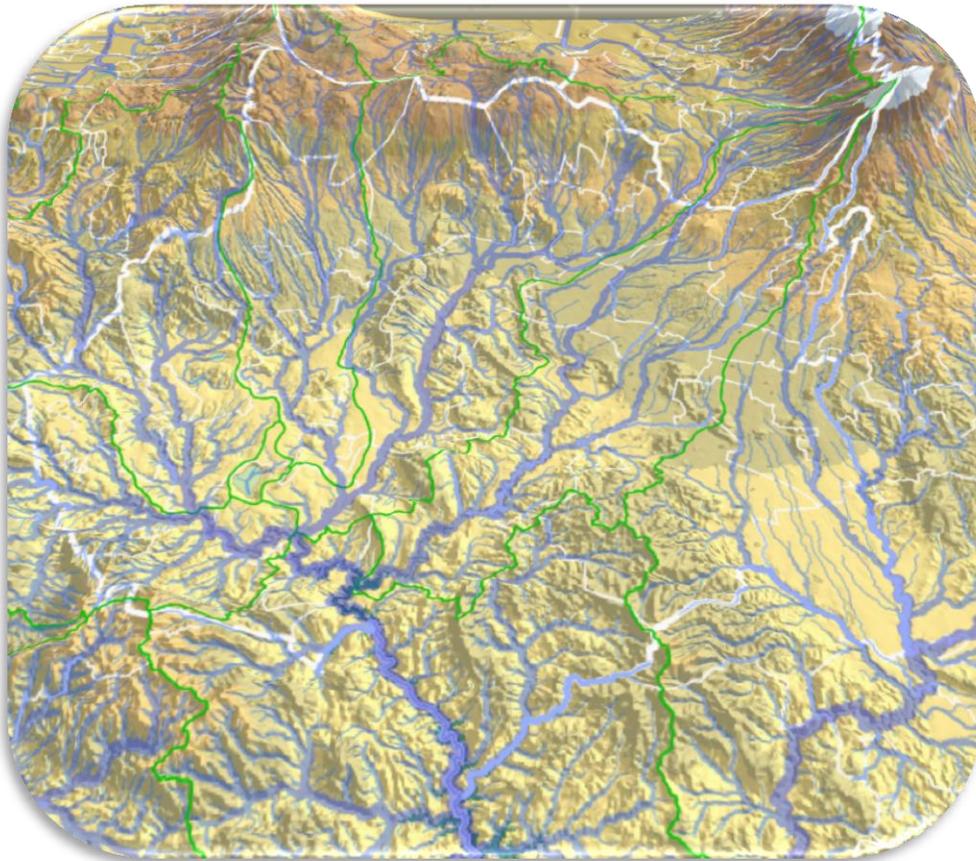


Estrategia para la aplicación de la norma de caudal ambiental hacia un enfoque adaptativo al cambio climático así como implementar la NMX-AA-159-SCFI-2012 para su difusión en el área focal de Eco-hidrología



Proyecto Interno

Diciembre de 2013

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	6
OBJETIVOS.....	8
ANTECEDENTES .....	9
IHA.....	10
ESTADÍSTICAS EN R.....	11
RESULTADOS ESPERADOS .....	12
METODOLOGÍA .....	13
METODOLOGÍA IHA .....	13
ESTADÍSTICAS CON R.....	15
ÁREA DE ESTUDIO .....	16
LOCALIZACIÓN .....	16
INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA .....	17
INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA.....	18
MUNICIPIOS Y POBLACIÓN .....	20
RESULTADOS.....	23
CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	23
USO DE SUELO Y VEGETACIÓN .....	24
ESTACIONES HIDROMÉTRICAS .....	27
RÉGIMEN NATURAL .....	28
ESTACIONALIDAD Y TENDENCIA.....	32
ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS .....	36
ANÁLISIS DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS .....	38
TENDENCIAS MENSUALES DE LAS ESTACIONES REPRESENTATIVAS .....	41
APLICACIÓN DE LA NMX .....	45
TENNANT MODIFICADO POR GARCÍA ET AL. 1990 .....	45
ALTERACIONES .....	56
CALIDAD DEL AGUA .....	62
ANTECEDENTES .....	62
RESULTADOS .....	62

SITIOS PRIORITARIOS PARA LA CONSERVACIÓN .....	70
INDICADORES ECOHIDROLÓGICOS EN EL MARCO PER (PRESIÓN – ESTADO – RESPUESTA) .....	72
PRESAS.....	72
PROGRAMA HÍDRICO ESTATAL. (CONAGUA, 2010A) .....	74
LÍNEAS GENERALES.....	74
BALANCE DE LAS CUENCAS.....	75
Usos .....	76
CAMBIO CLIMÁTICO Y ADAPTACIÓN .....	80
CONCLUSIONES.....	81
BIBLIOGRAFÍA .....	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	17
FIGURA 2. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS EN EL ESTADO DE MORELOS. ....	18
FIGURA 3. LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS EN EL ESTADO DE MORELOS.....	20
FIGURA 4. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN .....	21
FIGURA 5. MUNICIPIOS DEL ESTADO DE MORELOS.....	22
FIGURA 6. SUBCUENCAS DEL ESTADO DE MORELOS. ....	23
FIGURA 7. USO DE SUELO Y VEGETACIÓN SERIE V INEGI 2010.....	25
FIGURA 8. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS EN EL ESTADO DE MORELOS.....	27
FIGURA 9. VARIABILIDAD INTER-ANUAL.....	29
FIGURA 10. VARIABILIDAD INTRA-ANUAL .....	32
FIGURA 11. TENDENCIAS ESTACIONALES DE LOS DATOS HIDROMÉTRICOS. ....	35
FIGURA 12. TEMPERATURA OBSERVADA, PROMEDIO ANUAL.....	36
FIGURA 13. TEMPERATURA MÁXIMA, PROMEDIO ANUAL .....	36
FIGURA 14. TEMPERATURA MÍNIMA, PROMEDIO ANUAL.....	37
FIGURA 15. PRECIPITACIÓN PROMEDIO .....	37
FIGURA 16. HIPSOMETRÍA.....	38
FIGURA 17. TIPOS CLIMÁTICOS .....	39
FIGURA 18. ESTACIONES REPRESENTATIVAS CON REFERENCIA A LA ALTITUD, UBICACIÓN EN SUBCUENCAS Y TIPOS CLIMÁTICOS .....	41
FIGURA 19. TENDENCIAS MENSUALES DE TEMPERATURA MÁXIMA.....	42
FIGURA 20. TENDENCIAS MENSUALES DE TEMPERATURA MÍNIMA .....	44
FIGURA 21. TENDENCIAS MENSUALES DE PRECIPITACIÓN.....	45

FIGURA 22. CAUDAL ECOLÓGICO TEMIXCO.....	47
FIGURA 23. CAUDAL ECOLÓGICO ZACATEPEC.....	48
FIGURA 24. CAUDAL ECOLÓGICO YAUTEPEC .....	49
FIGURA 25. CAUDAL ECOLÓGICO TICUMAN .....	50
FIGURA 26. CAUDAL ECOLÓGICO LA CUERA.....	51
FIGURA 27. CAUDAL ECOLÓGICO DOS BOCAS .....	52
FIGURA 28. CAUDAL ECOLÓGICO AMACUZAC.....	53
FIGURA 29. CAUDAL ECOLÓGICO XICATLACOTLA.....	54
FIGURA 30. CAUDAL ECOLÓGICO TETLAMA .....	55
FIGURA 31. CAUDAL ECOLÓGICO ALPUYECA .....	56
FIGURA 32. MESES QUE CUMPLE Y % DE CUMPLIMIENTO PARA LA ESTACIÓN ZACATEPEC.....	57
FIGURA 33. ALTERACIONES CON RESPECTO A LOS UMBRALES DEL RÉGIMEN NATURAL ZACATEPEC .....	57
FIGURA 34. MESES QUE CUMPLE Y % DE CUMPLIMIENTO PARA LA ESTACIÓN TICUMAN .....	58
FIGURA 35 ALTERACIONES CON RESPECTO A LOS UMBRALES DEL RÉGIMEN NATURAL TICUMAN .....	58
FIGURA 36. MESES QUE CUMPLE Y % DE CUMPLIMIENTO PARA LA ESTACIÓN XICATLACOTLA.....	59
FIGURA 37. ALTERACIONES CON RESPECTO A LOS UMBRALES DEL RÉGIMEN NATURAL XICATLACOTLA .....	59
FIGURA 38. MESES QUE CUMPLE Y % DE CUMPLIMIENTO PARA LA ESTACIÓN AMACUZAC.....	60
FIGURA 39. ALTERACIONES CON RESPECTO A LOS UMBRALES DEL RÉGIMEN NATURAL AMACUZAC.....	60
FIGURA 40. MESES QUE CUMPLE Y % DE CUMPLIMIENTO PARA LA ESTACIÓN ALPUYECA .....	61
FIGURA 41. ALTERACIONES CON RESPECTO A LOS UMBRALES DEL RÉGIMEN NATURAL ALPUYECA.....	61
FIGURA 42. RESULTADOS PROMEDIO PARA EL AÑO 2009, DE INDICADORES DE CALIDAD DEL AGUA EN LOS SITIOS DE MONITOREO EN EL ESTADO DE MORELOS. CONCENTRACIÓN EN MG/L. ....	63
FIGURA 43. ZONAS DE ESTUDIO DEL RÍO APATLACO (CONAGUA, 2010).....	64
FIGURA 44. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO. ....	65
FIGURA 45. CARGA DE DBO POR GIRO INDUSTRIAL .....	65
FIGURA 46. CAUDAL DEL RÍO APATLACO. ....	66
FIGURA 47. CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO Y CONDUCTIVIDAD EN EL RÍO. ....	67
FIGURA 48. CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES EN EL RÍO.....	67
FIGURA 49. CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN EL RÍO.....	68
FIGURA 50. CONCENTRACIÓN DE DBO Y DQO EN EL RÍO. ....	68
FIGURA 51. SITIOS PRIORITARIOS ACUÁTICOS EPICONTINENTALES .....	70
FIGURA 52. SITIOS PRIORITARIOS TERRESTRES. ....	71
FIGURA 53. LOCALIZACIÓN DE LAS PRESAS EN EL ESTADO. ....	72
FIGURA 54. OBJETIVOS AMBIENTALES, A PARTIR DE IMPORTANCIA ECOLÓGICA Y PRESIÓN DE USO .....	74
FIGURA 55. PRESIÓN DE Uso (SEMARNAT, 2010) .....	74
FIGURA 56. DISTRITO DE RIEGO 016 (CONAGUA, 2010A).....	76
FIGURA 57. USOS DEL AGUA SUPERFICIAL DEL ESTADO DE MORELOS.....	77
FIGURA 58. ACUÍFEROS DEL ESTADO DE MORELOS(CONAGUA, 2010A) .....	78

FIGURA 59. USOS DE AGUA SUBTERRÁNEA DEL ESTADO DE MORELOS ..... 79

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. DISTRIBUCIÓN TERRITORIAL DE LAS CUENCAS EN EL ESTADO DE MORELOS .....	16
TABLA 2. RELACIÓN DE ESTACIONES HIDROMÉTRICAS EN EL ESTADO DE MORELOS UBICADAS EN CUERPOS DE AGUAS NATURALES. ....	17
TABLA 3. RELACIÓN DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS LOCALIZADAS EN EL ESTADO DE MORELOS, QUE CUENTAN CON MÁS DE 25 AÑOS DE REGISTRO. ....	18
TABLA 4. ÁREAS Y LONGITUDES DE LOS RÍO PRINCIPALES.....	24
TABLA 5. DIFERENTES USOS DE SUELO Y SU COBERTURA EN EL ESTADO.....	25
TABLA 6. VEGETACIÓN RIBEREÑA A LO LARGO DE CADA CORRIENTE .....	26
TABLA 7. ESTACIONES Y SUBCUENCA EN LA QUE SE ENCUENTRAN .....	27
TABLA 8. MEDIANAS MENSUALES DE CADA ESTACIÓN EN METROS CÚBICOS POR SEGUNDO (M <sup>3</sup> /s) .....	29
TABLA 9. UMBRALES DE VARIABILIDAD NATURAL PARA CADA ESTACIÓN. ....	30
TABLA 10. ESTACIONES REPRESENTATIVAS SELECCIONADAS .....	38
TABLA 11. DESCRIPCIÓN DE LA TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN DE CADA TIPO DE CLIMA.....	39
TABLA 12. PORCENTAJES DE REFERENCIA ESTACIONALES PARA EL OBJETIVO AMBIENTAL C.....	46
TABLA 13. RESUMEN DE DATOS MENSUALES PARA QMI, %QMI, %EMA Y QECOL TEMIXCO.....	47
TABLA 14. RESUMEN DE DATOS MENSUALES PARA QMI, %QMI, %EMA Y QECOL ZACATEPEC .....	48
TABLA 15. RESUMEN DE DATOS MENSUALES PARA QMI, %QMI, %EMA Y QECOL YAUTEPEC.....	49
TABLA 16. RESUMEN DE DATOS MENSUALES PARA QMI, %QMI, %EMA Y QECOL TICUMAN .....	50
TABLA 17. RESUMEN DE DATOS MENSUALES PARA QMI, %QMI, %EMA Y QECOL LA CUERA.....	51
TABLA 18. RESUMEN DE DATOS MENSUALES PARA QMI, %QMI, %EMA Y QECOL DOS BOCAS .....	52
TABLA 19. RESUMEN DE DATOS MENSUALES PARA QMI, %QMI, %EMA Y QECOL AMACUZAC.....	53
TABLA 20. RESUMEN DE DATOS MENSUALES PARA QMI, %QMI, %EMA Y QECOL XICATLACOTLA.....	54
TABLA 21. RESUMEN DE DATOS MENSUALES PARA QMI, %QMI, %EMA Y QECOL TETLAMA.....	55
TABLA 22. RESUMEN DE DATOS MENSUALES PARA QMI, %QMI, %EMA Y QECOL ALPUYECA .....	56
TABLA 23. PERCENTILES Y PORCENTAJES DE CUMPLIMIENTO PARA LA ESTACIÓN ZACATEPEC.....	56
TABLA 24. PERCENTILES Y PORCENTAJES DE CUMPLIMIENTO PARA LA ESTACIÓN TICUMAN.....	58
TABLA 25. PERCENTILES Y PORCENTAJES DE CUMPLIMIENTO PARA LA ESTACIÓN XICATLACOTLA .....	59
TABLA 26. PERCENTILES Y PORCENTAJES DE CUMPLIMIENTO PARA LA ESTACIÓN AMACUZAC .....	60
TABLA 27. PERCENTILES Y PORCENTAJES DE CUMPLIMIENTO PARA LA ESTACIÓN ALPUYECA.....	61
TABLA 28. INDICADORES DE CALIDAD DEL AGUA.....	63
TABLA 29. INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA EN EL ESTADO. ....	72
TABLA 30. BALANCE DE AGUAS SUPERFICIALES EN EL ESTADO DE MORELOS (CONAGUA, 2010A).....	76
TABLA 31. USO DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS EN EL ESTADO DE MORELOS.....	79

## **Introducción**

Con el propósito de mantener el equilibrio de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico, así como permitir la protección y conectividad de los ecosistemas riparios, acuáticos, terrestres y costeros, es necesario que se garantice un régimen de caudal ecológico en las corrientes o escurrimientos. Dicho régimen se integra con los escurrimientos de las distintas micro y subcuencas que integran la totalidad de la cuenca de captación y desembocan en los sistemas costeros. Por lo que evaluar y definir el régimen de cada subcuenca es importante a nivel regional para la conservación de los ecosistemas.

Existe una problemática nacional relativa a la disminución del agua en los cauces, derivada de la competencia entre usos y la incompleta regulación conforme a la disponibilidad y asignación del recurso, como por ejemplo, la demanda de agua en sitios aguas arriba de las cuencas hidrológicas, no considera la conservación de un escurrimiento hacia las partes bajas, así como en el caso del agua subterránea no considera, la descarga del acuífero hacia cuerpos de agua superficiales que constituyen el caudal base de los ríos. Al no existir una normatividad específica con respecto al caudal ecológico, las concesiones y asignaciones, así como los permisos de descarga, no han considerado plenamente la necesidad de establecer un régimen de caudal, que es de gran importancia para la preservación de los ecosistemas: fluviales, lacustres, lagunas y estuarios.

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.

El régimen de caudales ecológicos es un instrumento de la gestión del agua, fundamentado en el principio ecológico del régimen natural y el gradiente de la condición biológica, que busca establecer un régimen para sostener a los ecosistemas, los usos del agua y las necesidades de almacenamiento a lo largo del año. Conforme con los criterios establecidos en la norma de caudal ecológico bajo revisión, se clasificarán las subcuencas del estado de Morelos de acuerdo con: 1) aspectos bióticos; 2) integridad ecológica y 3)

Estrategia para la aplicación de la norma de caudal ambiental hacia un enfoque adaptativo al cambio climático así como implementar la NMX-AA-159-SCFI-2012 para su difusión en el área focal de Eco-hidrología

alteración eco hidrológica para determinar su importancia ecológica. Asimismo, se determinará su presión de uso. Posteriormente con la aplicación de metodologías hidrológicas se definirá la estrategia de caudal que considere las presiones por el cambio climático y el riesgo a las poblaciones bióticas.

## **Objetivos**

Determinar reservas potenciales de agua en ríos de Morelos y umbrales de variabilidad como enfoque adaptativo al cambio climático. Diseñar indicadores ecohidrológicos para el análisis de Presión-Estado-Respuesta de los sistemas acuáticos bajo esquemas de aprovechamiento actuales por infraestructura hidráulica y su adaptación potencial

Aplicar herramientas hidrológicas de la NMX-AA-159-SCFI-2012, para identificar el régimen natural de caudal y sus umbrales de variabilidad para calcular los caudales ecológicos en las subcuencas del estado de Morelos

## **Antecedentes**

Actualmente se reconoce que el cambio climático está afectando a los recursos hídricos a nivel global y regional. Los principales efectos sobre los patrones de temperatura y precipitación se han analizado a estos niveles y se están sub-escalando a nivel de cuencas y subcuencas para determinar los efectos potenciales y las posibles estrategias de adaptación.

La variabilidad natural histórica de las corrientes señala un intervalo de comportamiento natural y las magnitudes, frecuencia y duración de eventos extremos de sequía e inundación, aunque en nuestro país los períodos de registro no vayan más allá de 60 años como máximo. Por otro lado, se ha publicado la disponibilidad de más de 700 cuencas en el país (Conagua) la cual se utiliza como el porcentaje de volumen asignado para señalar la presión de uso. Con esta información y el grado de importancia ecológica se han clasificado las cuencas con un objetivo ambiental como A, B, C, o D.

De acuerdo con el objetivo, la norma NMX-AA-159-SCFI-2012 asigna un porcentaje del escurrimiento medio anual (como volumen o caudal) que se recomienda para el ambiente o como reserva de agua, que permitiría mantener la estructura y función de los ecosistemas y contribuir a que estos continúen proporcionando los servicios ambientales y completando su ciclo hidrológico local o regional.

Las estrategias de adaptación reconocen estas reservas para aprovechar los recursos dentro de ciertos límites de su variabilidad, así como para identificar las tendencias que han seguido distintos componentes o indicadores ecológicos y socioeconómicos de las cuencas, bajo esquemas como el promovido por la OCDE de PER Presión-Estado-Respuesta. Además, al definir como se ha llegado a la condición actual se podrán analizar, en el largo plazo, las respuestas o estrategias de adaptación que se tomen.

La NMX-AA-159-SCFI-2012 considera los objetivos ambientales para asignar caudales y volúmenes a las corrientes bajo distintos enfoques hidrológicos, y recomienda utilizar métodos más avanzados que relacionen las características del cauce con la preferencia de hábitat de las especies, además de integrar los requerimientos de agua y riesgos para las poblaciones locales.

## **IHA**

La metodología IHA-RVN se ha consolidado al aplicarse en más de 80 casos alrededor del mundo (ConserveOnline, 2011). Estas aplicaciones se pueden clasificar en tres grupos principales:

**Investigación Hidrológica:** El uso de la metodología y el software IHA-RVA en la evaluación de cambios en las condiciones hidrológicas, incluyendo cambios causados por actividades manejadas por el hombre (embalses, áreas recreativas, distritos de riego, presas para abastecimiento de agua potable, etc.).

**Investigación Ecológica:** Su uso en la evaluación de conexiones entre las condiciones hidrológicas y el tipo de respuesta ecológica. En éste se incluyen estudios específicos de influencias sobre algunas especies, transporte de sedimentos y distribución de la salinidad.

**Formulación de recomendaciones de caudales ambientales:** Este uso incluye trabajos donde el software IHA-RVA, que incluye parámetros hidrológicos, se utiliza para establecer los rangos o intervalos de variación y monitoreo de ciertas variables ambientales.

Con el software IHA V 7.1 (TNC, 2009), se realizan los análisis de indicadores de alteración hidrológica (IHA) y del intervalo de variabilidad (RVA) de las series de tiempo intra e interanuales de 33 parámetros hidrológicos, que se obtienen de los registros de los caudales medios diarios de las estaciones hidrométricas. Dichos parámetros se clasifican dentro de cinco grupos, siendo el primero los caudales medios mensuales; el segundo los máximos y mínimos para distintos períodos de interés (1, 3, 7, 30 y 90 días). El tercer grupo corresponde a las fechas o momento en que ocurren los extremos mínimos y máximos, el cuarto grupo a la duración y conteo de pulsos altos y bajos, mientras que el quinto grupo corresponde a los parámetros asociados a la tasa de cambio, tales como el número de veces que el hidrograma cambia a una condición de incremento a decremento y viceversa.

Del análisis de series de datos hidrológicos diarios, mensuales y anuales (con mejores resultados cuando se cuenta con 20 años de registros o más), se obtiene el régimen de variación natural del caudal, el software realiza análisis de regresión y tendencias mensuales.

Para cada indicador se realizan los análisis paramétricos o no paramétricos estimando las medias o medianas y su dispersión, por desviaciones estándar o percentiles a lo largo de la serie. Posteriormente se comparan las alteraciones impuestas por la regulación del caudal

por las presas u otra infraestructura o manejo, conforme a su comportamiento en las series de tiempo del sistema natural, dentro del intervalo de variabilidad de cada parámetro dado por +/- una desviación estándar o entre los percentiles 25% a 75%.

Las modificaciones a este intervalo de variación, también sirven para evaluar el desempeño de la asignación de caudales ambientales en una corriente regulada estableciendo las metas de cumplimiento. Los distintos percentiles son útiles para recomendar caudales ambientales mensuales o por distintos períodos de tiempo, en lugar de un caudal mínimo a lo largo de todo el año. Este régimen variable contribuye a la salud de las poblaciones y al mantenimiento del ecosistema fluvial.

Con el desarrollo de información sobre el cauce, las inundaciones y los hábitat disponibles, esta metodología puede agrupar los parámetros hidrológicos en cinco componentes del caudal ambiental que corresponden a caudales extremos bajos, caudales bajos, pulsos altos, pequeñas inundaciones y grandes inundaciones de 2 y 10 años de retorno respectivamente. IHA despliega gráficamente estos cinco componentes ambientales que influyen en los ecosistemas acuáticos y riparios, que pueden desglosarse en 34 parámetros EFC (Environmental Flow Components). Por medio de este análisis se asocia un significado al intervalo de variabilidad de los parámetros hidrológicos, en términos de los procesos relacionados con la dinámica del cauce y los requerimientos de los ecosistemas acuáticos y riparios, así como del alcance e importancia de las inundaciones. (Richter et al., 1998).

#### **ESTADÍSTICAS EN R**

R es un conjunto integrado de programas para manipulación de datos, cálculo y gráficos. Entre otras características dispone de:

- Almacenamiento y manipulación efectiva de datos,
- Operadores para cálculo sobre variables indexadas (Arrays), en particular matrices,
- Una amplia, coherente e integrada colección de herramientas para análisis de datos, posibilidades gráficas para análisis de datos, que funcionan directamente sobre pantalla o impresora, y
- Un lenguaje de programación bien desarrollado, simple y efectivo, que incluye condicionales, ciclos, funciones recursivas y posibilidad de entradas y salidas. (Debe destacarse que muchas de las funciones suministradas con el sistema están escritas en el lenguaje R).

Se considera al R como un sistema completamente diseñado y coherente, antes que como una agregación incremental de herramientas muy específicas e inflexibles, como ocurre frecuentemente con otros programas de análisis de datos.

R es en gran parte un vehículo para el desarrollo de nuevos métodos de análisis interactivo de datos. Como tal es muy dinámico, y las diferentes versiones no siempre son totalmente compatibles con las anteriores. Algunos usuarios prefieren los cambios debido a los nuevos métodos y tecnología que los acompañan, a otros, sin embargo, les molesta ya que algún código anterior deja de funcionar. Aunque R puede entenderse como un lenguaje de programación, los programas escritos en R deben considerarse esencialmente efímeros.

R se puede describir como un entorno en el que se han implementado muchas técnicas estadísticas, tanto clásicas como modernas. Algunas están incluidas en el entorno base de R y otras se acompañan en forma de bibliotecas (packages). Junto con R se incluyen ocho bibliotecas (llamadas bibliotecas estándar) pero otras muchas están disponibles a través de Internet en CRAN (The Comprehensive R Archive Network - <http://www.r-project.org>).

Como hemos indicado, muchas técnicas estadísticas, desde las clásicas hasta la última metodología, están disponibles en R, pero los usuarios necesitarán estar dispuestos a trabajar un poco para poder encontrarlas.

Existe una diferencia fundamental en la filosofía que subyace en R y la de otros sistemas estadísticos. En R, un análisis estadístico se realiza en una serie de pasos, con unos resultados intermedios que se van almacenando en objetos, para ser observados o analizados posteriormente, produciendo unas salidas mínimas. Sin embargo en SAS o SPSS, se obtendrá de modo inmediato una salida copiosa para cualquier análisis, por ejemplo, una regresión o un análisis discriminante.

## **RESULTADOS ESPERADOS**

1. Porcentajes del EMA para Reservas de agua y umbrales de variación en las estaciones hidrométricas de las cuencas del estado de Morelos.
2. Indicadores ecohidrológicos en el marco PER (Presión – Estado – Respuesta) conforme con el desarrollo hidráulico actual en las cuencas, importancia ecológica y presión de uso.
3. Informe final

## **Metodología**

Los métodos hidrológicos emplean índices de caudales únicos o múltiples (basados en la variabilidad anual o temporal), derivados de registros históricos para fijar objetivos de caudal, que ayudan a mantener la integridad biológica y los servicios ecosistémicos. Estos métodos son utilizados en un 30% del total global y aplicado en todas las regiones del mundo.

Son apropiados para propósitos de planeación de recursos hídricos a nivel de sitio o región, además de ser simples, rápidos y económicos. Cuando existe escasez de datos de campo, pueden funcionar y tienen un potencial de regionalización.

Algo que puede afectar el uso de estas metodologías es que cuentan con un enfoque simple y de baja resolución, vínculos ecológicos limitados y la variación natural del régimen de caudales se considera parcialmente. No es apropiado para casos en que debe negociarse la asignación del agua.

Algunos ejemplos de métodos hidrológicos que se usan en la actualidad son los siguientes:

- Método de Tennant o de Montana
- Método de Tennant modificado para las zonas tropicales de México
- Metodología IHA - RVA (Indicators of Hydrological Alteration – Range of Variability Approach)
- Método ELOHA (Ecological Limits of Hydrologic Alteration)

Para conocer los caudales ecológicos, se utilizó el software IHA-RVN-7.1 (Régimen de variación natural e indicadores de alteración hidrológica). Esta metodología se ha consolidado para el análisis estadístico y la definición de intervalos, ya sea como porcentajes o percentiles, en los que debe mantenerse el caudal ecológico en las corrientes cuando se presenta competencia por el agua.

### **METODOLOGÍA IHA**

Con el software IHA-RVA V-7.1 (TNC, 2009) se realizan los análisis de indicadores de alteración hidrológica (IHA) y del rango de variabilidad (RVA) de las series de tiempo intra e interanuales de 34 parámetros o indicadores hidrológicos que se obtienen de los registros de los caudales medios diarios de las estaciones hidrométricas. Dichos parámetros se clasifican dentro de cinco grupos, siendo el primero los caudales medios mensuales; el segundo los máximos y mínimos para distintos períodos de interés (1, 3, 7, 30 y 90 días). El tercer grupo corresponde a las fechas o momento en que ocurren los extremos mínimos y máximos, así como a un índice de caudal base, calculado como el

cociente entre el caudal mínimo de 7 días/caudal medio anual. El cuarto grupo a la duración y conteo de pulsos altos y bajos, mientras que el quinto grupo corresponde a los parámetros asociados a la tasa de cambio, tales como el número de veces que el hidrograma cambia a una condición de incremento a decremento y viceversa. En total son 34 parámetros hidrológicos los que pueden ser analizados conforme a lo detallado de cada estudio.

Del análisis de series de datos hidrológicos diarios, mensuales y anuales, se obtiene el régimen de variación natural del caudal, el software realiza análisis de regresión de cada parámetro hidrológico, para determinar su tendencia a través del tiempo y puede interpolar datos faltantes.

Para cada parámetro se realizan los análisis paramétricos o no paramétricos estimando las medias o medianas y su dispersión, por desviaciones estándar o percentiles a lo largo de la serie de datos. En el análisis paramétrico, se asume una distribución normal y el área bajo la curva de más/menos una desviación estándar concentra el 68.27% ( $X - s$ ) y ( $X + s$ ), mientras que el 95.45% se ubica en ( $X - 2s$ ) y ( $X + 2s$ ) y el 99.73% de todos los datos dentro del área en ( $X - 3s$ ) y ( $X + 3s$ ).

El análisis no paramétrico se realiza utilizando las medianas, cuartiles y percentiles. Los cuartiles dividen el conjunto de datos en cuatro partes iguales y pueden leerse en los gráficos de cajas y bigotes, siendo el límite inferior el percentil 25 (25% de los datos menores o igual a este valor), la mediana (50%) y el límite superior el percentil 75 (75% de los datos menor a este valor y 25% mayores al mismo). De la igual forma, el conjunto de datos de la muestra se puede dividir en 100 partes iguales por medio de percentiles.

El intervalo de variabilidad natural de cada parámetro dado por +/- una desviación estándar o bien entre los percentiles 25 a 75, conforme al comportamiento de las series de tiempo del sistema natural. Los extremos de los percentiles 10 a 5 o bien 90 a 95 representan los datos más bajos (en años secos) o bien más altos (en años lluviosos). De esta forma, se pueden comparar las alteraciones a imponer por la regulación del caudal por las presas u otra infraestructura de extracción o manejo, para identificar en que percentil se está dejando el caudal ya sea mensual, estacional, o bien máximo o mínimo de algún período de interés.

Este intervalo o rango de variabilidad, también sirve para evaluar el desempeño de la asignación y liberación de caudales ambientales en una corriente regulada estableciendo las metas de cumplimiento. El Rango de Variabilidad (Range Variability Approach - RVA), fue desarrollado en respuesta al creciente interés de usar la variabilidad natural para recomendar caudales ambientales, y no insistir con el uso de un caudal mínimo a lo largo

de todo el año. Este régimen variable contribuye a la salud de las poblaciones y al mantenimiento del ecosistema fluvial.

Para esta propuesta de caudal se analizaron los caudales mensuales y los de distintos períodos de interés (1, 3, 7, 30 y 90 días máximos y mínimos).

#### **ESTADÍSTICAS CON R**

Se han analizado en R los datos diarios y mensuales de estaciones seleccionadas con datos tanto hidrológicos, así como climatológicos.

Para los dos conjuntos de datos, hidrológicos y climatológicos, se han realizado análisis de distribución así como desviación estándar, también análisis de series de tiempo para conocer su comportamiento y los componentes: estacional, aleatoriedad y de tendencia para los cada serie de datos mensuales.

El lenguaje R realiza los análisis de acuerdo con las necesidades del usuario. Cuenta con librerías establecidas y otros paquetes descargables para adaptarse a esas necesidades.

Para cada análisis es necesario programar scripts con rutinas específicas para cada serie de datos o según sea el resultado esperado de los análisis.

R es una herramienta caracterizada por ser un entorno de trabajo adaptable a las necesidades del usuario, el uso de scripts ahorra tiempo y facilita el análisis de los datos, ya que no es necesario tener las rutinas terminadas con miles de líneas de código, sino sólo unas cuantas, que al hacer uso de las librerías hacen que el trabajo sea más ágil y rápido.

## Área de estudio

### LOCALIZACIÓN

El estado de Morelos se encuentra en el centro del país, localizado en su totalidad dentro de la gran cuenca del río Balsas (Región Hidrológica No. 18), una de las más grandes del país, cuenta con una extensión territorial de 117,405 km<sup>2</sup>.

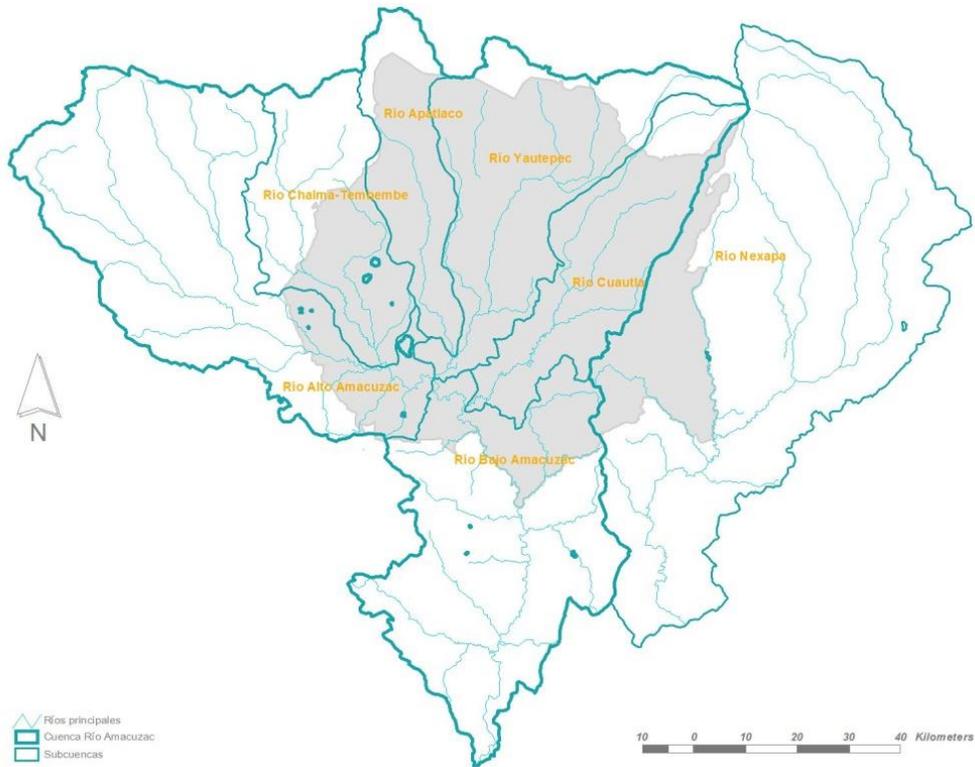
Morelos es el único estado que se encuentra inserto dentro de esta gran cuenca en su totalidad, y se ubica específicamente en la porción denominada Alto Balsas. A su vez, la cuenca del río Balsas está compuesta por cuencas más pequeñas, de las que sobresalen las cuencas de los ríos Amacuzac y Nexapa (Fig. 1).

La mayor parte del estado de Morelos se encuentra dentro de la cuenca del río Amacuzac (87% de su territorio), y el resto en la cuenca del río Nexapa. En la porción del estado correspondiente a la cuenca del río Amacuzac, se ubican cinco ríos principales: Apatlaco, Yautepec, Cuautla, Chalma-Tembembe y Amacuzac, y el lago de Tequesquitengo, uno de los cuerpos de agua más importantes dentro del estado, los cuales representan seis de las siete cuencas en que se ha dividido Morelos. En tanto que en la porción de la cuenca del río Nexapa únicamente se cuenta con la cuenca del mismo nombre.

En la tabla 1 y figura 1 se muestran las siete cuencas que comprenden el estado de Morelos y que se consideraron para fines de este estudio.

**Tabla 1. Distribución territorial de las cuencas en el estado de Morelos**

Cuenca	Superficie	
	Km <sup>2</sup>	%
Apatlaco	605	12.4
Yautepec	1,291	26.5
Cuautla	472	9.7
Nexapa	636	13.1
Chalma-Tembembe	988	20.3
Amacuzac	877	18.0
Total	4869	100



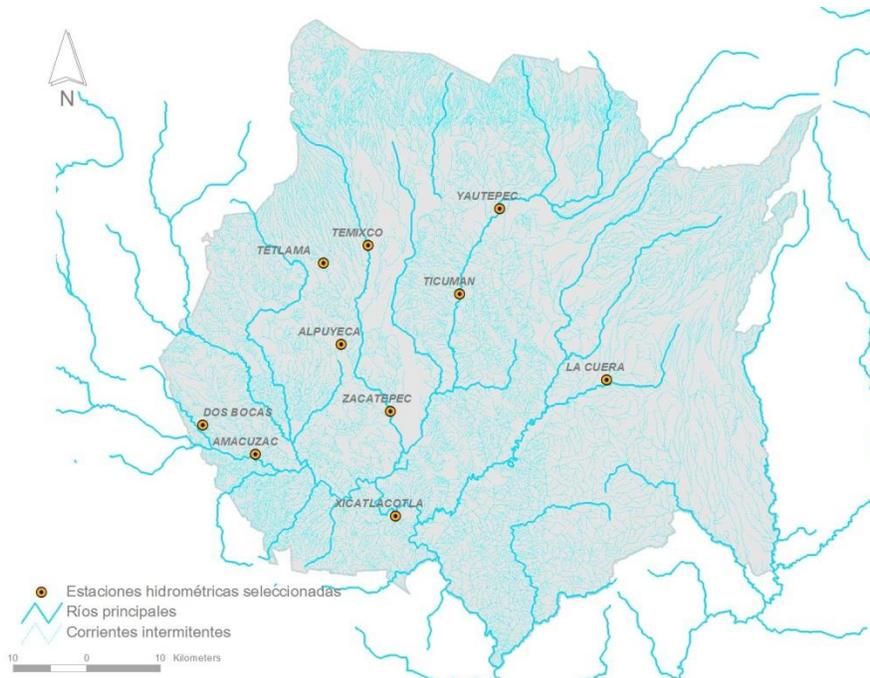
**Figura 1. Localización del área de estudio**

#### INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA

Con el fin de poder realizar el análisis de la información hidrométrica, se identificaron las estaciones contenidas en el BANDAS (Banco Nacional de Aguas Superficiales) operadas por la CONAGUA, y se seleccionaron aquellas con años de registro mayores a 20 años y que se encontraran sobre un cuerpo de agua natural (río principal). La selección dio como resultado el conjunto de 10 estaciones que se muestran en la tabla 2 y figura 2.

**Tabla 2. Relación de estaciones hidrométricas en el estado de Morelos ubicadas en cuerpos de aguas naturales.**

Clave	Nombre	Corriente	Dg_Lat	Dg_Long	Años de registro
18193	Yautepec	Río Yautepec	18.896	-99.050	1949-1979,1981-1987,1995-2006
18223	Ticuman	Río Yautepec	18.792	-99.104	1951-1985,1987-1999,2001-2006
18232	Amacuzac	Río Amacuzac	18.600	-99.371	1955-2006
18264	Zacatepec	Río Apatlaco	18.650	-99.196	1955-2005
18269	Alpuyeca	Río Tetlama	18.733	-99.258	1956-1990,1992-1996,1998-2006
18271	Temixco	Río Apatlaco	18.854	-99.221	1956-2005
18316	La Cuera	Río De La Cuera	18.683	-98.917	1960-1987
18323	Tetlama	Río Tetlama	18.833	-99.279	1962-1989,1992-2006
18437	Xicatlacotla	Río Amacuzac	18.521	-99.192	1958-1967,1969-1987,1989-2006
18438	Dos Bocas	Río Amacuzac	18.637	-99.438	1982-2005



**Figura 2. Localización de las Estaciones Hidrométricas en el Estado de Morelos.**

#### INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA

Para el análisis climatológico, se ubicaron las estaciones climatológicas del Estado de Morelos y se seleccionaron las estaciones con más de 25 años de registro y dieron como resultado 45 en total. En la tabla 3, se muestra la relación de estaciones seleccionadas y en la figura 3, se observa la distribución espacial de dichas estaciones.

**Tabla 3. Relación de estaciones climatológicas localizadas en el Estado de Morelos, que cuentan con más de 25 años de registro.**

Clave	Nombre	Años de registro	Total de Años	Situación
17001	Atlatlahuacan, Mor	1/10/1924 - 29/02/2012	88	Operando
17002	Colonia Empleado, Mor	1/01/1939 - 31/01/2002	63	Operando
17003	Cuatla (SMN), Mor	1/04/1926 - 30/11/2011	85	Operando
17004	Cuernavaca (DGE), Mor	1/04/1955 - 31/12/2011	57	Operando
17005	Cuatla (DGE), Mor	1/04/1955 - 31/12/2011	57	Operando
17006	El Rodeo, Mor	1/04/1955 - 30/11/2011	56	Operando
17007	Huajintlán, Mor	1/05/1925 - 31/12/2011	87	Operando
17008	Huautla, Mor	1/02/1962 - 31/12/2011	50	Operando
17012	Oaxtepec, Mor	1/03/1970 - 31/05/2011	41	Operando
17013	Temilpa, Mor	1/04/1955 - 30/11/2009	54	Operando
17014	Temixco, Mor	1/04/1957 - 30/09/2011	54	Operando
17015	Tepalcingo, Mor	1/10/1955 - 31/12/2011	57	Operando
17016	Tequesquitengo, Mor	1/04/1955 - 30/09/2007	52	Operando

17018	Ticuman, Mor	1/09/1955 - 31/05/2011	56	Operando
17019	Tilzapotla, Mor	1/10/1942 - 31/05/2011	69	Operando
17020	Tlacotepec, Mor	1/04/1955 - 30/11/2011	56	Operando
17021	Tlacualera	1/02/1962 - 30/11/2011	49	Operando
17024	Yautepec	1/04/1955 - 31/05/2012	57	Operando
17026	C.A.E. La Victoria	1/01/1961 - 31/12/2010	50	Operando
17028	Jonacatepec	1/07/1926 - 31/12/2011	86	Operando
17029	Palpan	1/05/1923 - 31/12/2011	89	Operando
17031	Jojutla (DGE)	1/03/1977 - 31/12/2011	35	Operando
17032	San Gabriel	1/10/1930 - 31/08/1969	39	Suspendida
17033	Xicatlacotla (CFE)	1/08/1963 - 31/12/2010	48	Operando
17036	Lagunillas De Rayón	1/04/1974 - 30/11/2011	37	Operando
17038	Nexpa	1/03/1976 - 30/11/2011	35	Operando
17039	San Juan Tlacotenco	1/07/1975 - 30/11/2011	36	Operando
17043	E.T.A. 118 Yecapixtla	1/01/1976 - 31/05/2011	35	Operando
17044	E.T.A. 040 Amacuzac	1/08/1973 - 31/12/2010	38	Operando
17045	Huecahuaxco	1/01/1982 - 31/12/2008	27	Operando
17046	Hueyapan	1/08/1985 - 30/11/2011	26	Operando
17047	Huitzilac	1/12/1961 - 31/03/2012	51	Operando
17048	Puente Ocuituco	1/01/1982 - 30/11/2011	29	Operando
17051	Totolapan	1/07/1981 - 31/12/2011	31	Operando
17054	Moyotepec	1/09/1978 - 30/11/2011	33	Operando
17056	San Pablo Hidalgo	1/09/1978 - 30/11/2011	33	Operando
17057	El Limón	1/09/1978 - 31/05/2011	33	OPERANDO
17058	Cuentepec	1/10/1978 - 31/12/2011	34	OPERANDO
17060	Alponocan	1/05/1980 - 31/12/2011	32	OPERANDO
17061	Apancingo	1/08/1980 - 31/12/2011	32	OPERANDO
17068	Achichipico	1/01/1982 - 31/05/2010	28	OPERANDO
17071	Progreso	1/01/1982 - 30/06/2009	27	OPERANDO
17072	Alpuyeca	1/01/1969 - 30/11/2011	42	OPERANDO
17073	Cuautlita	1/01/1983 - 31/03/2012	29	OPERANDO
17076	Puente De Ixtla	1/04/1974 - 30/11/2011	37	OPERANDO

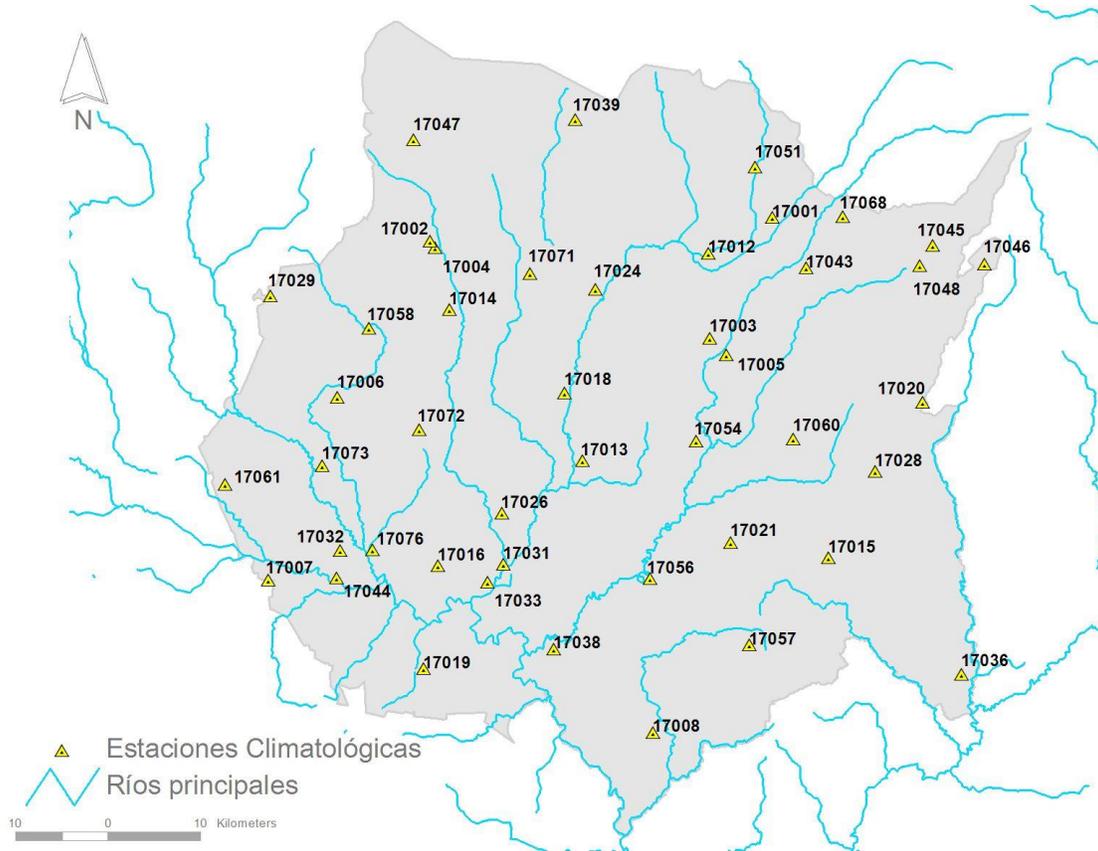
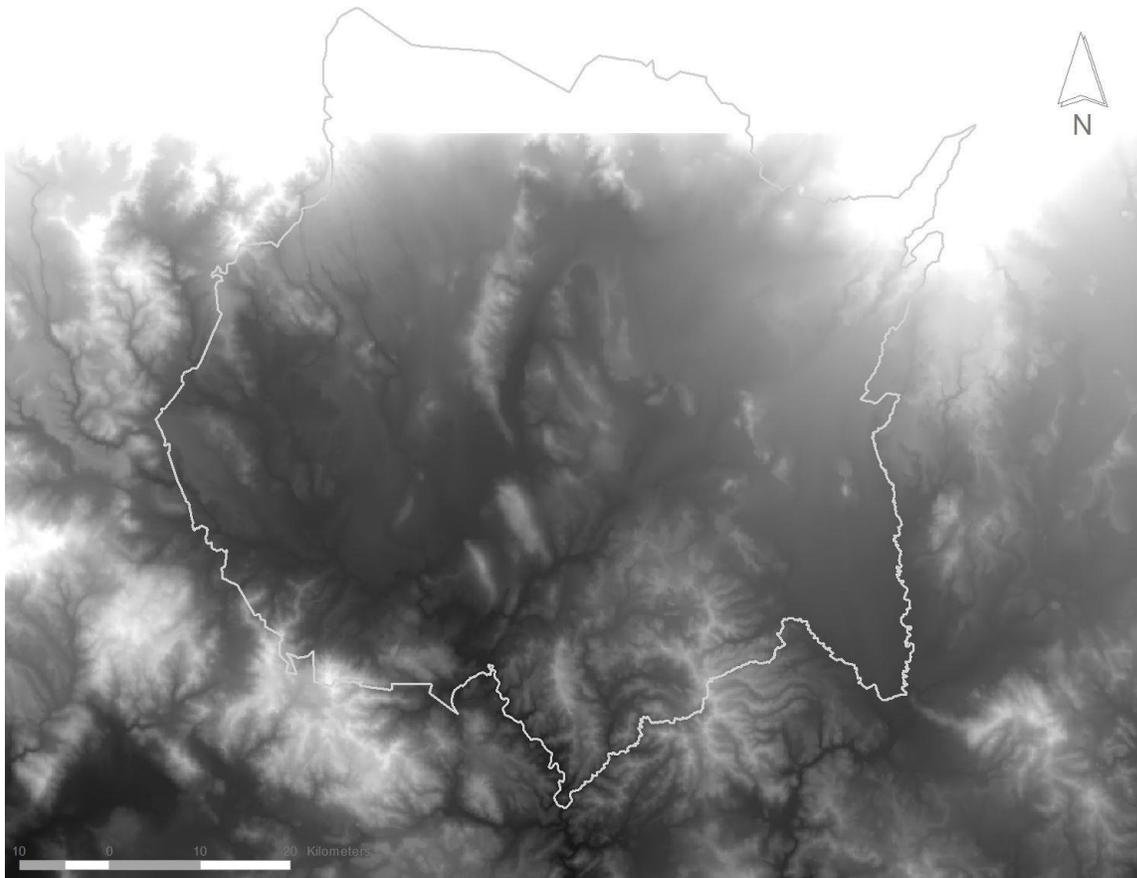


Figura 3. Localización de estaciones Climatológicas en el Estado de Morelos

#### MUNICIPIOS Y POBLACIÓN

Por su extensión, Morelos es uno de los estados más pequeños de México. Con una superficie de 4,958 km<sup>2</sup> que representa tan sólo el 0.25% del territorio del país, ocupa el trigésimo lugar a nivel nacional. Sin embargo, Morelos se encuentra ubicado estratégicamente en el centro del país, al colindar al norte con el Estado de México y el Distrito Federal, al este con el Estado de México y Puebla, al sur con Puebla y Guerrero, y al oeste con Guerrero y el Estado de México.

El estado se localiza a una altura promedio de 1,480 metros sobre el nivel del mar (msnm) y sus coordenadas geográficas extremas son: al norte 19° 08', al sur 18° 20' de latitud norte, al este 98° 38' y al oeste 99° 30' de longitud oeste. Políticamente, Morelos está compuesto por 33 municipios y su capital es la ciudad de Cuernavaca. Entre los años de 1950 y 2005, su población se incrementó en un 591% aproximadamente, al pasar de 272,842 a 1' 612,899 habitantes.



**Figura 4. Modelo digital de elevación**

Con respecto a la tasa de crecimiento poblacional podemos apreciar que en el estado, se ha visto reducida considerablemente, ya que pasó en la década de los años 60 y 70, de un 4.78% a un 0.73% actualmente. En Morelos, según datos del INEGI, en el 2005 había un total de 1'612,899 habitantes de los cuales 775,311 eran hombres y 837,588 mujeres, lo que equivale, respectivamente al 48 y al 52% de la población total.

Para el 2005, la población estatal se concentraba en 1,276 localidades rurales en las que habitaban 224,857 personas y en 87 localidades urbanas con 1'388,042 habitantes (86% del total), entre las que se destacan cuatro grandes ciudades: Cuernavaca, Jiutepec, Temixco y Cuautla. De las localidades rurales 890 (70%) son asentamientos con menos de 100 habitantes (CONAGUA, 2010a). La figura 5, muestra los límites de cada municipio y sus respectivos nombres.



Figura 5. Municipios del Estado de Morelos

## Resultados

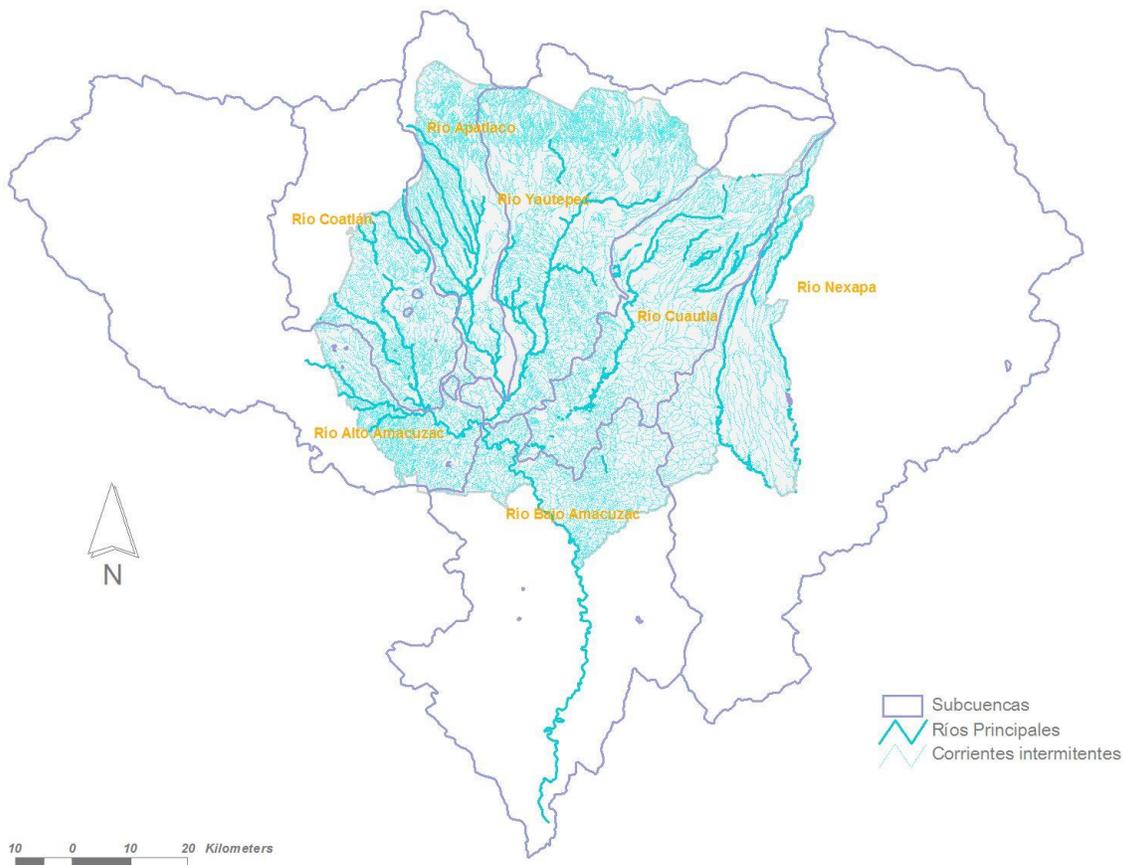
Para la estrategia de aplicación de la Norma de caudal ecológico hacia un enfoque adaptativo al cambio climático, se utilizaron los datos hidrométricos de 10 estaciones seleccionadas y datos de temperatura y precipitación de 14 estaciones climatológicas.

Para las estaciones hidrométricas, se obtuvieron valores umbrales de variabilidad natural de los caudales y se determinaron los valores de caudal ecológico haciendo uso de las metodologías hidrológicas establecidas en la NMX.

Para las estaciones climatológicas, se determinaron las tendencias a partir de valores mensuales de temperatura y precipitación.

### CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Inicialmente, se obtuvieron los mapas de hidrología superficial, identificando los ríos principales, además se identificaron las subcuencas de los ríos: Apatlaco, Yautepec, Cuautla, Nexapa, Alto y bajo Amacuzac y Coatlán (Figura 6).



Se caracterizaron, de manera general, por área y longitud del cauce principal cada una de las subcuencas que inciden en el estado de Morelos y se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 4).

**Tabla 4. Áreas y Longitudes de los río principales**

Nombre	Área (km <sup>2</sup> )	Área de la cuenca en el estado (Km <sup>2</sup> )	% de área de la subcuenca en el estado	Longitud (km)
Río Apatlaco	751	605	81	63
Río Nexapa	4,415	636	14	39.76, 75.12 y 62.39*
Río Yautepec	1,601	1291	81	95.01
Río Alto Amacuzac	2,622	378	14	108.03
Río Bajo Amacuzac	2,253	499	45	
Río Chalma-Tembembe	1,108	988	86	70.01 y 50.72**
Río Cuautla	1,150	472	21	85.51

\* Se origina en las faldas del volcán Popocatepetl y sus principales afluentes en el estado de Morelos son los ríos Tepalcingo, Grande o San Francisco, y la barranca de Amatzinac.

\*\*Conformado por los ríos Chalma y Tembembe.

#### USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

El mapa de uso de suelo se obtuvo a partir de la Serie V de INEGI. Se observa en porcentajes, que la cobertura de vegetación predominante es agricultura de riego anual y semipermanente, con 2,794 Ha de cobertura que representa un 13.97% de todo el estado; en segundo lugar, agricultura de temporal anual 1,493 Ha y 7.47 % y en tercer lugar bosque de pino con 1,267 Ha y 6.34. Además cabe destacar que el uso para asentamientos humanos y zona urbana es de 267 Ha y 551 Ha, cubriendo 1.34% y 2.76% respectivamente. En la Figura 7, se muestran los diferentes usos de suelo en el estado y en la tabla 5, se encuentra su descripción.

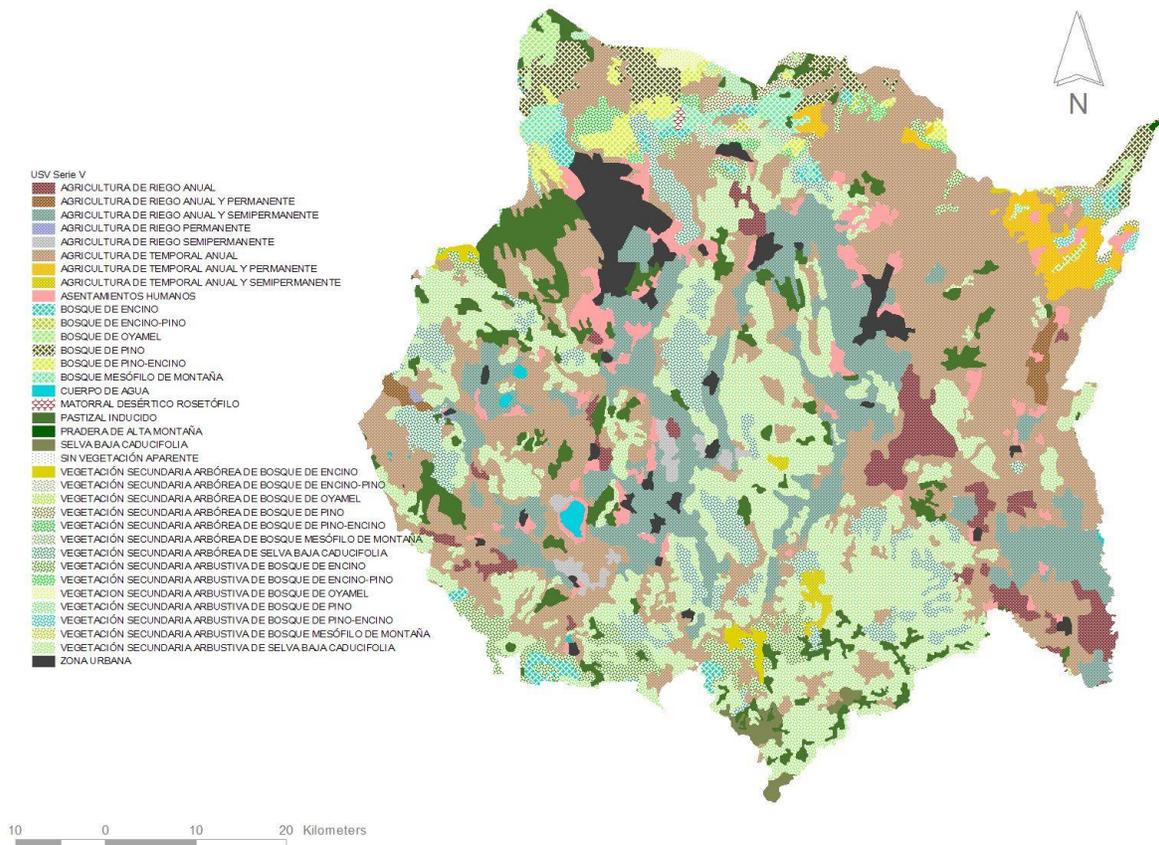


Figura 7. Uso de suelo y vegetación serie V INEGI 2010

Tabla 5. Diferentes usos de suelo y su cobertura en el estado

Descripción	Área (Ha)	%
Agricultura de riego anual y semipermanente	2794	13.97
Agricultura de temporal anual	1493	7.47
Bosque de pino	1267	6.34
Agricultura de riego anual y permanente	1240	6.20
Agricultura de temporal anual y permanente	1099	5.50
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	1001	5.01
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de oyamel	966	4.83
Bosque Mesófilo de montaña	914	4.57
Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	806	4.03
Agricultura de temporal anual y semipermanente	764	3.82
Selva baja caducifolia	636	3.18
Agricultura de riego anual	633	3.17
Zona urbana	551	2.76
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	530	2.65
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	502	2.51

Agricultura de riego semipermanente	441	2.21
Bosque de pino-encino	408	2.04
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino-pino	356	1.78
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	341	1.71
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	337	1.69
Bosque de encino	312	1.56
Bosque de oyamel	308	1.54
Pastizal inducido	275	1.38
Asentamientos humanos	267	1.34
Matorral desértico rosetófilo	245	1.23
Vegetación secundaria arbórea de bosque Mesófilo de montaña	212	1.06
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	197	0.99
Bosque de encino-pino	183	0.92
Vegetación secundaria arbórea de bosque de oyamel	183	0.92
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	183	0.92
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	162	0.81
Agricultura de riego permanente	102	0.51
Cuerpo de agua	92	0.46
Vegetación secundaria arbustiva de bosque Mesófilo de montaña	76	0.38
Pradera de alta montaña	69	0.35
Sin vegetación aparente	51	0.26
Total	19,996	100.00

**Tabla 6. Vegetación ribereña a lo largo de cada corriente**

Nombre	Longitud (km)	Presencia de vegetación (km)
Río Apatlaco	63	43
Río Nexapa	177.27	177.27
Río Yautepec	95.01	83
Río Alto Amacuzac	108.03	103
Río Bajo Amacuzac		
Río Chalma-Tembembe	120.73	115.73
Río Cuautla	85.51	74

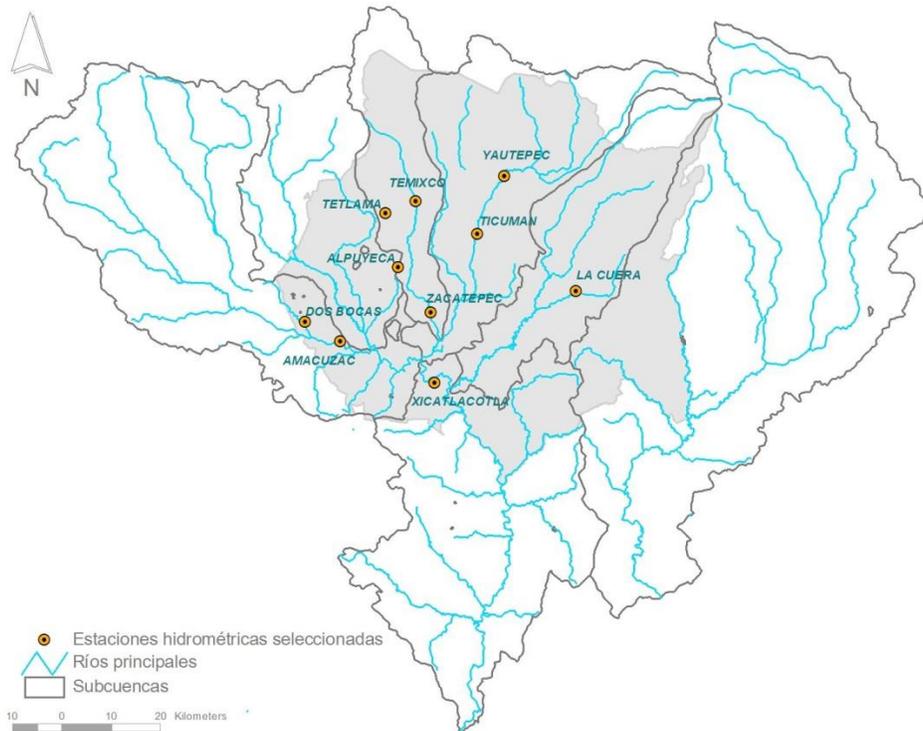
**ESTACIONES HIDROMÉTRICAS**

Se realizó el análisis de las estaciones hidrométricas de los ríos de Morelos, se identificaron 10 estaciones hidrométricas, de las cuales 2 se ubican en la subcuenca del río Apatlaco, 2 en el río Yautepec, 3 en el río Amacuzac, 2 en el río Tetlama y 1 en el río De La Cuera.

A continuación se muestra la localización de Estaciones hidrométricas en cuerpos de agua naturales del estado de Morelos (Figura 8 y Tabla 7).

**Tabla 7. Estaciones y subcuenca en la que se encuentran**

Estación	Subcuenca
Temixco	Río Apatlaco
Zacatepec	
Yautepec	Río Yautepec
Ticuman	
La Cuera	Río Cuautla
Dos Bocas	Río Amacuzac
Amacuzac	
Xicatlacotla	
Tetlama	Río Chama-Tembembe
Alpuyeca	



**Figura 8. Localización de las estaciones hidrométricas en el estado de Morelos**

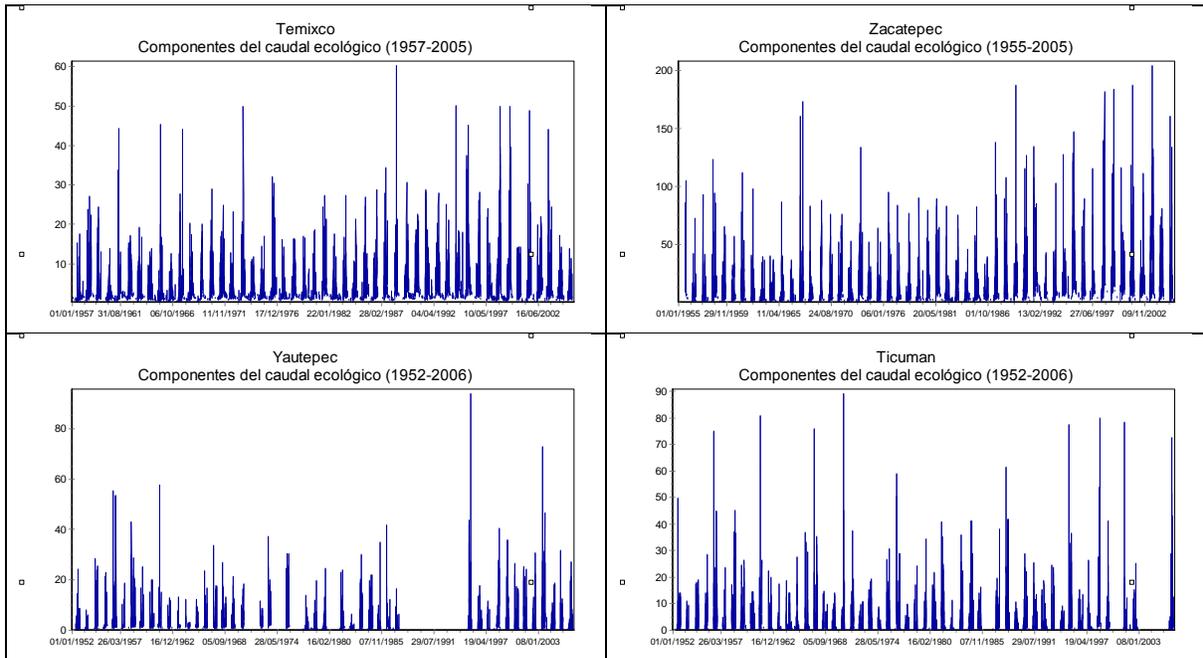
## Régimen Natural

La aplicación del Índice de Alteración Hidrológica determina la variabilidad natural de las subcuencas, así como su alteración con respecto a las condiciones naturales.

Se ordenaron los datos hidrométricos diarios de las estaciones seleccionadas para analizarlos con el Software IHA y así conocer la variabilidad natural, las tendencias para los meses seco (Abril) y lluvioso (Septiembre) de cada estación. Los resultados de los análisis de variabilidad natural, se muestran en orden espacial empezando por las estaciones de la cuenca del río Apatlaco, seguido por las estaciones del río Yautepec, Cuautla, Amacuzac y terminando con la subcuenca Chalma-Tembembe. Además dentro de cada cuenca se ordenan de norte a sur o de parte alta, media y baja cuando esto aplica en cada subcuenca.

## Variabilidad Inter-anual

Del análisis de datos hidrológicos diarios se calculó la media de los valores diarios de caudal y se generaron los siguientes hidrogramas que muestran el comportamiento natural, en los cuales se puede observar el día en el que inicia la temporada de estiaje/lluvias, así como el comportamiento promedio diario histórico, para cada una de las estaciones hidrométricas (Figura 9).



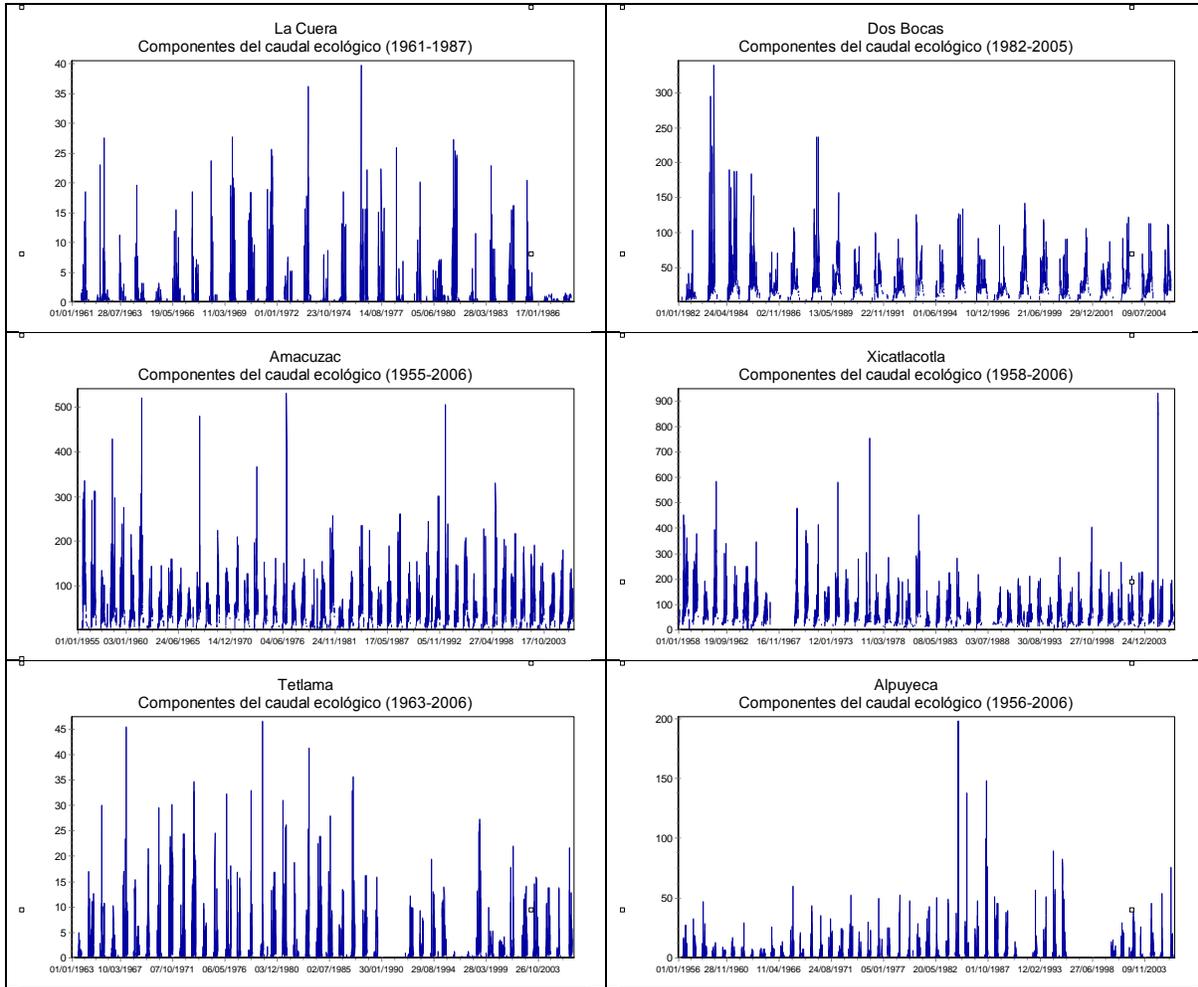


Figura 9. Variabilidad Inter-anual

Las medianas mensuales muestran la estacionalidad de los datos, es decir, indican el mes donde empiezan las épocas de lluvias y estiaje (Tabla 8).

Tabla 8. Medianas mensuales de cada estación en metros cúbicos por segundo (m³/s)

Mes/Estación	Temixco	Zacatepec	Yautepec	Ticuman	La Cuera
Enero	1.30	1.63	0.49	0.06	0.00
Febrero	1.13	0.93	0.51	0.06	0.00
Marzo	0.96	0.71	0.46	0.04	0.00
Abril	0.75	0.62	0.44	0.03	0.00
Mayo	0.79	0.91	0.64	0.04	0.00
Junio	1.54	2.39	0.87	0.22	0.04
Julio	2.26	5.59	1.11	0.57	0.18
Agosto	2.55	5.63	1.06	0.50	0.12
Septiembre	3.45	8.73	1.27	0.86	0.20
Octubre	2.24	4.84	1.05	0.31	0.00

Noviembre	1.56	3.04	0.80	0.16	0.00
Diciembre	1.32	2.33	0.53	0.07	0.00
<b>Mes/Estación</b>	<b>Dos Bocas</b>	<b>Amacuzac</b>	<b>Xicatlacotla</b>	<b>Tetlama</b>	<b>Alpuyeca</b>
Enero	3.75	4.30	19.72	0.10	0.19
Febrero	2.84	3.40	18.18	0.09	0.16
Marzo	1.73	2.15	14.24	0.09	0.12
Abril	1.41	2.00	13.57	0.08	0.14
Mayo	2.48	3.60	15.13	0.09	0.14
Junio	14.55	16.28	30.24	0.18	0.60
Julio	19.54	33.35	43.40	0.39	1.07
Agosto	21.60	38.40	51.04	0.56	1.05
Septiembre	31.00	56.13	68.31	1.20	1.54
Octubre	23.61	40.90	51.63	0.36	1.10
Noviembre	11.22	15.50	32.87	0.13	0.39
Diciembre	5.02	6.35	23.08	0.10	0.41

Para conocer la variabilidad natural, se consideran los percentiles 25 y 75, los cuales serán los valores umbrales para determinar dicha variabilidad. En la tabla 9 se muestran estos valores umbrales para cada estación hidrométrica analizada.

**Tabla 9. Umbrales de variabilidad natural para cada estación.**

<b>Mes/Estación</b>	<b>Temixco</b>		<b>Zacatepec</b>		<b>Yautepec</b>		<b>Ticuman</b>		<b>La Cuera</b>	
	P25	P75	P25	P75	P25	P75	P25	P75	P25	P75
Enero	1.00	1.53	0.92	2.53	0.29	0.92	0.03	0.20	0.00	0.06
Febrero	0.92	1.38	0.49	1.94	0.26	0.89	0.02	0.15	0.00	0.00
Marzo	0.76	1.11	0.37	1.52	0.23	0.87	0.02	0.15	0.00	0.01
Abril	0.62	1.02	0.38	1.32	0.23	0.83	0.01	0.07	0.00	0.00
Mayo	0.57	1.07	0.54	1.55	0.30	0.92	0.02	0.12	0.00	0.00
Junio	1.06	2.29	1.09	5.57	0.41	1.14	0.07	0.53	0.00	0.49
Julio	1.58	3.32	2.99	8.45	0.53	1.52	0.27	0.96	0.00	0.51
Agosto	1.73	4.05	3.54	9.21	0.57	1.39	0.25	0.85	0.00	0.33
Septiembre	2.59	4.95	5.20	13.72	0.67	1.96	0.37	1.84	0.00	0.75
Octubre	1.47	2.83	2.53	8.83	0.56	1.42	0.14	1.08	0.00	0.30
Noviembre	1.22	1.84	2.09	5.11	0.37	1.08	0.05	0.32	0.00	0.05
Diciembre	1.14	1.68	1.65	3.46	0.32	1.02	0.02	0.24	0.00	0.12
<b>Mes/Estación</b>	<b>Dos Bocas</b>		<b>Amacuzac</b>		<b>Xicatlacotla</b>		<b>Tetlama</b>		<b>Alpuyeca</b>	
	P25	P75	P25	P75	P25	P75	P25	P75	P25	P75
Enero	2.56	4.58	3.33	7.38	15.40	26.70	0.09	0.12	0.09	0.35
Febrero	2.11	3.29	2.28	5.18	13.59	22.40	0.07	0.12	0.01	0.26
Marzo	1.55	2.13	1.40	3.70	11.71	20.11	0.07	0.11	0.02	0.23
Abril	1.23	1.84	1.03	3.28	10.84	18.00	0.07	0.10	0.01	0.22

Estrategia para la aplicación de la norma de caudal ambiental hacia un enfoque adaptativo al cambio climático así como implementar la NMX-AA-159-SCFI-2012 para su difusión en el área focal de Eco-hidrología

Mayo	1.39	3.90	2.10	5.40	12.07	18.51	0.07	0.11	0.01	0.24
Junio	6.82	21.34	8.93	31.78	22.60	42.54	0.13	0.37	0.26	1.23
Julio	14.31	31.31	21.03	50.05	33.09	64.10	0.23	0.69	0.78	1.46
Agosto	15.43	28.29	28.13	51.60	38.60	69.30	0.38	1.14	0.67	1.77
Septiembre	24.40	48.18	42.91	81.39	54.75	93.63	0.55	1.80	1.02	2.13
Octubre	19.59	28.75	30.03	52.05	39.76	64.13	0.23	0.89	0.50	1.42
Noviembre	7.19	15.44	10.45	25.84	27.50	40.95	0.10	0.25	0.18	0.94
Diciembre	3.76	6.50	5.03	10.53	18.42	30.87	0.08	0.12	0.15	1.03

### Variabilidad Inter-anual

La variabilidad inter-anual, muestra los eventos que ocurren en el año que son importantes considerar para identificar el momento donde se llevan a cabo eventos de importancia ecológica y biológica, ya que muestran los valores diarios promedio de toda la serie de datos Figura 10.

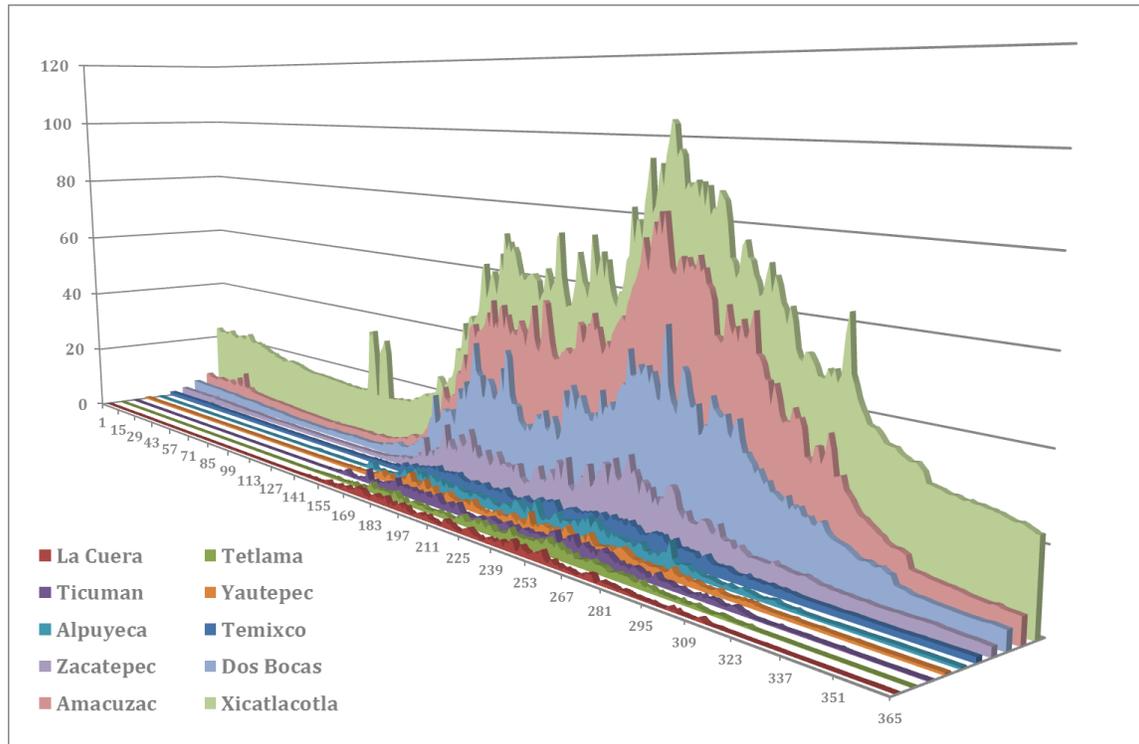


Figura 10. Variabilidad Intra-anual

En la figura anterior, se puede observar cada una de las estaciones analizadas, desplegadas y ordenadas según el volumen de agua que lleva la corriente en ese sitio. Una característica importante que muestra este tipo de gráficos es la estacionalidad en todo el Estado y la variación natural en cada uno de los sitios.

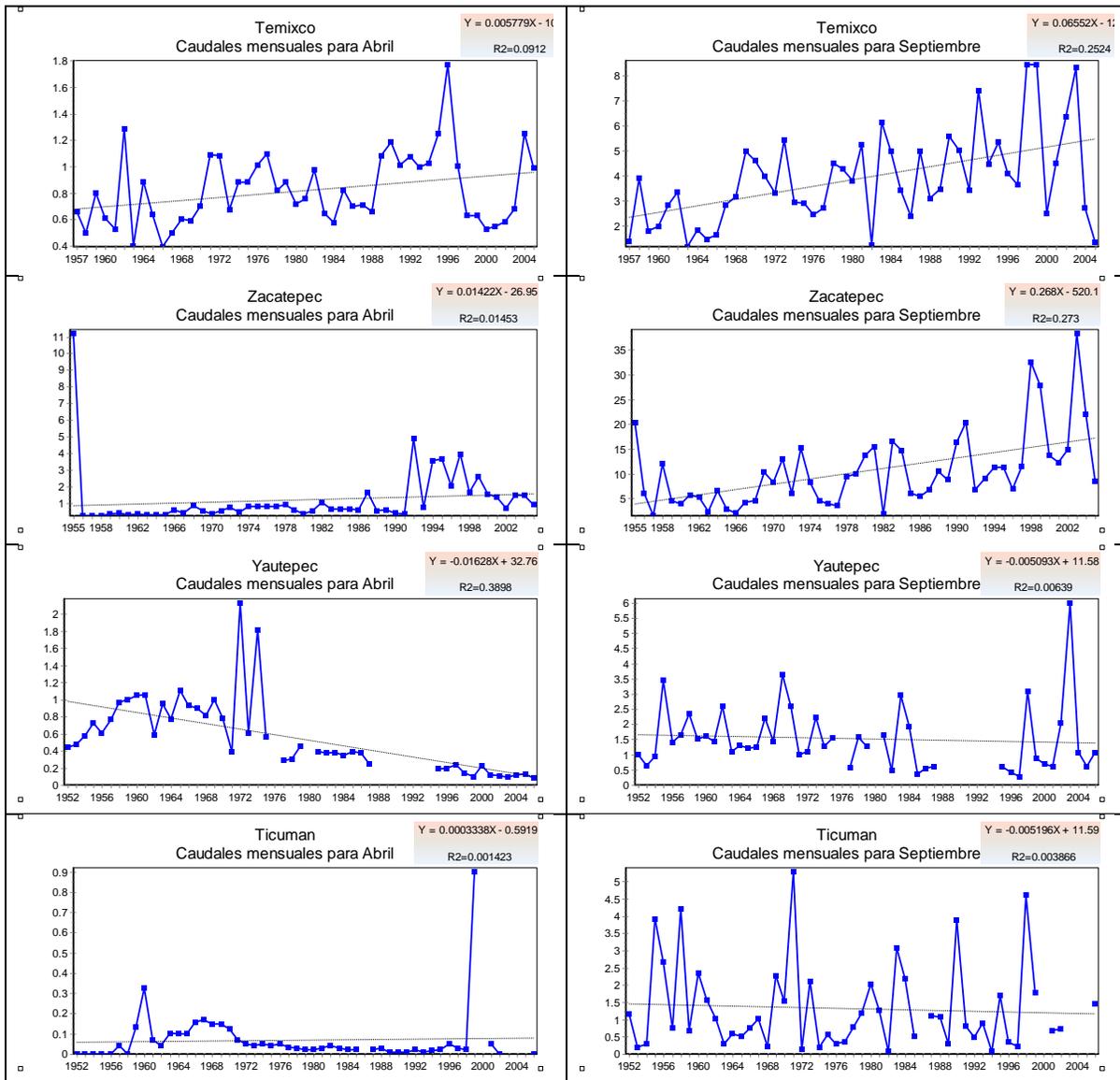
### Estacionalidad y tendencia

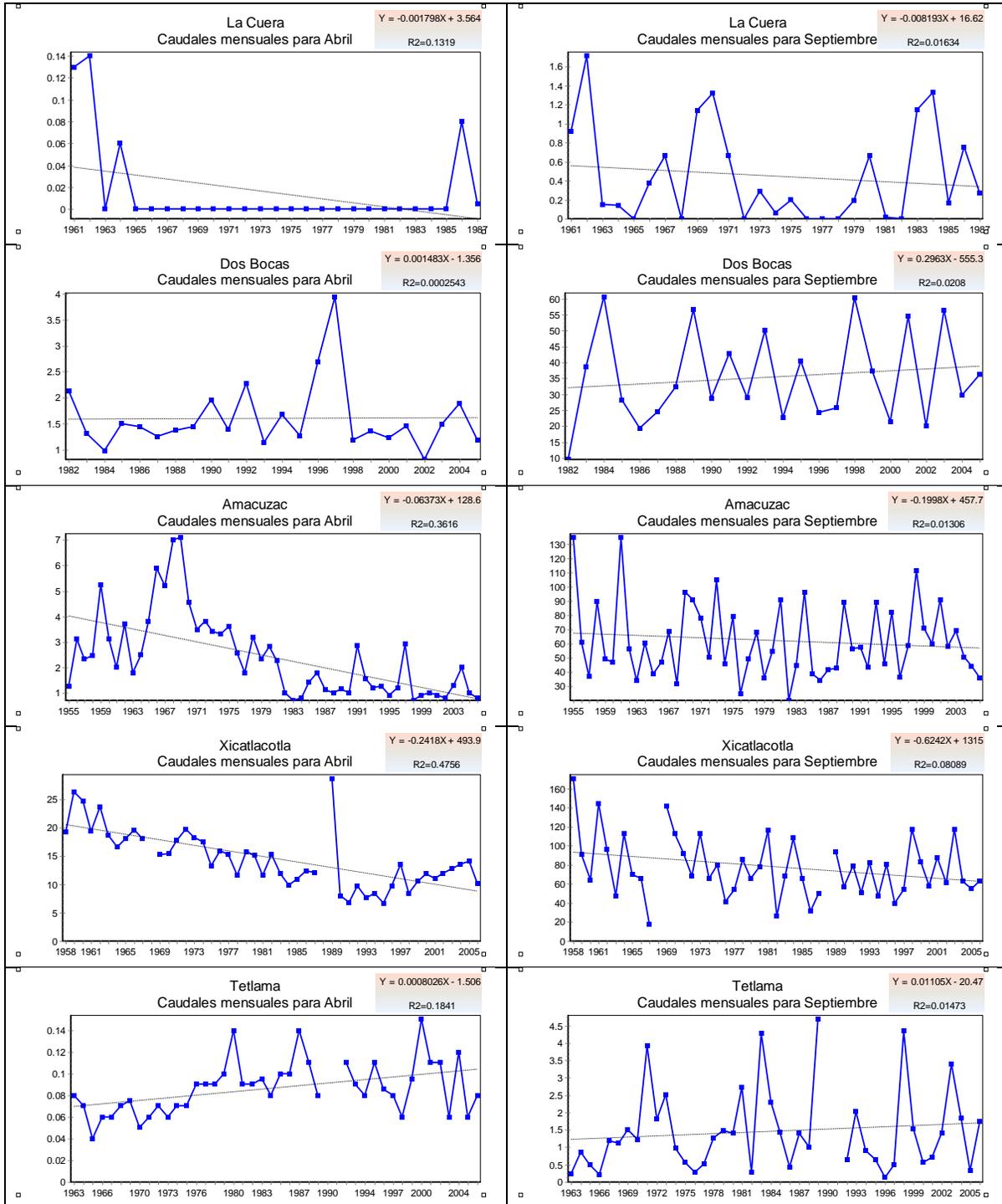
Se analizaron las estaciones hidrométricas para conocer la estacionalidad y la tendencia que siguen los datos y que muestran además, el comportamiento histórico de los caudales en los ríos estudiados.

Se determinaron los meses más secos y más lluviosos, de los cuales, para todas las estaciones se encontró que coincidían en abril y septiembre. De esta manera se observó en la temporada de secas una tendencia positiva, en las estaciones Temixco, Zacatepec, Ticuman, Dos Bocas, Tetlama, y Alpuyeca; y una tendencia negativa en las estaciones

Amacuzac, Xicatlacotla, Yautepec, La Cuera. Así mismo, en la temporada de lluvias, se observó una tendencia positiva en las estaciones Temixco, Zacatepec, Dos Bocas, Tetlama, y Alpuyecá y negativa en las estaciones Amacuzac, Xicatlacotla, Yautepec, Ticumán y La Cuera.

Se puede observar que los sitios donde se encuentran las estaciones con tendencia positiva en la temporada de estiaje tienen un aporte de agua que va en aumento, y de manera inversa para las estaciones con tendencia negativa para la temporada de lluvias (Figura 11).





Estrategia para la aplicación de la norma de caudal ambiental hacia un enfoque adaptativo al cambio climático así como implementar la NMX-AA-159-SCFI-2012 para su difusión en el área focal de Eco-hidrología

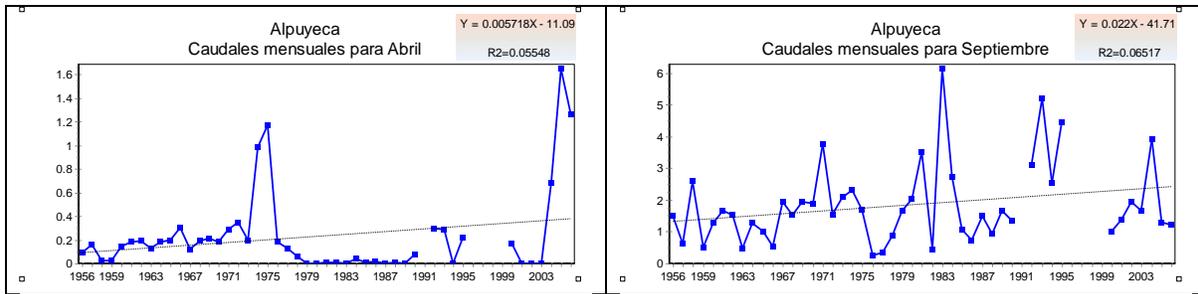


Figura 11. Tendencias estacionales de los datos hidrométricos.

## ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS

Se trabajó con el Sistema ERIC II Para obtener los datos de temperaturas máximas mínimas y de precipitación.

Los resultados para temperatura observada, promedio anual fueron entre 10 y 20 grados centígrados, que van aumentando de la parte alta a la parte baja del estado (Figura 12).

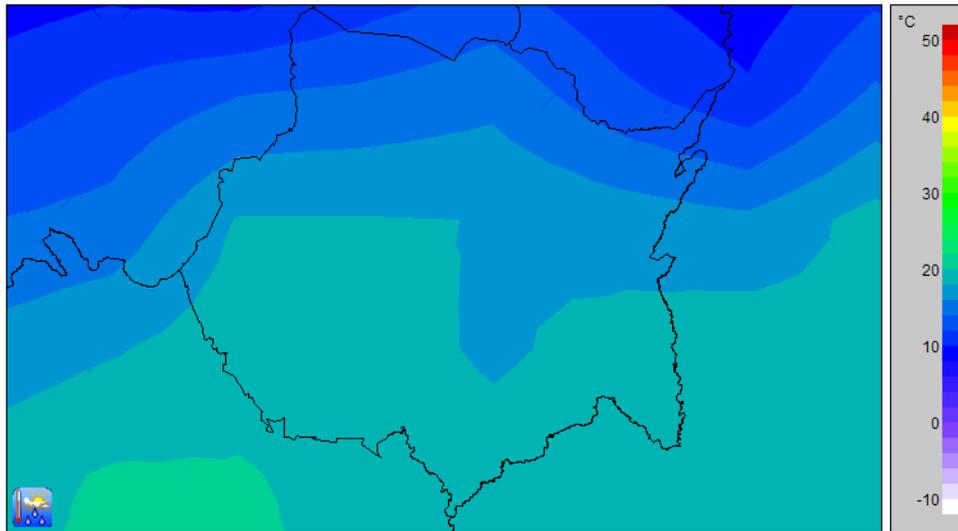


Figura 12. Temperatura observada, promedio anual

Para la temperatura máxima, promedio anual, los resultados van de 20 a 38, aproximadamente, aumentando gradualmente de la parte alta a la parte baja del estado (Figura 13).

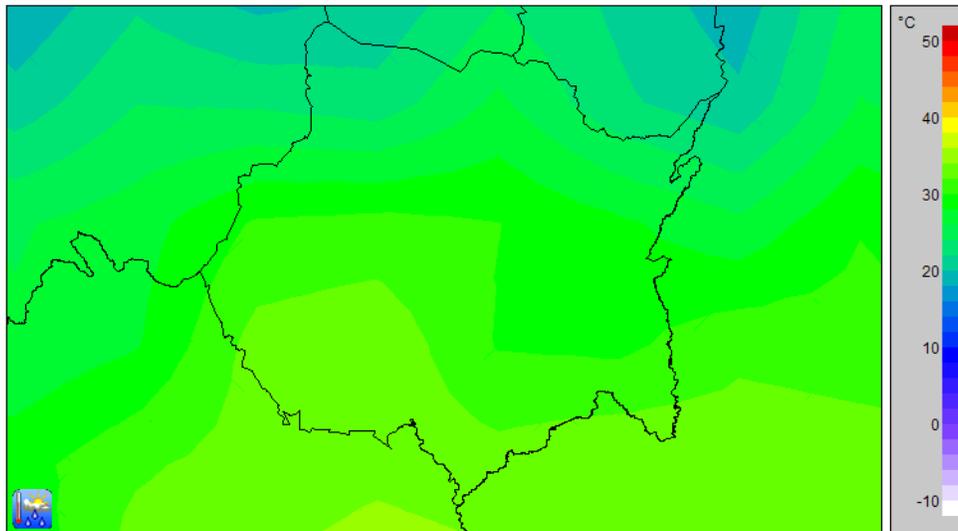
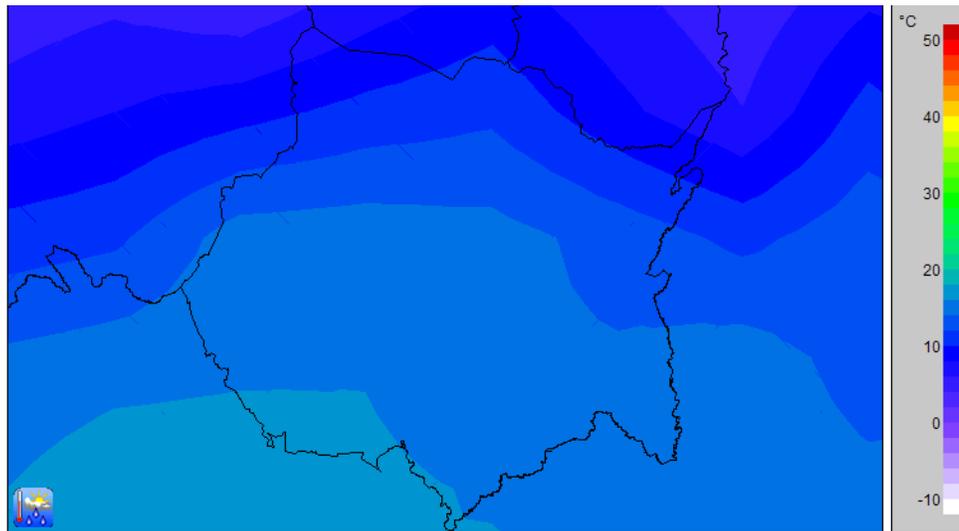


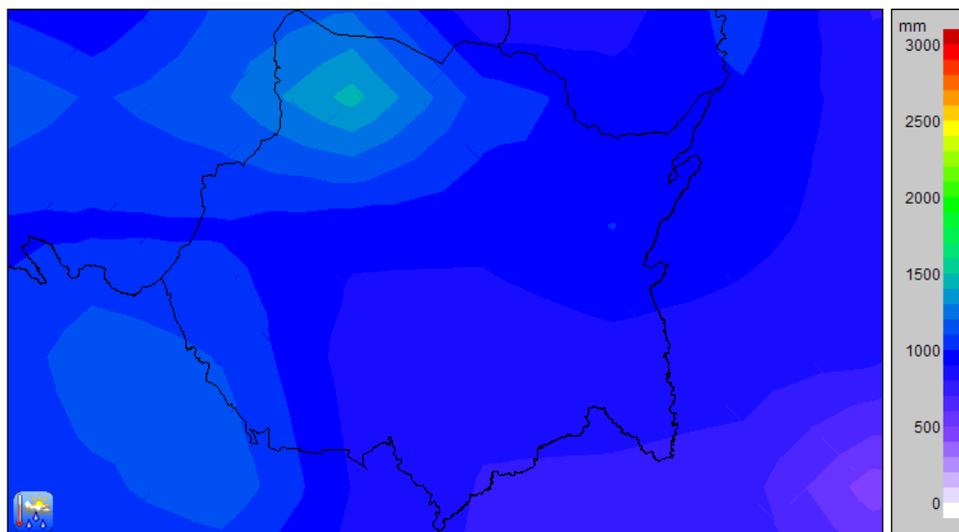
Figura 13. Temperatura máxima, promedio anual

Las temperaturas mínimas, promedio anual, dieron como resultado, valores que van desde los 9 grados centígrados hasta los 18, aproximadamente (Figura 14).



**Figura 14. Temperatura mínima, promedio anual**

La precipitación promedio anual es de aproximadamente de 500 mm a 1,600 mm, de los cuales, los valores más altos se presentan en las partes más altas del estado, en municipios como Huitzilac y la parte alta de Cuernavaca (Figura 15).



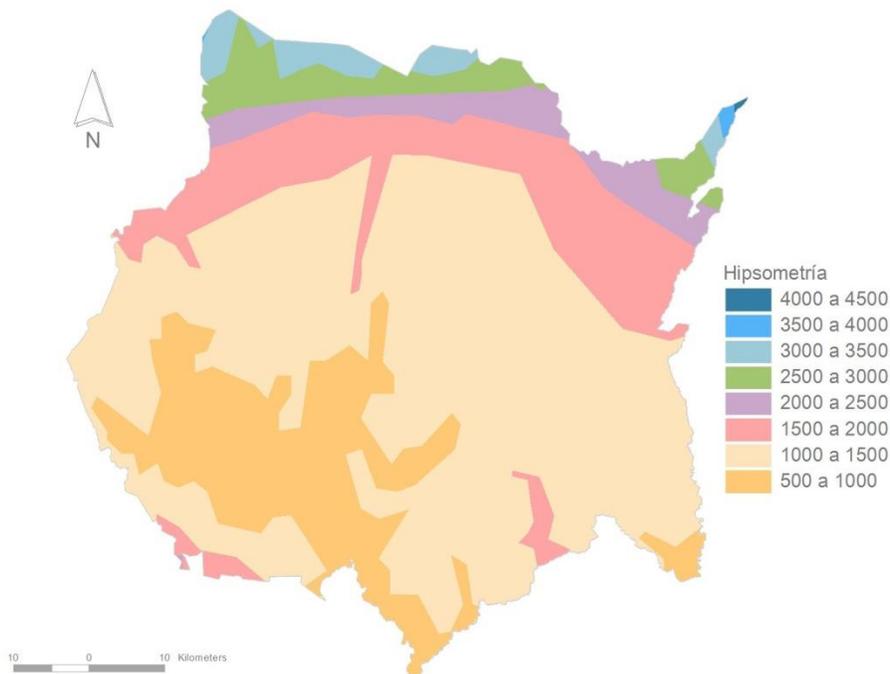
**Figura 15. Precipitación promedio**

### Análisis de Estaciones Climatológicas

De las 25 estaciones climatológicas, se realizó una caracterización para identificar aquellas con mayor influencia en el estado (Gimaces & Pradas, 2011)(González, Loza, & Gómez, 2010), esta identificación, se realizó basándose en la subcuenca en que se ubicaron, en los valores de altitud sobre el nivel del mar y los tipos climáticos de Enriqueta García (García, 1973) (Tabla 11 y Figuras 16 y 17), lo cual dio como resultado 14 estaciones más representativas y fueron las siguientes (Tabla 10 y Figura 18).

**Tabla 10. Estaciones representativas seleccionadas**

Nombre	Altitud
San Juan Tlacotenco,	2306.0
Huitzilac, Huitzilac	2850.0
Totolapan E-10,Totolapan	1920.0
Oaxtepec, Yautepec	1385.0
Hueyapan E-4,Tetela D V.	2230.0
Progreso, Jiutepec	1350.0
Palpan (Tanque Reposo)	1470.0
Ticuman, Tlaltizapán	1130.0
Moyotepec, Villa De Ayala	1230.0
Puente De Ixtla	920.0
El Limón, Tepalcingo	1650.0
Tilzapotla, Puente De I.	1200.0
Lagunillas De Rayón, DGE	1100.0
Huautla, Tlaquiltenango	971.0



**Figura 16. Hipsometría**

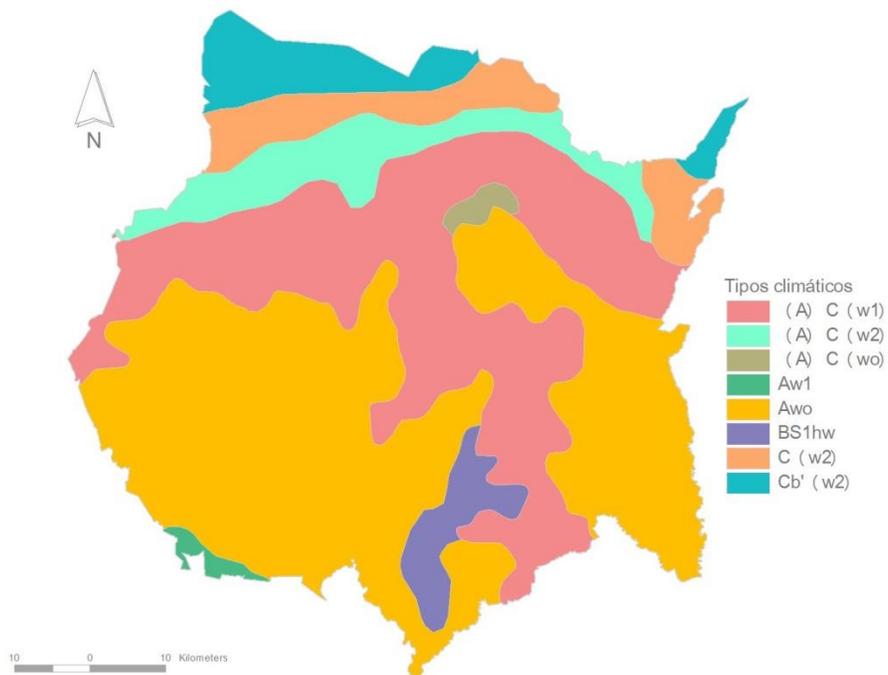


Figura 17. Tipos Climáticos

Tabla 11. Descripción de la Temperatura y Precipitación de cada tipo de clima

Tipo de Clima	Descripción de la temperatura	Descripción de la precipitación
Awo	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.	Precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
Awo	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.	Precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
C(w2)	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.	Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.
C(w2)	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.	Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.
Cb'(w2)	Semifrío, subhúmedo con verano fresco	Precipitación en el mes más seco

Tipo de Clima	Descripción de la temperatura	Descripción de la precipitación
	largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C , temperatura del mes más frio entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente bajo 22°C.	menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.
Cb'(w2)	Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C , temperatura del mes más frio entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente bajo 22°C.	Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.
(A)C(w2)	Semi cálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frio menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.	Precipitación del mes más seco menor a 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
(A)C(w1)	Semi cálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frio menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.	Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% anual.
(A)C(w1)	Semi cálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frio menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.	Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% anual.
(A)C(wo)	Semi cálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frio menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.	Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2, y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
BS1hw	Semiárido, semi cálido, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frio menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.	Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
Aw1	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frio mayor de 18°C.	Precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

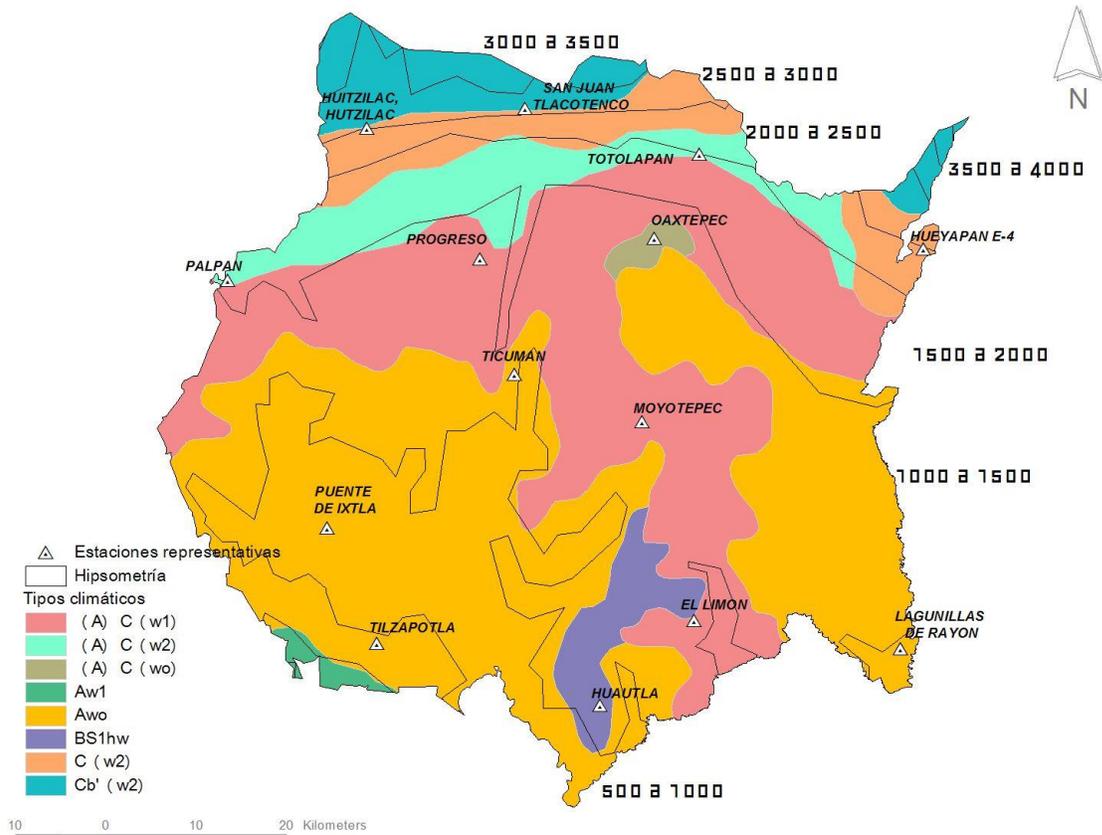
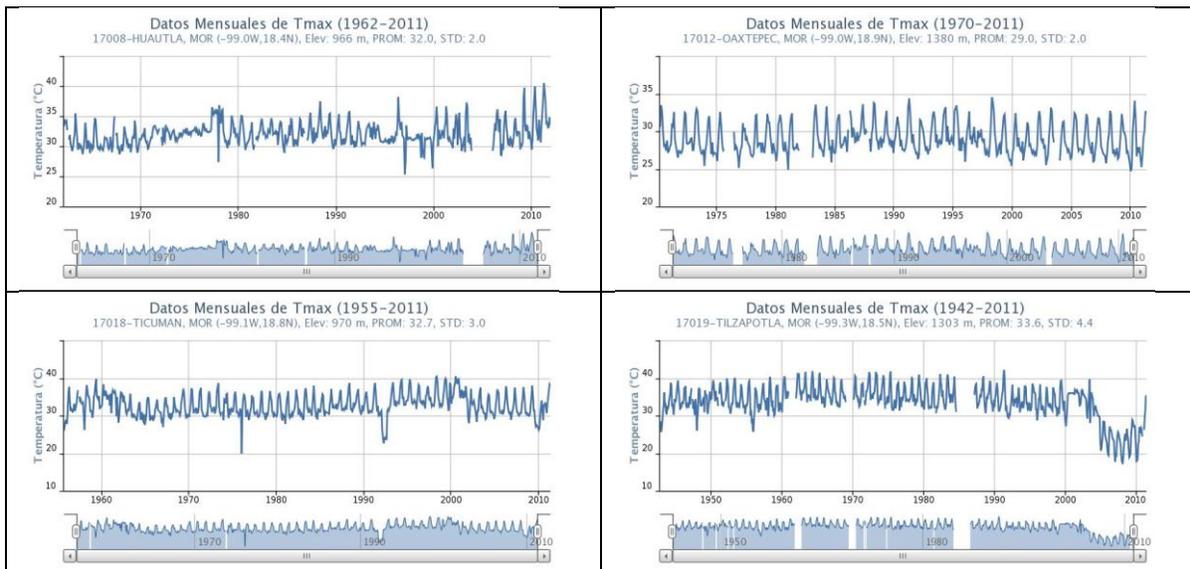


Figura 18. Estaciones representativas con referencia a la altitud, ubicación en subcuencas y tipos climáticos

### Tendencias mensuales de las estaciones representativas

Del análisis de estaciones climatológicas se obtuvieron tendencias anuales y mensuales de temperatura máxima y mínima y precipitación (Figuras 19, 20 y 21 respectivamente).



Estrategia para la aplicación de la norma de caudal ambiental hacia un enfoque adaptativo al cambio climático así como implementar la NMX-AA-159-SCFI-2012 para su difusión en el área focal de Eco-hidrología

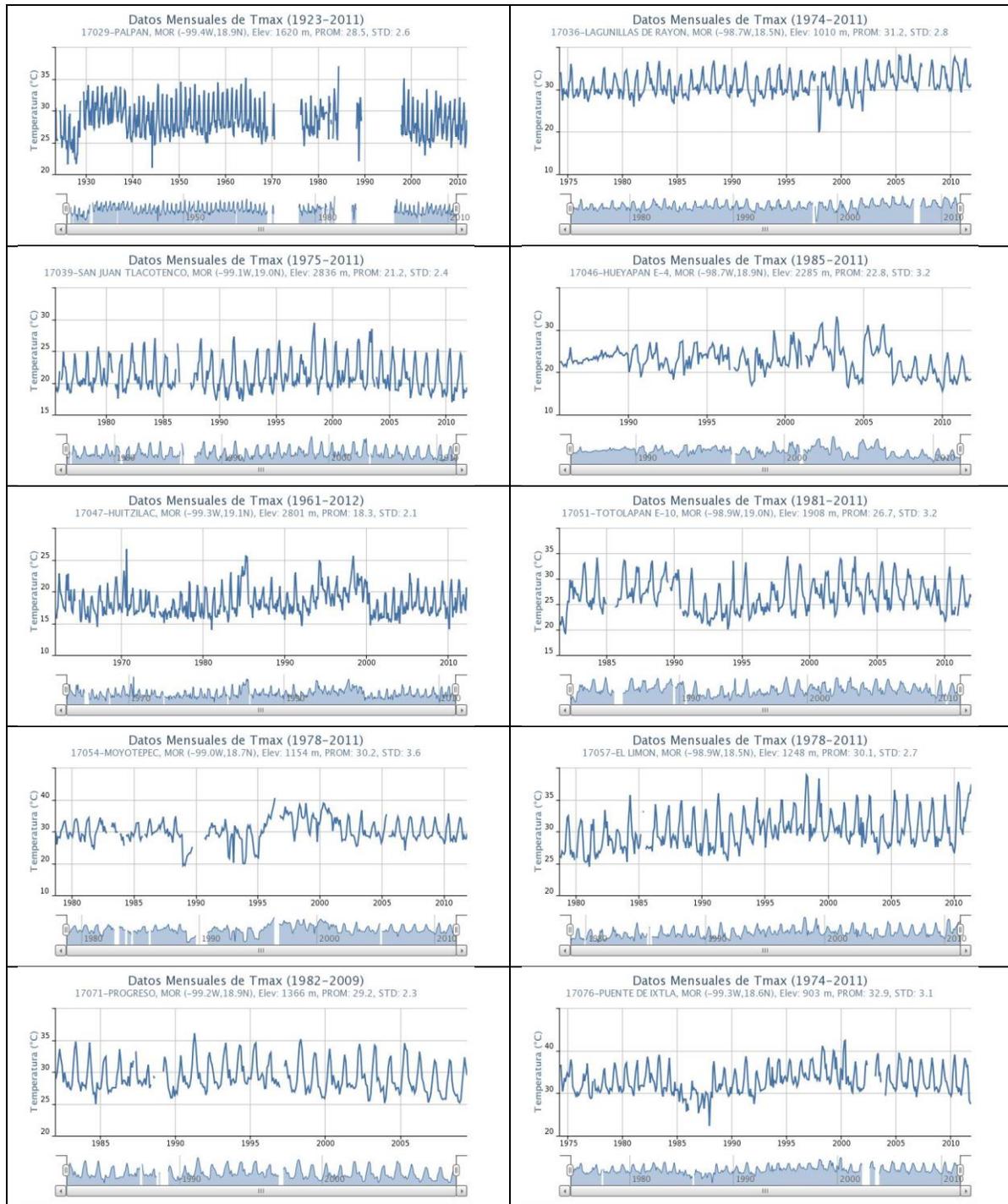
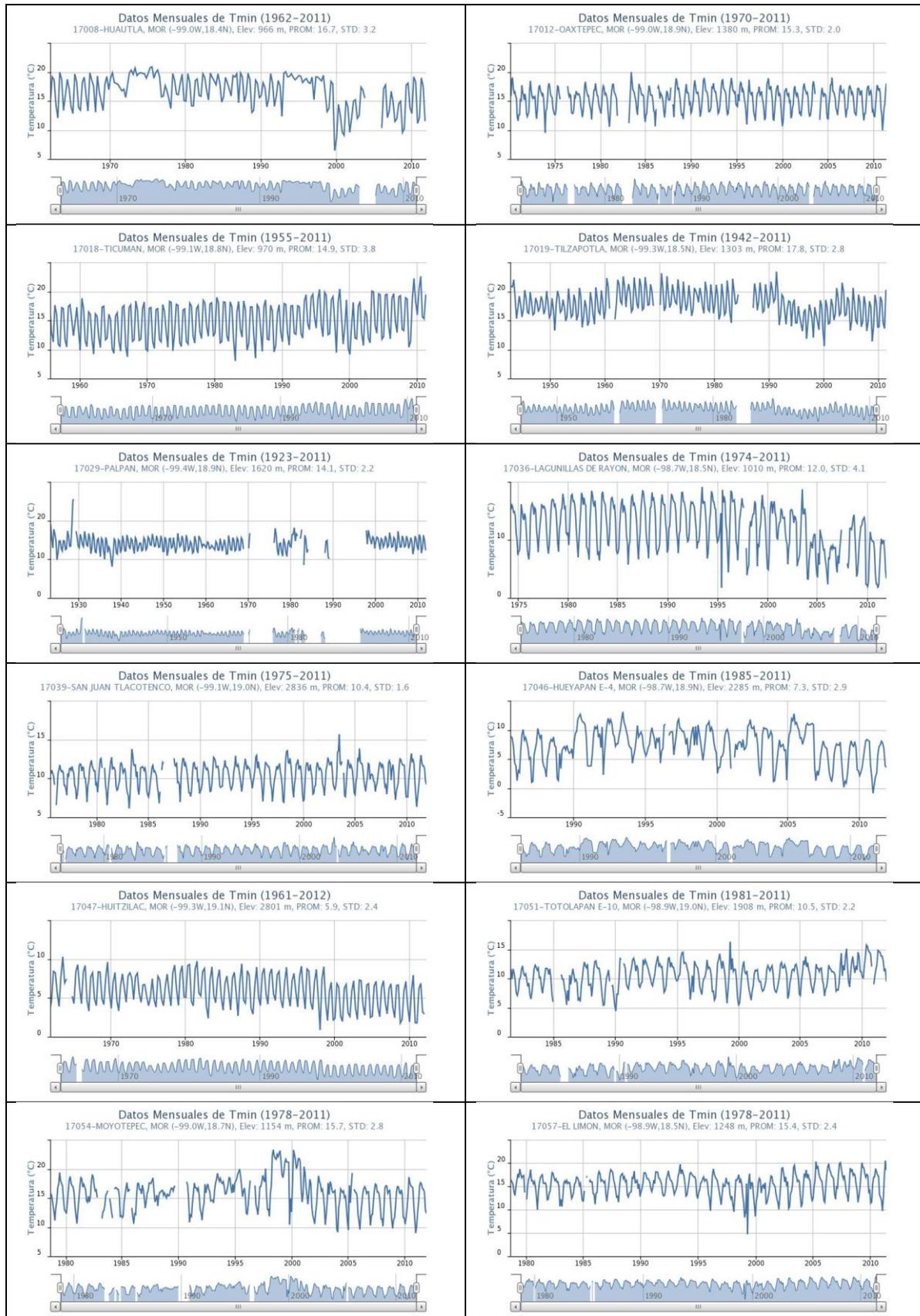
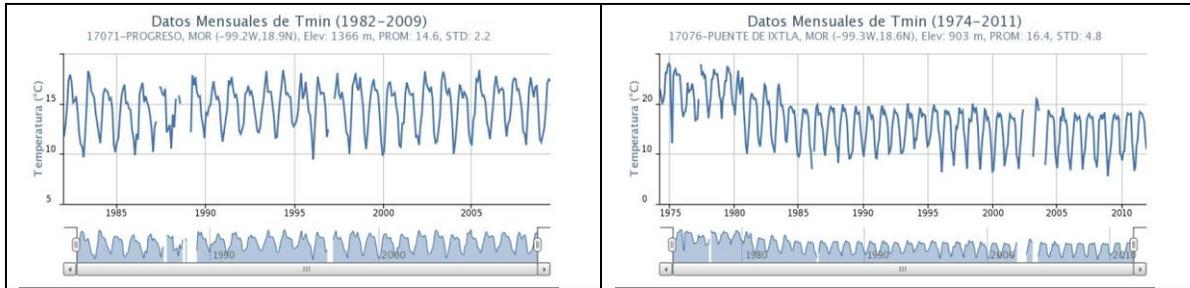


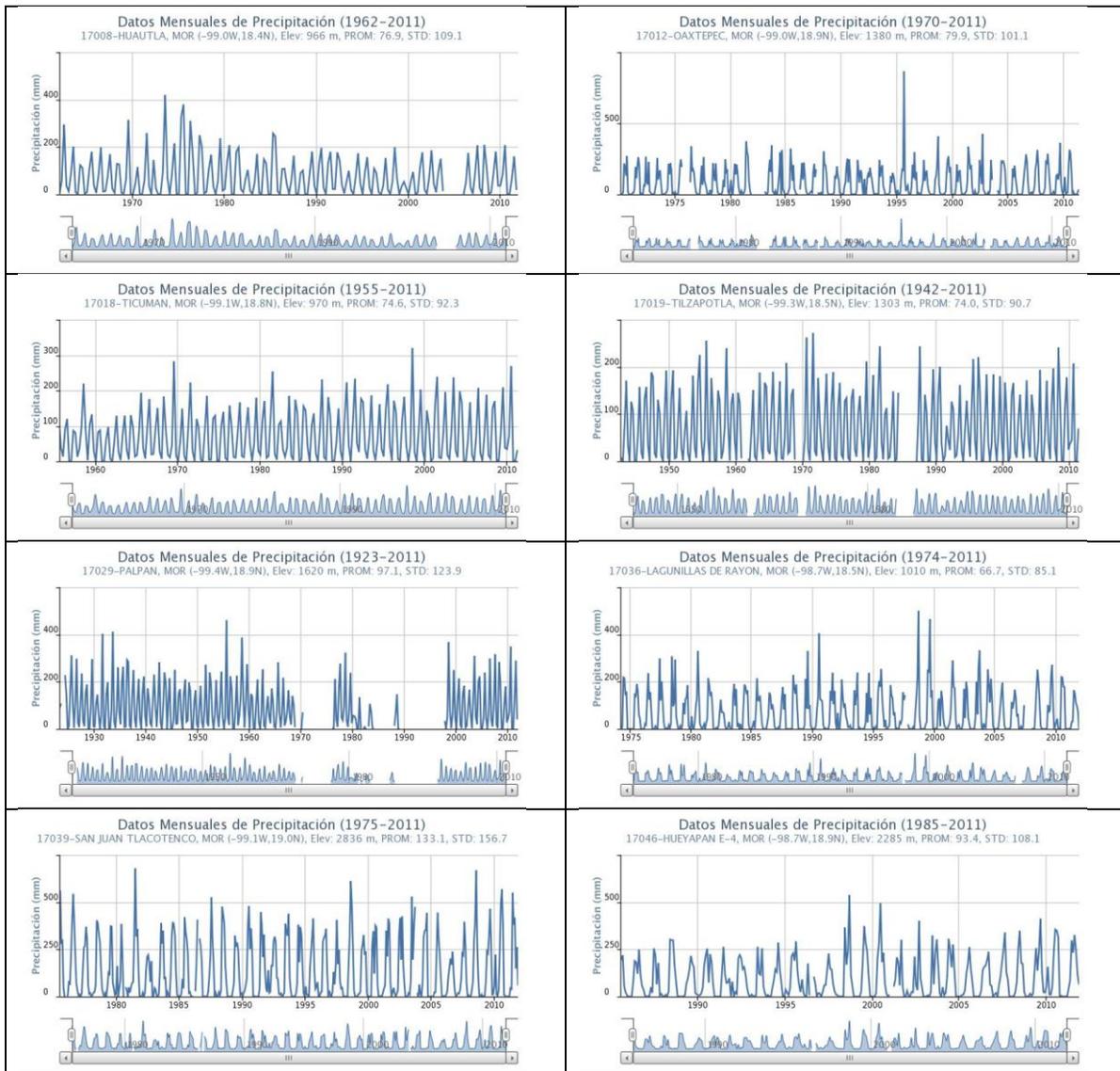
Figura 19. Tendencias mensuales de Temperatura máxima

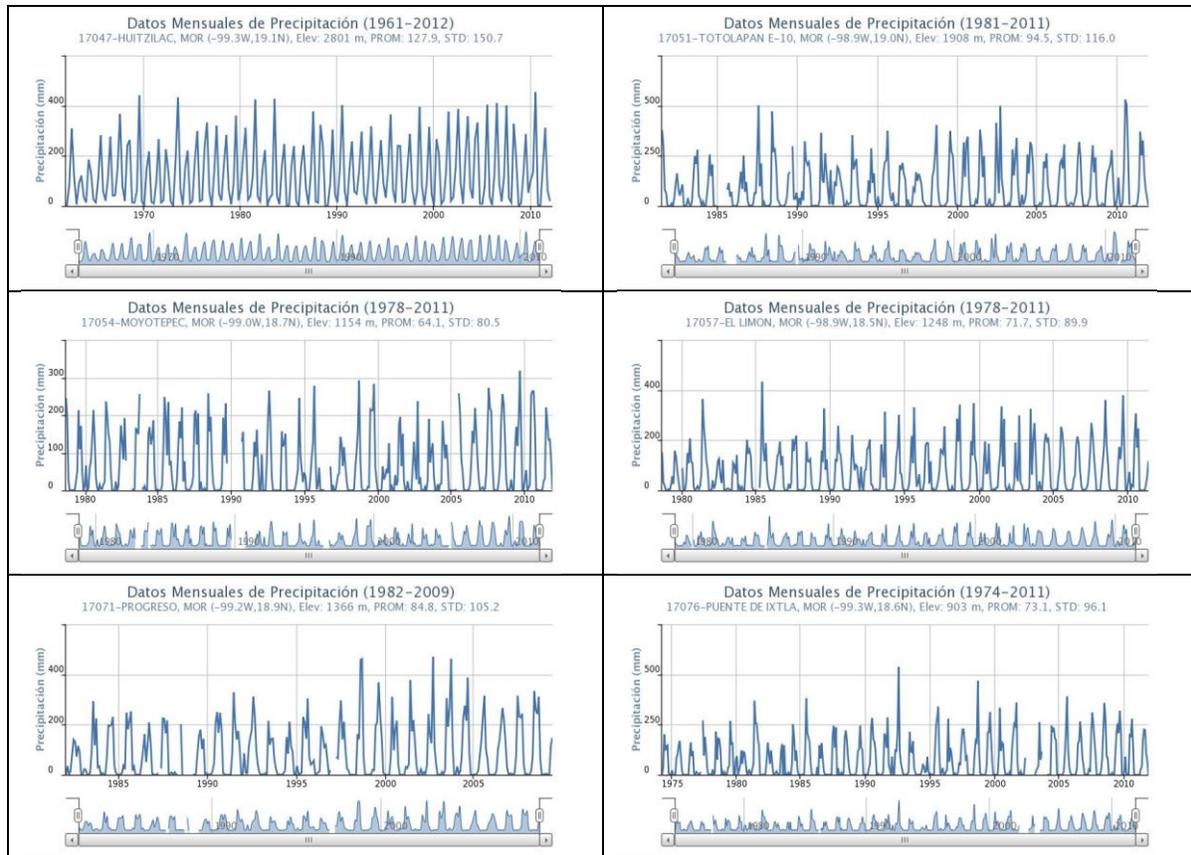
Estrategia para la aplicación de la norma de caudal ambiental hacia un enfoque adaptativo al cambio climático así como implementar la NMX-AA-159-SCFI-2012 para su difusión en el área focal de Eco-hidrología





**Figura 20. Tendencias mensuales de Temperatura mínima**





**Figura 21. Tendencias mensuales de Precipitación**

### **APLICACIÓN DE LA NMX**

Del análisis de la Norma Mexicana de Caudal Ecológico (NMX-AA-159-SCFI-2012), para la zona de estudio se clasifica con el Objetivo Ambiental C, que corresponde al Río Amacuzac, en el cual vierten cada uno de los ríos del estado, este objetivo ambiental representa una importancia ecológica muy alta, con una presión de uso también muy alta. La importancia ecológica representa que una o más especies en la región son endémicas o tiene una relevancia internacional y presentan algún estatus de conservación de acuerdo a la NOM-059-SEMARNAT-2010, y la presión de uso en la zona representa una alta concesión de agua que sobrepasa la disponibilidad de la cuenca. Con dicha información se continúa realizando el análisis de la subcuenca.

### **Tennant modificado por García et al. 1990**

La metodología de Tennant consiste en un régimen de caudal ecológico mensual, y partiendo de porcentajes de referencia establecidos por el objetivo ambiental y definidos estado actual o deseado del sitio, importancia ecológica y presión de uso (Tabla 12).

**Tabla 12. Porcentajes de referencia estacionales para el Objetivo ambiental C**

Objetivo ambiental	Periodo			
	Estiaje		Avenida	
	% CMA	% Qmi	% CMA	% Qmi
C	15	60	30	30

Para la estrategia de caudal ecológico por el método Tennant modificado por García, 1999, se señalan cinco elementos a partir de los cuales se obtiene el caudal ecológico (Figuras 22-31).

- 1) El escurrimiento medio anual en caudal CMA (Línea roja);
- 2) % de CMA para estiaje y avenidas (15 y 30%) (Línea azul);
- 3) El caudal medio mensual Qmi (área verde);
- 4) % de Qmi para estiaje y avenidas (60 y 30) y
- 5) El caudal base, que corresponde al caudal histórico medio mensual mínimo y representa la aportación del acuífero a la corriente en estudio.

Por último, el caudal ecológico para el periodo de estiaje, no puede ser mayor al % de Qmi determinado para cada época del año (estiaje y lluvias), ni menor al caudal base; entonces, para el periodo de estiaje, se ajusta eligiendo entre el 15% de CMA y el 60% de Qmi; y para el periodo de avenidas, se ajusta eligiendo entre el 30% de CMA y el 30% de Qmi y los valores que se asignan son los que se muestran en las tablas 13 a 22.

Los resultados obtenidos para cada una de las estaciones hidrométricas en la cuenca fueron los siguientes:

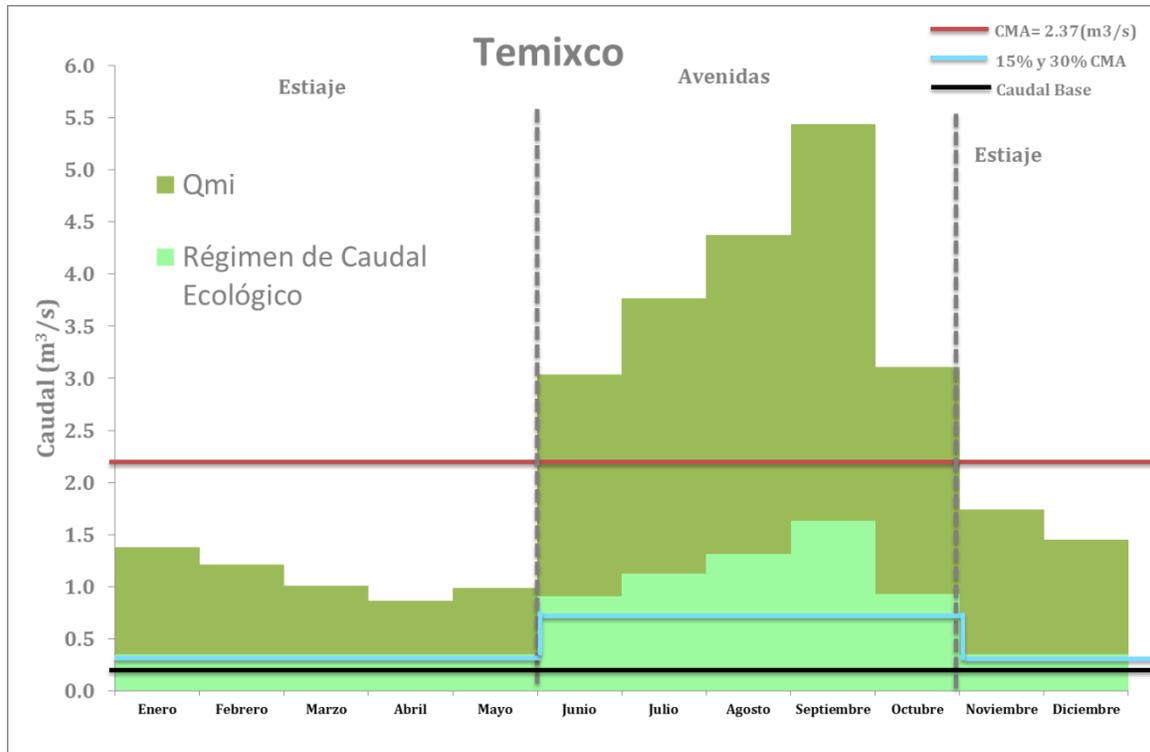


Figura 22. Caudal Ecológico Temixco

Tabla 13. Resumen de datos mensuales para Qmi, %Qmi, %EMA y Qecol Temixco

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Qmi	1.38	1.21	1.01	0.86	0.99	3.03	3.77	4.37	5.44	3.11	1.74	1.45
% Qmi	0.83	0.73	0.61	0.52	0.59	0.91	1.13	1.31	1.63	0.93	1.05	0.87
% EMA	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.36	0.36
Cecol	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.91	1.13	1.31	1.63	0.93	0.36	0.36

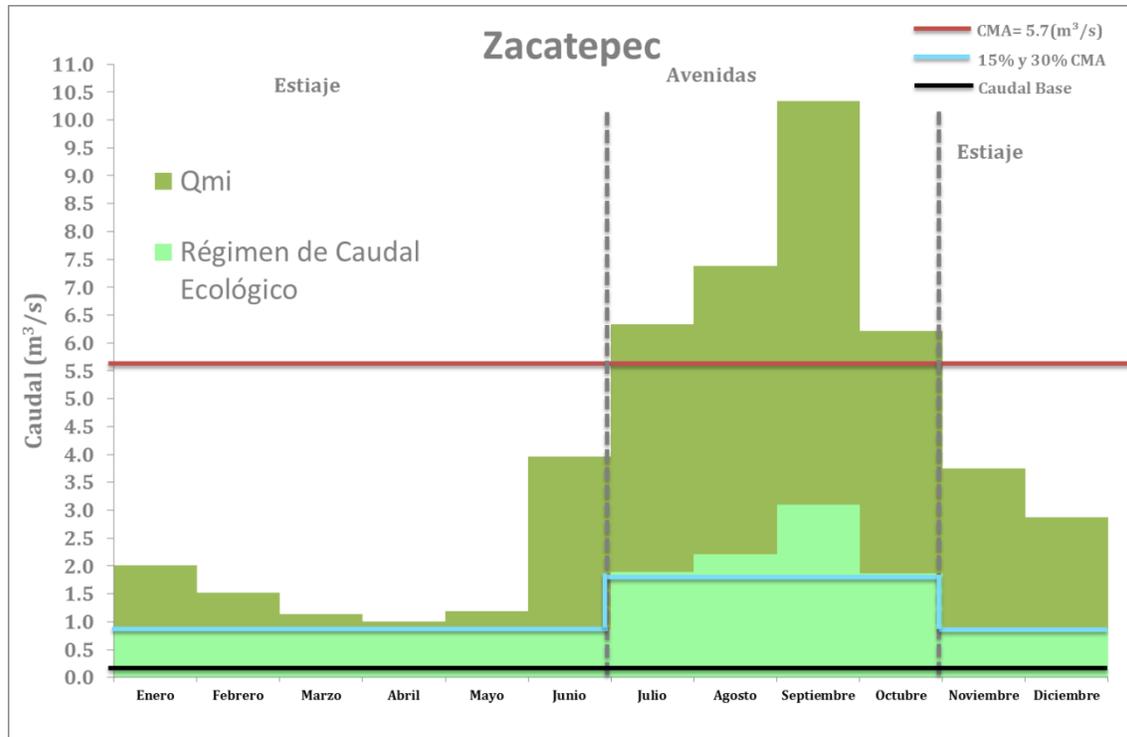


Figura 23. Caudal Ecológico Zacatepec

Tabla 14. Resumen de datos mensuales para Qmi, %Qmi, %EMA y Qecol Zacatepec

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Qmi	2.0	1.5	1.1	1.0	1.2	4.0	6.3	7.4	10.3	6.2	3.7	2.9
% Qmi	1.20	0.92	0.68	0.60	0.71	1.19	1.90	2.21	3.10	1.86	2.25	1.72
% EMA	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	1.71	1.71	1.71	1.71	0.86	0.86
Cecol	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	1.90	2.21	3.10	1.86	0.86	0.86

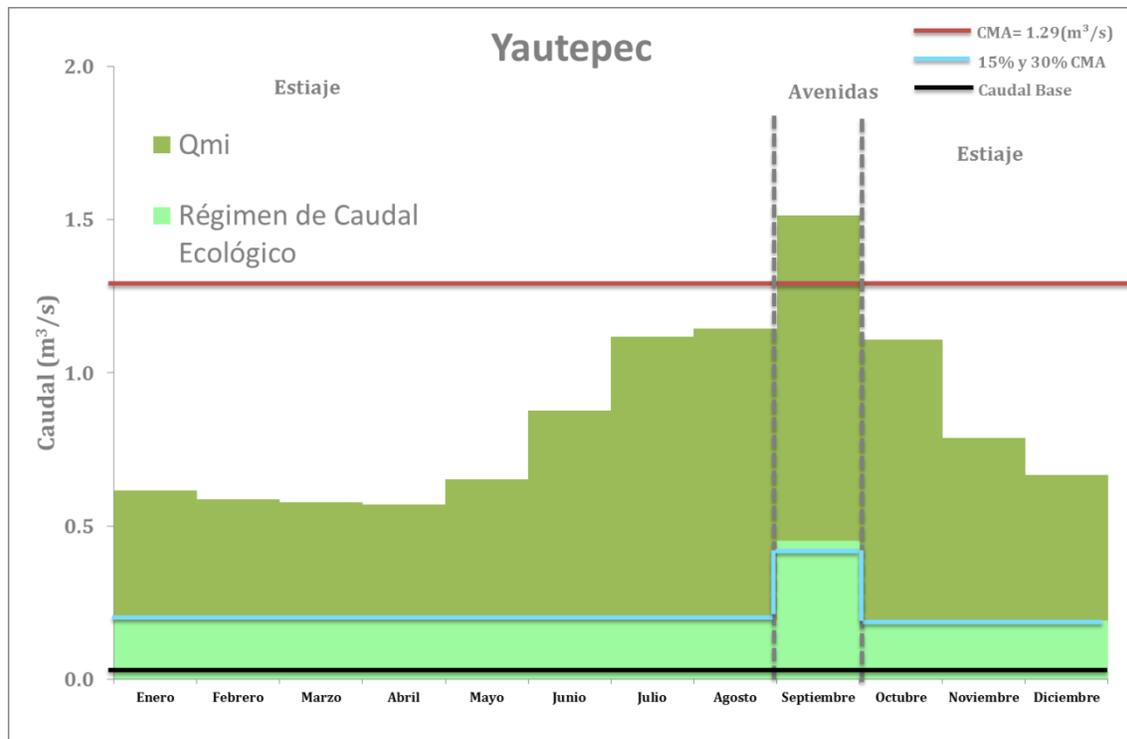


Figura 24. Caudal Ecológico Yautepec

Tabla 15. Resumen de datos mensuales para Qmi, %Qmi, %EMA y Qecol Yautepec

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Qmi	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.9	1.1	1.1	1.5	1.1	0.8	0.7
% Qmi	0.37	0.35	0.35	0.34	0.39	0.53	0.67	0.69	0.45	0.67	0.47	0.40
% EMA	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.39	0.19	0.19	0.19
Cecol	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.45	0.19	0.19	0.19

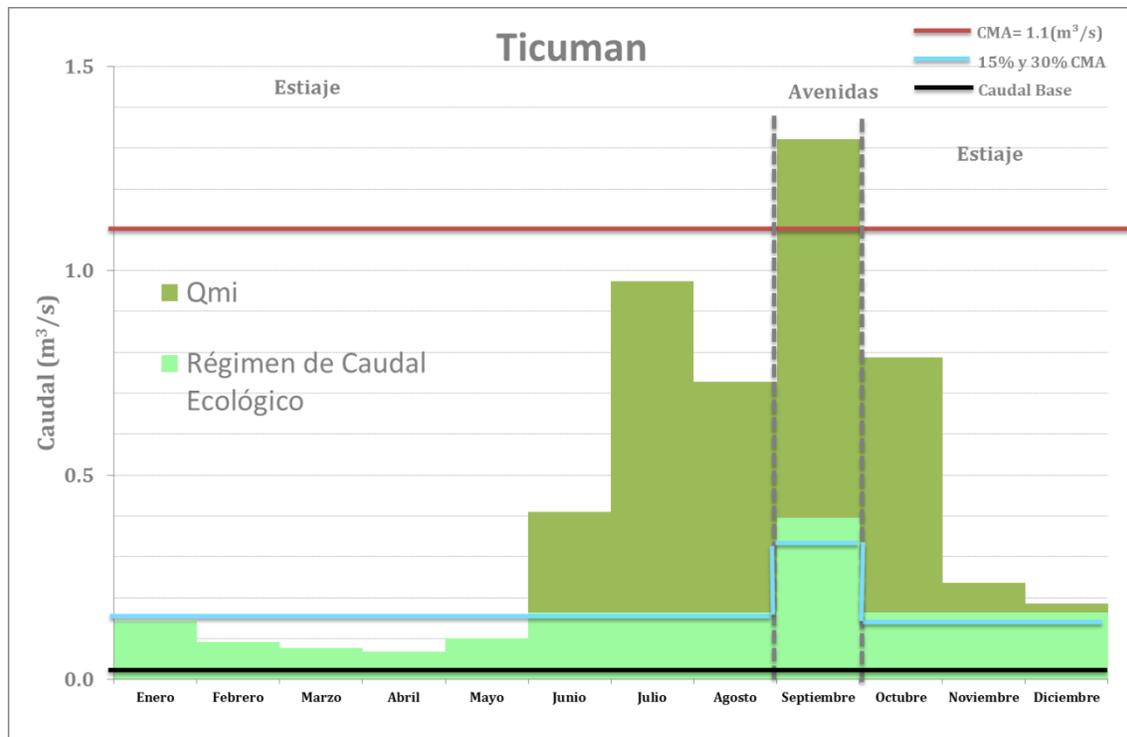


Figura 25. Caudal Ecológico Ticuman

Tabla 16. Resumen de datos mensuales para Qmi, %Qmi, %EMA y Qecol Ticuman

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Qmi	0.14	0.09	0.08	0.07	0.10	0.41	0.98	0.73	1.32	0.79	0.24	0.19
% Qmi	0.09	0.06	0.05	0.04	0.06	0.25	0.59	0.44	0.40	0.47	0.14	0.11
% EMA	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.33	0.17	0.17	0.17
Cecol	0.14	0.09	0.08	0.07	0.10	0.17	0.17	0.17	0.40	0.17	0.17	0.17

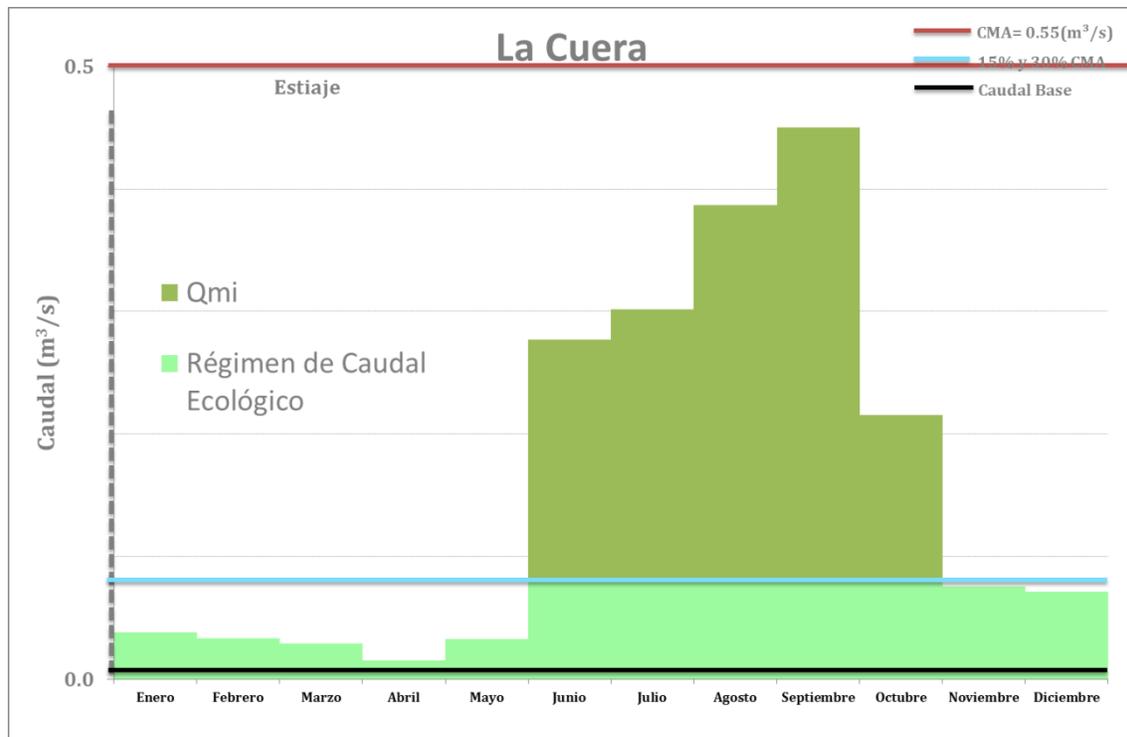


Figura 26. Caudal Ecológico La Cuera

Tabla 17. Resumen de datos mensuales para Qmi, %Qmi, %EMA y Qecol La Cuera

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Qmi	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.28	0.30	0.39	0.45	0.22	0.08	0.07
% Qmi	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.17	0.18	0.23	0.13	0.13	0.05	0.04
% EMA	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Cecol	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07

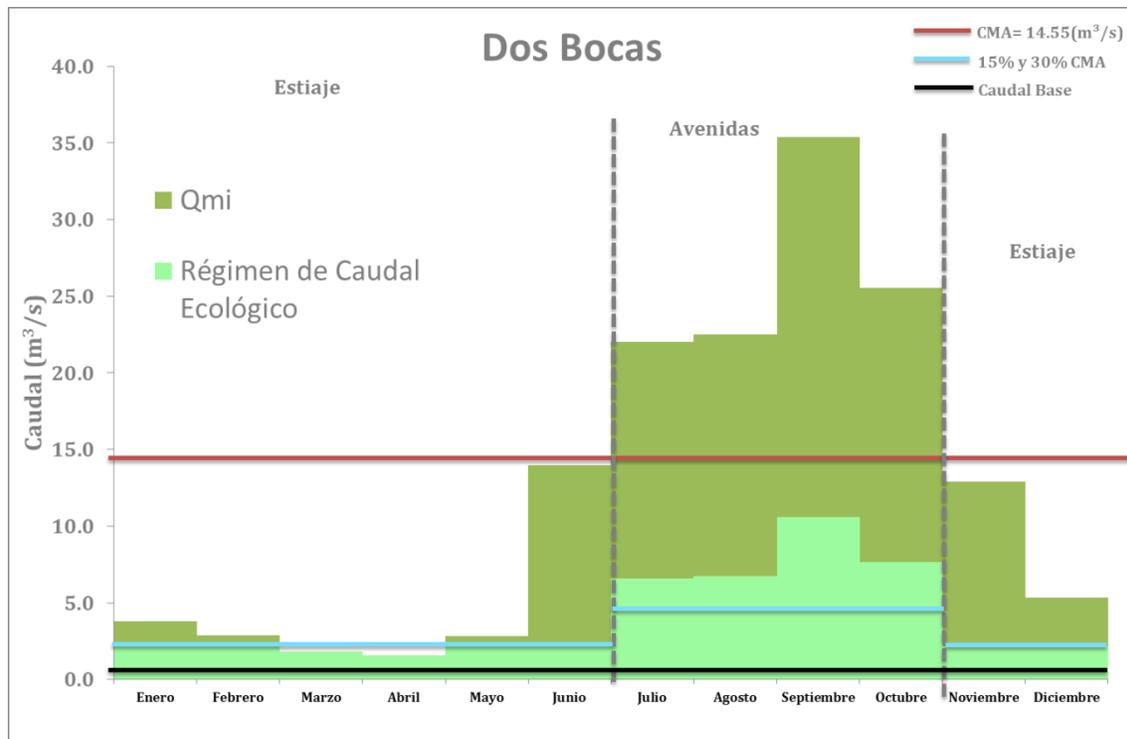


Figura 27. Caudal Ecológico Dos Bocas

Tabla 18. Resumen de datos mensuales para Qmi, %Qmi, %EMA y Qecol Dos Bocas

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Qmi	3.82	2.90	1.84	1.60	2.84	13.96	22.02	22.52	35.39	25.53	12.89	5.33
% Qmi	2.29	1.74	1.10	0.96	1.70	8.37	6.61	6.76	10.62	7.66	7.73	3.20
% EMA	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	4.37	4.37	4.37	4.37	2.18	2.18
Cecol	2.18	2.18	1.84	1.60	2.18	2.18	6.61	6.76	10.62	7.66	2.18	2.18

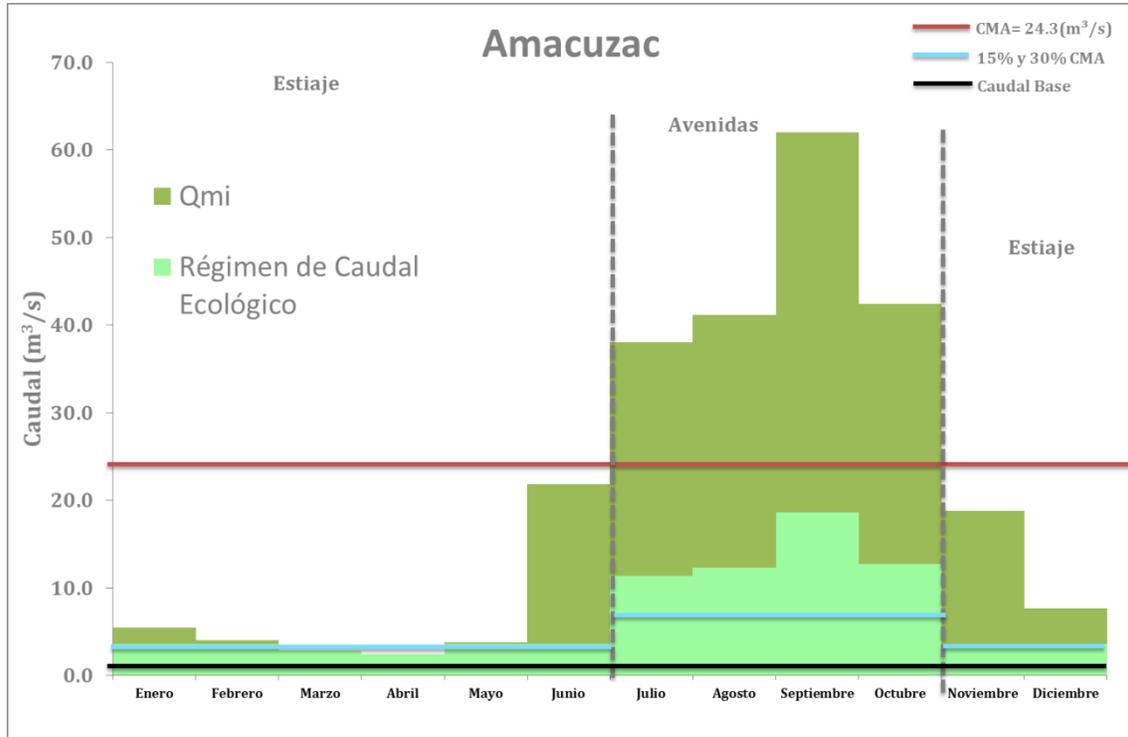


Figura 28. Caudal Ecológico Amacuzac

Tabla 19. Resumen de datos mensuales para Qmi, %Qmi, %EMA y Qecol Amacuzac

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Qmi	5.44	4.02	2.83	2.40	3.82	21.84	38.05	41.12	61.97	42.40	18.80	7.63
% Qmi	3.26	2.41	1.70	1.44	2.29	13.10	11.41	12.33	18.59	12.72	11.28	4.58
% EMA	3.65	3.65	3.65	3.65	3.65	3.65	7.29	7.29	7.29	7.29	3.65	3.65
Cecol	3.65	3.65	2.83	2.40	3.65	3.65	11.41	12.33	18.59	12.72	3.65	3.65

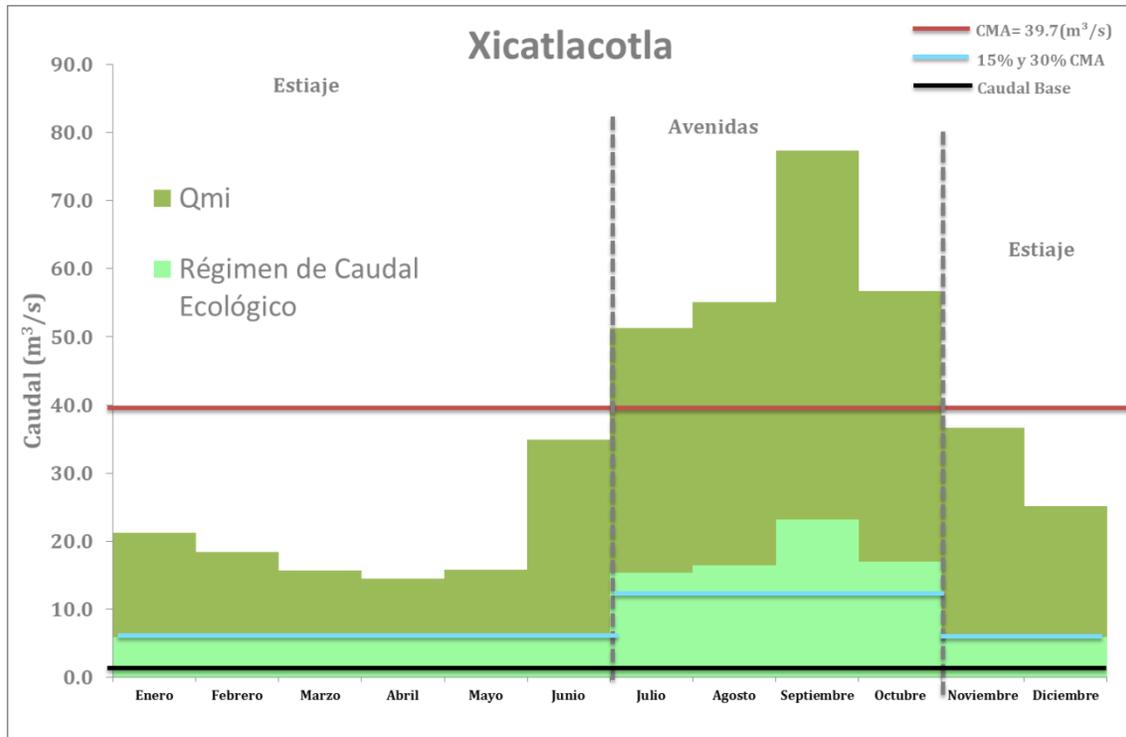


Figura 29. Caudal Ecológico Xicatlacotla

Tabla 20. Resumen de datos mensuales para Qmi, %Qmi, %EMA y Qecol Xicatlacotla

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Qmi	21.2	18.5	15.7	14.5	15.8	34.9	51.2	55.0	77.3	56.7	36.6	25.2
% Qmi	12.7	11.1	9.4	8.7	9.5	20.9	15.4	16.5	23.2	17.0	22.0	15.1
% EMA	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	11.9	11.9	11.9	11.9	6.0	6.0
Cecol	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	15.4	16.5	23.2	17.0	6.0	6.0

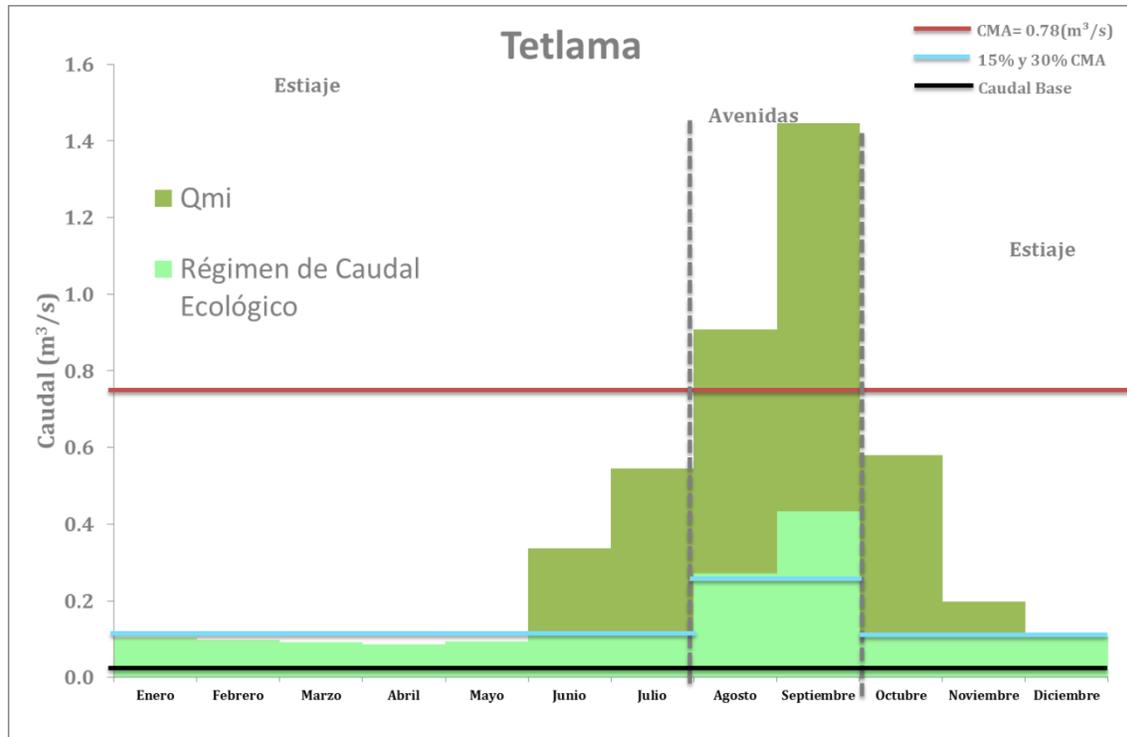


Figura 30. Caudal Ecológico Tetlama

Tabla 21. Resumen de datos mensuales para Qmi, %Qmi, %EMA y Qecol Tetlama

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Qmi	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.34	0.54	0.91	1.45	0.58	0.20	0.11
% Qmi	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.20	0.33	0.27	0.43	0.35	0.12	0.06
% EMA	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.23	0.23	0.12	0.12	0.12
Cecol	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.12	0.12	0.27	0.43	0.12	0.12	0.11

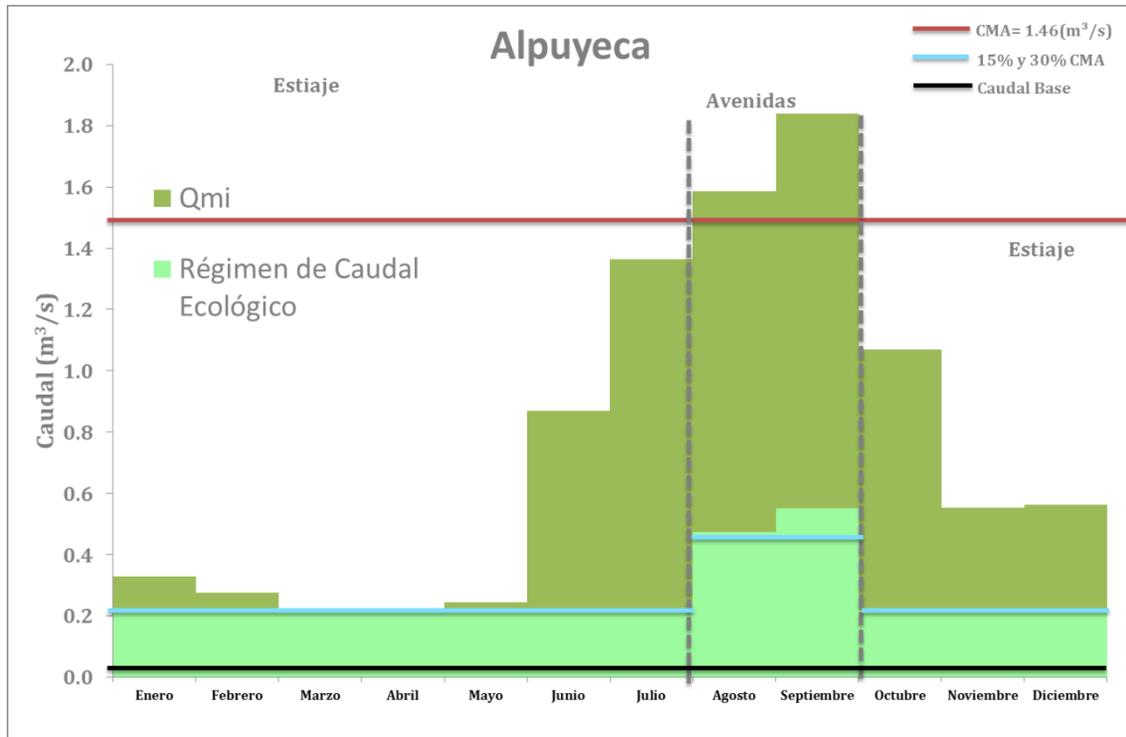


Figura 31. Caudal Ecológico Alpuyeca

Tabla 22. Resumen de datos mensuales para Qmi, %Qmi, %EMA y Qecol Alpuyeca

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Qmi	0.33	0.28	0.22	0.23	0.25	0.87	1.36	1.58	1.84	1.07	0.55	0.56
% Qmi	0.20	0.17	0.13	0.14	0.15	0.52	0.82	0.48	0.55	0.64	0.33	0.34
% EMA	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.44	0.44	0.22	0.22	0.22
Cecol	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.48	0.55	0.22	0.22	0.22

### Alteraciones

Para conocer las posibles alteraciones al caudal en las estaciones a la salida de cada una de las subcuencas, se analizaron los datos mensuales de caudal, dividiendo la serie en dos partes, para comparar el Régimen Hidrológico Natural (RHN), con respecto al Régimen Hidrológico Actual (RHA), y así saber el porcentaje de cumplimiento, que según la metodología del WWF, si es menor al 50% se considera alterado y si es mayor, se considera, no alterado.

A continuación se muestran los resultados del análisis del régimen natural con respecto al alterado por estación (Tabla 23-27 y Figuras 32-41).

Zacatepec - Alterado, con un total de cumplimiento de 49%  
Tabla 23. Percentiles y porcentajes de cumplimiento para la estación Zacatepec

Estrategia para la aplicación de la norma de caudal ambiental hacia un enfoque adaptativo al cambio climático así como implementar la NMX-AA-159-SCFI-2012 para su difusión en el área focal de Eco-hidrología

Parámetro	P10	Mediana (P50)	P90	Q medio actual (m <sup>3</sup> /s)	No. meses que cumple	Total meses	% cumplimiento
Ene	0.5	1.0	1.7	2.9	8	26	30.8
Feb	0.3	0.6	1.3	2.3	10	26	38.5
Mar	0.3	0.5	1.0	1.7	11	26	42.3
Abr	0.3	0.4	0.8	1.5	12	26	46.2
May	0.3	0.8	1.5	1.6	15	26	57.7
Jun	0.7	1.3	4.0	5.9	12	26	46.2
Jul	1.3	3.1	8.3	8.8	16	26	61.5
Ago	1.8	4.0	10.3	9.1	20	26	76.9
Sep.	2.6	5.8	12.6	14.0	13	26	50.0
Oct	1.7	3.1	8.5	8.0	15	26	57.7
Nov	1.4	2.6	4.7	4.5	12	26	46.2
Dic	1.3	2.0	2.9	3.6	9	26	34.6
Total mensual					153	312	49.0

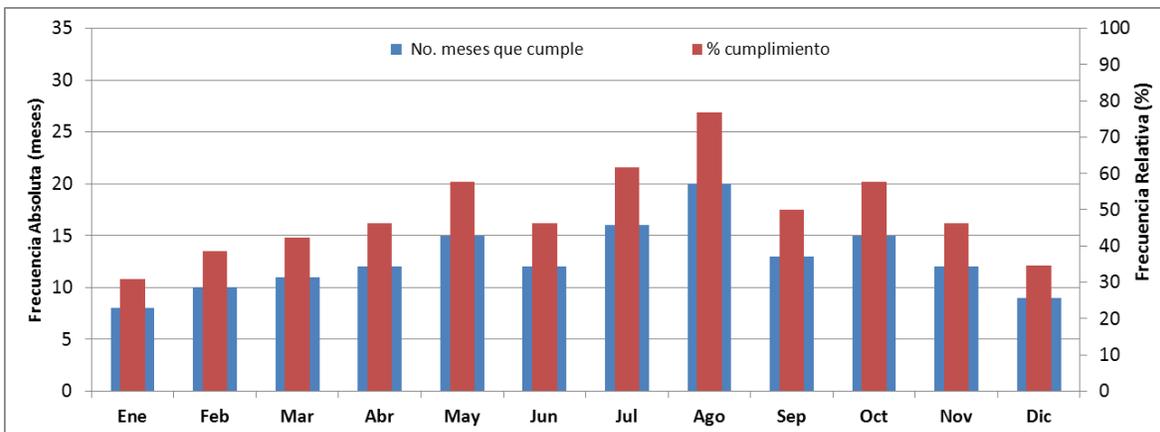


Figura 32. Meses que cumple y % de cumplimiento para la estación Zacatepec

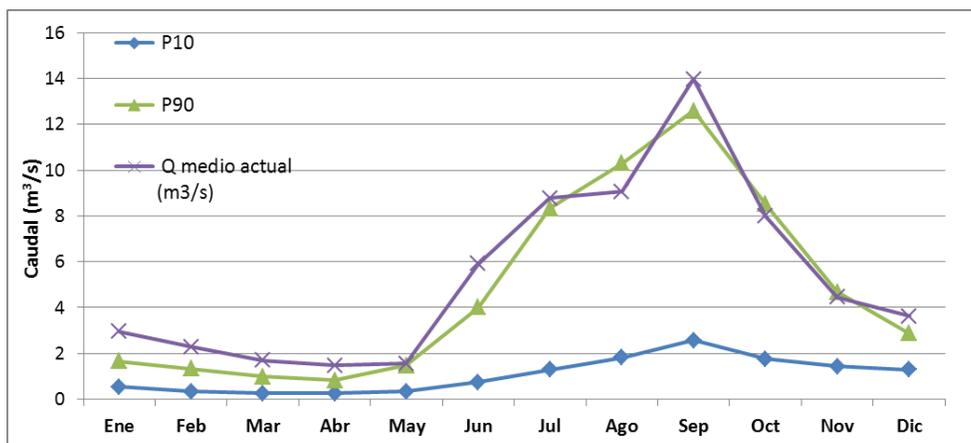
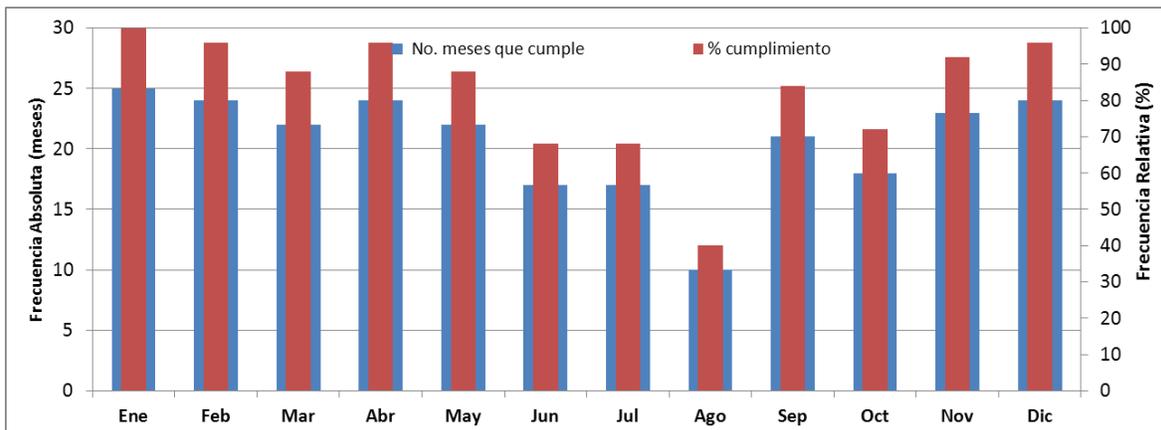


Figura 33. Alteraciones con respecto a los umbrales del régimen natural Zacatepec

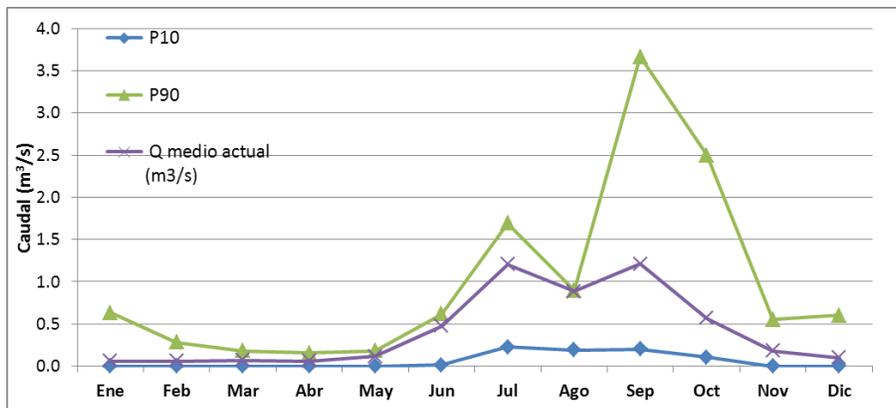
**Ticuman - No alterado con un total de cumplimiento de 82%**

**Tabla 24. Percentiles y porcentajes de cumplimiento para la estación Ticuman**

Parámetro	P10	Mediana (P50)	P90	Q medio actual (m <sup>3</sup> /s)	No. meses que cumple	Total meses	% cumplimiento
Ene	0.0	0.2	0.6	0.1	25	25	100.0
Feb	0.0	0.2	0.3	0.1	24	25	96.0
Mar	0.0	0.1	0.2	0.1	22	25	88.0
Abr	0.0	0.1	0.2	0.1	24	25	96.0
May	0.0	0.1	0.2	0.1	22	25	88.0
Jun	0.0	0.3	0.6	0.5	17	25	68.0
Jul	0.2	0.4	1.7	1.2	17	25	68.0
Ago	0.2	0.5	0.9	0.9	10	25	40.0
Sep.	0.2	1.0	3.7	1.2	21	25	84.0
Oct	0.1	0.6	2.5	0.6	18	25	72.0
Nov	0.0	0.2	0.6	0.2	23	25	92.0
Dic	0.0	0.2	0.6	0.1	24	25	96.0
Total mensual					247	300	82.3



**Figura 34. Meses que cumple y % de cumplimiento para la estación Ticuman**

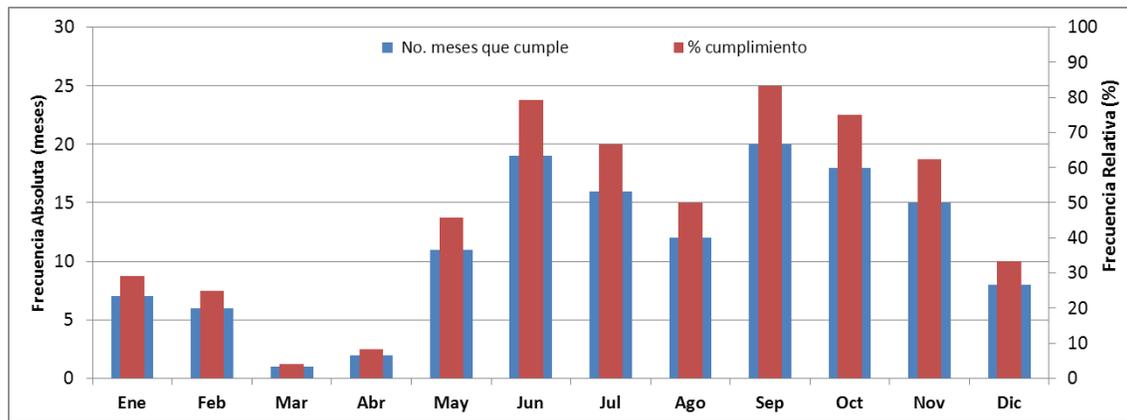


**Figura 35 Alteraciones con respecto a los umbrales del régimen natural Ticuman**

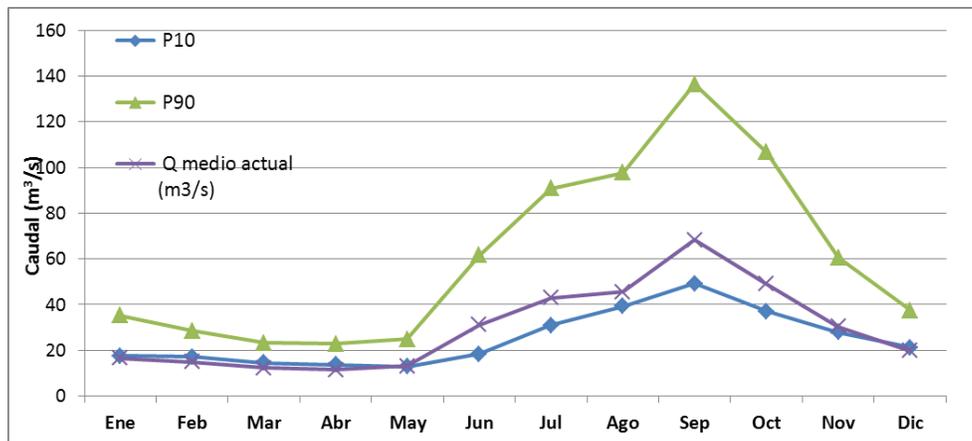
**Xicatlacotla - Alterado, con un total de cumplimiento de 46.9%**

**Tabla 25. Percentiles y porcentajes de cumplimiento para la estación Xicatlacotla**

Parámetro	P10	Mediana (P50)	P90	Q medio actual (m <sup>3</sup> /s)	No. meses que cumple	Total meses	% cumplimiento
Ene	17.5	26.1	35.3	16.6	7	24	29.2
Feb	17.2	22.3	28.5	14.9	6	24	25.0
Mar	14.5	19.0	23.3	12.3	1	24	4.2
Abr	13.7	17.7	22.8	11.5	2	24	8.3
May	12.8	18.0	24.9	13.1	11	24	45.8
Jun	18.3	33.4	61.6	31.1	19	24	79.2
Jul	30.9	55.0	90.9	42.9	16	24	66.7
Ago	39.2	59.6	97.8	45.7	12	24	50.0
Sep.	49.2	79.8	136.5	68.4	20	24	83.3
Oct	37.1	58.9	106.7	49.1	18	24	75.0
Nov	28.0	39.1	60.7	30.3	15	24	62.5
Dic	21.2	30.9	37.4	19.7	8	24	33.3
Total mensual					135	288	46.9



**Figura 36. Meses que cumple y % de cumplimiento para la estación Xicatlacotla**

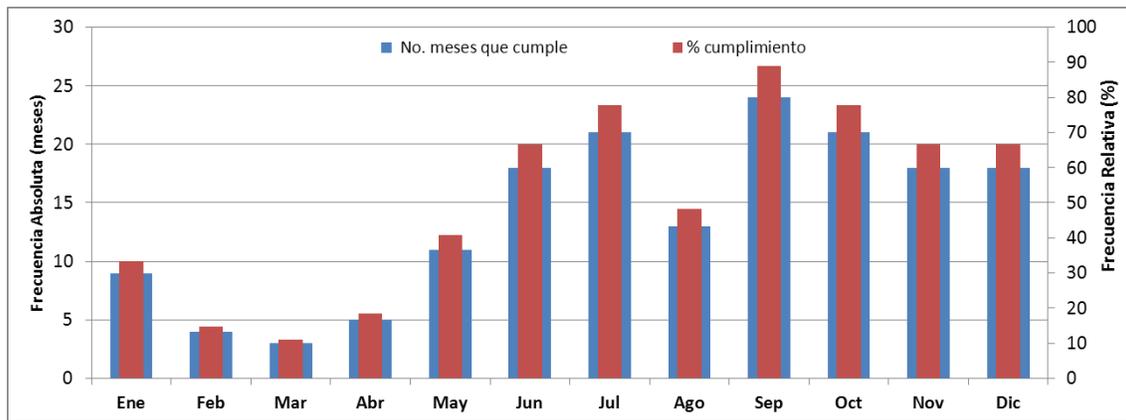


**Figura 37. Alteraciones con respecto a los umbrales del régimen natural Xicatlacotla**

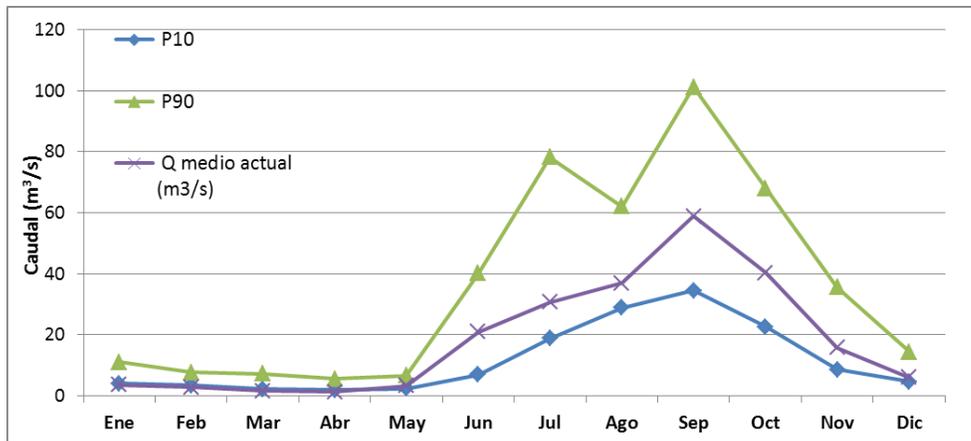
**Amacuzac - No alterado, con un total de cumplimiento de 50.9%**

**Tabla 26. Percentiles y porcentajes de cumplimiento para la estación Amacuzac**

Parámetro	P10	Mediana (P50)	P90	Q medio actual (m <sup>3</sup> /s)	No. meses que cumple	Total meses	% cumplimiento
Ene	4.0	7.7	11.0	3.5	9	27	33.3
Feb	3.4	5.1	7.8	2.9	4	27	14.8
Mar	2.2	3.7	7.2	1.7	3	27	11.1
Abr	1.9	3.3	5.6	1.4	5	27	18.5
May	2.4	4.3	6.6	3.3	11	27	40.7
Jun	7.0	22.1	40.1	21.0	18	27	66.7
Jul	18.8	42.3	78.2	30.7	21	27	77.8
Ago	28.9	38.7	62.1	37.0	13	27	48.1
Sep.	34.5	56.1	101.1	58.9	24	27	88.9
Oct	22.6	42.3	67.9	40.2	21	27	77.8
Nov	8.6	19.0	35.6	15.7	18	27	66.7
Dic	4.6	8.9	14.3	6.1	18	27	66.7
Total mensual					165	324	50.9



**Figura 38. Meses que cumple y % de cumplimiento para la estación Amacuzac**

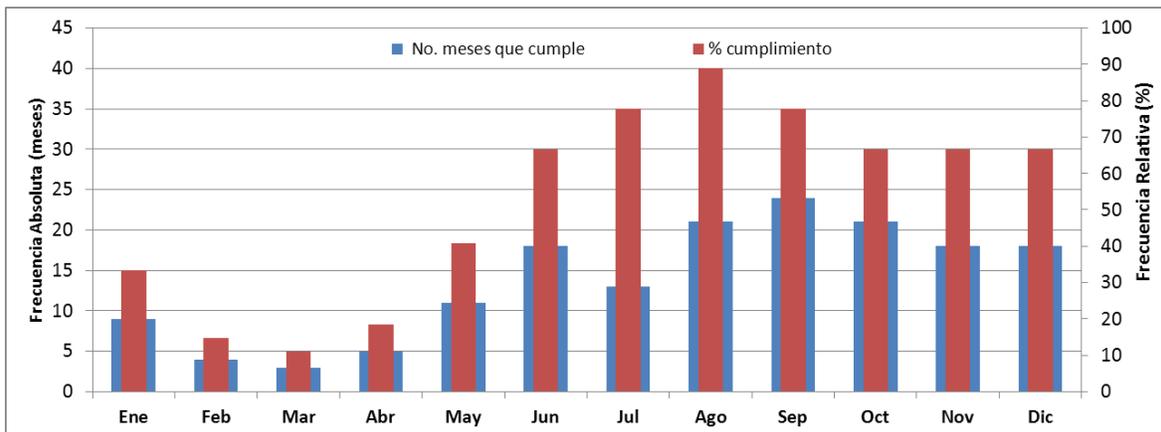


**Figura 39. Alteraciones con respecto a los umbrales del régimen natural Amacuzac**

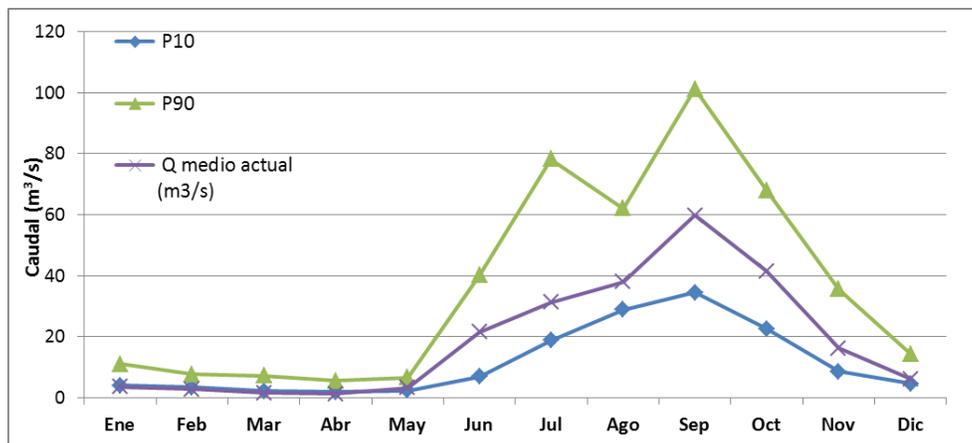
**Alpuyeca - No alterado, con un 50.9% de cumplimiento**

**Tabla 27. Percentiles y porcentajes de cumplimiento para la estación Alpuyeca**

Parámetro	P10	Mediana (P50)	P90	Q medio actual (m <sup>3</sup> /s)	No. meses que cumple	Total meses	% cumplimiento
Ene	4.0	7.7	11.0	3.5	9	27	33.3
Feb	3.4	5.1	7.8	2.9	4	27	14.8
Mar	2.2	3.7	7.2	1.6	3	27	11.1
Abr	1.9	3.3	5.6	1.3	5	27	18.5
May	2.4	4.3	6.6	3.2	11	27	40.7
Jun	7.0	22.1	40.1	21.5	18	27	66.7
Jul	18.8	42.3	78.2	31.3	13	27	77.8
Ago	28.9	38.7	62.1	37.9	21	27	88.9
Sep.	34.5	56.1	101.1	59.7	24	27	77.8
Oct	22.6	42.3	67.9	41.4	21	27	66.7
Nov	8.6	19.0	35.6	16.2	18	27	66.7
Dic	4.6	8.9	14.3	6.2	18	27	66.7
Total mensual					165	324	50.9



**Figura 40. Meses que cumple y % de cumplimiento para la estación Alpuyeca**



**Figura 41. Alteraciones con respecto a los umbrales del régimen natural Alpuyeca**

## **CALIDAD DEL AGUA**

### **Antecedentes**

En general, en la región de la cuenca Balsas a la que pertenece el Estado de Morelos se considera que el grado de presión sobre el recurso hídrico es fuerte, ya que el uso consuntivo respecto a la disponibilidad total es mayor. La cuenca alta del Balsas está dividida en siete cuencas hidrológicas, perteneciendo al Estado de Morelos la cuenca del río Amacuzac, cuyas corrientes principales son: el río Amacuzac, Apatlaco, Tembembe y Nexapa.

El estado de Morelos cuenta con 51 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de las cuales el 12% (6 plantas) no operan al 100% de su capacidad instalada y 26% (13 plantas) no están operando por diferentes problemáticas técnicas u operativas presentadas, como la falta de mantenimiento y falta de capacidad financiera para seguir operando. El gasto instalado de la PTAR es de 45.9 Mm<sup>3</sup>/año, mientras que el gasto de operación es de 20.5 Mm<sup>3</sup>/año, lo cual representa que menos de la mitad de las aguas residuales aportadas a los cauces recibe tratamiento.

El volumen de aguas residuales descargadas es de 203.5 Mm<sup>3</sup>/año (municipales, industriales, servicios y otros), en el río Apatlaco se descargan cerca de 83.09 Mm<sup>3</sup>/año, de las cuales 54.16 Mm<sup>3</sup>/año corresponden a descargas municipales (65.2%); 25.7 Mm<sup>3</sup>/año industriales (31%); 3.0 Mm<sup>3</sup>/año servicios (3.6%) y 0.17 Mm<sup>3</sup>/año otros (0.2%) (CONAGUA, 2010b).

La deficiencia en el tratamiento a nivel estatal es un indicador de la calidad del agua en los ríos de Morelos y el deterioro del agua seguirá mientras no se cuente con un saneamiento adecuado.

### **Resultados**

La Red Nacional de Monitoreo de Calidad del Agua de la CONAGUA, tiene establecidos 22 sitios de monitoreo, distribuidos en 3 de la red primaria, 7 red secundaria y 12 en la red de estudios especiales. En dichos sitios se determinan los parámetros de demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y los sólidos suspendidos totales, como los principales indicadores de la calidad del agua en los ríos. Los dos primeros indican la cantidad de materia orgánica (biodegradable y no biodegradable) aportada por las descargas de aguas residuales de origen municipal y no municipal, mientras que los sólidos suspendidos la cantidad de material erosionado aportado al cauce y también el proveniente de las aguas residuales.

En la Figura 42, se observan los resultados de los tres indicadores de calidad del agua para el año 2009.

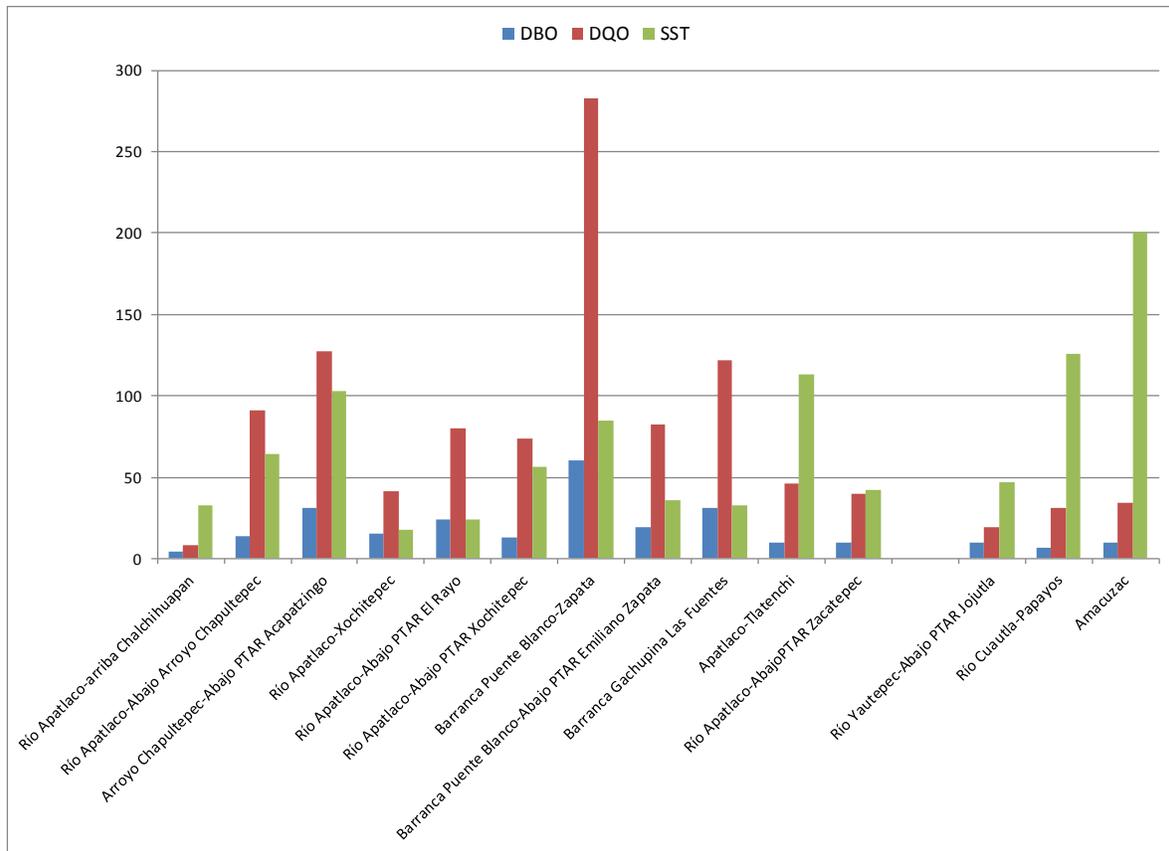


Figura 42. Resultados promedio para el año 2009, de indicadores de calidad del agua en los sitios de monitoreo en el Estado de Morelos. Concentración en mg/L.

En la Tabla 28, se presentan las concentraciones de los indicadores de calidad del agua en mg/L considerados por la CONAGUA.

Tabla 28. Indicadores de calidad del agua.

Indicadores de Calidad del Agua	DBO <sub>5</sub>	DQO	SST
<b>Excelente</b>	≤ 3	≤ 10	≤ 25
<b>Buena Calidad</b>	> 3 ≤ 6	> 10 - 20	> 25 ≤ 75
<b>Aceptable</b>	> 6 ≤ 30	> 20 ≤ 40	> 75 ≤ 150
<b>Contaminada</b>	> 30 ≤ 120	> 40 ≤ 200	> 150 ≤ 400
<b>Muy contaminada</b>	> 120	> 200	> 400

Los resultados observados en la figura 42, indican que para la DBO la calidad del agua es aceptable para todos los usos, a excepción del sitio Barranca Puente Blanco Zapata que se considera contaminada. Para la DQO, el primer sitio y los cuatro últimos son aceptables y los restantes se consideran contaminados; mientras que para los SST todos los sitios son aceptables y únicamente el sitio de Amacuzac se considera contaminado.

La CONAGUA realiza los estudios de clasificación de las corrientes y para el río Apatlaco se cuenta con información de dicho estudio y se resumen los principales resultados por la CONAGUA (CONAGUA, 2010c).

La longitud del río es de 58.20 km y se dividió en 7 tramos o zonas para su análisis desde la parte alta hasta la confluencia con el río Yautepec (Figura 43).

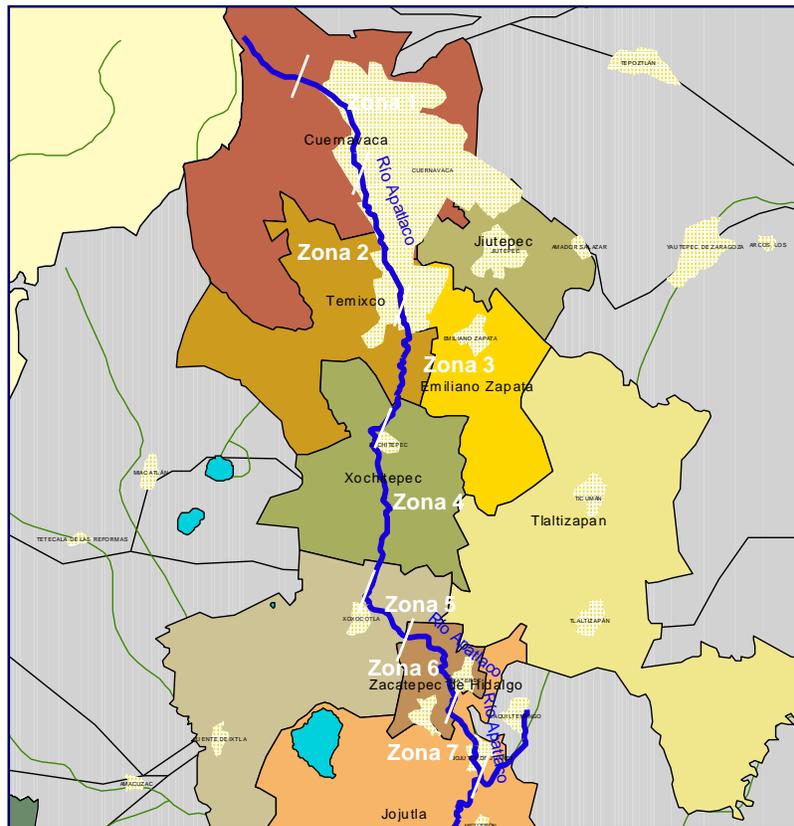


Figura 43. Zonas de estudio del río Apatlaco (CONAGUA, 2010).

La concentración de demanda bioquímica de oxígeno en el río se presenta en la Figura 44.

Estrategia para la aplicación de la norma de caudal ambiental hacia un enfoque adaptativo al cambio climático así como implementar la NMX-AA-159-SCFI-2012 para su difusión en el área focal de Eco-hidrología

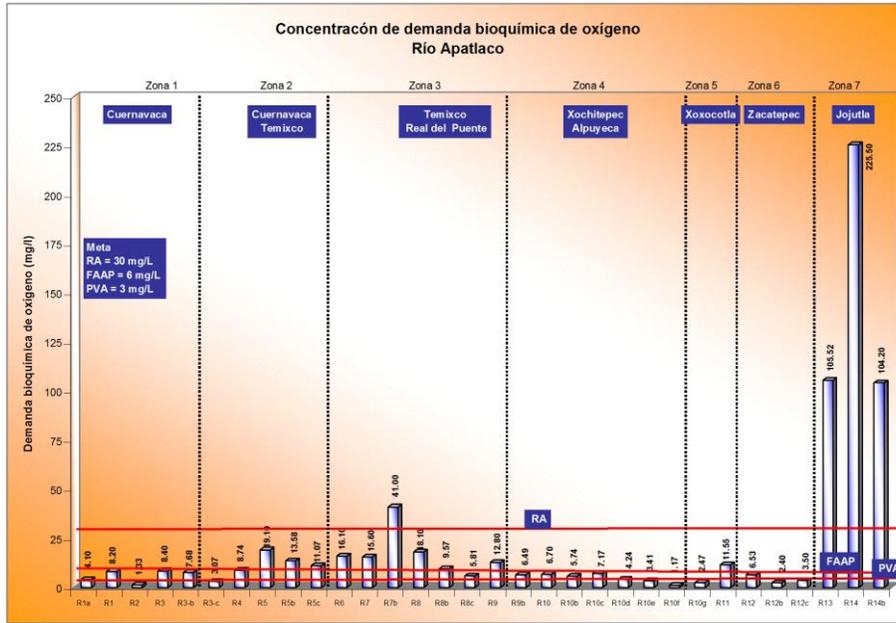


Figura 44. Demanda bioquímica de Oxígeno.

De las 7 zonas en que se dividió al río, la zona 7 es la que se encuentra con la mayor concentración, sobrepasando los criterios de riego agrícola (RA), fuente de abastecimiento para agua potable (FAAP) y protección de vida acuática (PVA) ubicados en Jojutla.

La carga de DBO (kg/día) por giro industrial que más aporta al río es la industria azucarera, seguida de las descargas municipales (Figura 45).

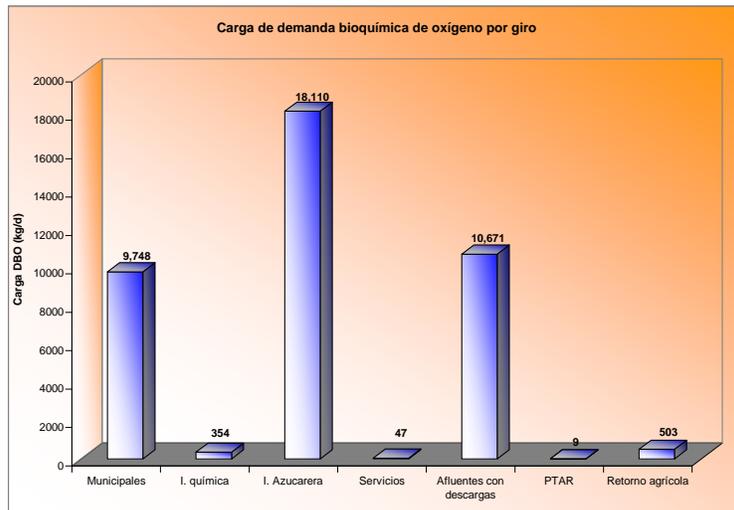


Figura 45. Carga de DBO por giro industrial

Con el estudio que realizó la CONAGUA, se identificaron los principales generadores de la contaminación y las zonas en donde la carga contaminante disminuye la capacidad de

depuración del río y en donde es necesario realizar las acciones de saneamiento urgentes para controlar la contaminación.

El río Apatlaco por ser el cauce que atraviesa las ciudades con mayor población y actividades industriales, además de contar con información más detallada se realizó un monitoreo en 2013, para conocer la calidad del agua en los sitios de la Red Nacional de Monitoreo que tiene establecida la CONAGUA y que se presentan a continuación.

El muestreo del río Apatlaco, en cantidad y calidad del agua incluyó nueve sitios de monitoreo en el cauce principal y un afluente del río (Arroyo Chapultepec). El caudal del río se presentó en un intervalo de 0.6 hasta 1.8 m<sup>3</sup>/s ubicados el primero en el inicio del río y el segundo aguas debajo de la descarga de la PTAR de Xochitepec (Figura 46).

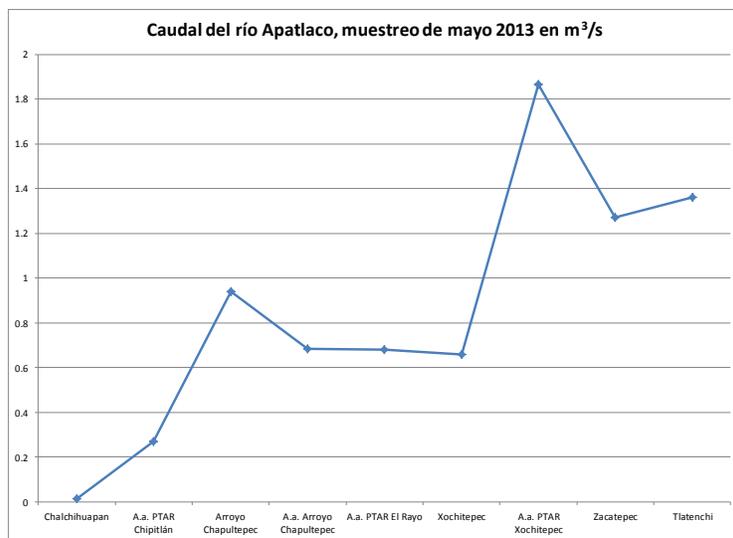


Figura 46. Caudal del río Apatlaco.

El oxígeno disuelto osciló de 0.83 mg/L hasta 4.86 mg/L, mientras que la conductividad presentó concentraciones de 98 microS/cm hasta 1240 microS/cm. El sitio de Tlatenchi fue el de menor concentración de oxígeno y mayor conductividad, lo que denota que el río no tiene la capacidad para degradar la materia orgánica aportada por las descargas de aguas residuales que son incorporadas al cauce y que coincide con la zona 7 del estudio de clasificación ubicado en Jojutla (Figura 47).

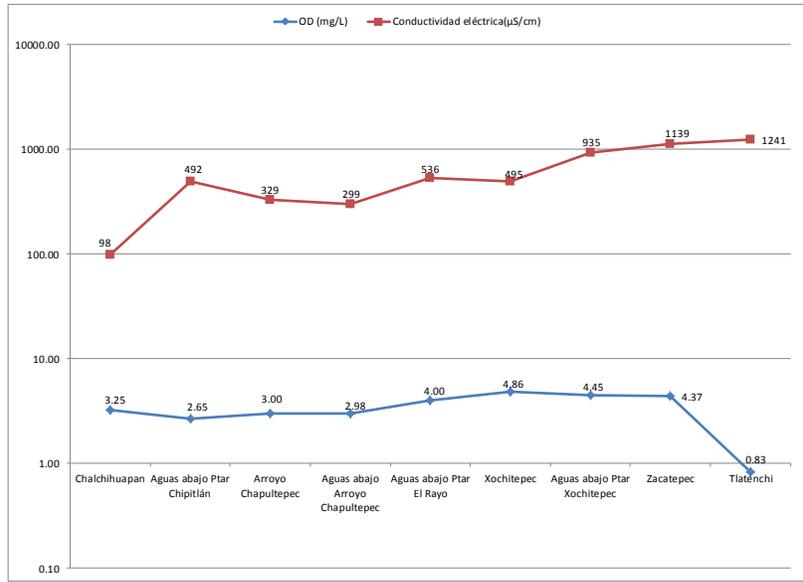


Figura 47. Concentración de oxígeno disuelto y conductividad en el río.

En todos los sitios de muestreo no se cumple con el criterio para uso en protección de vida acuática para el oxígeno disuelto que es de 5 mg/L (CE-CCA-001/89).

Los resultados de calidad del agua del río Apatlaco obtenidos en el muestreo, indican que en el sitio denominado Aguas abajo de la planta de tratamiento de Chipitlán es en donde se determinaron las concentraciones más altas de nutrientes, como fósforo y nitrógeno (3.25 y 8.33 mg/L respectivamente), lo que sugiere que la planta de tratamiento probablemente aporte los nutrientes al río.

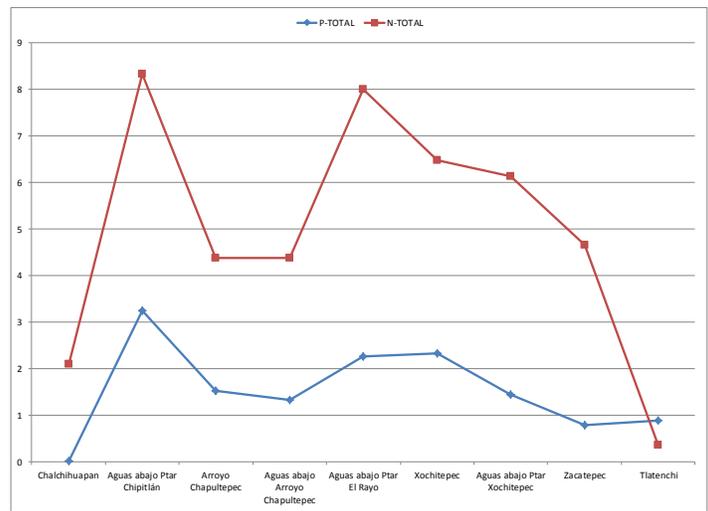


Figura 48. Concentración de nutrientes en el río.

En lo que respecta a los sólidos suspendidos totales, el arroyo Chapultepec es el que aporta la mayor concentración, con 410 mg/L y se ve reflejado el aporte en el sitio aguas abajo del arroyo con una concentración de 44.7 mg/L (Figura 49).

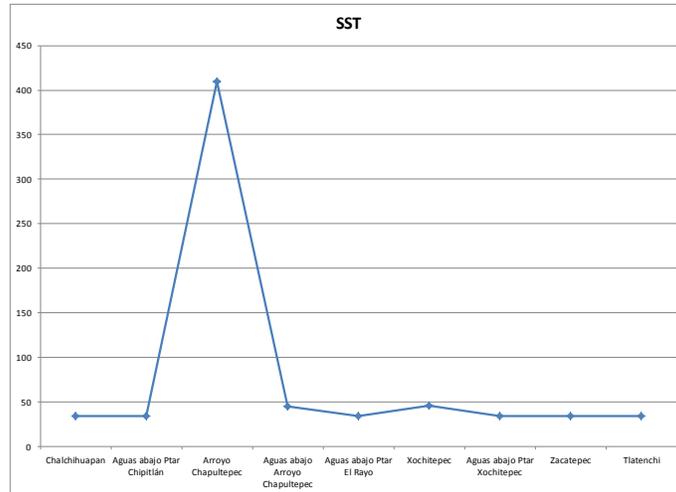


Figura 49. Concentración de sólidos suspendidos totales en el río.

En cuanto al aspecto bacteriológico el sitio de Zacatepec fue en donde se determinó la mayor concentración de coliformes fecales con 930 000 NMP/100 mL, mientras que en el sitio de Chalchihuapan fue el de menor concentración con 4 NMP/100 mL y el único que cumplió con el criterio de menos de 200 NMP/100 mL para protección a la vida acuática.

El análisis de toxicidad con *Vibrio fischeri* y *Daphnia magna* en todas los sitios de muestreo resultaron sin detección de toxicidad. El arroyo Chapultepec es el que aporta mayor concentración de DQO con 53.7 mg/L, por lo que, de acuerdo a los indicadores de calidad del agua de la CONAGUA se considera un sitio contaminado por materia orgánica no biodegradable, ya que se encuentra entre el intervalo de > 40 y menor o igual a 200 mg/L, mientras que las concentraciones de DBO estuvieron por debajo de 30 mg/L, por lo que, se considera que la calidad del agua es aceptable (Figura 50).

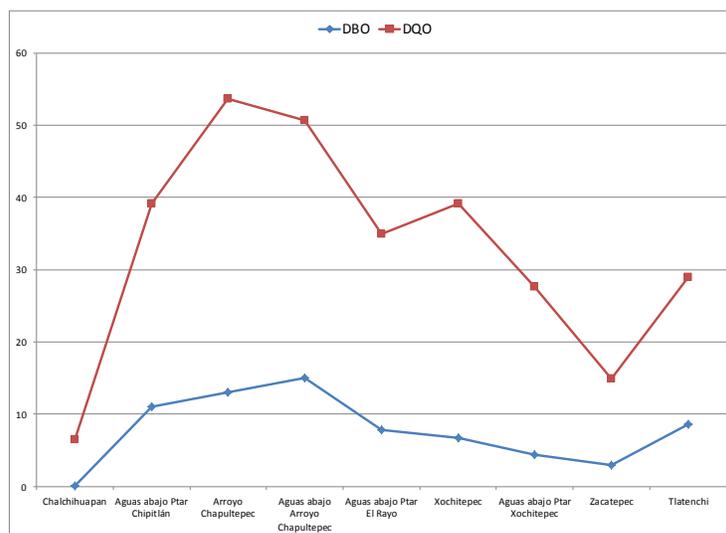


Figura 50. Concentración de DBO y DQO en el río.

El potencial de óxido reducción es de especial interés en los cauces naturales exentos de aportes contaminantes y es definido por presentar resultados positivos. En el caso del río Apatlaco, los resultados obtenidos indicaron que a partir del sitio desde Xochitepec hasta Tlatenchi se incrementó el potencial de óxido reducción con valores negativos en un intervalo de - 9.13 hasta - 139 mVolts, lo que denota el incremento en aportes de aguas residuales al cauce principal, observándose que el sitio de aguas abajo de la Planta de tratamiento de Xochitepec se incrementó hasta - 59.5 mVolts.

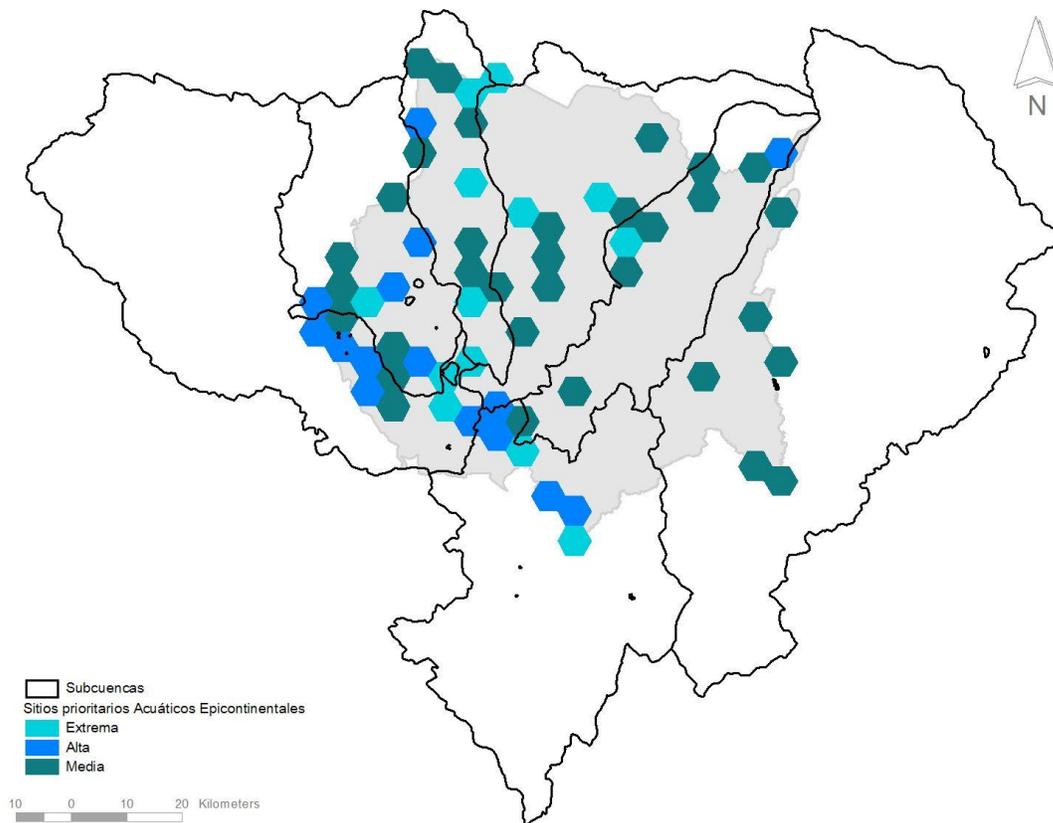
El ecosistema acuático requiere de calidad y cantidad de agua suficiente y adecuada para realizar las funciones y servicios ambientales que presta a la población, por lo que es necesario considerar a los ecosistemas como un usuario más del agua y destinarle la calidad y cantidad de agua necesaria para que a través del manejo adaptativo se tomen decisiones sobre el uso del recurso. En la subcuenca del río Apatlaco, tanto la calidad como la cantidad de agua han disminuido por los usos actuales y por la falta de saneamiento adecuado, ya que en su recorrido por las ciudades que atraviesa se vierten aguas residuales que impacta su capacidad de asimilación y dañan su integridad ecológica.

Por lo que, resulta relevante que la aplicación del caudal ecológico a través de la norma conjuntamente con los aspectos de calidad del agua, disponibilidad y saneamiento, son factores claves para el manejo del recurso hídrico en las cuencas hidrológicas.

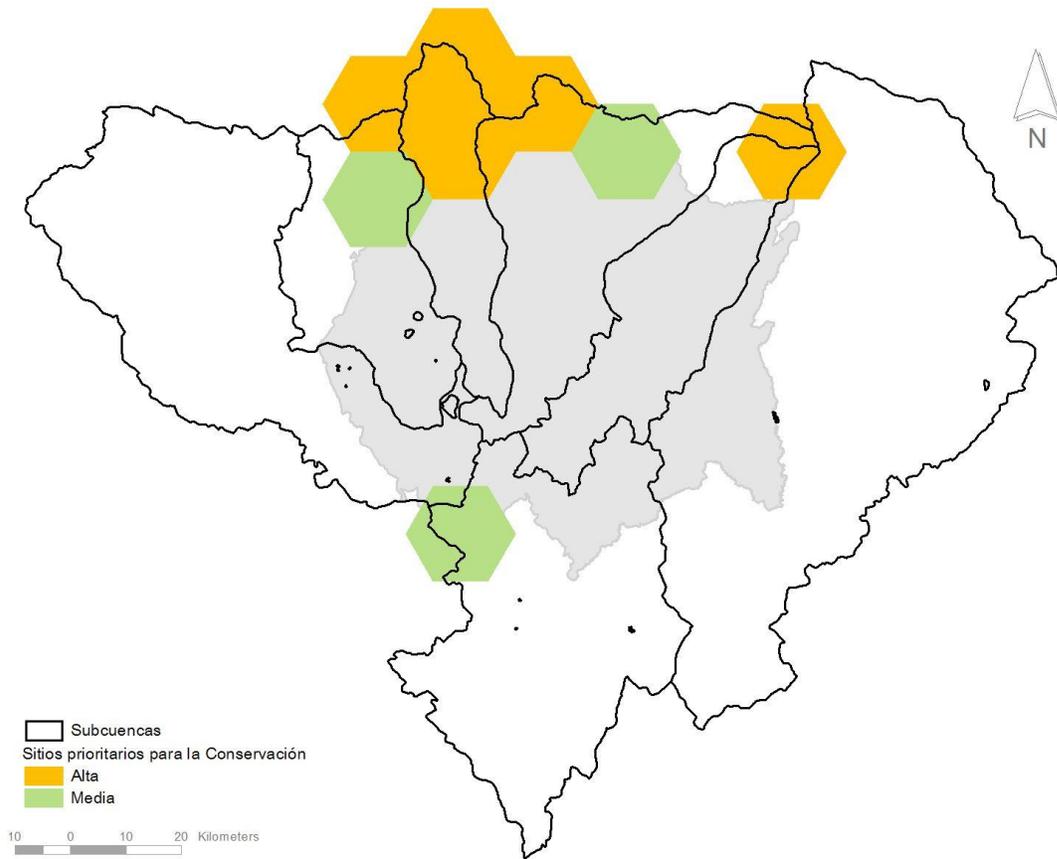
### SITIOS PRIORITARIOS PARA LA CONSERVACIÓN

Se realizó el análisis de los sitios prioritarios para la conservación de la CONABIO, tanto para los ecosistemas terrestres como acuáticos epicontinentales. Para el terrestre se considera que la parte alta de la subcuenca del Apatlaco tiene registros de sitios con una conservación media, mientras que para el sistema acuático existen registros de sitios con un estatus de conservación entre media y alta.

Se identificaron los sitios prioritarios para la conservación, tanto acuáticos epicontinentales como terrestres, las figuras 51 y 52 a continuación, muestran la incidencia de estos sitios en el estado de Morelos.



**Figura 51. Sitios prioritarios Acuáticos Epicontinentales**

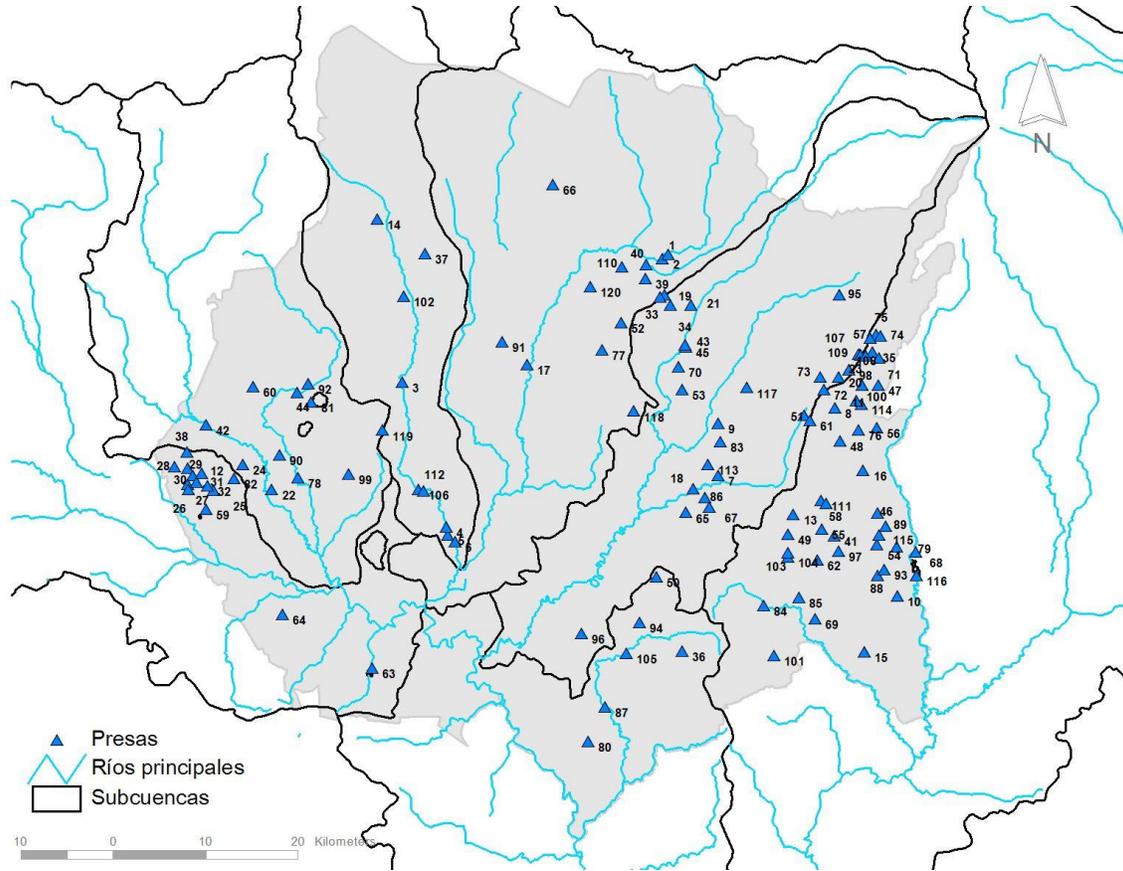


**Figura 52. Sitios prioritarios Terrestres.**

**INDICADORES ECOHIDROLÓGICOS EN EL MARCO PER (PRESIÓN – ESTADO – RESPUESTA)**

**Presas**

El estado de morelos cuenta con una infraestructura hidráulica de 120 presas, clasificadas por sus usos que van desde: Generación eléctrica, Riego, Agua potable, Abrevadero Acuacultura, Pesca y Otros Usos. De manera general, en la Figura 53 y tabla 29, se presenta la localización de estas presas en el estado y una tabla con sus coordenadas geográficas respectivamente.



**Figura 53. Localización de las presas en el estado.**

**Tabla 29. Infraestructura hidráulica en el estado.**

<b>Id</b>	<b>Nombre</b>	<b>Coordenadas</b>	<b>Id</b>	<b>Nombre</b>	<b>Coordenadas</b>
1	1ª Toma Río Yautepec	-98.9608194444,18.9026694444	9	Amate Amarillo	-98.9137888889,18.7362527778
2	2ª Toma Río Yautepec	-98.9668222222,18.8985111111	10	Amatzinac	-98.7332833333,18.5634194444
3	4a Toma Río Apatlaco	-99.2368055556,18.7826111111	11	Amilcingo	-98.7712500000,18.7553611111
4	7a Toma Río Apatlaco	-99.1945555556,18.6407222222	12	Ancha	-99.4441388889,18.6973888889
5	8a Toma Río Apatlaco	-99.1931277778,18.6328888889	13	Atotonilco	-98.8382222222,18.6455000000
6	9a Toma Río Apatlaco	-99.1861111111,18.6260277778	14	Atzingo	-99.2595388889,18.9432250000
7	Adolfo Ruiz Cortines	-98.9146944444,18.6852500000	15	Axochiapan	-98.7690138889,18.5098166667
8	Aguiluz	-98.7931388889,18.7489444444	16	Ayotzin	-98.7656388889,18.6876111111

Estrategia para la aplicación de la norma de caudal ambiental hacia un enfoque adaptativo al cambio climático así como implementar la NMX-AA-159-SCFI-2012 para su difusión en el área focal de Eco-hidrología

<b>Id</b>	<b>Nombre</b>	<b>Coordenadas</b>	<b>Id</b>	<b>Nombre</b>	<b>Coordenadas</b>
17	B El Jagüey	-99.1084722222,18.7980000000	71	Jagüey Chicomucelo	-98.7467222222,18.7968055556
18	B Progreso	-98.9401111111,18.6732222222	72	Jagüey El Pedregal	-98.8039444444,18.7672777778
19	B Xochimicaltzingo	-98.9656861111,18.8635305556	73	Jagüey El Potrero	-98.8072944444,18.7792305556
20	B. Cbta N°39 Temoac	-98.7888388889,18.7787611111	74	Jagüey La Colonia	-98.7446388889,18.8180277778
21	Barcnas	-98.9388888889,18.8527777778	75	Jagüey La Secundaria	-98.7489055556,18.8201833333
22	Barrancas De Aguas	-99.3727777778,18.6802777778	76	Jantetelco	-98.7693055556,18.7270000000
23	Barreto	-98.7600888889,18.7991416667	77	Joya De Los Pájaros	-99.0308611111,18.8103333333
24	Bordo Milpillas	-99.4021444444,18.7050861111	78	La Cuahuiloteria	-99.3458333333,18.6916666667
25	Bordo N° 10	-99.4323694444,18.6804555556	79	La Esperanza	-98.7333638889,18.6115444444
26	Bordo N°. 4	-99.4591666667,18.6869444444	80	La Gallina	-99.0533000000,18.4280472222
27	Bordo N°. 5	-99.4583333333,18.6819444444	81	La Laguna	-99.3310833333,18.7649444444
28	Bordo N°.1	-99.4719777778,18.7044777778	82	La Moneda	-99.4111111111,18.6916666667
29	Bordo No.2	-99.4586500000,18.7024805556	83	La Palapa	-98.9119166667,18.7185833333
30	Bordo No.3	-99.4537638889,18.6954194444	84	La Poza	-98.8706166667,18.5570916667
31	Bordo No.6	-99.4495722222,18.6887611111	85	La Sábila	-98.8347777778,18.5642500000
32	Bordo No.7	-99.4389166667,18.6850666667	86	Las Teclas	-98.9286388889,18.6641944444
33	Calderon	-98.9705555556,18.8608333333	87	Lorenzo Vázquez	-99.0356944444,18.4615000000
34	Casasano	-98.9597222222,18.8533333333	88	Los Cerritos	-98.7536111111,18.5844444444
35	Cerro De La Era	-98.7533333333,18.8024444444	89	Los Lavaderos	-98.7435833333,18.6318055556
36	Cerro Prieto	-98.9556388889,18.5146388889	90	Los Orihuela	-99.3638888889,18.7138888889
37	Chapultepec	-99.2111666667,18.9084750000	91	Los Pájaros	-99.1333333333,18.8208333333
38	Chavarría	-99.4592222222,18.7188055556	92	Los Perritos	-99.3333333333,18.7833333333
39	Cocoyoc 2	-98.9846388889,18.8791944444	93	Los Tepetates	-98.7465277778,18.5898888889
40	Cocoyoc I	-98.9836972222,18.8929055556	94	Mariano Matamoros	-98.9982777778,18.5434166667
41	Coyotomate	-98.7970833333,18.6238888889	95	Ocuituco	-98.7861111111,18.8594444444
42	Der Apantle Grande	-99.4389722222,18.7450833333	96	Pablo Torres Burgos	-99.0578333333,18.5338055556
43	Der La Colmena	-98.9456250000,18.8142055556	97	Palo Prieto	-98.7924166667,18.6090277778
44	Der La Toma	-99.3452222222,18.7747750000	98	Piedra Silleta	-98.7778333333,18.7857777778
45	Der. Agua Hedionda	-98.9447305556,18.8119027778	99	Plan De Ayala	-99.2934166667,18.6939444444
46	El Abrevadero	-98.7516388889,18.6449166667	100	Popotlán	-98.7644305556,18.7709083333
47	El Amate Amarillo	-98.7480611111,18.7702222222	101	Poza Honda	-98.8611111111,18.5083333333
48	El Arco	-98.7886388889,18.7168055556	102	Primera I	-99.2333333333,18.8666666667
49	El Arrozal	-98.8444555556,18.6264111111	103	Pronase	-98.8447138889,18.6081194444
50	El Atascadero	-98.9797750000,18.5877750000	104	Pronase 2	-98.8451111111,18.6041388889
51	El Ciruelo	-98.8251388889,18.7426666667	105	Quilamula	-99.0127500000,18.5137222222
52	El Embocadero	-99.0110805556,18.8367805556	106	Quinta Toma Apatlaco	-99.2226111111,18.6780000000
53	El Gigante	-98.9497222222,18.7702777778	107	San Andrés	-98.7652277778,18.7998972222
54	El Panteón	-98.7536944444,18.6145000000	108	San Andrés II	-98.7666777778,18.8005027778
55	El Pastor	-98.8096944444,18.6306944444	109	San Andrés III	-98.7677916667,18.8011777778
56	El Pochote	-98.7505000000,18.7289222222	110	San Carlos	-99.0085555556,18.8913611111
57	El Sitio	-98.7551388889,18.8165833333	111	Santa Cruz	-98.8099722222,18.6588333333
58	El Tecolote	-98.8045250000,18.6557888889	112	Sexta Toma Apatlaco	-99.2170000000,18.6758638889
59	El Tilcuate	-99.4404166667,18.6619722222	113	Simón Cárdenas	-98.9246666667,18.6966111111
60	El Tizate	-99.3900000000,18.7813888889	114	Socavones	-98.7660694444,18.7522000000
61	El Venado	-98.8188638889,18.7371361111	115	Tenango	-98.7507000000,18.6233861111
62	El Zacate	-98.8144444444,18.6005555556	116	Tierra Y Libertad	-98.7133888889,18.5836111111
63	Emiliano Zapata	-99.2736916667,18.5039361111	117	Tlayecac	-98.8832166667,18.7706000000
64	Felipe Ruiz De Velasco	-99.3643972222,18.5581138889	118	Tomases	-99.0000000000,18.7500000000
65	General Fco Leyva	-98.9487500000,18.6497777778	119	Xoxocotla	-99.2579916667,18.7362166667
66	Huilcoya	-99.0783055556,18.9730555556	120	Yautepec	-99.0419972222,18.8729055556
67	Huitchila	-98.9242500000,18.6548055556			
68	Ing. Manuel Pastor	-98.7138333333,18.6060833333			
69	Ixtlilco El Grande	-98.8184166667,18.5435000000			
70	Jagüey Apatlaco	-98.9527777778,18.7922222222			

De acuerdo con la NMX de Caudal ecológico, al sitio de estudio le corresponde un objetivo ambiental C, cuya clasificación se obtiene al combinar una importancia ecológica muy alta y una presión de uso muy alta (Figura 54 y 55).

<b>Importancia Ecológica</b>	Muy alta	A	A	B	C
	Alta	A	B	C	D
	Media	B	C	C	D
	Baja	B	C	D	D
<b>Presión de uso (% de asignación)</b>		Baja	Media	Alta	Muy alta
		≤10%	≥ 11%	≥ 40%	≥ 80%

Figura 54. Objetivos ambientales, a partir de Importancia Ecológica y Presión de Uso



Figura 55. Presión de Uso (SEMARNAT, 2010)

## PROGRAMA HÍDRICO ESTATAL. (CONAGUA, 2010a)

### Líneas generales

El Programa Hídrico Estatal 2030 (PHEM2030), orienta los esfuerzos haciendo énfasis en la protección y preservación del medio ambiente y de los ecosistemas ligados al recurso hídrico, en el uso, aprovechamiento y explotación de sus recursos naturales, que permita

la gobernabilidad efectiva y acceso a los recursos, ofreciendo también, protección contra los fenómenos naturales extremos para los próximos años proyectados hasta el 2030.

El programa se formuló con la participación de los principales grupos interesados en resolver los problemas que frenan el desarrollo del estado en materia de agua y sus recursos naturales asociados.

El PHEM2030 un instrumento de gestión que define el rumbo a seguir para los próximos treinta años por el estado de Morelos en materia hídrica, y de acuerdo con la política nacional. De ahí que se constituya en un documento rector que oriente el quehacer institucional en los niveles nacional, de organismo de cuenca, estatal y municipal.

### **Balance de las cuencas**

En el estado de Morelos, la temporada de lluvias durante el año se presenta entre los meses de junio y septiembre. La precipitación media anual en el estado varía entre 800 mm en las zonas bajas y 1,500 mm en las más altas (SDUOP Morelos, 2007).

Morelos se localiza en el Alto Balsas, la mayor parte en la cuenca del río Amacuzac y el resto, en la cuenca del río Nexapa. Ambas corrientes descargan sus aguas al río Balsas.

En el estado, a partir de las grutas de Cacahuamilpa entre los límites de Morelos con Guerrero, el río Amacuzac corre en una dirección este-sureste hasta la confluencia con el río Cuautla, a unos 62 km de las grutas, recibiendo en este tramo las aportaciones de los ríos Chalma-Tembembe, Apatlaco y Yautepec. Después de la confluencia con el río Cuautla, el río cambia la dirección de su curso para dirigirse hacia el sur, recorriendo otros 104 km antes de confluir con el río Balsas.

Considerando una precipitación media anual en el estado de 980 mm, se estima un volumen de 4,842 hm<sup>3</sup>. De dicho volumen se pierden por evaporación alrededor del 62%, es decir, 2,992 hm<sup>3</sup>; de los 1,850 hm<sup>3</sup> restantes se estima que 1,136 hm<sup>3</sup> se infiltran (23%), quedando sólo 712 hm<sup>3</sup> de escurrimiento superficial, lo que representa un 15% del volumen total de precipitación.

Del volumen infiltrado se estima que sólo 406 hm<sup>3</sup> servirán para la recarga de acuíferos, lo que representa un 8% del volumen total, y 730 hm<sup>3</sup> se podrán aprovechar a través de manantiales.

Por su parte la cuenca del río Nexapa se ubica en el territorio de los estados de Morelos y Puebla. Se origina de las faldas del volcán Popocatepetl y drena de norte a sur. Las principales corrientes superficiales localizadas en la cuenca del río Nexapa, en Morelos, son los ríos Tepalcingo, Grande o San Francisco y la barranca de Amatzinac.

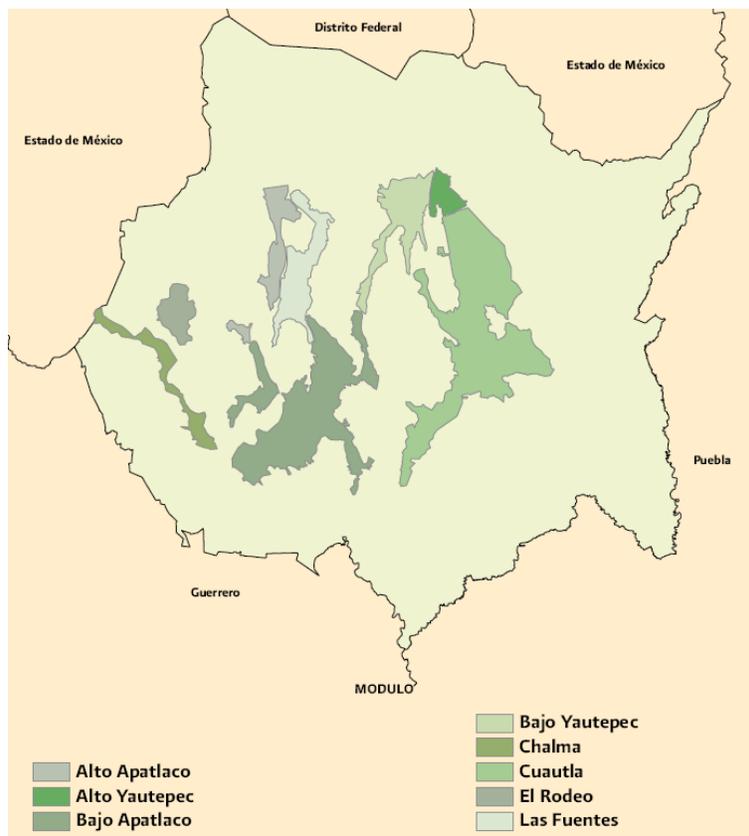
Sin embargo, una limitante para la disponibilidad de agua superficial, es la vigencia de tres decretos de veda, por lo que actualmente la disponibilidad de agua superficial en el estado se considera nula.

**Tabla 30. Balance de aguas superficiales en el Estado de Morelos (CONAGUA, 2010a)**

Volúmenes Medios anuales (hm <sup>3</sup> )			
Precipitación	Evaporación	Infiltración	Escurrimiento superficial
4,842	2,996	1,136	712
100%	62%	23%	15%

### Usos

Acorde con su potencial agrícola, Morelos tiene como principales usuarios del agua superficial a los agricultores agrupados en el distrito de riego 016 Estado de Morelos (Figura 56) y en las unidades de riego para el desarrollo rural (URDERALES). El distrito, con una superficie de 33,654 ha y 18,530 usuarios, utiliza un volumen de agua anual aproximado de 772 hm<sup>3</sup>, y sus cultivos principales son caña de azúcar, arroz, maíz, cebolla, tomate, jícama, pepino, calabacita y ornamentales.



**Figura 56. Distrito de Riego 016 (CONAGUA, 2010a)**

Las URDERALES, concentradas la mayor parte en las zonas noreste y sureste de la entidad, constan de 207 unidades pertenecientes a 11,262 usuarios que poseen una superficie total de 22,856 ha y en las que se utiliza un volumen anual aproximado de 283 hm<sup>3</sup>, donde se cultivan de manera importante: ornamentales, durazno, aguacate, jitomate, cebolla, entre otros.

Existen actualmente doce presas de almacenamiento importantes en el estado que son utilizadas en su totalidad para riego y en conjunto suman un total de 59.92 hm<sup>3</sup>, estas presas durante el estiaje se vacían casi completamente, quedándoles un volumen entre el 20 y 10% de su capacidad total.

Algunos otros cuerpos importantes de agua con los que cuenta Morelos son el lago de Tequesquitengo y las lagunas de Coatetelco y Zempoala que tienen principalmente un uso recreativo y una capacidad total de 155 hm<sup>3</sup>. La laguna de Coatetelco en los últimos ocho años se ha secado completamente en cinco ocasiones y Tequesquitengo en la época de estiaje tiene una disminución en sus volúmenes del orden de los 10 hm<sup>3</sup>.

Actualmente se estima que en Morelos se utiliza un volumen anual de agua superficial, proveniente de los principales ríos y manantiales del estado de alrededor de 1,022 hm<sup>3</sup>; la mayoría de estos manantiales se localizan en la porción central y septentrional del estado y sobresalen por su gran caudal los manantiales de Las Estacas, Fundición, Chapultepec y El Salto. De este volumen, el 95% se destina a la agricultura, seguida de los servicios e industria con el 3% y el uso público urbano en una proporción menor que equivale al 2% del total (Figura 57 y Tabla 31).

En lo que respecta al uso industrial, el consumo corresponde principalmente a los ingenios azucareros, las caleras y a la industria textil; sin embargo, de manera independiente solamente representa el 0.4% del agua superficial utilizada en el estado.

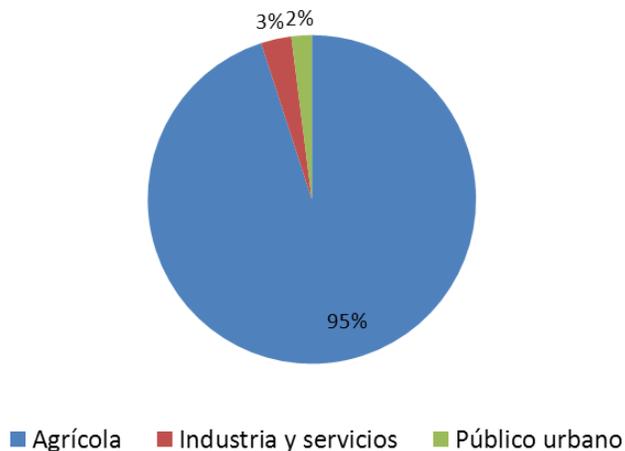


Figura 57. Usos del agua superficial del estado de Morelos.

Por otro lado, el estado cuenta con una importante reserva de agua subterránea que permite abastecer de agua potable a su población. Existen cuatro zonas acuíferas: Cuernavaca, Cuautla-Yautepec, Zacatepec y Tepalcingo-Axochiapan (Figura 58).

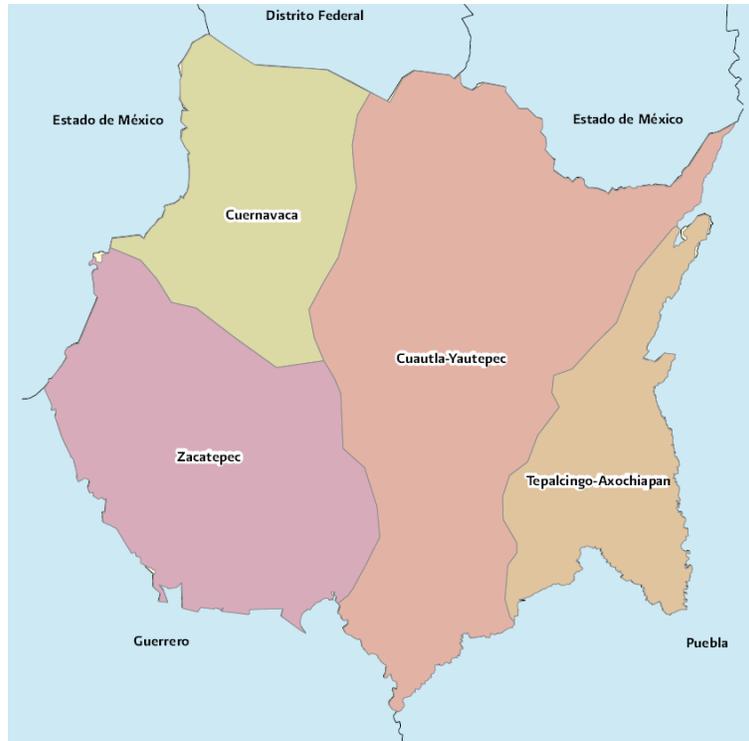


Figura 58. Acuíferos del Estado de Morelos(CONAGUA, 2010a)

De acuerdo con el último censo de población del estado, elaborado por el INEGI durante el año 2000, aproximadamente el 45% de la población se asentaba en el área que comprende el acuífero de Cuernavaca, el 28% en la de Cuautla-Yautepec, el 19% en la de Zacatepec y el 8% restante en la de Tepalcingo-Axochiapan.

En la actualidad y utilizando como referencia los valores establecidos en el decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 31 de enero de 2003, el acuífero de Cuernavaca se cataloga en equilibrio con una disponibilidad estimada de 33 hm<sup>3</sup>, los acuíferos Cuautla-Yautepec y Zacatepec se encuentran subexplotados con una disponibilidad estimada de 15 y 27 hm<sup>3</sup> respectivamente, mientras que el acuífero Tepalcingo-Axochiapan se encuentra sobreexplotado, por lo que no se pueden otorgar nuevas concesiones para su explotación.

De estos acuíferos se estima que se extrae un volumen total de 356 hm<sup>3</sup>, proveniente de 1,259 pozos profundos y 1,640 norias del estado. Los pozos profundos están distribuidos en toda la entidad pero los que sobresalen son: El Artesiano de San Gabriel de las Palmas,

el de Cuauchichinola, los de Puente de Ixtla, Zacatepec y los de Atlacahualoya, cerca de Telixtac. De las norias la de mayor importancia se localiza en la ciudad de Cuernavaca.

En este caso el mayor usuario es el uso público urbano con un 67%, seguido de la agricultura con un 23%, el uso industrial con un 7% y, en menor grado, los servicios y algunos usos catalogados como múltiples, con un 2 y un 1%, respectivamente (Figura 59 y Tabla 31).

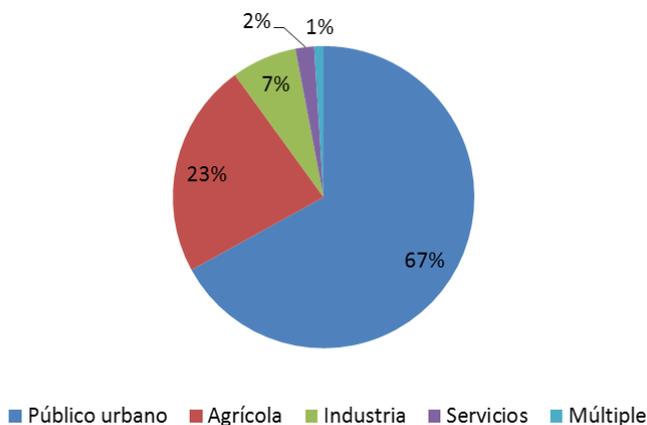


Figura 59. Usos de agua subterránea del estado de Morelos

Tabla 31. Uso de aguas superficiales y subterráneas en el estado de Morelos

Tipo	Unidad	Volúmenes Anuales				Total
		Agrícola	Público urbano	Industrial y Servicios	Múltiples	
Superficial	hm <sup>3</sup>	970	23	29	0	1022
	%	95	2	3	0	100
Subterránea	hm <sup>3</sup>	82	239	32	4	357
	%	23	67	9	1	100
Total	hm <sup>3</sup>	1052	262	61	4	1379
	%	76	20	4	0	100

De acuerdo a la CONAGUA, 2011, cuando en una cuenca hidrológica el porcentaje que representa el agua empleada en usos consuntivos respecto a la disponibilidad es mayor al 40% se ejerce una fuerte presión sobre el recurso y es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico en cuenca o región. En el caso del Estado de Morelos que pertenece a la región hidrológica de la cuenca del río Balsas, se tiene una fuerte presión de uso, debido a que se tiene un 49.38%.

Por lo anterior, la zona padece estrés hídrico. Esto puede suceder estacionalmente, por las variaciones en los flujos durante cada temporada. De esta manera, pueden identificarse hot spots, sitios críticos en los que es necesario restringir el uso de agua durante los meses que se rebasa el límite (AgroDer, 2012).

## **CAMBIO CLIMÁTICO Y ADAPTACIÓN**

La vulnerabilidad se define como el grado de susceptibilidad y la incapacidad de un sistema a enfrentarse a los efectos adversos del cambio climático. La vulnerabilidad de un sistema se deriva de su alta sensibilidad o de su baja capacidad de adaptación (IPCC, 2001).

Los sistemas ecológicos, sociales y económicos son vulnerables y los más vulnerables son los más sensibles y los menos capaces de adaptarse. De esta forma la sensibilidad se define como el grado en el que se está afectando un sistema. La adaptabilidad se define como la capacidad de los sistemas a ajustes como respuestas a los cambios.

Así el (IPCC, 2001) define al vulnerabilidad como el grado en el que un sistema es susceptible a los impactos negativos del cambio climático, incluyendo la incapacidad del sistema para adaptarse a dichos impactos.

La adaptación tiene dos ejes: 1) adaptación autónoma: respuesta inconsciente para ajustar a las nuevas condiciones, ejemplo de un bosque; y 2) adaptación planeada: estrategias planeadas para adaptarse. Con lo que finalmente se tiene:

Vulnerabilidad = Sensibilidad - Adaptación autónoma - Adaptación planeada

Estrategias generales de adaptación

1. Admitir los costos.- Aceptar si los costos son bajos y los riesgos conocidos.
2. Compartir las pérdidas y/o compensar
3. Prevenir los impactos .- asociación de cultivos, construcción de diques en las zonas costeras
4. Buscar alternativas.- cambiar las actividades agrícolas en una cuenca vulnerable a la erosión y los crecientes
5. Cambiar la localización.- desplazar edificaciones.
6. Investigar, educar, sensibilizar.

Se pueden desarrollar o sub escalar escenarios de modelación climática para estimar el riesgo o la vulnerabilidad (IPCC) de los ecosistemas acuáticos y su aprovechamiento, construyendo mapas de riesgo para diseñar las estrategias de adaptación y gestión para el manejo de las cuencas hidrográficas. El fin último “la implementación de las estrategias de adaptación” serán parte de la política-institucional, local, nacional y regional.

## CONCLUSIONES

El ecosistema acuático requiere de calidad y cantidad de agua suficiente y adecuada para realizar las funciones y servicios ambientales que presta a la población, por lo que es necesario considerar a los ecosistemas como un usuario más del agua y destinarle la calidad y cantidad de agua necesaria para que, a través del manejo adaptativo, se tomen decisiones sobre el uso del recurso.

Se reconoce que el papel que desempeñan los cuerpos de agua en la conservación de los ecosistemas y su biodiversidad es de importancia para el mantenimiento, no solo de la población humana, sino también de la salud del ecosistema acuático. Por lo que, es necesario que los cuerpos de agua fluviales mantengan un caudal de agua que considere su variabilidad natural, además de su calidad. Por lo anterior, en la Ley de Aguas Nacionales el uso ambiental o uso para conservación ecológica, está plasmado en su artículo 15 fracción X, y la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 es un procedimiento para determinar el caudal ecológico en cuencas hidrológicas.

La aplicación de la norma en los principales ríos de Morelos, utilizando los datos hidrométricos, identificó que en algunos meses se tiene que el caudal ecológico es igual al promedio mensual, por lo que es necesario un manejo del recurso para no comprometer la disponibilidad del agua. En el río Apatlaco (EH Zacatepec), para los meses de julio y agosto; en el río Yautepec (EH Ticumán), río Cautla (EH La Cuera) y río Tembembe (EH Tetlama) para los meses de enero a mayo, y para el río Amacuzac (EH Amacuzac) en el mes de abril.

Para el río Amacuzac en la EH Xicatlacotla, en el río Apatlaco en la EH Temixco y en el río Yautepec EH Yautepec, el caudal ecológico no compromete la disponibilidad del recurso.

Con el establecimiento del caudal ecológico se podrá establecer la conectividad longitudinal y transversal de los cauces, lo cual redundará en el transporte de nutrientes, sedimentos, migración de especies y material genético que garantice la conservación de la biodiversidad de los ecosistemas fluviales. Por lo que, es necesario contar con calidad y cantidad de agua para seguir manteniendo los servicios ambientales.

En la subcuenca del río Apatlaco, tanto la calidad como la cantidad de agua han disminuido por los usos actuales y por la falta de saneamiento adecuado, ya que en su recorrido por las ciudades que atraviesa, se vierten aguas residuales que impactan su capacidad de asimilación y dañan su integridad ecológica.

Por lo que, resulta relevante que la aplicación del caudal ecológico a través de la norma, conjuntamente con los aspectos de calidad del agua, disponibilidad y saneamiento, son factores claves para el manejo del recurso hídrico en las cuencas hidrológicas.

Existen sitios prioritarios por su biodiversidad en los ríos de Morelos que es necesario conservar como se presentan en la figura 51, además de realizar más estudios en los ríos de Morelos.

El objetivo ambiental para la determinación del caudal ecológico por el método de Tennant modificado es C, lo que implica que el porcentaje de referencia del escurrimiento medio anual en estiaje es de 15 y en avenidas es del 30%. Así tenemos que para el río Apatlaco en su parte alta el caudal ecológico varía de 0.36 hasta 1.63 m<sup>3</sup>/s cubriendo las épocas de estiaje y avenidas; en la parte baja (Zacatepec) el caudal varía de 0.86 hasta 3.10 m<sup>3</sup>/s. En el río Yautepec parte alta de 0.19 hasta 0.45 m<sup>3</sup>/s, en su parte baja oscila de 0.07 hasta 0.40 m<sup>3</sup>/s. En el río Cuautla de 0.02 hasta 0.08 m<sup>3</sup>/s. En el río Amacuzac en la parte baja en donde ya confluyeron los ríos de 2.40 hasta 18.59 m<sup>3</sup>/s. La alteración que se evaluó a la salida de cada subcuenca analizando y comparando los datos del régimen hidrológico natural (RHN) y el régimen hidrológico alterado (RHA) se obtuvo que, para la parte baja del río Apatlaco, se encuentra alterado debido a que se presentaron meses a lo largo del periodo evaluado de 20 años, en donde el caudal medio mensual del sistema fluvial no fue cubierto. La calidad del agua en el río Apatlaco de los datos históricos y del muestreo realizado, identifica la parte baja del río como la de mayor concentración de DBO y DQO, por la falta de saneamiento y alcantarillado, lo que está ocasionando que la biodiversidad de los sistemas fluviales se vea impactada por la contaminación del agua. Se requieren acciones de manejo y control para revertir el deterioro de los ecosistemas acuáticos.

## BIBLIOGRAFÍA

- CONAGUA. (2010a). *Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Morelos*. (SEMARNAT, Ed.) (Primera Ed., p. 172). Mexico, D.F.: CONAGUA.
- CONAGUA. (2010b). *Estadísticas del agua en la cuenca del río Balsas* (Primera ed., p. 180). Mexico, D.F.: SEMARNAT.
- CONAGUA. (2010c). *Agenda del Agua 2030, Foro Estatal Morelos* (Junio 2010., p. 89). Cuernavaca, Mor.: Informe Organismos de Cuenca Balsas.
- CONAGUA, 2011. Atlas del Agua en México 2011. Editor SEMARNAT, pp. 142
- ConserveOnline. (2011). The Indicators of Hydrologic Alteration. Retrieved from <http://conserveonline.org/workspaces/iha>
- García, E. (1973). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. (I. de G. Universidad Nacional Autónoma de México, Ed.) (2nd ed., p. 246). Mexico, D.F.: UNAM.
- Gimaces, A., & Pradas, M. E. (2011). Determinación de zonas isoclimáticas y selección de estaciones meteorológicas representativas en Aragón como base para la estimación del impacto del cambio climático sobre la posible relación. *Revista Española de Salud Pública*, 85(6), 8.
- González, A., Loza, L., & Gómez, J. H. (2010). *Características climáticas generales en la zona metropolitana de Guadalajara (zmg)* (p. 6). Guadalajara.
- NMX-AA-159-SCFI-2012. Norma Mexicana. Que establece el procedimiento para la determinación del Caudal ecológico en cuencas hidrológicas". DOF 20 de septiembre de 2012. México.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Braun, D. P., & Powell, J. (1998). A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research & Management*, 14(4), 329–340.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas del Gobierno del Estado de Morelos. Programa Estatal de Desarrollo Urbano 2007-2012 (2007). Mexico.
- SEMARNAT. (2010). *Atlas Geográfico del Medio Ambiente y Recursos Naturales* (2010th ed., p. 105). Mexico, D.F.: SEMARNAT.
- TNC (The nature Conservancy). (2009). *Manual de usuario de Indicadores de alteración hidrológica, Versión 7.1. Nature*.

Estrategia para la aplicación de la norma de caudal ambiental hacia un enfoque adaptativo al cambio climático así como implementar la NMX-AA-159-SCFI-2012 para su difusión en el área focal de Eco-hidrología

WWF, 2012. Huella hídrica en México en el contexto de Norteamérica. WWF México (Fondo Mundial para la Conservación), AgroDer y SabMiller. México DF.