes los valores del RHA se encuentran por arriba del RHN.

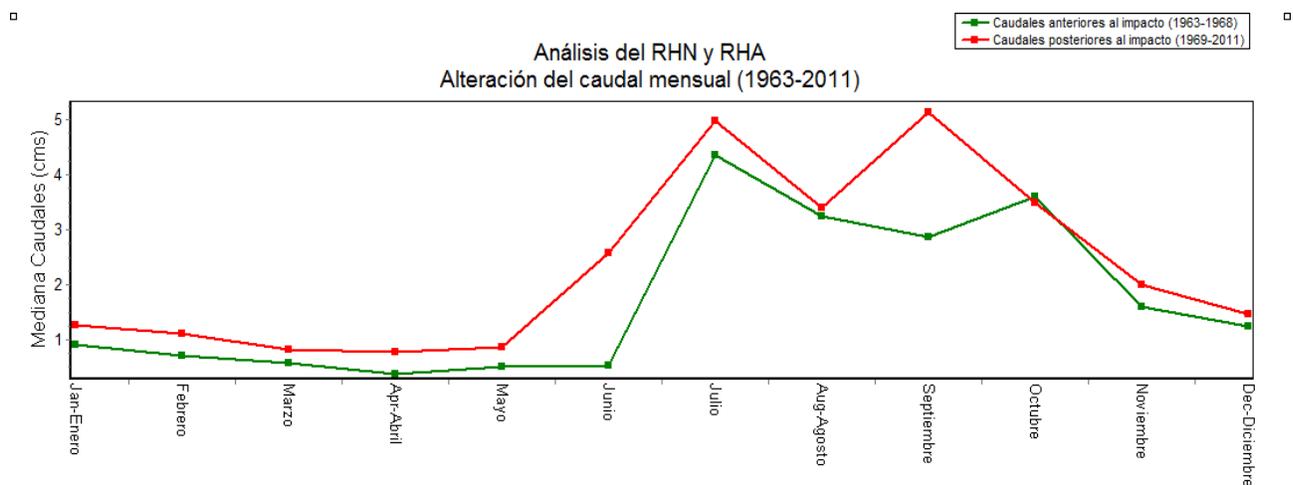


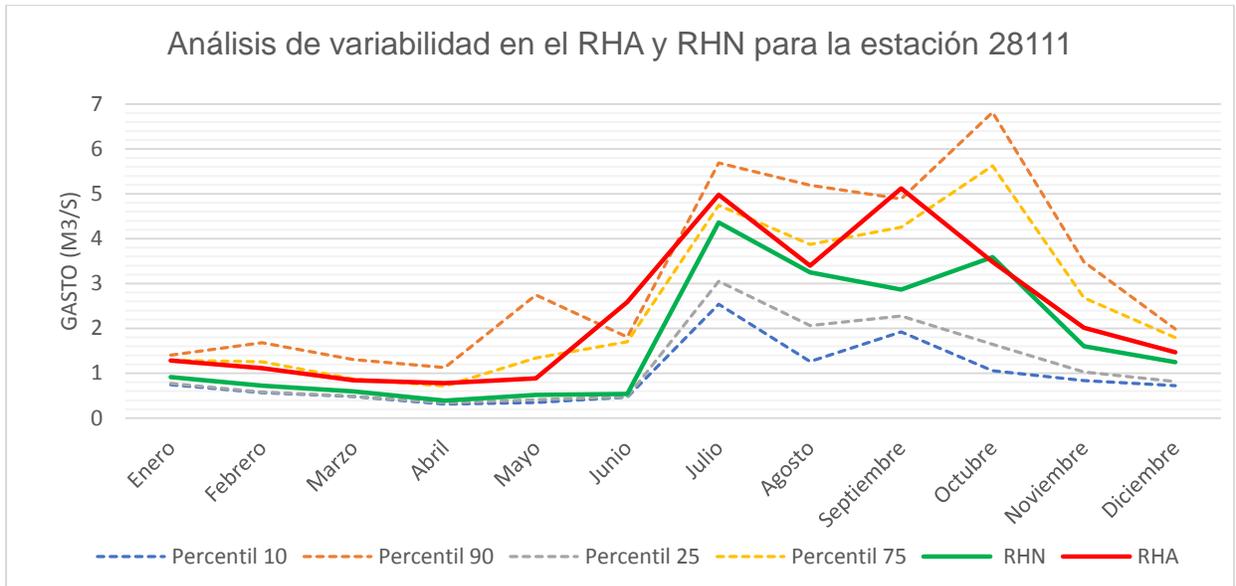
Fig. 7.35. Caudales medios mensuales del RHN y RHA de la estación hidrométrica 28111.

Los caudales mensuales de la cuenca, registrados en la estación 28111, se muestran alterados (Tabla 7.39). Las modificaciones que ha sufrido dan como resultado un aumento en el caudal de todos los meses a excepción de agosto y octubre que se presentan gastos similares en el periodo pre y pos impacto; con la construcción de la presa el flujo aumentó prácticamente en todos los meses. Esto puede ser debido al corto registro (6 años) con el que se cuenta previo al impacto de la construcción de la presa.

Tabla 7.39. Parámetros de IHA del grupo 1 (medianas de la serie), con percentiles 25 y 75 estación 28111.

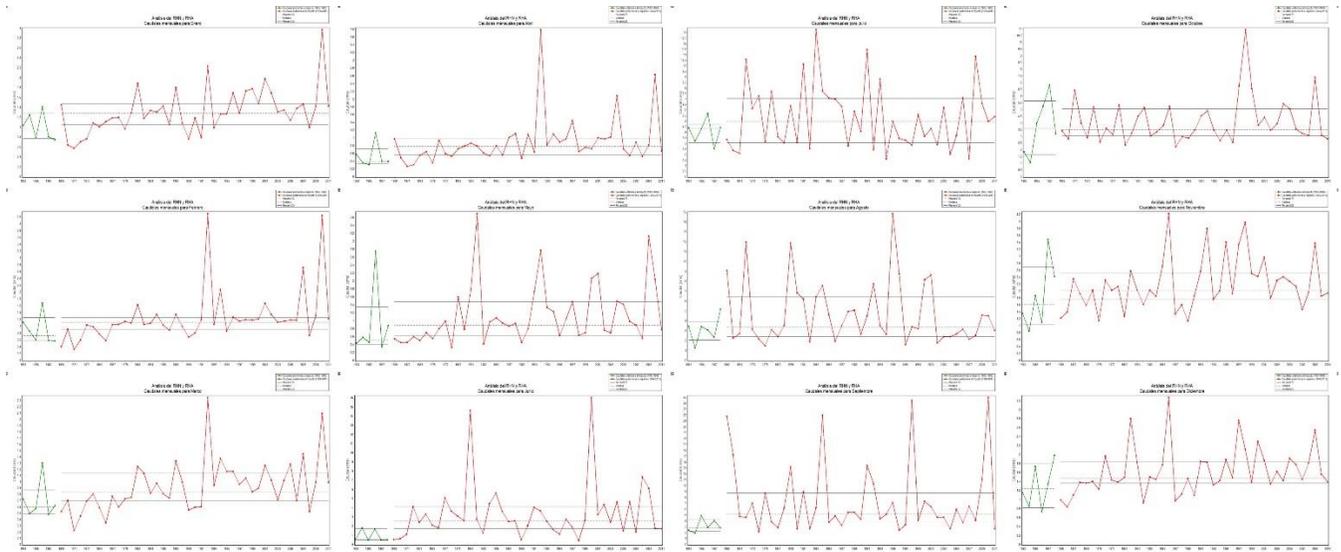
Parámetros IHA Grupo 1	Caudal 1963-1968	Percentil 25	Percentil 75	Caudal 1969-2011	Percentil 25	Percentil 75
Mes	(m <sup>3</sup> /s)					
Enero	0.92	0.77	1.29	1.29	1.05	1.47
Febrero	0.72	0.58	1.25	1.11	0.91	1.26
Marzo	0.60	0.49	0.87	0.84	0.70	1.14
Abril	0.39	0.34	0.71	0.78	0.56	0.98
Mayo	0.52	0.41	1.34	0.89	0.62	1.48
Junio	0.54	0.48	1.70	2.59	1.70	4.13
Julio	4.36	3.05	4.75	4.98	3.06	7.08
Agosto	3.25	2.07	3.87	3.40	2.40	6.41
Septiembre	2.87	2.27	4.26	5.12	3.79	8.71
Octubre	3.59	1.65	5.62	3.49	3.03	5.04
Noviembre	1.60	1.03	2.68	2.02	1.75	2.50
Diciembre	1.25	0.82	1.79	1.47	1.37	1.85

De acuerdo con el análisis realizado con IHA -percentiles 25 y 75- (Fig. 7.35), se tiene que los meses de abril, junio, julio y septiembre en RHA presentan gastos promedios por arriba del percentil 75. Los meses enero, febrero y marzo se encuentran muy cerca de los valores del percentil 75. Los restantes se mantienen dentro del rango comprendido entre ambos percentiles.



**Fig. 7.36. Percentiles, RHA y RHN para la estación hidrométrica 28111.**

En un análisis de toda la serie de tiempo para cada mes, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Fig. 7.36.



**Fig. 7.37. Análisis mensual del  $P_{25}$  y  $P_{75}$  en la estación 28111.**

Se observa en la Fig. 7.36 mes de enero y diciembre que el gasto correspondiente al  $P_{75}$  del régimen alterado con respecto al  $P_{75}$  del régimen natural es mayor. Mismo efecto se observa en el  $P_{25}$ , siendo el del régimen alterado mucho más alto que en el régimen natural. En el mes de febrero se presenta el  $P_{75}$  del régimen alterado similar al

del régimen natural, pero no es el caso del  $P_{25}$ , dado que en el régimen natural es de menor magnitud. En los meses de marzo y abril los valores de ambos percentiles son más bajos en el régimen natural; el mes de mayo presenta el mismo comportamiento pero con menor severidad. Caso contrario son los meses de junio y septiembre donde el  $P_{75}$  del régimen natural es similar al  $P_{25}$  del régimen alterado. En los gastos registrados en los meses de julio y agosto el  $P_{25}$  es coincidente en ambos regímenes, sin embargo el  $P_{75}$  es mayor en el régimen alterado. En los casos de los meses de octubre y noviembre, el percentil 75 es mayor en régimen natural que alterado; así mismo, el percentil 25 es menor en el régimen natural que en el alterado.

Para el análisis de rangos de variabilidad (RVA), donde los percentiles 33 y 67 definen los umbrales, se obtuvo el gráfico de la Fig.7.37 donde los índices de magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales los gastos correspondientes a los meses de enero a abril, junio y septiembre superan valores de alteración hidrológica mayores a 1, p. e. el mes de abril se incrementan hasta 150%. Este resultado muestra correspondencia con el análisis realizado en la estación 28108, misma que esta aguas abajo a la 28111 donde el área de aportación de la 28108 es parte de la 28111. Como resultado del RVA, se consideraría como régimen alterado el registro de la estación 28111.

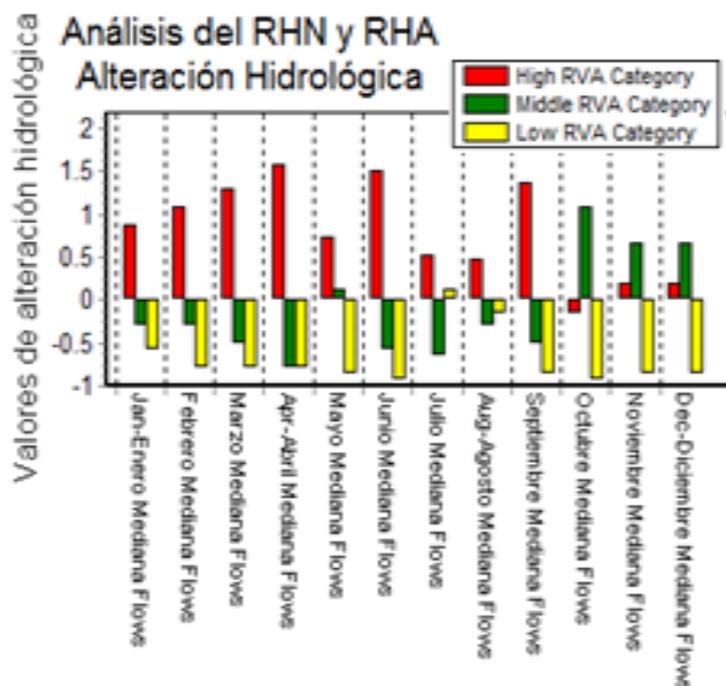


Fig. 7.38. Análisis de RVA para de los IHA del grupo I en la estación 28111.

En la Fig. 7.35, también se muestran los percentiles 10 y 90 del RHN (NMX 159), de su análisis se determina que solo los meses de junio y septiembre se encuentra sobre los valores del percentil 90, mientras que los meses de enero, abril y diciembre se aproximan a superarlo. Los meses restantes se mantienen dentro del rango comprendido entre ambos percentiles.

A continuación, en la Tabla 7.40 se muestran los resultados de la metodología antes desarrollada para la aplicación del apéndice B de la NMX 159 para la estación 28111.

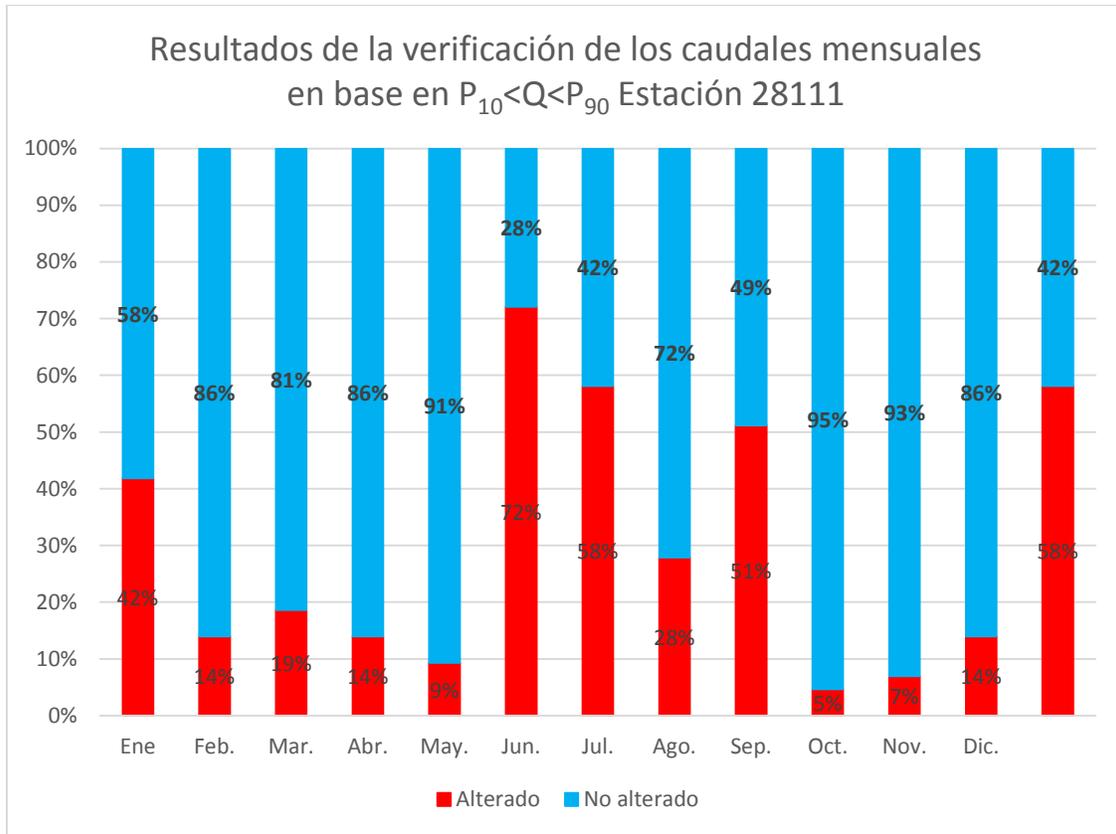
Tabla 7.40. Cálculo mensual de percentiles 10 y 90 en RHN (1963-1968) y RHA (1969-2011), estación 28111.

Meses	RHN [m <sup>3</sup> /s]		RHA [m <sup>3</sup> /s]	
	Percentil 10	Percentil 90	Percentil 10	Percentil 90
<b>Enero</b>	0.74	1.41	0.76	1.85
<b>Febrero</b>	0.57	1.68	0.63	1.91
<b>Marzo</b>	0.48	1.30	0.53	1.36

Meses	RHN [m <sup>3</sup> /s]		RHA [m <sup>3</sup> /s]	
	Percentil 10	Percentil 90	Percentil 10	Percentil 90
<b>Abril</b>	0.31	1.13	0.47	1.31
<b>Mayo</b>	0.35	2.75	0.45	2.14
<b>Junio</b>	0.47	1.81	0.81	5.92
<b>Julio</b>	2.54	5.69	2.21	10.39
<b>Agosto</b>	1.26	5.19	1.89	8.94
<b>Septiembre</b>	1.92	4.89	2.65	19.16
<b>Octubre</b>	1.06	6.82	2.61	6.50
<b>Noviembre</b>	0.84	3.48	1.29	3.39
<b>Diciembre</b>	0.73	1.98	1.03	2.44

Concluido el cálculo de los percentiles 10 y 90 se concluye que el P<sub>10</sub> en ambos periodos no ha tenido mayores alteraciones, sin embargo el P<sub>90</sub>, muestra cambios de junio a septiembre, haciendo más húmedo en el RHA en estos meses (Tabla 7.46). La gráfica de resultados que se muestra en el Fig. 7.39 indica que el régimen hidrológico no se ha visto afectado por la construcción de la presa José Evaristo Molina de acuerdo a lo que se indica en el punto 3 del Apéndice B.

De los 516 datos mensuales con los que se cuenta solo 143 se muestran fueran del rango que comprende el percentil 10 y 90 para cada mes. Se observa en la Fig. 7.38, que los meses de junio, julio y septiembre sí se encuentran alterados. Para los datos anuales 25 de 43 datos anuales se encuentra fuera del rango. Por lo que se concluye, de acuerdo a la NMX 159, que la estación 28111 no está alterada.



**Fig. 7.39. Resultados de la verificación de los caudales del RHA contenidos en entre el percentil 10 y 90 del RHN de la estación 28111.**

## 8. CONCLUSIONES

Conforme con los datos, métodos y recursos informáticos y digitales disponibles se puede desarrollar la base hidrológica del proceso científico propuesto por ELOHA para clasificar, agrupar y/o analizar cuencas aforadas o no aforadas individualmente y por regiones de interés para proponer estrategias de caudal ambiental que respondan a las necesidades de usuarios y preserven los ecosistemas.

El uso de recursos públicos obtenidos en CONAGUA, CONABIO e INEGI permite establecer el fundamento hidrológico, la clasificación geomorfológica y el análisis de las alteraciones para la priorización en la aplicación de caudales ambientales con base en las condiciones propias del territorio nacional, permitiéndose la adaptación para diferentes objetivos.

En cuanto al análisis de consistencia de los datos, es importante enfatizar que la falta de datos y porosidad de la información es un factor limitante en la regionalización de cuencas hidrológicas. La validez de trabajar con un periodo de retorno u otro, como resultado de las pruebas de homogeneidad, permiten percibir que para obtener mayor detalle y lograr relacionar las alteraciones en la cuenca se sugiere un análisis no estacional.

El  $7Q_{10}$  es un estadístico útil para establecer un **límite mínimo** para caudal ambiental en cuencas no aforadas. Para este caso, se utilizó a nivel anual; sin embargo, se puede realizar a nivel mensual y/o diario; con la finalidad de obtener un régimen. Se recomienda realizarlo para temporada seca y de avenidas, al menos. El modelo matemático que infiere el  $7Q_{10}$  de las cuencas no aforadas no es válido hasta una calibración con aforos en campo y/o análisis de información obtenida por percepción remota.

Después de haber obtenido dos regiones homogéneas en el área de estudio se concluye que la aplicación de diversas técnicas es necesaria debido a que cada una analiza los datos de manera particular; y que conociendo las fortalezas de los datos y de la zona se puede tener mayor confianza en una técnica en particular. Se reconoce que los trazos multidimensionales y la técnica de región de influencia, son las únicas aplicables a cuencas no aforadas. Las variables explicativas con mayor importancia son la precipitación de enero a abril y la pendiente media de la cuenca; además, del área de la cuenca.

Se identifica a la región 1 con régimen de periodo húmedo que comienza en junio y finaliza en diciembre. Por otro lado la región 2, presenta el mismo periodo húmedo pero con la particularidad de que en agosto tiene una ligera baja.

Es muy difícil transferir gastos entre cuencas debido a la poca información hidrométrica y a que las series históricas de las mismas en su mayoría son posteriores a las alteraciones. De 13 estaciones, sólo fue posible analizar datos de presunto régimen natural en 4 estaciones. Se reconoce que el análisis de alteración es una primera aproximación, debido a que no se logró proponer hidrogramas naturalizados y alterados en las cuencas no aforadas, fuera de las regiones homogéneas con punto de control. Si bien Poff et al. (2010), recomienda el uso de diversos software para lograrlo, esto requieren gran cantidad de insumos, mismos que pueden ser usados de fuente secundaria o tomados en campo, provocando que la aplicación del marco ELOHA resulte costosa. En las cuencas asociadas a los puntos de control de las estaciones 27005 y 27006, donde no se identifica alteración del régimen por infraestructura, se recomienda realizar un análisis para identificar los cambios paulatinos por cambio de uso de suelo y/o extracciones; por ellos se induce que es necesario el proceso técnico para la naturalización de los cauces, no sólo en el área de estudio, sino en diversas cuencas del país que no cuentan con registros del régimen natural necesarios para la definición de caudal ecológico, p. e. en procesos de recuperación de ríos.

Resultante de la falta de datos hidrométricos consistentes el modelo de RLM resulta deficiente en la búsqueda de un límite de caudal ambiental en las cuencas no aforadas. Las condiciones de datos en la República Mexicana permiten concluir que la presente

metodología realizada cuenta con muchas limitantes, incluido el hecho de que sólo se realizó la base hidrológica del proceso científico del ELOHA. Si bien, ahora se conocen los recursos públicos que permiten el desarrollo de esta etapa del marco ELOHA, se reconoce que se requiere de un equipo interdisciplinario y trabajo en campo para culminarlo con mayor certeza.

Las regiones homogéneas se determinaron a gran escala, por lo que se recomienda una escala menor dependiendo del objetivo establecido. Se recomienda programar y automatizar la metodología propuesta con el fin de tener un mayor alcance en el análisis y poder concluir en una clasificación completa a nivel región homogénea.

Se requiere de una visita de campo para corroborar las clasificaciones geomorfológicas obtenidas con SIG, para proceder a una clasificación nivel III y/o IV, y así contar con mayor detalle. Dependiendo del objetivo buscado, se recomienda realizar más secciones tipo en los tramos a clasificar. Además, se sugiere utilizar un mayor procesador de cálculo para re-escalar la base de datos original del MDE tipo LiDAR y llegar a una clasificación geomorfológica con mayor detalle. En la zona de estudio el factor limitante en la región homogénea 1 fue que no existe MDE tipo LiDAR. Se concluye que la pendiente media longitudinal es la variable con mayor efecto en la clasificación geomorfológica.

Al definirse por diferentes percentiles los umbrales de IHA-RVA y de la NMX 159, no conllevan a los mismos resultados en los puntos de control donde fueron aplicados de la región homogénea dos. Se establece como límites de alteración los asociados a la estación 28108 para una propuesta de caudales ambientales en la región, seleccionando los umbrales de acuerdo al objetivo requerido. Las variaciones del régimen de caudal en los gastos mensuales, que se han analizado con la aplicación de la herramienta IHA7.1 de TNC; en conjunto con los demás estadísticos de alteración, permitirán la conectividad con el Paso 4 “Relaciones Caudal-Ecología”; al proceder con la obtención y análisis de datos biológicos.

Pese a que la Ley de Aguas Nacionales no refiere el uso ecológico como primera prioridad en la administración del recurso hídrico a nivel cuenca; la tendencia a nivel internacional, federal, estatal y municipal está comenzando a cambiar al considerarlo prioritario. La definición del régimen de caudal ecológico es actualmente una herramienta de política pública fundamentada como principio precautorio ante el cambio climático; si bien en México desde 2012 existe una norma que ayuda en su determinación, es necesario convertir la NMX 159 en norma oficial (NOM) y adjudicar el proceso de verificación a alguna instancia con participación social. Para la determinación de un régimen ecológico, ELOHA se recomienda al ser una metodología integral en la planeación hídrica y territorial en diversas escalas (regionales, estatales o en zonas de conservación) fundamentada en tres ejes principales: hidrológico-hidráulico, ecológico y de gobernanza.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alonso-Eguía-Lis P., González Villela R. (2007) en “Introducción a los caudales ambientales” recopilado por Alonso-Eguía, L.; Gómez B., M.; Saldaña F. P. *Requerimientos para Implementar el Caudal Ambiental en México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Alianza World Wildlife Fundación Gonzalo Río Arronte, Programa Hidrológico Internacional-Organización de la Naciones Unidas para la Ciencia, la Educación y la Cultura y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Jiutepec, Morelos. 176 p.

Alonso Eguía-Lis, Perla E. (2007). *Evaluación y aplicación del modelo holístico de caudal ecológico para ríos mexicanos*. IMTA. Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua. Subcoordinación de Hidrobiología y Evaluación Ambiental. Jiutepec, Mor., México.

Aparicio M., F. J. (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*, Ed. Limusa, México, 299 p.

Aparicio F.J, Gómez J.F, y Patiño C, (2010), *Manual de análisis de frecuencias en hidrología*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Mor. 158p

Aparicio F.J, Gómez J.F, y Patiño C, (2010), *Manual de análisis de frecuencias en hidrología*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Mor. 158p.

Angus Webb, J., R. Bond, N., R. Wealands, S., Mac Nally, R., P. Quinn, G., A. Vesk, P., & R. Grace, M. (2007). Bayesian clustering with AutoClass explicitly recognises uncertainties in landscape classification. *Ecography*, 30(4), 526–536.

- Ashkar, J.; Bayentin, N.; Savoie, N. E.-J. (2009). *Frequency Analysis of Low Streamflow Characteristics Using Statistical Distributions*. In World Water Congress 2004 (Vol. 8013, p. 9).
- Bravard, J.P. y Gilvear, D.J. (1993): «Structure hydro-géomorphologique des hydrosystèmes». En Amoros, C. y Petts, G.E. (coords.): *Hydrosystèmes fluviaux*, París, Masson, pp. 83-103.
- Bunn, S. E., & Arthington, A. H. (2002). Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental management*, 30(4), 492-507.
- Campos A. D. F. (1987). *Procesos del Ciclo Hidrológico*, Volumen 1, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, 524 p.
- Conferencia de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP-16), (2010). *Diálogo Regional de Política de América Latina y el Caribe. Retos y Oportunidades en Adaptación al Cambio Climático en Materia de Agua: Elementos para una Agenda Regional*. Cancún, Quintana Roo, México. Diciembre de 2010.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (1992). Ley nacional de aguas nacionales. Diario Oficial de la Federación (DOF). Última reforma publicada el 11 de agosto de 2014.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2011). Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2011), *Identificación de reservas potenciales de agua para el medio ambiente en México*. Comisión Nacional del Agua-Alianza WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. México, DF. Septiembre de 2011.

Conesa, C. (1999): «Cambio ambiental y equilibrio dinámico de los cauces». *Papeles de Geografía*, nº 30, pp. 31-46.

Cruz- Miguel, Martín Lucino, (2012). *Obras hidráulicas de protección marginal*. Tesis de Maestría en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Distrito federal México. 116 pp.

Cuevas, M. L., Garrido, A., & Sotelo, E. I. (2010). Regionalización de las cuencas hidrográficas de México. *Las cuencas hidrográficas de México: Diagnostico y priorización*. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, Fundación Gonzalo Río Arronte IAP, Ciudad de México, México, 10-13.

Dietrich, W.E. y Dunne, T. (1993): *The channel head*. En: Beven, K. y Kirkby, M.J. (eds): *Channel network hydrology*. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, pp. 175-219

Dyson, M., Bergkamp, G., & Scanlon, J. (2003). *Flow: the essentials of environmental flows*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.

EPA. Environmental Protection Agency, (2006). [www.epa.gov](http://www.epa.gov).

García de Jalón D., Gonzáles del Tánago M., (2006). *El concepto de caudal ecológico y criterios para su aplicación en los ríos españoles [en línea]*. Departamento de Ingeniería Forestal. Escuela de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Memorias del 5º Congreso Ibérico. Faro, Portugal.  
Disponible para Word Wide Web:

<http://ocw.um.es/ciencias/ecologia/ejercicios-proyectos-y-casos-1/jalontanago-1998.pdf>

Garrido, A., Cuevas, M., Cotler, H., González, D., & Tharme, R. (2010). *Evaluación del grado de alteración ecohidrológica de los ríos y corrientes superficiales de México*. *Investigación Ambiental*, 2(1), 25–46.

Gopal, B. (2013). Methodologies for the Assessment of Environmental Flows. In *Environmental Flows An Introduction for Water Resources Managers* (pp. 129–182).

Horacio, J., & Ollero, a. (2011). *Clasificación geomorfológica de cursos fluviales a partir de sistemas de información geográfica (S.I.G)*. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 56, 373–396.

Hamilton, D. A., & Seelbach, P. W. (2011). Michigan's water withdrawal assessment process and internet screening tool. *Fisheries Division Special Report*, 55.

Huang, W.; Nnaji, G. A.; Gitau, M. & Clarck II, C. (2014). Frequency Analysis of Minimum Ecological Flow and Gauge Height in Suwannee River, Florida. *Journal of Coastal Research*, 68(2010), 152–159.

Ibáñez A. Sara. Métodos para la determinación del tiempo de concentración (tc) de una cuenca hidrográfica [en línea]. Departamento de producción vegetal. Escuela técnica superior de ingeniería agronómica y del medio natural. Universidad Politécnica de Valencia, España. Disponible para *Word Wide Web*: <http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10781/Coeficiente%20de%20escorrent%C3%ADa.pdf>

Kendy (2009). *Applications of the ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA) in the United States*. ELOHA Applications - University of Washington.

---

Disponible para Word Wide  
Web:[http://depts.washington.edu/oldenlab/wordpress/wp-content/uploads/2013/03/Kendy-et-al-ELOHA-applications\\_2009.pdf](http://depts.washington.edu/oldenlab/wordpress/wp-content/uploads/2013/03/Kendy-et-al-ELOHA-applications_2009.pdf)

Kennard, M. J., Pusey, B. J., Olden, J. D., MacKay, S. J., Stein, J. L., & Marsh, N. (2010). Classification of natural flow regimes in Australia to support environmental flow management. *Freshwater Biology*, 55(1), 171–193.

LAN: *Ley de Aguas Nacionales*. En: [www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16.pdf)

Linnansaari, T., Monk, W. A., Baird, D. J., & Curry, R. A. (2013). *Review of approaches and methods to assess Environmental Flows across Canada Canada and internationally*, 3848 DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2012/039.

Locke, A., Stalnaker, C., Zellmer, S., Williams, K., Beecher, H., Richards, T. & Annear, T. (2008). Integrated approaches to riverine resource stewardship: Case studies, science, law, people, and policy. *Instream Flow Council*, Cheyenne, WY.

Manciola, P.; Pierleoni, A.; Bellezza, M., and Casadei, S., (2004). Weibull distribution parameters computation in low flow phenomena. *Proceedings of the IASTED International Conference on Environmental Modelling and Simulation*. St. Thomas, Virgin Islands USA, pp. 192- 196.

Maddock, I. (1999). The importance of physical habitat assessment for evaluating river health. *Freshwater Biology*, 41(2), 373–391. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1999.00437.x>

Orsini-Zegada, L. (2011). *Distribuciones mezcladas en el análisis de frecuencias de flujos mínimos*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Osorio-González M.; González-Villarreal F. J.; Carrillo-Sosa J. J. & Reyes-Hernández J.; (2014). González Villarreal Fernando Jorge , Carrillo Sosa Juan Javier , Reyes Hernández Jorge Luis y. In *XXI / I CONGRESO NACIONAL DE HIDRÁULICA*.
- Palau, A. (2003). *Régimen ambiental de caudales: estado del arte*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Pedraza, J. (1996): *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*. Madrid, Rueda, 414 pp.
- Petts, G.E. y Amoros, C. (coord) (1996): *Fluvial hydrosystems*. London, Chapman & Hall Ltd, 322 pp.
- Pérez-Alberti, A. (1981): *Aproximación xeográfica aos vales fluviais en Galicia*. Cuadernos de Estudios Galegos, nº 32 (96-97), pp. 7-36.
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., & Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime. *BioScience*, 47(11), 769-784.
- Poff, N. L., Richter, B. D., Arthington, A. H., Bunn, S. E., Naiman, R. J., Kendy, E., ...& Warner, A. (2010). *The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards*. *Freshwater Biology*, 55(1), 147-170.
- Programa de ONU-Agua para la Promoción y la Comunicación en el marco del Decenio (UNW-DPAC) (2015). [citado el 02 de febrero de 2016]. Disponible para *Word* *Wide* *Web*:  
[http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/green\\_economy\\_2011/pdf/info\\_brief\\_watersheds\\_and\\_aquifers\\_spa.pdf](http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/green_economy_2011/pdf/info_brief_watersheds_and_aquifers_spa.pdf)

- Real R.R.A, (2015). Curso de Hidrología Urbana, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, México. 240p.
- Reidy L. C. A., Olden J.D., Beechie T.J., Keenard M.J, Skidmore P. B., Konrad C.P., Imaki H. (2012) *Hydrogeomorphic classification of Washington state rivers to support emerging environmental flow management strategies*. River research and applications 28. 1340-1358. USA, 2012.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J.M., and Brown, D.P. A (1996). *Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems*. Conservation Biology. Vol. 10, No. 4, pp. 1163-1174.
- Richter, B., Baumgartner, J., Wigington, R. and Braun, D. (1997), How much water does a river need?. *Freshwater Biology*, 37: 231–249.
- Richter, B. D., Warner, A. T., Meyer, J. L., & Lutz, K. (2006). A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations. *River research and applications*, 22(3), 297-318.
- Richter, B.D. (2010). Re-thinking environmental flows: From allocations and reserves to sustainability boundaries. *Rivers Research and Applications* 26: 1052-1063.
- Risley, J., Stonewall, A., & Haluska, T., (2008). Estimating flow-duration and low-flow frequency statistics for unregulated streams in Oregon: *USGS Scientific Investigations Report 2008-5126*.
- Rivas-Carpio J., Maya-Franco A., O.-G. N. N. y, & A., L.-M. (2014). *Evaluación del potencial hidroeléctrico en la cuenca del río La Antigua*. In XXI I I CONGRESO NACIONAL DE HIDRÁULICA (pp. 3–6).

- Robinson, J. S., & Sivapalan, M. (1997). Temporal scales and hydrological regimes: Implications for flood frequency scaling. *Water Resources Research*, 33(12), 2981-2999.
- Rodríguez T., S. (2012), *Caracterización ambiental y determinación de caudal ecológico en la cuenca del Río Verde, Oaxaca*. Tesis de Maestría en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Jiutepec, Morelos, México. 116 pp.
- Rodríguez-Gallego, L., Chreties, C., Crisci, M., Fernández, M., Colombo, N., Lanzilotta, B., Saravia M., Neme C., Sabaj V.y Conde D., (2011). *Fortalecimiento del concepto de Caudales Ambientales como Herramienta para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos* [en línea]. Vida Silvestre Uruguay. Uruguay. Disponible para Word Wide Web: [http://www.agua.org.mx/h2o/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=1289&Itemid=](http://www.agua.org.mx/h2o/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=1289&Itemid=)
- Rosgen, D.L., (1994). A Classification of Natural Rivers. *Catena* 22:169-199.
- Rosgen, D.L., (1996). *Applied River Morphology (Second Edition)*. Wildland Hydrology, Pagosa Springs, Colorado
- Secretaría de Economía. (2012). NMX-AA-159-SCFI-2012, Norma que Establece el Procedimiento para la Determinación del Caudal Ecológico en Cuencas Hidrológicas, publicada en el Diario oficial de la federación el 20 de septiembre de 2012. México.
- SEMARNAT, (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. México.

SEMARNAT, (2014). *Ríos libres y vivos, introducción al caudal ecológico y reservas de agua*. México.

Servicio de información agroalimentaria y pesquera (SIAP). Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2015 [citado el 02 de septiembre de 2015]. Disponible para *Word Wide Web*: <http://www.siap.gob.mx/>

Schumm, S.A. (1977): *The fluvial system*. New York, John Wiley & Sons, 338 pp.

Schumm, S.A. y Lichty, R.W. (1965): «Time, space and causality in Geomorphology». *American Journal of Science*, nº 263, pp. 110-119.

Sistema de Seguridad de Presas (2012). Comisión Nacional del Agua, [consultado el 03 de noviembre de 2016]. En <http://201.116.60.136/inventario/hinicio.aspx>

Smakhtnin, V. U. (2001). Low flow hydrology: A review. *Journal of Hydrology*, 240, 147–186.

The Nature Conservancy (2010). *Ecological Limits of Hydrologic Alteration*. Environmental Flows for Regional Water Management. Disponible para *Word Wide Web*: [www.iwmi.cgiar.org/.../ELOHA\\_FACT\\_SHEET.pdf](http://www.iwmi.cgiar.org/.../ELOHA_FACT_SHEET.pdf)

The Nature Conservancy (2011). *Indicadores de alteración hidrológica, versión 7.1. Manual del usuario* [en línea] [citado el 16/10/2015]. Disponible para *Word Wide Web*: <http://www.conservationgateway.org/Files/Pages/indicadores-de-alteraci%C3%B3n.aspx>.

Twidale, C.R. (1976): *Analysis of landforms*. Australia, Wiley & Sons, 572 pp.

Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). (2017), Centro Regional de Capacitación en Cuencas [en línea] [citado el 10/02/2017. Disponible para *Word Wide Web*: <http://fcu.uaq.mx/crcc/index.php>

Villanueva U., Alata-Rey J. R., Eliezer J. (2011). *Análisis y propuesta de una metodología para la determinación del caudal ecológico en centrales hidroeléctricas del Perú, aplicación a un caso típico*. Tesis de Maestro en ciencias con mención en energética. Facultad de Ingeniería mecánica. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

USGS. (1999). Estimation of Minimum 7-Day , 2-Year Discharge for Selected Stream Sites , and Associated Low-Flow Water-Quality Data , Southeast Texas , 1997 – 98, (July), 2–5.

Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, P., Bunn, S. E., Sullivan C. A., Liermann, R. y Davies, P. M. (2010). *Global threats to human water security and river biodiversity*. *Nature*, 467(7315), 555-561.

Ward, J. V. (1989). The four-dimensional nature of lotic ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 8(1), 2-8.

Watershed Academy, [sin fecha]. Environmental Protection Agency [en línea] [citado el 02/02/2016. Disponible para *Word Wide Web*: [https://cfpub.epa.gov/watertrain/moduleFrame.cfm?parent\\_object\\_id=1189](https://cfpub.epa.gov/watertrain/moduleFrame.cfm?parent_object_id=1189)

Werrity, A. (1997): «Short-term changes in channel stability». En Thorne, C.R., Hey, R.D. y Newson, M.D. (eds.): *Applied fluvial geomorphology for river engineering and management*, Chichester, Wiley, pp. 47-65.

WMO. (2008). Manual on Low-flow Estimation and Prediction. *Operational Hydrology Report* (Vol. No, 50). <https://doi.org/WMO-No. 1029>.

WWF. *Cómo conservar los ríos vivos-Guía sobre caudales ecológicos [en línea]*. 1er. Reimpresión. México DF. Octubre, (2010) [citado el 30 de noviembre de 2013]. Disponible para *Word Wide Web*:

[http://www.agua.org.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=14218:como-conservar-los-rios-vivos-guia-sobre-los-caudales-ecologicos&catid=1293:caudales-ecologicos&Itemid=99](http://www.agua.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=14218:como-conservar-los-rios-vivos-guia-sobre-los-caudales-ecologicos&catid=1293:caudales-ecologicos&Itemid=99)

WWF-Fundación Gonzálo Río Arronte, Comisión Federal de Electricidad, C. N., de Áreas Naturales Protegidas, C. N. para el C. y U. de la, Biodiversidad, I. de B. e I. de la U. N. A., de México, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, I. N. de E., Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, T. N. C. y W., & Wildlife Fund, I. P. M. (2006). Norma Mexicana Caudal Ecológico Hoja Informativa. *[en línea]*. [citado el 30 de noviembre de 2014]. Disponible para *Word Wide Web*:  
[http://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/norma\\_mexicana\\_caudal\\_ecologico\\_hoja\\_informativa.pdf](http://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/norma_mexicana_caudal_ecologico_hoja_informativa.pdf)