

Impacto del Cambio Climático en la Calidad del Agua en México

TC-0872.4

Informe final

COORDINACIÓN DE TRATAMIENTO Y CALIDAD DEL AGUA
SUBCOORDINACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA

JEFE DE PROYECTO:

I.Q. Antonio Javier García López

COLABORADORES:

M. en C. Norma Ramírez Salinas

M.C. Camilo Vázquez Bustos

Dra. Ma. Teresa Leal Ascencio

México, 2011

RESUMEN EJECUTIVO

Este informe presenta un análisis de los posibles impactos que el cambio climático puede inducir a la calidad del agua en México, con base en la bibliografía nacional e internacional hasta el momento reportada sobre el tema. Se estudian algunos aspectos de calidad del agua que pueden ser modificados por consecuencia del cambio climático, tales como: incremento en la temperatura del agua, disminución de la solubilidad del oxígeno, cambios en los procesos de nitrificación y eutroficación, así como los problemas que enfrentaran los responsables de los sistemas operadores de agua potable.

Así también, se desarrolló una guía metodológica que sirve como herramienta para detectar impactos en la calidad del agua por efecto del cambio climático. Con el objeto de avanzar en la detección de impactos en México, la metodología se utilizó, en primera instancia, para determinar la correlación entre la temperatura del aire y temperatura del agua, y a la postre para estimar la variación de la temperatura en los cuerpos superficiales de agua para el periodo 1991-2008, tomando como base el periodo 1975-1990. El análisis se realizó con la ayuda de las bases de datos climatológica y de calidad del agua proporcionada por la CONAGUA. Los resultados muestran una relación estrecha entre la temperatura del agua y la temperatura del aire, ya que se obtienen correlaciones entre el 70 y 95%. En cinco sitios de estudio, entre ellos el lago de Chapala y la laguna de Catemaco, la temperatura promedio del agua presenta incremento para el periodo 1991-2008, con respecto al periodo base. Cuantitativamente este incremento fluctúa, en función de las características del cuerpo de agua, entre 0.7 y 1.3 °C, considerándose un valor promedio aproximado de 0.9 °C.

La guía metodológica fue mostrada y transferida a 18 estados de la república mexicana cuyos planes estatales de acción ante el cambio climático (PEACC) ya han sido iniciados, a través de un taller que tuvo lugar en las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), cuyo propósito principal es que la metodología se introduzca como parte de sus respectivos PEACC. Adicionalmente, los resultados de la investigación junto con la guía fueron presentados en una reunión de alto nivel con representantes de CONAGUA, Organismos Operadores de Agua Potable y COFEPRIS, como principales actores del sector gubernamental en el campo del agua.

Finalmente se proponen medidas de adaptación y recomendaciones de políticas públicas, con base en un marco normativo, encaminadas a establecer acciones globales que permitan atender los posibles efectos del cambio climático en la calidad del agua en México.

CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	2
INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVOS	10
ANTECEDENTES	11
1.1. <i>Calidad del Agua</i>	11
1.2. <i>Características de los cuerpos de agua</i>	13
1.3. <i>Impactos antropogénicos en la calidad del agua</i>	17
1.4. <i>Cambio climático</i>	20
1.5. <i>Evaluación del impacto del cambio climático en la calidad del agua</i>	22
1.5.1. Impacto en calidad del agua	23
1.5.2. Ecosistemas acuáticos	24
1.5.3. Disponibilidad de agua	27
1.5.4. Salud humana	29
1.5.5. Abastecimiento de agua potable	46
1.5.6. Otros impactos	52
1.6. Referencias bibliográficas	53
DETECCIÓN DE IMPACTOS EN LA CALIDAD DEL AGUA EN MÉXICO	58
2.1. <i>Obtención de registros</i>	58
2.1.1. Fuentes de información de calidad del agua	58
2.1.2. Fuentes de información climatológica	59
2.2. <i>Metodología de detección de impactos</i>	59
2.2.1. Selección de los sitios a estudio	59
2.2.2. Control de calidad de los datos	60
2.2.3. Evaluación de homogeneidad	62
2.2.4. Interpretación de patrones de comportamiento de las series de tiempo	64
2.2.5. Estimación de la variación	69
2.3. Referencias bibliográficas	70
3.1. <i>Selección de sitios de estudio</i>	71
3.2. <i>Control de calidad de los metadatos</i>	71
3.3. <i>Evaluación de homogeneidad</i>	74
3.4. <i>Estimación de variación de temperatura</i>	76
3.4.1. Variación entre periodos (1975-1990) y (1991-2008)	76



3.4.2. Variación por promedios mensuales	77
3.5. Referencias bibliográficas	79
ADAPTACIÓN	80
4.1. Referencias bibliográficas	82
EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CALIDAD DEL AGUA Y SU INCIDENCIA EN LA GESTIÓN DE GOBIERNO	83
5.1. <i>Del contexto de la propuesta</i>	83
5.2. <i>Del desarrollo de la propuesta</i>	85
5.3. <i>De las acciones propuestas.</i>	86
5.4. <i>Del Marco Normativo</i>	89
5.4.1. De los actores institucionales	89
5.4.2. De las obligaciones	94
5.4.3. De los instrumentos rectores	95
Conclusiones y recomendaciones	98
ANEXOS	99
7.1. <i>Metodología de política pública</i>	99
7.2. Referencias bibliográficas	101

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Incremento proyectado en la temperatura del aire (°C) para las regiones hidrológicas, de acuerdo a los escenarios A2 y A1B	21
Tabla 2. Reacciones que afectan las concentraciones de arsénico orgánico en aguas subterráneas	31
Tabla 3. Metales clasificados por su esencialidad conocida	42
Tabla 4. Solubilidad del agua para COP's	45
Tabla 5. Resumen de preselección de sitios	71
Tabla 6. Matriz de aprobación de control de calidad de los datos para cada uno de los sitios	72
Tabla 7. Coeficientes de correlación de Spearman para los cinco sitios aprobados	74
Tabla 8. Variación de la temperatura entre los periodos (1975-1990) y (1991-2008)	76
Tabla 9. Variación de la temperatura entre periodo (1975-1990) y variación del promedio mensual de la serie homogénea	77

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Adsorción de metales de acuerdo al pH	12
Figura 2. Río Grijalva	14
Figura 3. Muelle del Río Papaloapan, Laguna de Alvarado	15
Figura 4. Aguas subterráneas	16
Figura 5. Obra de toma del proyecto hidroeléctrico La Yesca	18
Figura 6. Monitoreo del agua (CONAGUA e IMTA, 2000)	19
Figura 7. Escenarios de cambio de temperatura (°C) de los GCMs bajo el escenario de emisiones A2. a) al 2030, b) al 2050 y c) al 2080 (Conde y Gay, 2008)	21
Figura 8. Calentamiento global del océano, observado y simulado (Reichert et al., 2002)	23
Figura 9. Gradiente de temperatura del agua en los océanos	23
Figura 10. Muerte masiva de peces en Puerto de Veracruz	26
Figura 11. Delta del Río Colorado	26
Figura 12. Evaporación	28
Figura 13. Cambio proyectado en la escorrentía del agua en el 2050 (Milly et al., 2005)	29
Figura 14. Diagrama pH-Eh para especies acuáticas de arsénico en el sistema As-O ₂ -H ₂ O a 25°C y 1 atm de presión barométrica	32
Figura 15. Especiación arsenito/arsenato como una función del pH (fuerza iónica 0.01 M)	33
Figura 16. Diagramas Eh-pH del sistema Pb-O-H (1) $\Sigma\text{Pb} = 10^{-10}$, 298.15K, 105 Pa	34
Figura 17. Diagramas Eh-pH del sistema Pb-O-H (2) $\Sigma\text{Pb} = 10^{-10}$, 298.15K, 105 Pa	35
Figura 18. Diagramas Eh-pH del sistema Hg-O-H (1) $\Sigma\text{Hg} = 10^{-10}$, 298.15K, 105 Pa	36
Figura 19. Diagramas Eh-pH del sistema Hg-O-H (2) $\Sigma\text{Hg} = 10^{-10}$, 298.15K, 105 Pa	37
Figura 20. Representación esquemática de los patrones de circulación y transporte del mercurio, para las capas de mezcla y termoclina en el Océano Pacífico	37
Figura 21. La solubilidad total de varios metales en agua como función del pH (Dyer et al., 1998)	41
Figura 22. Estructura modelo para el transporte químico y destino en un sistema acuático (Paquin et al., 2003)	41
Figura 23. Concesiones de agua para consumo humano. Fuente: CONAGUA, 2010	47
Figura 24. Relación solubilidad del cloruro de potasio con respecto al tiempo	47
Figura 25. Principales procesos de potabilización. Fuente CONAGUA, 2008	48
Figura 26. Cloración con gas en un sistema de agua potable	50
Figura 27. Distribución del ácido hipocloroso y los iones de hipoclorito en agua a distintos valores de pH y temperatura (Morris, 1982)	51
Figura 28. Relación pH y dióxido de carbono en agua de mar, estación Mauna Loa (Dore et al., 2009)	52
Figura 29. Inundaciones por fuertes lluvias	52
Figura 30. Promedio climatológico de las concentraciones de oxígeno disuelto (Stramma et al., 2008)	53
Figura 31. Etapas en las que se desarrolla la metodología	59
Figura 32. Flujograma del proceso de selección de los sitios a estudio	60
Figura 33. Gráfica de control de promedios y rangos móviles	60
Figura 34. Proceso de control de calidad de los datos	61
Figura 35. Proceso de evaluación de homogeneidad de la serie de datos	63
Figura 36. Puntos fuera de los límites de control	65
Figura 37. Tendencias descendentes y ascendentes	66
Figura 38. Ejemplo de series ó corridas	67

Figura 39. Adhesiones al límite de control	68
Figura 40. Ejemplo de sesgos	68
Figura 41. Ejemplo de datos estratificados	70
Figura 42. Incoherencia temporal y espacial en el sitio Puente Chalco	73
Figura 43. Estratificación de datos en el sitio Límite Internacional	73
Figura 44. Gráficas de referencia de Catemaco y Chapala	74
Figura 45. Gráficas Emilio López, Derivadora Morelos y El Carrizo	75
Figura 46. Modelo Prospectivo de Política Pública	100
Figura 47. Representación gráfica de la relación entre la política Pública y el Espacio o Entorno	101

INTRODUCCIÓN

El cambio climático se perfila como el problema ambiental global más relevante de nuestro siglo, en función de sus potenciales impactos sobre los diversos componentes que configuran el proceso de desarrollo tales como los recursos hídricos, los ecosistemas, la biodiversidad, los procesos productivos, la infraestructura y la salud pública. En los últimos años, un gran número de análisis y estudios científicos que redujeron las incertidumbres y mejoraron la detección de los efectos iniciales del cambio climático, así como una creciente transformación de la conciencia colectiva, han contribuido a revalorar la prioridad con la que los gobiernos y las instituciones multilaterales enfrentan el tema. Por el alcance de sus implicaciones económicas, políticas y sociales, el cambio climático es hoy un tema ineludible de la agenda internacional y objeto de preocupación para las instancias de más alto nivel de los gobiernos.

Los resultados de investigaciones científicas recientes y la difusión del Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) han reforzado en todo el mundo el sentido de urgencia con el que debe abordarse el tema. La necesidad de actuar ahora resulta cada vez más evidente y no debe posponerse una acción que, además de contrarrestar el cambio climático y sus impactos adversos, podría contribuir al logro de múltiples objetivos que confluyen en el desarrollo humano sustentable, como la seguridad energética y alimentaria, la salud pública, y la utilización racional de los recursos naturales.

México por su ubicación geográfica y condiciones socioeconómicas es especialmente vulnerable al calentamiento global ya que sufrirá notables modificaciones en su ciclo hidrológico (Martínez, 2008). Esta situación afectará en consecuencia la disponibilidad, demanda y calidad del agua, así como el manejo de las fuentes de abastecimiento de agua potable.

Aunque es inminente que la calidad del agua se verá afectada por el cambio climático, los trabajos en el tema son escasos en México y los pocos que existen comúnmente se han enfocado a determinar y proyectar los impactos sobre la cantidad y no sobre la calidad del recurso hídrico. En este contexto, la generación de conocimiento acerca de los posibles impactos del cambio climático sobre la calidad del agua, así como el desarrollo de herramientas que permitan determinar y, a la postre, proyectar dichos efectos, emerge como una tarea a realizar. Otro quehacer pendiente, de vital importancia, es la elaboración de propuestas de medidas de adaptación y recomendaciones de políticas públicas factibles y económicamente alcanzables, dirigidas a tomadores de decisiones, que ayuden a atenuar los efectos negativos del cambio climático sobre la calidad del agua en México, y de esta manera contribuir a alcanzar un desarrollo humano sustentable en el país.

El estudio de los efectos del cambio climático en México, así como el impulso a sus correspondientes medidas de adaptación, es uno de los objetivos que el Gobierno Federal ha plasmado en el eje rector Sustentabilidad Ambiental y uno de los cinco que conforman el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012. Siguiendo en la misma directriz, el Programa Nacional Hídrico 2007-2012, establece como su séptimo objetivo la determinación de los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico en México.



Para avanzar en el conocimiento del tema cambio climático-calidad del agua, y ser coherentes con lo dispuesto por el Gobierno Federal, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), supervisado por el Instituto Nacional de Ecología (INE), y financiado por la Embajada Británica en México, a través del Fondo de Oportunidades Globales del Ministerio Británico de Asuntos Exteriores, ha desarrollado el proyecto ***Efectos del Cambio Climático en la Calidad del Agua en México***, cuyo propósito principal ha sido generar información acerca de los posibles impactos del cambio climático sobre la calidad del agua, así como proponer medidas de adaptación y políticas públicas que deberían implementarse para ayudar a atenuar dichos impactos, y de esta manera alcanzar niveles razonables de sustentabilidad en el uso y manejo del recurso hídrico en México.

OBJETIVOS

1. Analizar los aspectos de calidad del agua más susceptibles a impactos negativos causados por el cambio climático en México. Específicamente se estudia el efecto que tendrá el posible incremento de la temperatura de los cuerpos de agua que se usan como fuentes de abastecimiento de agua potable.
2. Determinar, a través de herramientas estadísticas, los posibles impactos que el cambio climático ha inferido a la calidad del agua de las fuentes de abastecimiento superficiales de México.
3. Desarrollar una guía general que provea una metodología de detección de impactos en la calidad del agua como consecuencia del cambio climático.
4. Sensibilizar a los tomadores de decisiones sobre los principales impactos del cambio climático sobre la calidad del agua en México.
5. Proponer medidas de adaptación y recomendaciones de políticas públicas, dirigidas a tomadores de decisiones, que permitan atenuar los efectos del cambio climático, y de esta manera alcanzar niveles razonables de sustentabilidad en el uso y manejo del recurso hídrico en México.

ANTECEDENTES

1.1. Calidad del Agua

La calidad del agua se refiere a una condición del agua que hace que sea adecuada para un determinado uso o aplicación. En este sentido, el agua se puede utilizar para el riego pero no para consumo humano o es apropiada para la recreación y no para el riego y así sucesivamente. Aunque por sentido común, el agua podría ser calificada de forma similar por muchas personas, en el sentido estricto de la calidad, ésta debe ser referida a una cierta condición, de acuerdo con el uso y el cumplimiento con las normas de una determinada aplicación y no de carácter general.

Eso explica la existencia de muchas normas referentes al agua, las cuales podrían parecer muy similares entre sí cuando se observan detenidamente. No obstante, existen diferencias sutiles pero importantes, sobre todo cuando el costo del cumplimiento de las normas es tomado en cuenta.

La calidad del agua en las ciencias ambientales está relacionada con la capacidad de un cuerpo de agua para soportar o sostener la vida y el equilibrio entre las especies. Por ejemplo, la turbidez es una condición de los cuerpos de agua donde los sólidos suspendidos coloidales limitan la luz que llega a mayores profundidades, esto puede inhibir el crecimiento de plantas acuáticas sumergidas y afectar a las especies que dependen de ellas, tales como peces y crustáceos. La turbidez es dada al agua por la erosión de los suelos, por las actividades humanas que alteran la tierra, el escurrimiento de aguas pluviales y otros (Chapman, 1996).

Los cambios en la calidad del agua de lagos debido al cambio climático previsto pueden tener efectos profundos en los ecosistemas lacustres. Para hacer predicciones de calidad del agua de lagos y fuentes principales de agua potable se tiene que tomar en cuenta las diferentes geometrías, latitudes y altitudes, y extrapolar a los posibles escenarios climáticos futuros. Hay una gran incertidumbre sobre las condiciones del clima, las transferencias de calor y los procesos de mezcla en los lagos. Existen también cambios incuantificables en la temperatura del aire, humedad, precipitación y las condiciones del viento en cantidad y calidad de escorrentías en cuencas hidrográficas, las cargas de nutrientes que afectan la productividad primaria y la transparencia del agua. La consecuencia principal podría ser el aumento de la temperatura del agua y la pérdida de oxígeno disuelto.

Existen varios cambios que introducen efectos opuestos. Un aumento en los flujos de agua puede reducir la contribución del agua a la contaminación mediante la dilución de los contaminantes, reduciendo el tiempo para limpiar los contaminantes (Jacoby, 1990; Mulholland *et al.*, 1997; Schindler, 1997). Por otro lado, un flujo más grande tiene una mayor probabilidad de lavar los sedimentos, la turbidez y contaminantes llevados en ellos. Los cambios en la humedad de los suelos afectados por los cambios en el comportamiento de la precipitación modifican la relación infiltración de agua/flujo de agua superficial (Kiparsky y Gleick, 2003).

Parámetros del Agua

Potencial de hidrógeno (pH)

Es muy importante en la calidad del agua, ya que afecta a una gran cantidad de parámetros biológicos, químicos y físicos en cuerpos de agua. El potencial de hidrógeno es una escala logarítmica que significa que un aumento de una unidad corresponde a una concentración diez veces mayor. Un pequeño cambio puede representar la extinción de varias especies, frágiles a los cambios de pH. En regiones no contaminadas, el pH es controlado por los carbonatos y bicarbonatos. El contenido de metales en el agua parece cambiar con los cambios de pH ya que los metales son más o menos solubles a distintos pH, lo cual se muestra en la figura uno (Manziona y Merrill, 1989).

Los valores del potencial de hidrógeno son un importante indicador de calidad que depende del contenido de bicarbonato/carbonato/dióxido de carbono en el agua. Las reacciones ácido-base dependen del pH del agua. Se han demostrado cambios importantes en el pH del océano debido al aumento del dióxido de carbono en la atmósfera, conduciendo a la disolución de este gas en el agua, el cual se disuelve como ácido carbónico que induce un decremento débil del pH.

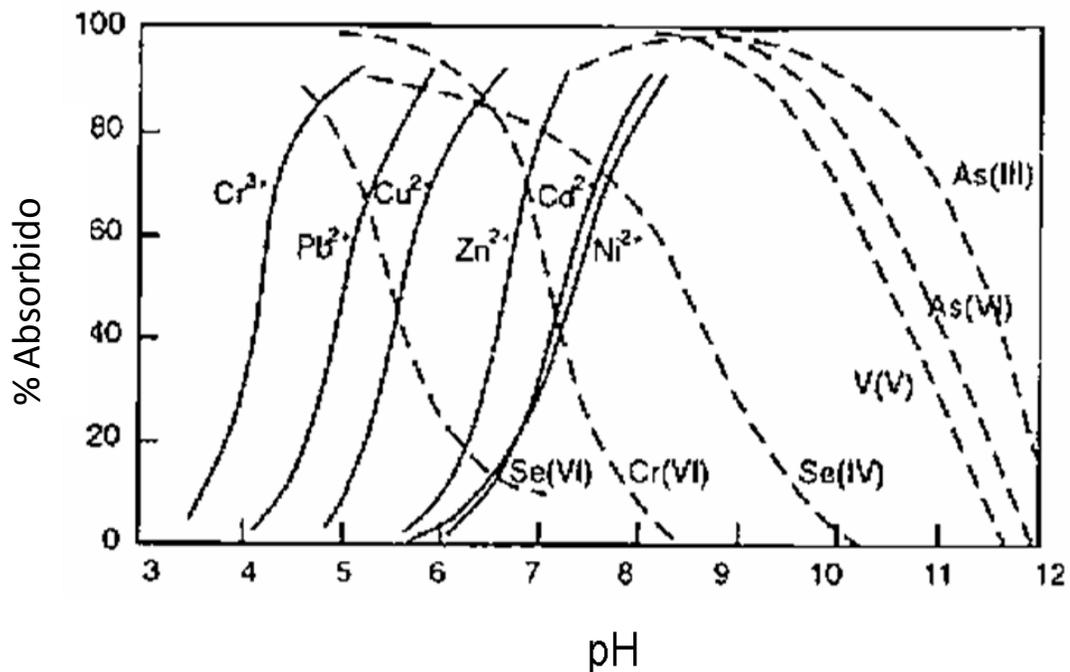


Figura 1. Adsorción de metales de acuerdo al pH

Temperatura del agua

La temperatura del agua se encuentra directamente relacionada a las fluctuaciones del tiempo y climáticas. Estas variaciones ocurren estacionalmente pero adicionalmente en los cuerpos de agua se presentan variaciones en periodos de 24 hrs. La temperatura en la superficie de los cuerpos de agua cambia por la latitud, altitud, época del año, hora del día circulación del aire, nubosidad, así como el flujo y profundidad del cuerpo de agua. La temperatura aumenta al disminuir el caudal del cuerpo de agua, esto incrementa la solubilidad de las sales, ocasionando cambios de conductividad y pH (Restrepo y Kjerfve, 2002).

Es importante tener en cuenta que las propiedades químicas del agua juegan un papel importante en la salud y la biodiversidad; cantidades excesivas de nutrientes o la falta de ellos pueden degradar la calidad del agua. La temperatura es muy importante ya que afecta a propiedades físicas, químicas y biológicas en los sistemas acuáticos. La temperatura modifica la solubilidad de compuestos, incluidos gases tan importantes como el oxígeno, que es menos soluble a mayor temperatura del agua (VWQM, 2009).

Oxígeno disuelto

El oxígeno es esencial para todas las formas de vida, especialmente para los organismos encargados de los procesos de autopurificación en aguas naturales. Éste varía con la temperatura, salinidad, turbulencia, actividad fotosintética y presión atmosférica (Jackson *et al.*, 2001).

Potencial redox (Eh)

La proporción de oxidantes y reductores en un sistema en relación con otro sistema es denominado potencial redox o Eh. Las condiciones redox en un sistema afectan directamente a la movilidad de los metales. Muchos metales están asociados o adsorbidos en oxihidróxidos de hierro. En términos generales, los iones reducidos son mucho más solubles que los oxidados.

1.2. Características de los cuerpos de agua

La caracterización de los cuerpos de agua se hace a través de tres componentes principales: la hidrología, la fisicoquímica y la biología. Todos los cuerpos de agua están interconectados, desde la atmósfera al mar, vía el ciclo hidrológico. El agua es el elemento continuo entre ellos, con diferentes niveles desde el agua de lluvia a las aguas marinas saladas. Debido a esa interconexión, hay influencias directas entre ellos o a través de estadios intermedios. En tierra, los tres principales cuerpos de agua son los lagos, los ríos y las aguas subterráneas, con propiedades hidrodinámicas diferentes y distintivas de cada uno. El término "calidad del agua" se utiliza en una forma amplia en el cual en realidad se está describiendo el estado de calidad ambiental y no solamente el del agua.

Los ríos están caracterizados por corrientes unidireccionales, con un flujo y velocidades altos (de 0,1 a 1 m/s). Los caudales son altamente variables en tiempo, dependiendo de la situación climática y el patrón de drenaje. En general, los ríos están mezclados en lo vertical debido a las corrientes y a la turbulencia. La mezcla lateral tiene lugar sólo en puntos de confluencia (figura dos).



Figura 2. Río Grijalva

Los lagos y lagunas se caracterizan por una velocidad promedio baja (0,001 a 0,01 m/s en superficie). Esto hace que los tiempos de residencia del agua en los lagos o de los elementos contenidos en ella sean largos, de un mes a varios cientos de años, de esta manera se cuantifican los movimientos de masa de material. Las corrientes dentro de los lagos son multidireccionales. Muchos lagos tienen periodos alternados de estratificación y mezcla vertical, con una periodicidad regulada por las condiciones climáticas y por la profundidad del lago. Los embalses presentan características intermedias entre ríos y lagos. Pueden tener fluctuaciones de nivel similares a los ríos, lo que depende del manejo al cual se les somete (figura tres).



Figura 3. Muelle del Río Papaloapan, Laguna de Alvarado

Las aguas subterráneas se caracterizan por un patrón de flujo continuo en términos de dirección y velocidad. Las velocidades del flujo en acuíferos fluctúan entre 10^{-10} y 10^{-3} m/s, reguladas principalmente por la porosidad y permeabilidad del material geológico. La mezcla del agua es muy pobre y la dinámica del agua es altamente diversa, ya que depende de características hidrogeológicas locales.

Existen diversos cuerpos de agua de transición, los cuales muestran características hidrodinámicas combinadas. Entre estos se encuentran los pantanos y marismas, los canales riparios, la humedad del suelo, los glaciares y capas de hielo, el agua atmosférica y planicies de inundación.

Por otro lado, los ríos alimentan al agua subterránea a través de los acuíferos cársticos, la zona hiporreica y el acuífero aluvial; aporta agua a las planicies de inundación, a los embalses y tal vez a algún lago. La superficie terrestre aporta agua a las aguas subterráneas, a ríos y lagos a través de los escurrimientos e infiltraciones al subsuelo (figura cuatro). Los embalses aportan agua al subsuelo igualmente y son alimentados por ríos y lagos. Las planicies de inundación reciben agua de los ríos y lagos manteniendo un nivel freático e intercambio de agua con el acuífero aluvial; por otro lado, aportan agua al acuífero y a las zonas pantanosas.



Figura 4. Aguas subterráneas

Como consecuencia de la variedad de regímenes de flujo, amplias variaciones en los tiempos de residencia del agua ocurren en los diferentes tipos de cuerpos de agua. En ríos, la variabilidad de la descarga es el principal factor gobernante sobre el régimen hidrológico. Los lagos se clasifican por el tiempo de residencia del agua y por su régimen térmico, resultante en los patrones de estratificación. Las aguas subterráneas dependen de su régimen de recarga, o sea la infiltración a través de la zona del acuífero insaturado, lo que permite la renovación del cuerpo de agua subterráneo. El conocimiento de las propiedades hidrodinámicas del cuerpo de agua es básico para poder establecer un sistema de monitoreo de calidad del agua efectivo. La interpretación de datos de calidad del agua puede ser errónea, de no considerarse la variabilidad espacial y temporal del régimen hidrológico.

Cada cuerpo de agua tiene un patrón de características físicas y químicas que están determinadas principalmente por condiciones climáticas, geomorfológicas y geoquímicas en la cuenca y en el acuífero subyacente. Hay algunas características que permiten clasificar en forma general a los cuerpos de agua de naturaleza similar, como son la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos y el potencial redox. El contenido mineral, determinado por los sólidos disueltos totales presentes, es una característica esencial que retrata la calidad de un cuerpo de agua, resultante del balance entre la disolución y la precipitación. El contenido de oxígeno es otra característica vital de cualquier cuerpo de agua porque influye grandemente sobre la solubilidad de los metales y es esencial para todas las formas de vida biológica.

La calidad química del ambiente acuático varía de acuerdo a la geología local, el clima, la distancia al océano, el tipo de suelo, las actividades humanas, etc. Si el agua superficial estuviera totalmente libre de actividades humanas, de 90 a 99% del agua dulce global tendría concentraciones químicas aceptables para sostener la vida acuática y los usos humanos del recurso. Existen algunas condiciones naturales raras o extremadamente raras donde no se permitiría la vida acuática o el uso humano, tales como aguas termales, lagos salados, lagos volcánicos ácidos y turberas. Aún con esas condiciones, hay organismos que se han adaptado a esos ambientes extremos. En muchas regiones el

agua subterránea tiene concentraciones de sales disueltas totales, fluoruro, arsénico y otros, que exceden las concentraciones máximas permisibles.

El material particulado es un factor esencial en calidad del agua porque regula los procesos de adsorción-desorción. Los procesos son dependientes de la cantidad de material particulado presente, el tipo y características de éste y el tiempo de contacto entre el agua y el material. La variabilidad temporal del contenido de material disuelto y particulado en cuerpos de agua es un resultado de las interacciones hidrodinámicas, la solubilidad mineral, las características del material particulado y la naturaleza e intensidad de la actividad biológica.

En cuanto al desarrollo de la biota (flora y fauna) en agua superficial, está gobernado por una variedad de condiciones ambientales que determinan la selección de especies, tanto como el desempeño fisiológico de organismos individuales. La producción primaria de materia orgánica, en la forma de fitoplancton y macrofitas, es más intensa en lagos y embalses que en ríos. La degradación de sustancias orgánicas y la producción bacteriana asociada puede ser un proceso de largo plazo que puede ser importante en agua subterránea y en lagos profundos, sin exposición directa a la luz solar.

Opuesto a la calidad química de cuerpos de agua, que puede ser medida por métodos analíticos apropiados, la descripción de la calidad biológica es una combinación de caracterizaciones cualitativas y cuantitativas. Pueden hacerse evaluaciones a nivel de la respuesta de especies o a nivel de comunidades biológicas a cambios en el ambiente.

1.3. Impactos antropogénicos en la calidad del agua

En el caso de los impactos antropogénicos en calidad del agua, la industrialización y el crecimiento poblacional han generado un mayor requerimiento de agua y demanda por mayor calidad. Los requerimientos han crecido de solamente el uso humano y la higiene personal a uso para las pesquerías, agricultura, navegación, producción industrial, enfriamiento de torres de generación de energía eléctrica, generación hidroeléctrica y actividades de recreación. Afortunadamente, las mayores demandas provienen de la agricultura y la generación de energía eléctrica (figura cinco), usos que tienen bajos requerimientos de calidad. La demanda como fuente de abastecimiento requiere de la mayor calidad posible, pero es una demanda moderada en cantidad. Por otro lado, el agua ha sido considerada desde tiempo inmemorial el mejor medio para limpiar, dispersar, transportar y disponer de desechos (domésticos, industriales, mineros, agrícolas).



Figura 5. Obra de toma del proyecto hidroeléctrico La Yesca

Cada uso de agua lleva a impactos específicos y generalmente previsible, en la calidad del ambiente acuático. Algunas actividades humanas conllevan efectos indirectos indeseados, si no devastadores, del ambiente acuático, tales como la urbanización incontrolada, deforestación, fugas o derrames de sustancias químicas, descarga de residuos no tratados, lixiviados de depósitos de residuos sólidos. Similarmente, el uso inadecuado y excesivo de fertilizantes tiene efectos a largo plazo en recursos hídricos superficiales y subterráneos.

En general los contaminantes son emitidos al ambiente de tres maneras: como gases, como sustancias disueltas o en forma particulada. Finalmente, los contaminantes llegan a los ambientes acuáticos de varias maneras, incluidos la atmósfera, el suelo y los organismos vivos.

La contaminación puede ser una resultante de fuentes puntuales o difusas. Muchas descargas puntuales pueden llevar a una descarga difusa, de tal manera que la distinción entre ellas no es tan importante, si no es con miras a su control. Una diferencia importante es que una descarga puntual puede ser tratada o controlada. Las fuentes puntuales más importantes son las descargas domésticas crudas o tratadas, las descargas industriales y regionalmente, las descargas pecuarias. La mayor parte de otras actividades agrícolas, como la aplicación de plaguicidas o fertilizantes, son consideradas fuentes difusas. Por otro lado, una fuente puntual como una chimenea genera la deposición atmosférica de contaminantes, la cual se considera una contaminación difusa al ambiente acuático.

La atmósfera permite un transporte casi ilimitado de contaminantes a escala global. Ciertos contaminantes han permeado hasta el Ártico y Antártico, con niveles elevados en mamíferos y población humana nativa, debido a la bioacumulación y magnificación a lo largo de la cadena trófica. Los principales contaminantes que son acarreados por la atmósfera son los gases provenientes de la generación de energía; los gases provenientes del uso de combustibles fósiles; sulfuros emitidos por las fundidoras; partículas de suelos acarreadas por el viento y plaguicidas volatilizados aplicados en la agricultura, sitios de disposición de residuos y regiones contaminadas previamente.

Estas sustancias, más las adheridas a partículas, volatilizadas del océano y un conjunto de sustancias orgánicas e inorgánicas, son dispersadas ampliamente por los sistemas atmosféricos y depositadas a escala global. La deposición de contaminantes provenientes de la atmósfera, sea como solutos en la lluvia o particulados, tiene lugar en un área muy amplia, cubriendo suelos, bosques y superficies de agua, donde se introducen a los ciclos hidrológicos y sedimentarios (erosión, transporte y deposición). Estos ciclos son secundarios, diferentes de aquellos primarios de emisión a la atmósfera, transporte y deposición.

Monitoreo de los cuerpos de agua

Un monitoreo de agua arroja información periódica acerca de las características de un cuerpo de agua (figura seis). Al analizar esa información se realiza una evaluación de calidad del agua, en el cual se analizan condiciones físicas, biológicas y químicas del agua, en relación a su calidad natural, a los efectos en el ser humano y a los usos propuestos, especialmente aquellos que pueden afectar la salud humana y la salud del sistema acuático mismo.

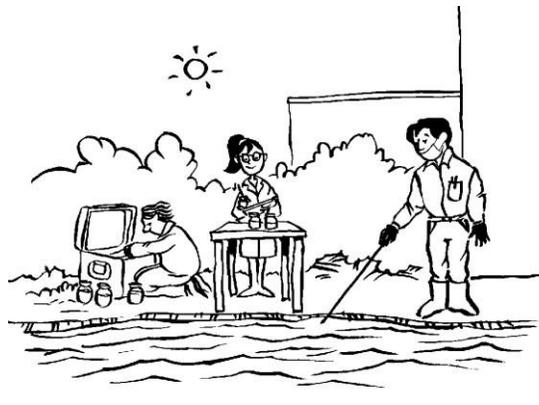


Figura 6. Monitoreo del agua (CONAGUA e IMTA, 2000)

La variación espacial en la calidad del agua es una característica importante y dominante en los diferentes tipos de cuerpos de agua, que es determinada por las características hidrodinámicas de éstos. La calidad del agua varía en las tres dimensiones que son a su vez modificadas por la dirección del flujo, el caudal y el tiempo. Consecuentemente, la calidad del agua no puede ser medida en un solo punto dentro de un cuerpo de agua, sino que requiere una malla o red de sitios de muestreo. Para fines prácticos y por limitaciones económicas se reduce el número de sitios de muestreo y se usan simplificaciones en cuanto al número ideal de estaciones de muestreo. Un ejemplo de optimización de recursos es generar perfiles verticales o longitudinales, perfiles en dos dimensiones, ideales para observar plumas de contaminación. La información puede también ser presentada con respecto a la profundidad o a la horizontal. Esto se aplica especialmente a lagos, embalses y acuíferos subterráneos.

Al analizar resultados de calidad del agua se debe tomar en cuenta que hay variaciones horarias, diurnas, mensuales, estacionales y ciclos anuales normales. Las escalas temporales y espaciales de muchos problemas de calidad del agua están asociadas a los tiempos de residencia del agua. Otros problemas son difíciles de relacionar al tamaño del cuerpo de agua o al tiempo de residencia.

Una evaluación de calidad del agua permite establecer las relaciones causa/efecto y hacer recomendaciones para futuras acciones, esto es, el manejo del recurso. Por lo tanto, hay una secuencia lógica en los tres componentes: monitoreo, evaluación y manejo. La evaluación genera información para el gobierno, comunidad científica y al público, define el estatus de calidad del agua, identifica y cuantifica las tendencias en calidad del agua, define las causas de condiciones y tendencias observadas, identifica los tipos de problemas de calidad del agua que tienen lugar en un área geográfica específica y provee información acumulada y evaluaciones, tal que los manejadores del recurso y agencias reguladoras puedan usarlas para evaluar alternativas y tomar decisiones.

1.4. Cambio climático

El cambio climático se refiere a una importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un largo período de tiempo (normalmente decenios o incluso más). El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso de los suelos.

El IPCC ha recopilado evidencia de que una serie de fenómenos se verán modificados como respuesta al cambio climático. Son dos los fenómenos resultantes principales: el incremento de la temperatura ambiente y la reducción en la precipitación. En ambos, hay un alto grado de certidumbre sobre su ocurrencia, y se está recopilando evidencia que incrementa esa certidumbre y en un esfuerzo de cuantificar su magnitud.

De acuerdo a los modelos establecidos para México, Magaña y Caetano (2007) han proyectado un aumento de la temperatura del aire en las diferentes regiones, tal como se muestra en la tabla uno.

Tabla 1. Incremento proyectado en la temperatura del aire (°C) para las regiones hidrológicas, de acuerdo a los escenarios A2 y A1B

Región	Escenario A2			Escenario A1B		
	2030	2050	2080	2020	2050	2080
I. Península de Baja California	+0,6	+2,0	+3,0	+0,9	+1,8	+2,7
II. Noroeste	+0,7	+1,9	+3,0	+0,8	+1,8	+2,6
III. Pacífico Norte	+0,8	+2,4	+3,2	+0,9	+1,9	+2,8
IV. Balsas	+0,5	+1,8	+2,6	+0,7	+1,5	+2,3
V. Pacífico Sur	+0,5	+1,7	+2,6	+0,6	+1,5	+2,2
VI. Río Bravo	+0,6	+2,0	+2,9	+0,7	+1,6	+2,5
VII. Cuencas Centrales del Norte	+0,6	+2,0	+2,9	+0,7	+1,6	+2,4
VIII. Lerma-Santiago- Pacífico	+0,6	+1,7	+2,8	+0,7	+1,6	+2,4
IX. Golfo Norte	+0,5	+1,6	+2,5	+0,6	+1,5	+2,2
X. Golfo Centro	+0,5	+1,6	+2,5	+0,6	+1,5	+2,2
XI. Frontera Sur	+0,7	+1,5	+2,5	+0,5	+1,4	+2,1
XII. Península de Yucatán	+0,5	+1,5	+2,5	+0,5	+1,4	+2,1
XIII. Valle de México	+0,5	+1,7	+2,6	+0,6	+1,5	+2,2

Los escenarios regionalizados (50 Km²) para el país (figura siete), generados por los modelos de circulación general, para los escenarios socioeconómicos A2 y A1B, predicen que se puede esperar una reducción entre 6 y 26% en la precipitación, aunado a un incremento en la temperatura media anual entre 0.5 y 3.2°C para el año 2100 (Magaña, 2008).

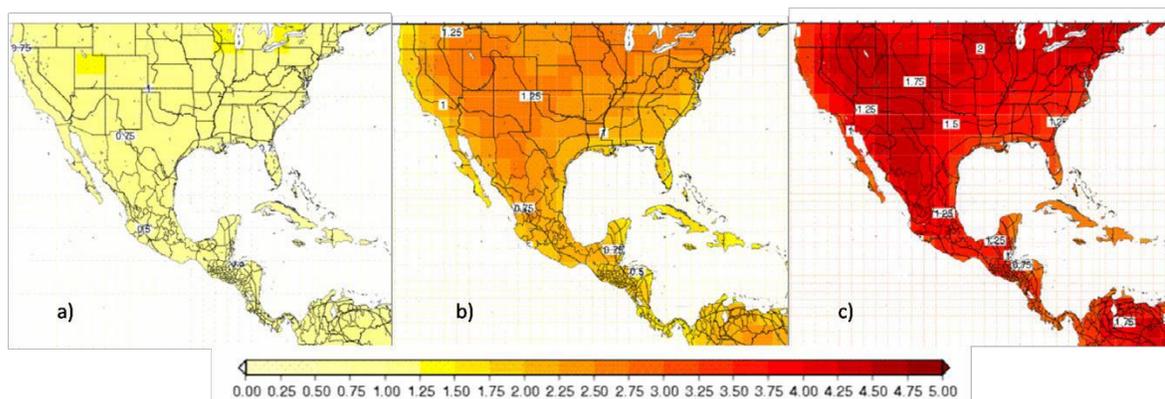


Figura 7. Escenarios de cambio de temperatura (°C) de los GCMs bajo el escenario de emisiones A2. a) al 2030, b) al 2050 y c) al 2080 (Conde y Gay, 2008)

1.5. Evaluación del impacto del cambio climático en la calidad del agua

De acuerdo al IPCC los Impactos climáticos son consecuencias del cambio climático en sistemas humanos y naturales. Dependiendo de la adaptación, se puede distinguir entre impactos potenciales e impactos residuales. Los impactos potenciales son todos los impactos que pueden suceder dado un cambio proyectado en el clima, sin tener en cuenta la adaptación y los Impactos residuales son aquellos impactos del cambio climático que pueden ocurrir después de la adaptación. Sin embargo algunos autores clasifican dentro de los impactos potenciales, los impactos indirectos, como aquellos resultantes de los efectos directos en su interacción con el medio ambiente. Esa distinción entre los efectos enfatiza el hecho de que la línea base de funcionamiento de los sistemas ambientales es cambiante en su naturaleza. Existen tres categorías, por lo menos, en las cuales se pueden dividir los impactos indirectos, siendo algunos de estos impactos, si bien indirectos, no por ello menos importantes. Los primeros serían los **impactos indirectos básicos** en ecosistemas terrestres y acuáticos (los cambios en temperatura, precipitación, patrones estacionales, características de los escurrimientos y patrones de recarga, tanto de agua superficial como subterránea). En segundo lugar están los **impactos en contaminación del agua** (el cambio en frecuencia e intensidad de las precipitaciones es uno de los efectos del calentamiento global más inmediatos, que podría estar de manifiesto en diferentes cuerpos de agua desde las últimas décadas). Ante eventos de lluvia extrema e inundaciones, la resultante es de mayor contaminación de cuerpos de agua. Finalmente el tercer grupo se constituye por los **impactos socioeconómicos** (Cromwell *et al.*, 2007).

Un aspecto por destacar es que hay impactos que tienen factores desencadenantes coincidentes, un ejemplo de ello es la eutrofización. También es posible observar que un área puede sufrir dos efectos diferentes y al parecer opuestos al mismo tiempo, por ejemplo, menor precipitación y lluvias más intensas. En ese caso algunos impactos resultantes serán acumulativos, mientras que otros pueden ser opuestos. Estos enunciados simples permiten tener un espectro bastante amplio de los impactos directos potenciales, así como de la relación entre los diversos efectos directos en el ciclo hidrológico y en los cuerpos de agua (Cromwell *et al.*, 2007).

Los **impactos compuestos** son aquellos efectos acumulativos que pueden ser mayores que la suma de las partes. Entre ellos se encuentran los impactos por migración de población o los efectos en los ecosistemas costeros y de montaña (op. cit.).

El impacto neto sobre la calidad del agua de los ríos, lagos y aguas superficiales, ante cambios en la precipitación es multifactorial, y también depende de características regionales y locales específicas (Gleick y Adams, 2000). No se encontró información que evaluara la resultante de la suma de los efectos, sin embargo, Leal y colaboradores (2009) consideran que en México se dan las condiciones para que estos efectos mencionados se presenten en los cuerpos de agua del país. Por otro lado, en las siguientes páginas se mencionan algunos resultados que se consideran importantes porque cuantifican la magnitud de los impactos mencionados.

1.5.1. Impacto en calidad del agua

El incremento de la temperatura ambiente y la reducción en la precipitación debido al cambio climático tiene un efecto en la calidad del agua ya que el incremento en el calor disponible en la atmósfera ha aumentado la temperatura del agua, el IPCC ha informado de que el agua ha absorbido el 75% de todo el calor disponible (2007). El incremento podría no ser tan notorio en cifras, pero podría tener un efecto tremendo.

El incremento en la temperatura promedio del aire como consecuencia del calentamiento global, éste ha sido demostrado ampliamente. Por el contrario, la evidencia de incremento en la temperatura del océano (figura ocho) ha recibido menos atención pública, a pesar de que es la base para calcular el incremento del nivel del mar, resultado de la expansión térmica (Levitus *et al.*, 2000).

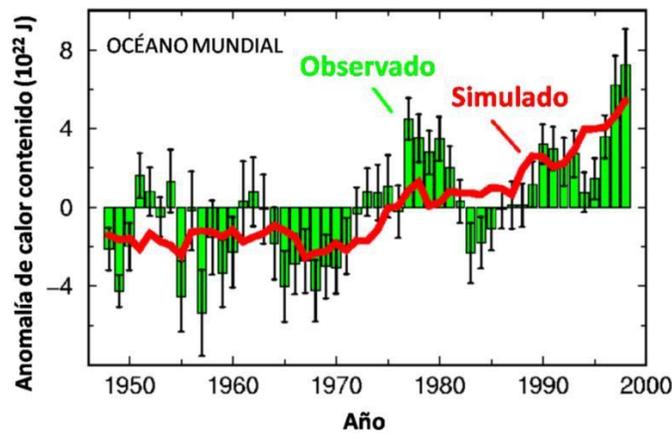


Figura 8. Calentamiento global del océano, observado y simulado (Reichert *et al.*, 2002)

Sin embargo estudios recientes muestran que la temperatura del océano ha aumentado al mismo tiempo que la temperatura del aire (figura nueve).

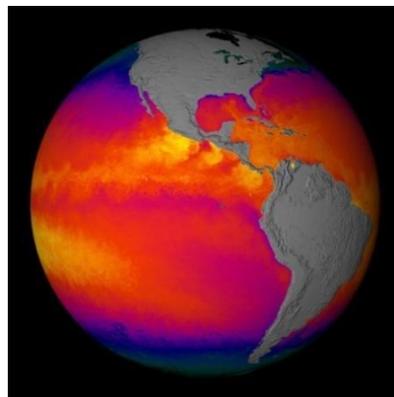


Figura 9. Gradiente de temperatura del agua en los océanos

La temperatura del agua está en equilibrio cercano con la temperatura del aire: el incremento de la temperatura del aire se asocia con el aumento en la temperatura del agua. Se ha demostrado un incremento de 1-3°C en los últimos 100 años en ríos europeos como el Danubio y el Rin (EEA, 2007). Hammond y Pryce (2007) demostraron una tendencia al incremento de la temperatura del agua, especialmente a partir de 1990 en los ríos de Gran Bretaña. Dichos investigadores calcularon el incremento actual en 1°C, con promedios por década entre 0.03 y 0.7°C en las diversas regiones de ese país. En Suiza se han demostrado incrementos importantes en temperatura para ríos en todas las altitudes (Hari *et al.*, 2006). Para México, en este documento se presentan los únicos resultados que se conocen.

El calentamiento global tiene un impacto sobre la “calidad del agua” término que se utiliza en una forma amplia con el cual en realidad se está describiendo el estado de calidad ambiental y no solamente a la calidad del agua, este incluye a la biodiversidad, disponibilidad, salud humana, usos del agua, turismo, etc., y que de manera directa o indirecta repercutirá en un impacto mayor en el abastecimiento de agua potable, sector en el que hace hincapié este estudio.

A continuación se mencionan los impactos generados en algunas componentes debido a los fenómenos de incremento de la temperatura ambiente y la reducción en la precipitación.

1.5.2. Ecosistemas acuáticos

El aumento de la temperatura del agua puede afectar negativamente a diferentes habitantes del ecosistema debido a la sensibilidad de las especies a la temperatura. La vida entera en las corrientes depende de un rango de tolerancia térmica específico, específicamente un intervalo que proporciona un bienestar casi óptimo para una amplia gama de organismos. Si la temperatura de las corrientes cambia, los organismos acuáticos desaparecerían o pasarían a otras regiones donde pueden encontrar condiciones más adecuadas y cómodas. Esto inicialmente conduce a un estrés fisiológico en los organismos y la pérdida de especies en las corrientes. Todos los organismos tienen un intervalo de tolerancia a la temperatura de la corriente y si ésta es excedida, distintos comportamientos y respuestas fisiológicas son esperados. Temperaturas del agua superiores provoca una falta de oxígeno disuelto, lo que hace a la vida acuática más sensible a los residuos tóxicos, parásitos y enfermedades (Koycheva y Karney, 2009), además se puede esperar un incremento en la nitrificación, toxicidad y eutrofización.

Incremento en la nitrificación. La nitrificación es un proceso de gran importancia para cuerpos de agua, pues permite la regeneración de nitrato, útil para el plancton, a partir de amonio. Un incremento de temperatura de 2 a 3°C en regiones templadas incrementaría de 20 a 30% la generación de nitrato. En las aguas pobres de oxígeno, el incremento en la productividad puede conllevar a la reducción significativa de oxígeno y con ello limitar la productividad de todo el ecosistema (Breuer *et al.*, 2002). Opuesto a esto, publicaciones recientes que estudian el contenido de nitratos en relación a la acidificación de los océanos, han concluido que la nitrificación decrece a pH ácido, lo que induce un incremento en el contenido de amonio. Las consecuencias de ello sería

que habría un incremento de 25% en la productividad primaria producida en base al amonio, y no en el nitrato (Beman *et al.*, 2011).

Incremento de toxicidad. El aumento de la temperatura del agua incrementa en general la toxicidad de los metales en los ecosistemas acuáticos. Por ejemplo, el cobre a cierta concentración incrementa su toxicidad en mejillones en 50% con un incremento de 5°C en la temperatura del agua. Sin embargo, esta respuesta no es igual para todos los organismos ni para todos los metales (Moore *et al.*, 1997; Rao *et al.*, 2000). En peces sucede el mismo fenómeno; el incremento en la toxicidad por algunos metales se adjudica a la mayor producción de radicales libres que son mucho más tóxicos que el compuesto original (Nemcsók *et al.*, 1987). Estudios hechos con el gusano *Tubifex tubifex* confirman un efecto de aumento de toxicidad de hasta 17% de varios metales pesados incrementando sólo 3°C la temperatura, especialmente el cobre y zinc (Rathore y Khangarot, 2002). En cuanto al nitrógeno amoniacal se ha demostrado que un incremento en la temperatura de 2°C aumenta en 12% la toxicidad de esta especie sobre los estadios juveniles de peces. Adicionalmente, el nitrógeno amoniacal cambia su ionización con el pH, por lo que a pH 8.0 es 65% más tóxico que a pH neutro (EPA, 1999). Una combinación de temperatura alta, baja concentración de oxígeno disuelto y concentraciones subletales de amonio han mostrado que son causa de necrosis en branquias en carpas (Jeney y Nemcsók, 1992).

Pérdida de oxígeno. La salud de un cuerpo de agua, como un río, depende de su capacidad para autopurificarse a través de la biodegradación, que se ve modificada cuando existe una menor cantidad de oxígeno disuelto. Esto ocurre cuando se calienta el agua y su capacidad para retener el oxígeno disminuye (Confalonieri *et al.*, 2007).

El oxígeno es parcialmente soluble en agua, fenómeno que depende de la altitud (porque esto determina la concentración de oxígeno en la atmósfera), de la temperatura del agua y de la salinidad (figura diez). El incremento en la temperatura reduce la disolución de oxígeno en el agua superficial. En aguas frías, tres grados centígrados de incremento en la temperatura reducen la solubilidad del oxígeno en 1 mg/L. En cuerpos de agua cálidos, el mismo incremento de temperatura reduce en 0.6 mg/L la solubilidad del oxígeno (Lewis, 2006). Debe recordarse que se considera que el límite para el crecimiento y desarrollo adecuado de especies acuáticas es de 5 mg/L de oxígeno disuelto (SEDUE, 1989; Chapman, 1996). Esto significa que en cuerpos de agua fría el impacto del calentamiento de la atmósfera es menos dañino a los ecosistemas, que en cuerpos de agua cálidos, como lagunas costeras tropicales, ríos y lagunas contaminadas. Un caso crítico lo constituyen los ríos en donde el caudal es pequeño y se tienen descargas contaminantes de consideración o donde las concentraciones detectadas de oxígeno disuelto en el agua están cerca de los límites máximos permisibles o recomendados (Gleick y Adams, 2000).



Figura 10. Muerte masiva de peces en Puerto de Veracruz

En México muchos ríos sirven de cuerpos receptores a descargas, aún más allá de su capacidad de asimilación y dilución, lo que lleva a un agotamiento del oxígeno disuelto (CONAGUA, 2007). Para el Golfo de México se ha proyectado que habría al menos una pérdida de 30% (figura 11), ante un incremento de 20% en las descargas de agua dulce del río Mississippi (Jacob, 2008).



Figura 11. Delta del Río Colorado

La anoxia en cuerpos de agua debida a la descarga de agua residual cruda directa o parcialmente tratada en México es una fuente de preocupación (Jiménez, 2001). Las descargas generan una disminución de la concentración de oxígeno en los cuerpos receptores, si la materia orgánica que vierten excede la capacidad de depuración del mismo. Esta condición se vería agravada en situaciones de incremento de la temperatura o de reducción del caudal, con consecuencias graves para el ecosistema, escenarios ambos esperados bajo cambio climático.

Incremento de la eutrofización. En términos de eutrofización, diversos autores reportados por Bates *et al.* (2008) mencionan que se espera un incremento de este fenómeno como consecuencia del aumento de la temperatura. Dentro de las consecuencias de la eutrofización está la mayor probabilidad de presencia de florecimientos de organismos microscópicos tóxicos denominados cianobacterias. Se sabe que la probabilidad de un florecimiento de cianobacterias se incrementa si coinciden temperaturas entre 15 y 30°C, pH entre 6 y 9 o mayor, días soleados de larga duración, concentración elevada de nutrientes (especialmente amonio, nitrato y fósforo), velocidades bajas del agua y ausencia de viento. En países septentrionales, el incremento de la temperatura, producto del

cambio climático y otras condiciones favorecedoras como las descargas difusas agrícolas puntuales, han generado que las cianobacterias sean detectadas fuera del periodo natural, entrado ya el invierno (Brient *et al.*, 2001; ADWG, 2004). El impacto ecológico de las cianobacterias es de selección de algunas especies y favorecimiento de otros productores primarios. Por otro lado, ejercen una selección sobre el zooplancton que no puede alimentarse de ellas. Los peces se ven afectados tanto en su alimentación, como en la deficiencia de oxígeno que se genera al degradarse la biomasa de las cianobacterias, pero también por la presencia de toxinas que llegan a ser bioacumuladas en peces, zooplancton y mejillones (Dokulil y Teubner, 2000; Mitchell *et al.*, 2007).

En la mayor parte de los sistemas acuáticos el fósforo está considerado como el elemento limitante para que se inicie la eutrofización, de modo que se admite que a una concentración mayor de 20 µg/L, existe un riesgo potencial de que se desencadene este proceso (Sande *et al.*, 2005).

Los efectos acumulativos del cambio climático, el aumento de la población y la industrialización y la agroindustria más intensas, es probable que continuará e intensificará el curso de la eutrofización en las aguas estuarinas y costeras. Como resultado, los síntomas de la eutrofización, tales como las florecimientos de algas nocivas y perjudiciales, reducen la calidad del agua, hay pérdida de hábitat y de recursos naturales, y la severidad de la hipoxia (falta de oxígeno) y su extensión en los estuarios y aguas costeras se verá aumentada (Rabalais *et al.*, 2009).

En general como resultado del incremento en la temperatura ambiente, se desprenden diversas consecuencias para la calidad del ambiente acuático que desencadenan reacciones muy variadas. Algunos ejemplos ya analizados son:

- Mayor velocidad de reciclamiento de nutrientes. Esto, debido a que la población bacteriana a mayor temperatura incrementa su actividad, metabolismo y tasa de reproducción, lo que aumenta la velocidad de mineralización de la materia orgánica.
- El incremento de disponibilidad de nutrientes se traduce en una mayor eutrofización.
- Reducción de oxígeno disuelto en agua, ya que el oxígeno es menos soluble a mayor temperatura.
- Incremento de la toxicidad de algunos metales. Algunos metales como el cobre, son más tóxicos a mayor temperatura del agua (Rathore y Khangarot, 2002).
- Modificación del equilibrio de especies acuáticas presentes en los cuerpos de agua.
- Aumento en la solubilidad de los compuestos orgánicos en agua.
- Prevalencia de especies resistentes a la eutrofización como las cianobacterias que son tóxicas.

1.5.3. Disponibilidad de agua

A pesar de estar documentado que la precipitación se ha incrementado en intensidad, se espera al mismo tiempo una reducción de la precipitación total anual. Esto es, si bien los periodos de lluvia pueden ser más intensos, la precipitación total anual puede muy bien ser menor a la media. Las

modelaciones recientes para México muestran en diversos escenarios que esto es muy posible y algunos análisis de datos de la climatología reciente confirman esos escenarios (Magaña, 2008).

Otros factores que afectan la calidad del agua son la evaporación y la transpiración, importantes en el balance hidrológico que afectan el clima, el crecimiento y distribución vegetal, así como la demanda y uso del agua. El incremento de la temperatura eleva el potencial de evaporación (figura 12), sin embargo la velocidad de evaporación está restringida por la disponibilidad de agua en las superficies con vegetación y en suelos. Para California este efecto ha sido calculado para dos escenarios de cambio y variabilidad climática. La evaporación podría incrementarse de 3.6 a 41.3%, con una gran sensibilidad al incremento de la temperatura lógicamente y no a la precipitación en sí misma, tanto en el escenario A2 como en el B2 (Zhu *et al.*, 2006).

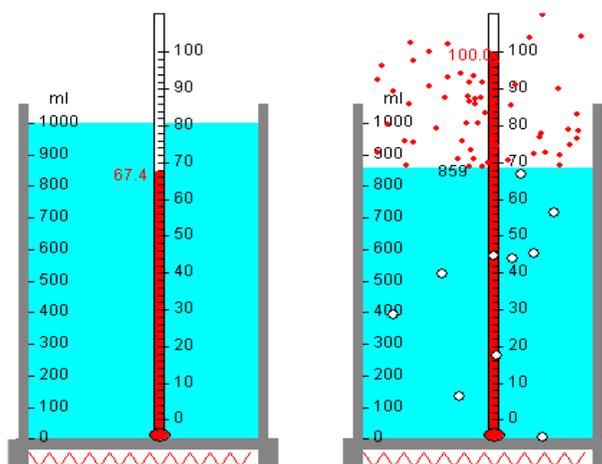


Figura 12. Evaporación

El contenido de humedad en la atmósfera puede limitar la velocidad de evaporación, haciendo que estos cambios sean muy importantes (Kiparsky y Gleick, 2003). Consistentemente los modelos de la evaporación global han mostrado un incremento entre 3 y 15% si la concentración de bióxido de carbono se duplica (IPCC, 2001).

Por tanto, es posible que otro efecto sobre la calidad del agua en México esté relacionada con menores precipitaciones, lo que llevaría a:

- Mayor demanda de agua para riego y para la población, lo que se traduce en pérdida de niveles de acuíferos.
- Modificación del tipo de vegetación por desecación del suelo.
- Modificación del régimen de infiltración de agua.
- El incremento de la temperatura del agua genera mayor evaporación, lo que hará los embalses más someros y más susceptibles de calentarse.

Aunado a esto la distribución de las aguas ha cambiado considerablemente debido a la manipulación de los flujos de los grandes ríos, presas de almacenamiento, humedales, uso urbano (inapropiado) del agua, explotación de acuíferos, deforestación, cambios en el uso de la tierra e irrigación (L'vovich *et al.*, 1995).

1.5.4. Salud humana

Con el incremento en la intensidad de la precipitación, los contaminantes se vuelcan en las vías fluviales y embalses de agua potable que tiene implicaciones importantes para la salud.

Este fenómeno ocasiona en la calidad del agua, entre otros:

- Mayor arrastre de sólidos suspendidos y contaminantes hacia los cuerpos de agua.
- Incremento en la erosión en tierras altas, deforestadas, tierras agrícolas abandonadas, etc.
- Incremento de la turbiedad en los embalses y lagos.
- Cambio en las concentraciones de los sólidos suspendidos en las escorrentías.

De acuerdo a las escorrentías, algunos autores han tratado de hacer predicciones sobre el cambio en el escurrimiento del agua. Milly *et al.*, (2005) han calculado una disminución del 15% para México (figura 13). Los autores han realizado una amplia investigación sobre este asunto y el producto obtenido es un resultado de 12 modelos.

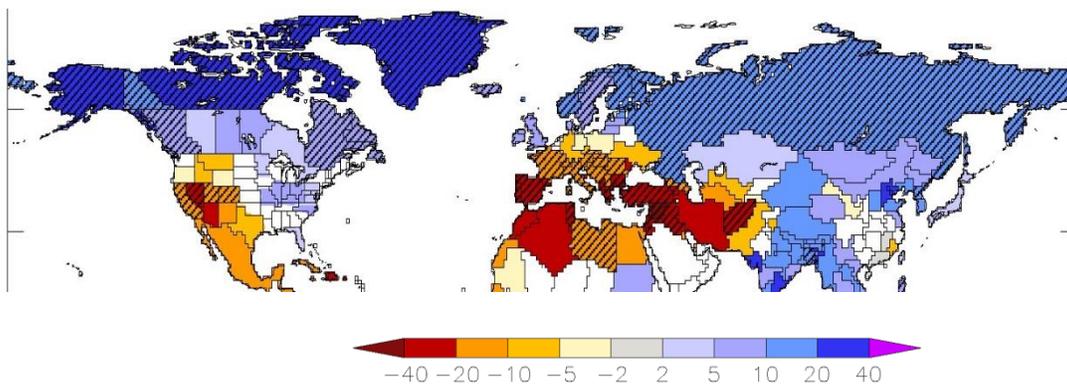


Figura 13. Cambio proyectado en la escorrentía del agua en el 2050 (Milly et al., 2005)

El aumento de la temperatura del agua puede dar lugar a un florecimiento de las poblaciones microbianas, que entre otras cosas puede tener un impacto negativo en la salud humana.

Los metales están asociados con una variedad de efectos sobre la salud. Para los metales, la frecuencia y duración de la exposición, las concentraciones y especies de metales son parámetros importantes.

Los metales en el ambiente

Los metales se encuentran naturalmente en el ambiente. Como resultado de la industrialización, los niveles ambientales actuales de los metales pueden estar relativamente elevados respecto a las concentraciones naturales. Esto puede dar lugar a una gran variabilidad en la ingesta de algunos metales en los alimentos, agua potable y el aire. La predicción de la toxicidad por exposición a metales inorgánicos es complicada por las variaciones en la bioaccesibilidad y biodisponibilidad de metales acumulados (Lanno, 2003). La forma del metal (especies químicas, compuestos, matriz y tamaño de las partículas) influye en la accesibilidad. La forma de metal se ve afectada por las propiedades del medio ambiente tales como el pH, el tamaño de partícula, humedad, potencial redox, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y sulfuros ácidos. La biodisponibilidad está influenciada por el estado nutricional, edad, sexo, estado fisiológico, condiciones patológicas y las interacciones con otras sustancias presentes.

Algunas características como el aumento de la temperatura del agua, concentración de oxígeno disuelto o pH pueden conducir a la liberación, la solubilidad o cambios en el estado de oxidación de los metales atrapados en los sedimentos o disueltos en el agua. Estos efectos producen una mayor o menor estabilidad o riesgo a los sistemas acuáticos. Desde el punto de vista humano y de la salud, el arsénico, el mercurio, el plomo y el cadmio reciben la atención más importante.

Arsénico

El caso del arsénico difiere de otros metales, ya que puede ser encontrado tanto en aguas marinas como en ríos y en organismos. El arsénico elemental no reacciona con el agua en ausencia de aire pero si lleva a cabo distintas reacciones que le permiten reducir, oxidar, coagular y adsorberse. El arsénico se encuentra de forma abundante en la corteza terrestre, el que proviene de rocas y suelos se disuelve en el agua subterránea, presentando las mayores concentraciones en áreas con actividad geotérmica, lo cual aumenta su transporte en el ambiente. Esto es esencial para muchas especies, pero no para los seres humanos, desarrollando así daño a órganos internos mediante la ingesta continua. El arsénico está presente en dos valencias para formar As^{3+} y As^{5+} . Las formas trivalentes son más solubles y tóxicas y tienden a adsorberse menos a las superficies que las formas pentavalentes (Ishinishi *et al.*, 2003). En aguas oxigenadas, el arsénico existe como As^{5+} , mientras que en aguas reductoras (aguas subterráneas) el arsénico se mantiene como trivalente, por lo tanto más tóxico y móvil. La presencia de arsénico en aguas subterráneas depende de las características químicas de los acuíferos, la presencia de fases minerales oxidativas/reductoras y la interacción con aguas ricas en arsénico (tabla dos).

Tabla 2. Reacciones que afectan las concentraciones de arsénico orgánico en aguas subterráneas

Principales reacciones que controlan el contenido de arsénico				
Condición Redox	Fases importantes	Reacciones importantes	Condiciones que afectan la movilidad del arsénico	Referencias
Oxígeno (disuelto)	Óxidos de Fe	Absorción/Desorción	pH: presencia de adsorbentes competentes; Fe ³⁺ y concentraciones de oxígeno	Peryea y Kammereck, 1997
	Precipitación			Welch <i>et al.</i> , 1988
Post-oxígeno (ausencia de oxígeno o sulfuro presente)	Sulfuros minerales	Sulfuros de oxidación	pH y actividad microbiana; transporte de oxígeno y nitratos	Appelo y Postma, 1993
	Óxidos de hierro	Adsorción/desorción y precipitación	Estado de oxidación del As	Dzombak y Morel, 1990
	Sulfuros	Adsorción/Desorción	pH	Moore <i>et al.</i> , 1988;
	minerales	Estado de oxidación	Concentraciones de sulfuros, hierro y arsénico	McRae 1995; Rittle <i>et al.</i> 1995; Huerta-Díaz <i>et al.</i> 1998
	Sulfuros minerales	precipitación		

En aguas naturales son comunes las formas inorgánicas. Esto se presenta en varios estados de oxidación, como semimetálicos, As (0), o iones como el arsenato (As⁺⁵), arsenito (As⁺³) y arsina (As⁻³). A medida que aumenta la toxicidad, el estado de oxidación se reduce de As (V) a As (III). La información termodinámica se resume en el diagrama pH-pE (figura 14).

La estructura y la química de arseniato es similar al fosfato, y esta semejanza tiene consecuencias importantes para el comportamiento de desorción y metabolismo microbiano. La toxicidad del As⁵⁺ se debe a su interferencia con la fosforilación oxidativa en las células, en sustitución del P en la síntesis del ATP, desactivando el almacenamiento de energía intracelular. La toxicidad del As³⁺ es causada por una fuerte afinidad por los grupos sulfhidrilo, tales como los grupos tiol en las enzimas.

El As⁵⁺ es termodinámicamente estable bajo condiciones oxidantes, mientras que el As³⁺ es estable bajo condiciones reductoras. Sin embargo, ambos se encuentran a menudo en el agua y los sedimentos, en condiciones tanto óxicas como anóxicas (Anderson y Bruland, 1991) debido a la cinética redox. Por ejemplo, la oxidación de As (III) por O₂ es lenta (del orden de semanas), mientras que las reacciones redox mediadas por bacterias pueden ser mucho más rápidas (Cullen y Reimer, 1989; Dowdle *et al.*, 1996). La especiación observada del As en aguas naturales depende de las condiciones locales, tales como la actividad bacteriana, mineralogía de sedimentos, pH y potencial redox.

El arsénico es quizás único entre los metales pesados y los oxianiones, ya que su movilidad en el agua depende de los valores de pH y condiciones oxidantes y reductoras. Las formas orgánicas del As pueden ser producidas por la actividad biológica, principalmente en las aguas superficiales. Sin embargo, las formas orgánicas pueden existir donde las aguas son significativamente afectadas por la contaminación industrial.

A pH neutro, típico de las aguas subterráneas, la solubilidad de la mayoría de los cationes de metales pesados se ve seriamente limitada por la precipitación o co-precipitación con un óxido, hidróxido, carbonato o fosfato mineral, o más comúnmente por su fuerte adsorción de óxidos de metales y materia orgánica. En contraste, la mayoría de oxianiones, incluyendo arseniato, tienden a ser menos adsorbidos al incrementarse el pH (Dzombak y Morel, 1990).

El potencial redox (Eh) y el pH son los factores más importantes que controlan la especiación del As. Bajo condiciones oxidantes H_2AsO_4^- es dominante a pH bajo (inferior a pH 6.9), mientras que a pH más altos, HAsO_4^{2-} llega a ser dominante. En condiciones reductoras a pH por debajo de 9.2, las especies sin carga de arsenito (H_3AsO_3) son dominantes (figura 14).

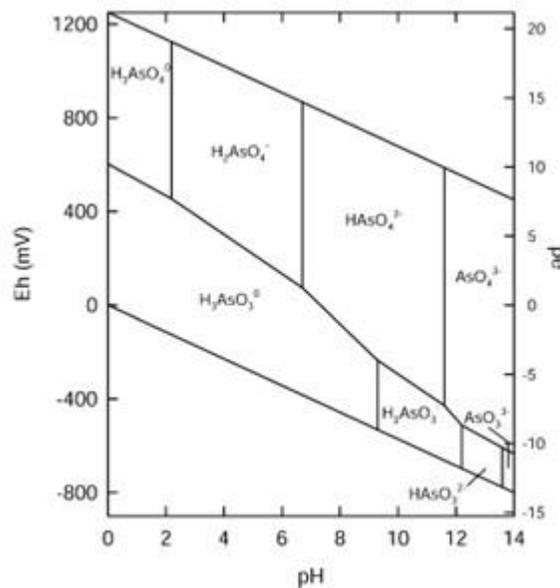


Figura 14. Diagrama pH-Eh para especies acuáticas de arsénico en el sistema As-O₂-H₂O a 25°C y 1 atm de presión barométrica

La distribución de especies de arsénico, como una función del pH, puede observarse en la figura 15.

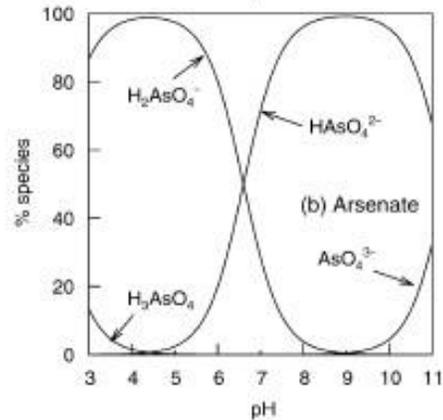
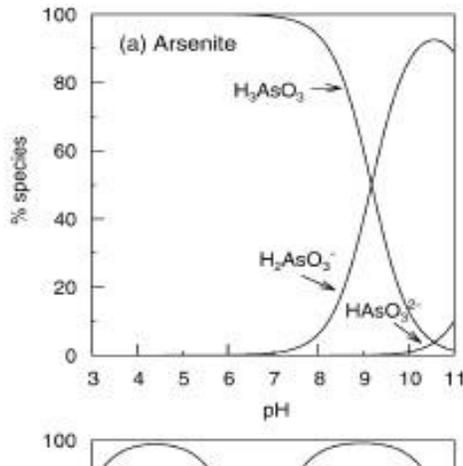


Fig. 2. (a) Arsenite and (b) arsenate speciation as a function of

Figura 15. Especiación arsenito/arsenato como una función del pH (fuerza iónica 0.01 M)

Plomo

El plomo es posible encontrarlo en concentraciones traza tanto en ríos como en agua marina. En condiciones normales no reacciona con el agua, pero comienza a reaccionar al contacto con el aire con cierto contenido de humedad. Si el oxígeno y el agua están presentes, el plomo metálico se convierte en hidróxido de plomo. Las formas $PbCO_3$ o $Pb(CO_3)_2^{2-}$ son solubles en agua; pero si el plomo se une al azufre en forma de sulfuro (S^{2-}) o al fósforo en forma de fosfato, se vuelve extremadamente insoluble y se encuentra como compuestos inmóviles en el ambiente. Tanto el plomo como los compuestos de plomo son extremadamente tóxicos (figuras 16 y 17).

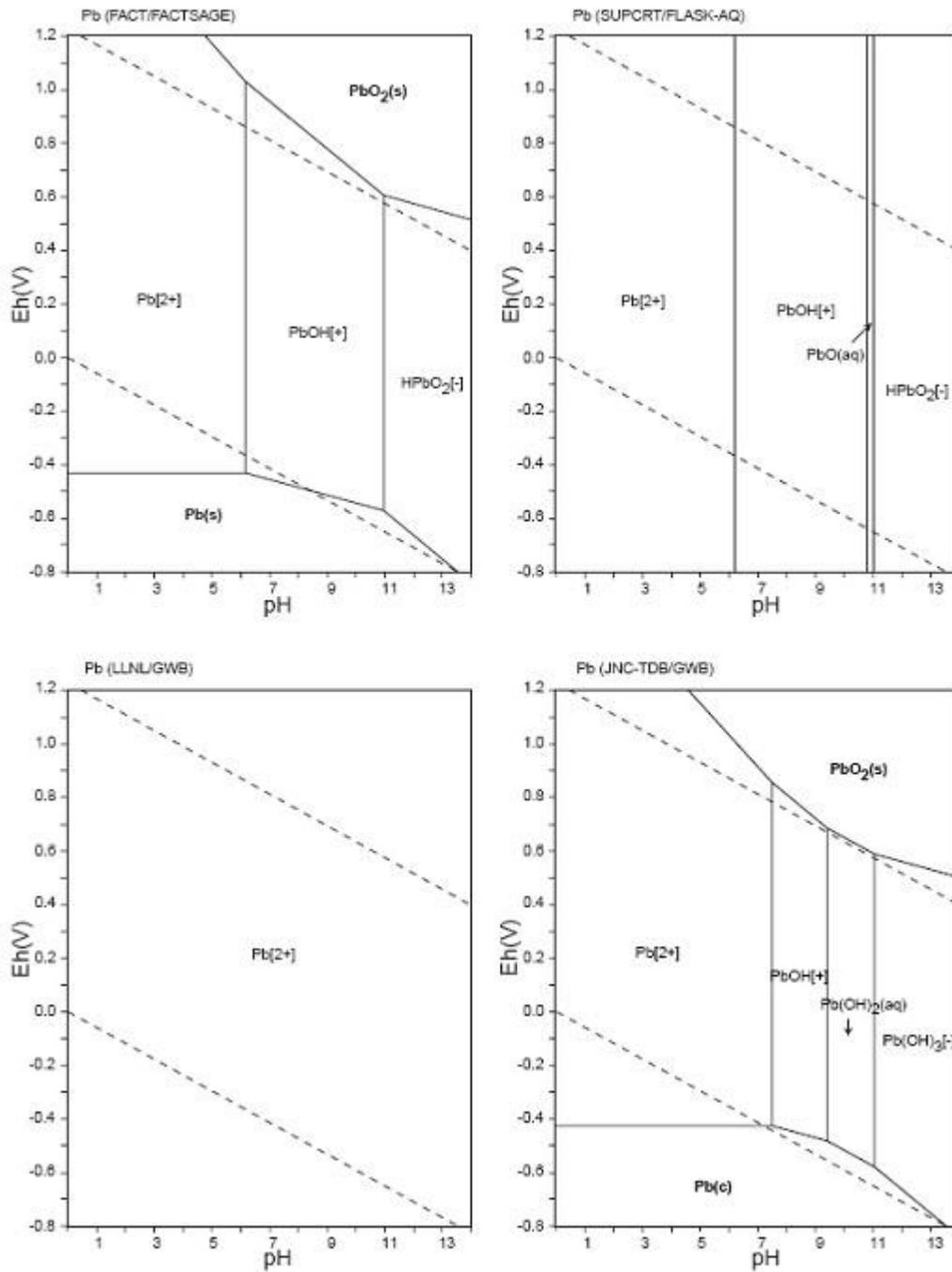


Figura 16. Diagramas Eh-pH del sistema Pb-O-H (1) $\Sigma Pb = 10^{-10}$, 298.15K, 105 Pa

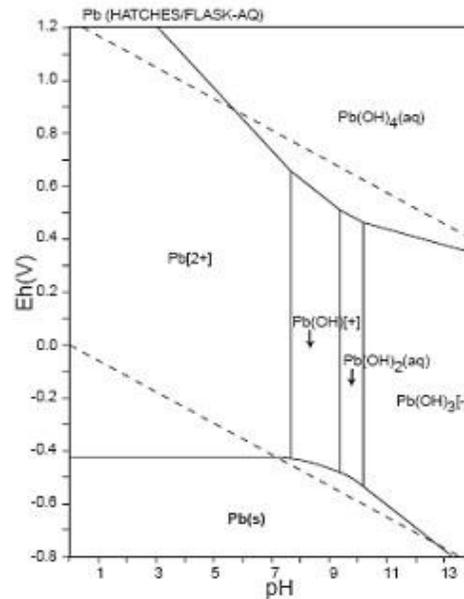


Figura 17. Diagramas Eh-pH del sistema Pb-O-H (2) $\Sigma Pb = 10^{-10}$, 298.15K, 105 Pa

Mercurio

En el caso del mercurio, se han hecho estudios de solubilidad con distintas matrices a distintos pH y se encontrado que a pH 12.4 la solubilidad total es más alta, y la más baja se da a pH 8.3 (Hagelberg, 2006). Los pH bajos se incrementa el potencial redox incrementando así la oxidación de Hg(I) a Hg(II) (figuras 18 y 19).

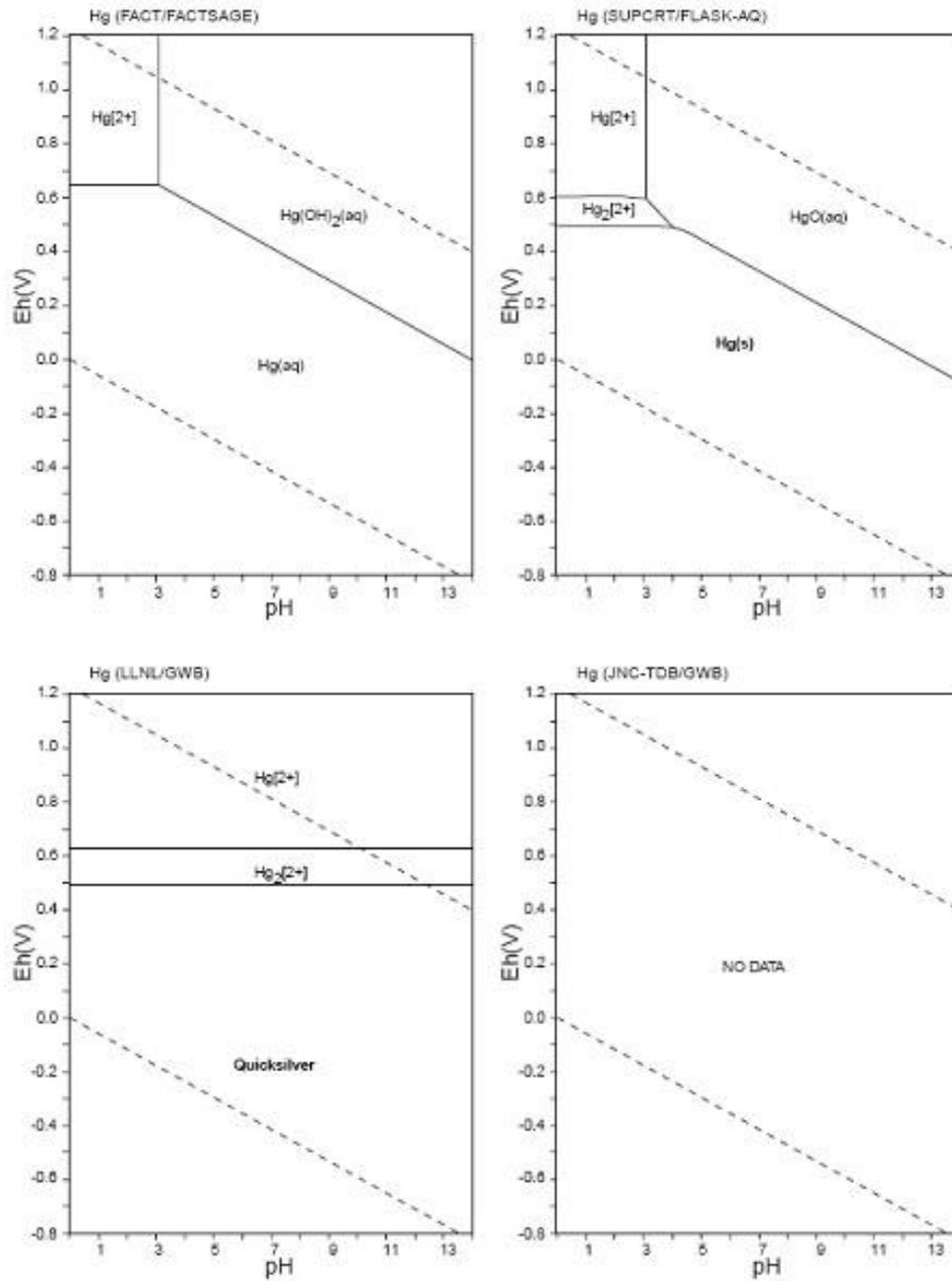


Figura 18. Diagramas Eh-pH del sistema Hg-O-H (1) $\Sigma Hg = 10^{-10}$, 298.15K, 105 Pa

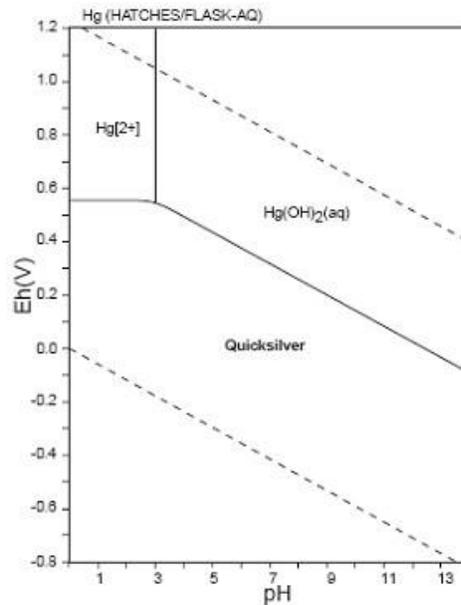


Figura 19. Diagramas Eh-pH del sistema Hg-O-H (2) $\Sigma\text{Hg}= 10^{-10}$, 298.15K, 105 Pa

El mercurio existe en el ambiente en tres estados de oxidación ($\text{Hg}(0)$, $\text{Hg}(\text{I})$ y $\text{Hg}(\text{II})$) y para cada valencia muchas formas químicas pueden tomar forma en las fases sólidas, acuosas y gaseosas. La química ambiental del mercurio es muy compleja y los cambios sutiles en las condiciones químicas, físicas, biológicas e hidrológicas pueden causar arreglos sustanciales en su forma física y estado de valencia. Un ejemplo de ello es la metilación del mercurio y la exposición subsecuente de la biota, siendo la exposición más grande en ambientes acuáticos que en ambientes terrestres (figura 20).

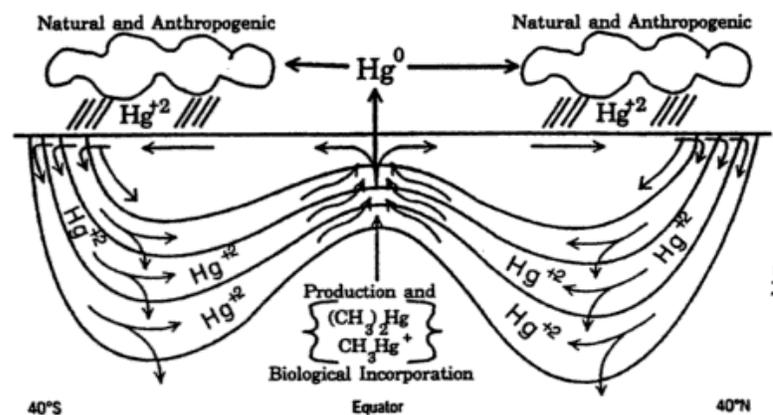


Figura 20. Representación esquemática de los patrones de circulación y transporte del mercurio, para las capas de mezcla y termoclina en el Océano Pacífico

La metilación del mercurio inorgánico Hg(II) es toxicológicamente la transformación más significativa del ciclo del mercurio en el ambiente, ya que incrementa ampliamente la disponibilidad del mercurio y su toxicidad, y lo hace más disponible para la vida silvestre y humanos, en su forma de metilmercurio.

Cadmio

El cadmio se encuentra de forma natural en ríos, aun así puede causar daño a plantas y animales. El cadmio en su forma disuelta, es muy tóxica para la vida acuática, especialmente para aquellos que se encuentran en estadios tempranos de vida, como larvas de pez. La toxicidad del cadmio es reducida, aun cuando el agua del río sea dura (por los altos niveles de carbonato de calcio). En el agua potable el cadmio se encuentra en concentraciones bajas, pero las descargas de los hogares aumentan su presencia en un 30% del total. Las concentraciones de cadmio en aguas naturales no contaminadas están por debajo de 1 µg/L (Friberg *et al.*, 1986). La contaminación del agua potable sucede por la presencia de cadmio como impureza en el zinc de tuberías galvanizadas o calentadores de agua. El agua potable de pozos bajos de áreas en Suecia donde el suelo había sido acidificado, contenía concentraciones de cadmio de 5 µg/L (*op. cit.*). Los niveles de cadmio pueden ser más altos en regiones con suministros de agua con pH bajo, así tienden a ser más corrosivas en sistemas que contienen cadmio.

El plomo es uno de los más tóxicos encontrados en sistemas acuáticos; es particularmente tóxico para niños pequeños y su riesgo incluye daño a los riñones, interferencia metabólica, toxicidad al sistema nervioso central y nervios periféricos, disminución de biosíntesis de proteínas, formación de nervios y células rojas en sangre. El mercurio es también altamente tóxico y único entre el comportamiento de metales, porque consistentemente se biomagnifica en la cadena alimenticia acuática. En su forma inorgánica el mercurio puede causar daño a riñones y ulceración. En aguas superficiales, además, el mercurio frecuentemente se transforma a su forma orgánica más tóxica metil mercurio. La ingestión de metil mercurio afecta el sistema nervioso central y puede causar la muerte incluso con relativamente bajas dosis consumidas. El arsénico muestra efectos severos crónicos cuando es ingerido, los más característicos son hiperqueratosis de las palmas de manos y pies e hiperpigmentación. El arsénico afecta también el sistema gastrointestinal y el hígado y puede inducir tumores en la piel y cáncer de piel. El mayor efecto relacionado con la salud asociado con la prolongada ingesta de cadmio es disfunción renal. Otros metales que tienen efectos crónicos en la salud incluyen al aluminio, el cual puede ser el factor co-causante de la enfermedad de Alzheimer; el cromo está asociado con dermatitis, congestión pulmonar y nefritis; y los complejos orgánicos de estaño son neurotóxicos (Nash, 1993).

Muchos metales que no son particularmente tóxicos para humanos, son altamente tóxicos para organismos acuáticos. Entre ellos se encuentra el cobre, plata, selenio, zinc y cromo. La toxicidad de metales para plantas y animales acuáticos es regulada por el estado de oxidación y su disponibilidad para formar partículas complejas en el ambiente, lo que está determinado principalmente por la química del agua (pH, salinidad, pE y temperatura). Las fuentes de contaminación por metales

incluyen intemperismo geológico, procesos industriales de minas y menas; el uso de componentes metálicos; lixiviados de metales procedentes de desechos sólidos; y tiraderos de basura y excretas animales o humanas que contienen metales (*op.cit.*).

Evaluación de riesgo por metales en la salud humana

Una evaluación de riesgo es un examen cuidadoso de lo que podría causar daño, de modo que es posible tomar precauciones para evitar el riesgo. Cuando un peligro es identificado, una evaluación de riesgo podría ser desarrollada como una respuesta y un plan general para su gestión. El riesgo puede ser caracterizado, la magnitud de la exposición, la relación dosis-efecto y la vía de exposición. El riesgo es la posibilidad de que alguien pueda verse afectada por este peligro, junto con la indicación de la gravedad del riesgo. Los metales se encuentran naturalmente en el ambiente y varían en la concentración de región a región. Aunque puestos en el ambiente por las actividades antropogénicas, los metales se encuentran naturalmente en las mezclas y con frecuencia en altas concentraciones. Algunos metales son esenciales para los seres humanos, las plantas, los animales y los microorganismos, y a diferencia de los productos químicos orgánicos, no se crean ni se destruyen, sino que sólo se puede transformar entre las formas orgánicas e inorgánicas. Existe una amplia gama de procesos como la absorción, distribución, adsorción, excreción y transformación en el medio ambiente y dentro de un organismo también, dependiendo del metal, la forma, el compuesto y el organismo para almacenar o regular el metal (EPA, 2007). Algunos metales (zinc, selenio y cobre) son elementos esenciales a bajas concentraciones pero tóxicos en concentraciones más altas. Otros como el plomo, el arsénico y el mercurio no son esenciales y no se les conocen funciones biológicas. Aunque muchos de los procesos que afectan a las moléculas orgánicas se aplican también para los metales, los modelos de predicción de rutas, el transporte y las propiedades tóxicas son mucho mejores para los anteriores que para los metales.

Los metales experimentan ciclos biogeoquímicos y afectan en un grado mucho mayor a los ecosistemas que los contaminantes orgánicos. Una carga de metal a los suelos, sedimentos, aire, aguas subterráneas o superficiales se distribuye y es transportada, distribuida y reciclada en los diversos medios ambientales desde la fuente. Eso depende de las propiedades físicas de la forma inicial de los materiales y la química particular del medio receptor. En agua y suelo un metal puede moverse hacia la cadena trófica, donde se pueden acumular de acuerdo a la dieta de los productores, los primeros consumidores o los segundos consumidores. La exposición varía entre el medio y los consumidores. La distribución dentro del organismo es de nuevo diferente en piel, plumas, riñones, hígado, grasa, pulmones, uñas, pelo, etc. El riesgo para los organismos o individuos pueden estar distribuido en la mortalidad, crecimiento, reproducción u otros fines. A niveles más altos de organizaciones biológicas, el riesgo puede afectar los ecosistemas, comunidades o poblaciones.

Para calcular el riesgo, distintos modelos pueden ser aplicados. Algunos modelos estiman el destino y transporte de metales en los distintos medios ambientales. Existen modelos de exposición basados en el medio en el que calculan la exposición de los organismos a los metales, la absorción, biodisponibilidad, los niveles actuales de los metales y los receptores. La bioacumulación y modelos

toxicocinéticos simulan la bioacumulación en órganos tejido-específicos, los mecanismos de absorción, la excreción, distribución/almacenamiento, el metabolismo de los metales por los organismos. Los modelos de toxicidad basados en residuos toman en cuenta la dosis interna, las relaciones entre los órganos blanco y todo el cuerpo, y las respuestas tóxicas. Los modelos de cadena alimenticia/bioacumulación reproducen el movimiento a través de la cadena alimenticia de acuerdo a los factores de bioaccesibilidad, biodisponibilidad, esencialidad, regulación (captación y distribución interna), desintoxicación, acumulación, capacidad de adaptación y almacenamiento. Los modelos reconocen la biomagnificación (es decir, aumentos en la concentración a través de múltiples niveles de la cadena trófica) la cual es rara en metales, con la excepción de ciertos compuestos organometálicos. Los modelos de exposición dietética simulan la exposición dietética a los metales por formas de alimentación y fisiología digestiva en todas las especies, las preferencias alimenticias, la estructura trófica de la comunidad y los índices de ingestión y de absorción. En las evaluaciones de riesgo para la salud humana, los modelos toman en cuenta las preferencias regionales, sociales y religiosas. Los modelos que consideran la toxicidad basada en la exposición toma en cuenta el cálculo de la dosis en comparación con la biodisponibilidad, la especiación del metal, las preferencias alimenticias, las cantidades, las concentraciones del ambiente, y las interacciones de metales. En las consideraciones sobre la información de exposición media, organismos adaptados o semejantemente aclimatados, las vías de exposición y la combinación de metales. Los modelos basados en la toxicidad media comparan las concentraciones ambientales con las funciones de respuesta del organismo, sobre todo para los organismos acuáticos y los que viven en el suelo. Los modelos de población, hábitat y ecosistemas calculan el riesgo basado en las funciones del ecosistema, los organismos individuales y la adaptación.

Los sedimentos sólidos pueden retener un millón de veces más metal que un volumen equivalente de agua. La proporción exacta de un químico retenida por sedimentos en relación al agua es una función de la química de un metal, así como el contenido químico en los sedimentos sólidos y el ambiente circundante. Para los humanos, la vía de entrada de los metales de los sedimentos es a través del agua utilizada para beber, bañarse y nadar. La disponibilidad de estos metales está mediada por procesos de intercambio del agua y sedimentos que pueden resultar en la liberación removilización de los químicos de los sedimentos del lecho. Los factores que controlan la influencia química de los metales son el potencial redox y el pH (figura 21).

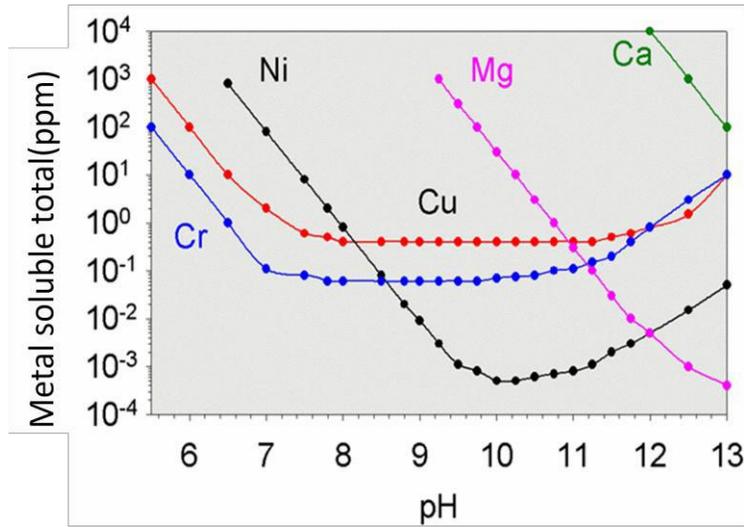


Figura 21. La solubilidad total de varios metales en agua como función del pH (Dyer et al., 1998)

El pH es a menudo relativamente constante o puede disminuir con la profundidad, pero la alcalinidad puede incrementarse debido a la mineralización de la materia orgánica (Stumm y Morgan, 1996). Como el oxígeno disuelto se consume, los microbios anaerobios utilizan otros aceptadores de electrones en reacciones redox o de oxidación-reducción en el orden de nitrato, hierro III, sulfato de amonio y bicarbonato para producir dióxido de carbono, amoníaco, sulfuro y metano (figura 22).

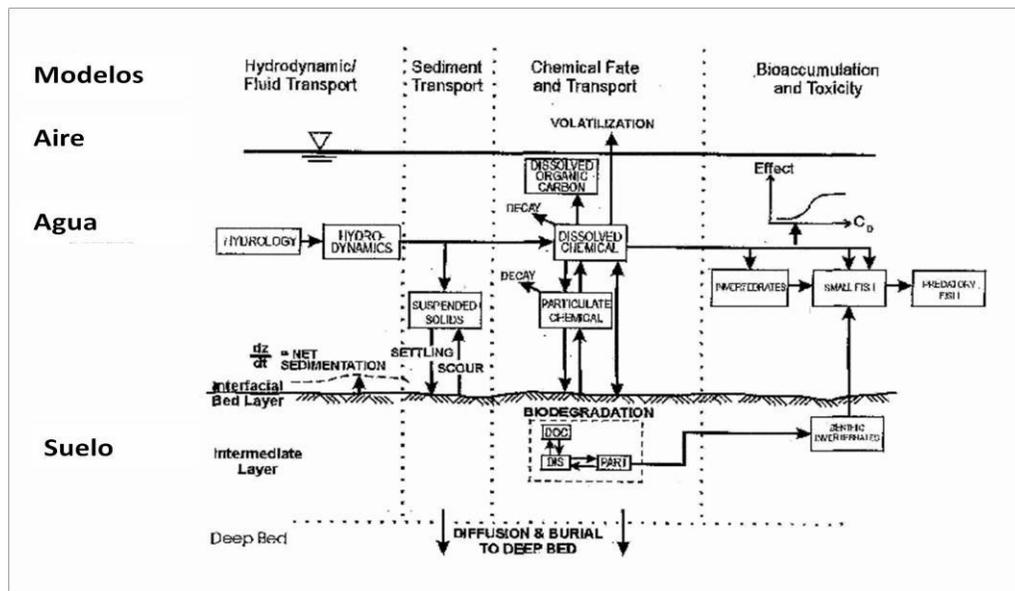


Figura 22. Estructura modelo para el transporte químico y destino en un sistema acuático (Paquin et al., 2003)

En general, el tracto gastrointestinal y el hígado regulan la incorporación y transferencia de cationes en los seres humanos. El grupo aniónico es más soluble en agua y es menos reactivo con N, S, P, O y grupos hidróxidos que son cationes. Se absorben de manera muy eficiente a través del intestino y su posterior compartimentación y excreción es por la manipulación de sus estados de oxidación y metilación; la carga total del cuerpo está regulada por la excreción renal (tabla tres).

Tabla 3. Metales clasificados por su esencialidad conocida

Metal	Esencialidad (requerimientos conocidos para la salud y funciones)		Benéfico (No se sabe si es esencial)		No esencial (no se conoce por ser benéfico)
	Plantas	Animales	Plantas	Animales	
	Aluminio (Al)				
Antimonio (Sb)					X
Arsénico (As)				X	
Bario (Ba)					X
Berilio (Be)					X
Cadmio (Cd)					X
Cromo (Cr)		X			
Cobalto (Co)		X	X		
Cobre (Cu)	X	X			
Plomo (Pb)					X
Manganeso (Mn)	X	X			
Mercurio (Hg)					X
Molibdeno (Mo)	X	X			
Níquel (Ni)	X	X			
Selenio (Se)		X	X		
Plata (Ag)					X
Estroncio (Sr)					X
Talio (Tl)					X
Vanadio (V)				X	
Zinc (Zn)	X	X			

Fuente: Adaptado de Barak, 1999.

En este estudio se aplicará un modelo para simular la transferencia de los metales a través del agua/sedimentos.

Descripción del Modelo de Metales

Una vez liberado a los cuerpos de agua, la movilidad de los metales traza es en gran medida controlada por los procesos de adsorción. Parte de la adsorción de metales traza se debe al intercambio de iones, sin embargo, la mayoría de la absorción está conectada con uniones específicas de metales pesados a las superficies de la carga variable de óxidos y materia orgánica. Los sólidos de carga variable obtienen iones de las soluciones sin liberar otros iones en proporción equivalente. Su carga de superficie puede ser positiva o negativa dependiendo del pH y la composición de la solución. Los sólidos de carga variable son importantes en la regulación de la movilidad tanto de carga positiva metales pesados como el Pb^{2+} y Cd^{2+} y de los oxianiones como $HAsO_4^{2-}$ y $H_2PO_4^-$. La modelación de sorción en sólidos de carga variable es muy compleja, por lo general requiere programas de computadora para una respuesta exacta (Appelo y Postma, 1993).

PHREEQC es un programa informático escrito en el lenguaje de programación C que está diseñado para realizar una amplia variedad de cálculos geoquímicos acuosos de temperatura baja. PHREEQC se basa en un modelo de asociación de iones acuosos y tiene capacidad para (1) especiación y cálculos de índices de saturación, (2) reacción en batch y cálculos de transporte de una dimensión (1D) que implican reacciones reversibles, las cuales incluyen reacciones acuosas, minerales, gaseosas, de sólido-solución, de complejación superficial y de equilibrio de intercambio iónico, y reacciones irreversibles, que incluyen transferencias de mol especificadas de reactivos, las reacciones cinéticamente controladas, soluciones de mezcla y cambios de temperatura; y (3) la modelación inversa, la cual encuentra conjuntos de minerales e intercambios de gases que reflejan las diferencias de composición entre las aguas, dentro de límites de incertidumbre de composición determinada (Parkhurst y Appelo, 1999).

PHREEQC contiene tres modelos de superficie/complejación que son utilizados para calcular las concentraciones de equilibrio de los iones de metales pesados en la fase disuelta y en la fase sólida, en sistemas acuosos: (1) Por defecto, el modelo de dos capas generalizado es utilizado sin cálculo explícito de la composición de la capa difusa. (2) Como alternativa, un modelo de doble capa electrostático con cálculos explícitos de la composición de capa difusa puede ser utilizado. (3) Por último, un modelo no electrostático puede ser seleccionado.

PHREEQC necesita un archivo de entrada en cual el problema está especificado a través de palabras clave y conjuntos de datos asociados. La entrada a PHREEQC es un formato completamente gratis y está basado en simbolismos químicos. Las ecuaciones balanceadas, escritas en símbolos químicos, son utilizadas para definir las especies acuosas, especies de intercambio, las especies de complejación superficial, soluciones sólidas y fases puras, lo cual elimina el uso de números índice para identificar los elementos o especies. La estructura de formato libre de los datos, el uso de bloques de datos en orden independiente para la palabra clave y la sintaxis relativamente simple facilitan la generación de conjuntos de datos de entrada con un editor estándar. El lenguaje de programación en C permite la asignación dinámica de la memoria del ordenador, por lo que existen muy pocas limitaciones en el tamaño de la matriz, longitud de las cadenas, o el número de entidades, tales como soluciones, fases,

conjuntos de fases, intercambiadores, soluciones sólidas, o superficies que se pueden ser definidas al programa.

Una base de datos producto químico extensible permite la aplicación de la reacción, el transporte, y la capacidad de modelación inversa a casi cualquier reacción química que se reconozca a la influencia de lluvia, suelo y calidad del agua superficial y subterránea. Actualmente siete bases de datos se proporcionan con PHREEQC, PHREEQC.DAT es el más pequeña. WATEQ4F.DAT tiene datos adicionales para los metales pesados, los archivos de 2 MINTEQ.DAT tienen un poco más de químicos orgánicos, Pitzer.DAT es para la modelación de alta salinidad y LLNL.DAT es una base de datos enorme con muchos minerales y gran alcance, la temperatura depende de las constantes de equilibrio. PHREEQD.DAT contiene coeficientes de difusión marcados para las especies de soluto. Las bases de datos contienen listas según las palabras clave.

La información básica que alimenta a PHREEQC es:

- 1) Composición de la fase acuosa
- 2) Composición de la fase sólida
- 3) Estado redox, alcalinidad, temperatura, potencial de hidrógeno (pH)
- 4) Constante de absorción y concentración de los sitios de superficie

La información de salida es:

- 1) Concentración de metal en fase acuosa
- 2) Concentración de metal en fase sólida

Cambio Climático y la emisión de COP's

En un clima cambiante, varios factores podrían resultar en un aumento en la liberación de COP's al ambiente. Por ejemplo, se prevé que la gama de enfermedades transmitidas por vectores como la malaria aumentarán, esto podría conducir a un mayor uso de plaguicidas orgánicos persistentes. También se espera que muchas áreas reciban menos lluvias; un clima más seco podría conducir a un aumento en los incendios forestales y así aumentar las emisiones de dioxinas y furanos. Las medidas adoptadas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero también podría mitigar las emisiones de contaminantes orgánicos persistentes producidos no intencionalmente. Por otra parte, un mayor uso de biomasa para la producción de energía resulta en emisiones mayores de COP's en comparación con los producidos por los combustibles fósiles, en particular el gas natural. Los datos actuales sugieren que un clima más cálido podría resultar en emisiones secundarias de los COP de los suelos, cuerpos de agua o hielo y elevar los niveles en el aire. Un estudio de los organismos acuáticos en los lagos alpinos encontró un aumento en los contaminantes orgánicos persistentes que podrían ser el resultado de los contaminantes siendo liberados del deshielo de los glaciares (UNEP, 2010).

En el caso de los plaguicidas, la atrazina aumenta su solubilidad en agua en 1.4% por cada grado de incremento en la temperatura (Ureña-Amate *et al.*, 2004). Entre los COP's solubles en agua el pentaclorofenol puede incrementar su solubilidad en 2.5% por cada grado centígrado de incremento de la temperatura del agua (NRCC, 1982). Como consecuencia de ello puede haber biota expuesta a mayores concentraciones de estos compuestos y con ello desencadenar epidemias o susceptibilidad a enfermedades dentro de esas especies (MacDonald *et al.*, 2003; Heide-Jorgensen *et al.*, 1992; Ross, 2002).

Muchos COP's tienen el potencial de ser persistentes, bioacumulables y transportables del sitio de liberación hasta grandes distancias en el ambiente. Una vez en el ambiente se pueden transferir a otra fase (sedimentos, aire, biota, suelos, agua), o bien, pueden ser transportados espacialmente y por advección mediante deposición atmosférica, bioacumulación, escurrimientos, depósito de partículas suspendidas y degradación. En todos estos fenómenos la temperatura juega un papel fundamental (MacDonald *et al.*, 2003; MacDonald *et al.*, 2005; Dachs *et al.*, 2002).

Tabla 4. Solubilidad del agua para COP's

Aldrín	A 20 °C (27 µg/L)
Endrín	0.2 mg/L; ligeramente soluble en agua
Mirex	0.07 µg/L a 25°C
Clordano	0.1 mg/L a 25°C
Heptacloro	0.05 mg/L a 25°C
Toxafeno	3 mg/L a 22°C; ligeramente soluble en agua
Dieldrín	A 20°C, 186 µg/L
PCB's	2.7 – 590 µg/L
DDT	0.025 mg/L a 25 ECb
Dioxinas	PCDD (0.019 µg/L); PCDF (0.692 µg/L)
Furanos	Muy ligeramente soluble en agua fría
<u>Hexaclorobenzeno</u>	<u>0.005 ppm a 25°C</u>

De la tabla cuatro, se puede concluir que los compuestos como el aldrín, heptacloro, dieldrín, endrín, clordano, toxafeno, algunos PCB's e incluso dioxinas podrían encontrarse en el agua y su solubilidad ser incrementada por el aumento de la temperatura.

Destino ambiental de los COP's

El impacto potencial del cambio climático en el comportamiento de los contaminantes orgánicos persistentes en el medio ambiente es complejo. El cambio climático afectará a muchos aspectos del ambiente, las temperaturas, los patrones de precipitación, la nieve, de hielo, y la salinidad de los océanos, por ejemplo. Estos cambios alteran la partición de los contaminantes orgánicos persistentes entre los compartimentos ambientales (aire, agua, suelo, sedimentos, nieve y hielo). Las

temperaturas más altas, por ejemplo, pueden dar lugar a la evaporación de los contaminantes orgánicos persistentes del suelo al aire, mientras que lluvias más intensas pueden conducir a una mayor deposición de superficie de los COP's en el aire y el incremento de la escorrentía de contaminantes.

Exposición a los COP'S

Estos y otros factores podrían influenciar la transferencia, la redistribución y la captación de los COP's, junto con los niveles totales que pueden ser encontrados en diferentes partes del globo. El aumento de los niveles de COP's en aire y agua debido a las liberaciones derivadas de la fusión del hielo y la nieve, combinado con emisiones posiblemente superiores expondría a los organismos a niveles más altos de contaminantes orgánicos persistentes ya sea directamente o a través de la cadena alimentaria, propiciando el aumento de impactos adversos a los humanos y a los ecosistemas. Por ejemplo, es posible que los aumentos en la intensidad y frecuencia de las tormentas pudieran conducir a episodios más agudos de contaminación química de los cuerpos de agua y las cuencas hidrográficas.

Los efectos tóxicos de los COP's

La suma del cambio climático a la combinación de factores físicos, químicos y estresantes biológicos que ya afectan a los ecosistemas puede aumentar la sensibilidad de algunos organismos a determinados contaminantes. Algunas especies pueden ser especialmente vulnerables a las interacciones clima/contaminantes, tales como los que viven en el límite de su rango de tolerancia fisiológica, donde la capacidad de adaptarse a los cambios ambientales es limitada. La exposición a los contaminantes orgánicos persistentes en combinación con otros factores, tales como la creciente gama de enfermedades transmitidas por vectores e inmunosupresores, también podría tener un efecto perjudicial en ciertos organismos, la cadena alimentaria y la biodiversidad. Entre los posibles impactos negativos incluyen la disminución de la capacidad de sobrevivir o de tolerar los cambios en los factores ambientales como la temperatura, así la exposición a bajas concentraciones de ciertas sustancias químicas pueden inducir estrés adicional sobre los organismos. Además, algunos datos sugieren que las altas temperaturas pueden aumentar la sensibilidad de la fauna silvestre a la exposición a determinados agentes contaminantes.

1.5.5. Abastecimiento de agua potable

Toda la evidencia mostrada anteriormente sobre el impacto del cambio climático en la calidad del agua y por ende a la biodiversidad, disponibilidad y salud humana, como resultado del incremento de la temperatura ambiente y la reducción en la precipitación, repercute en los cuerpos de agua superficiales y subterráneas que son fuentes de abastecimiento de agua para el consumo humano. La fuente predominante de abastecimiento público es la subterránea con el 62% del volumen, como puede apreciarse en la figura 23 (CONAGUA, 2010).

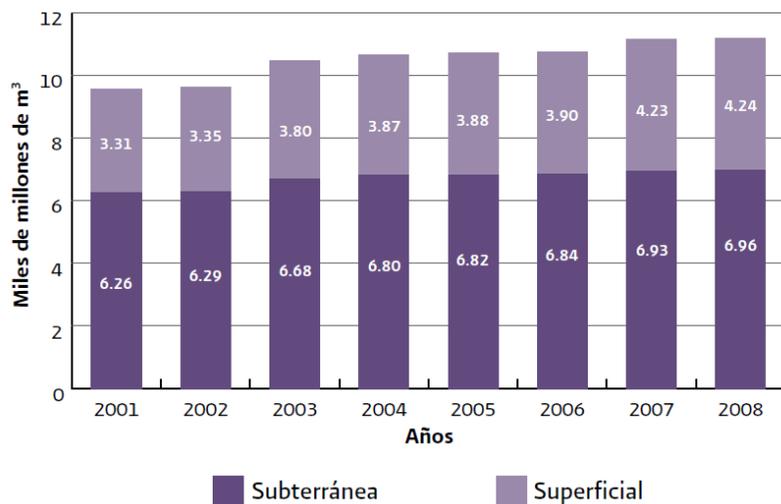


Figura 23. Concesiones de agua para consumo humano. Fuente: CONAGUA, 2010

Agua subterráneas como fuentes de abastecimiento. Un aumento de temperatura podría alterar algunas características de las fuentes de aguas subterráneas que poseen alta dureza lo que aumentaría la incidencia de incrustaciones en tuberías, también tienden a disolver cobre y plomo, las aguas subterráneas tienen bajas cantidades de oxígeno disuelto y una leve acidez, debido esto al anhídrido carbónico disuelto y a ácidos orgánicos débiles. Los iones que son directamente responsables de los valores de conductividad son, entre otros, el calcio, magnesio, potasio, sodio, carbonatos, sulfatos y cloruros. Uno de los problemas con el aumento de la temperatura en el agua es que la solubilidad de las sales también aumenta, como se puede observar en la figura 24, por ejemplo, en el caso del cloruro de potasio.

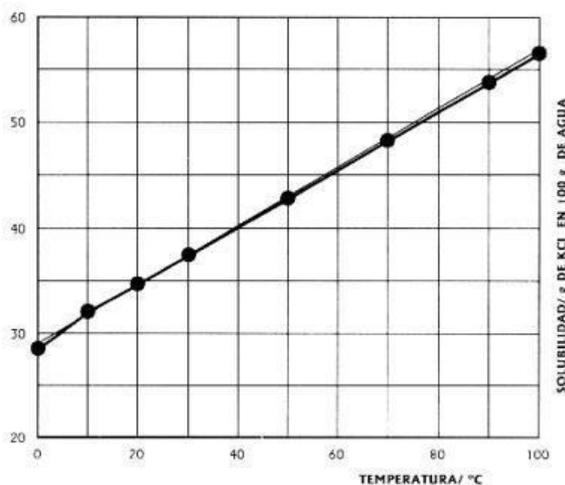


Figura 24. Relación solubilidad del cloruro de potasio con respecto al tiempo

La presencia de arsénico en el agua subterránea es uno de los problemas sanitarios más importantes a nivel mundial. Existen regiones en la República Mexicana donde por las características geológicas prevalentes, los acuíferos contienen arsénico y flúor disueltos en el agua en forma natural (Vega-Gleason, 2001). La presencia de arsénico por arriba de los límites que marcan los correspondientes estándares de calidad del agua en los acuíferos de México, está registrada y documentada principalmente en cuatro estados: Coahuila, Chihuahua, Durango e Hidalgo y se cuentan con datos esporádicos de detección de arsénico en pozos de Guanajuato, Zacatecas, Oaxaca, Morelos y Puebla. En 26 municipios de los estados antes mencionados existe alguna información sobre presencia de arsénico y fluoruros, en los cuales la población probablemente expuesta corresponde a más de 2 millones de habitantes (Vega-Gleason, 2001; Martínez, 2002). La problemática de la presencia de flúor en exceso en el agua para consumo humano en el país, se ve incrementada debido a la falta de control sobre la ingestión de flúor por otras vías como son la sal (adicionada) y las pastas de dientes, principalmente.

Aguas superficiales como fuentes de abastecimiento. El 28% del consumo humana de agua es satisfecho por los cuerpos de agua superficiales, sin embargo cifras de la CONAGUA anuncian que la concesión en este rubro ha ido en incremento. Los procesos de potabilización aplicados a este tipo de fuentes de abastecimiento se centran en la eliminación de sólidos suspendidos y algunos en la eliminación de sólidos disueltos (figura 25).

Se ha observado que el impacto neto sobre la calidad del agua de los ríos, lagos y aguas superficiales, ante cambios en la precipitación es multifactorial, y también depende de características regionales y locales específicas (Gleick y Adams, 2000). No se encontró información que evaluara la resultante de la sumatoria de estos impactos, sin embargo, Leal y colaboradores (2009) consideran que en México se dan las condiciones para que estos efectos mencionados se presenten en los cuerpos de agua del país y estos a su vez como fuentes de abastecimiento, los organismos encargados de la potabilización deberán definir el quehacer sobre el impacto en la calidad del agua que efectos tales como el incremento de nitrificación, toxicidad por disolución de metales, pérdida de oxígeno disuelto, eutrofización y solubilidad de los compuestos orgánicos persistentes aunado a esto el impacto de la disponibilidad.

Proceso central	Propósito	Plantas		Gasto potabilizado	
		No	%	m ³ /s	%
Ablandamiento	Eliminación de dureza	21	3.5	0.88	1.0
Adsorción	Eliminación de trazas de orgánicos	14	2.3	1.29	1.5
Clarificación convencional	Eliminación de sólidos suspendidos	187	31.0	58.93	67.5
Clarificación de patente	Eliminación de sólidos suspendidos	140	23.2	6.64	7.6
Electrodiálisis reversible	Eliminación de sólidos disueltos	2	0.3	0.12	0.1
Filtración directa	Eliminación de sólidos suspendidos	63	10.4	14.67	16.8
Filtros lentos	Eliminación de sólidos suspendidos	6	1.0	0.04	0.1
Ósmosis inversa	Eliminación de sólidos disueltos	155	25.7	1.29	1.5
	Remoción de hierro y manganeso	16	2.6	3.45	4.0
TOTAL		604	100	87.31	100

Figura 25. Principales procesos de potabilización. Fuente CONAGUA, 2008

La afectación en el proceso de potabilización, conociendo que la temperatura es un factor que influye sobre propiedades físicas como la viscosidad, la solubilidad, pH y la cinética de algunas reacciones que intervienen en los procesos biológicos y fisicoquímicos del agua. Sumará mayores costos para la potabilización, especialmente en aquellos casos donde ya hay presencia de metales, nitratos y cianotoxinas. Además mayores debido al recrecimiento bacteriano por pérdida de cloro disponible y presencia de sustancias orgánicas.

Desinfección

La desinfección del agua potable es esencial si se trata de proteger al público de las enfermedades infecciosas relacionadas al agua, así como enfermedades parásitas. Son varios los desinfectantes utilizados, tales como el cloro libre, las cloraminas, el dióxido de cloro y el ozono. Cada uno de los desinfectantes utilizados tiene sus ventajas y desventajas en términos de costos, eficacia, estabilidad, facilidad de aplicación y formación de sub-productos.

El cloro es el desinfectante más usado para el tratamiento del agua potable y la residual doméstica porque destruye los organismos a ser inactivados mediante la oxidación de la materia orgánica, manganeso, hierro y ácido sulfhídrico. Se utiliza en forma de cloro libre (de acción rápida) y de cloro combinado o monocloraminas (de acción lenta). El cloro puede ser suministrado en muchas formas que incluyen el gas cloro, las soluciones de hipoclorito y otros compuestos clorados en forma sólida o líquida. Algunas de las alternativas de desinfección incluyen la ozonización y la desinfección con radiación ultravioleta (UV). La selección de un desinfectante adecuado para una instalación de tratamiento depende de los siguientes criterios (EPA, 1999):

- La capacidad de penetrar y destruir los gérmenes infecciosos en condiciones normales de operación.
- La facilidad y seguridad en el manejo, el almacenamiento y el transporte.
- La ausencia de residuos tóxicos y de compuestos mutagénicos o carcinógenos.
- Costos razonables de inversión de capital y de operación y mantenimiento (O/M).

El cloro es un desinfectante que tiene ciertos limitantes en términos de salubridad y seguridad, pero al mismo tiempo tiene un largo historial como un desinfectante efectivo. Antes de decidir si el cloro reúne las condiciones para su uso por parte de una municipalidad es necesario entender las ventajas y desventajas de este producto.

Su aplicación (figura 26) como oxidante ha sido limitada debido a la formación de compuestos orgánicos halogenados, en especial el cloroformo y otros trihalometanos (THM). Como oxidante, el cloro remueve eficientemente el cianuro (Jiménez, 2001).



Figura 26. Cloración con gas en un sistema de agua potable

Cuando el gas de cloro y las sales de hipoclorito se añaden al agua, se produce la hidrólisis y la ionización para formar ácido hipocloroso (HOCl) e iones de hipoclorito (OCl^-), también conocidos como cloro libre disponible. El cloro libre reacciona rápidamente con el amoníaco en efluentes no nitrificados para formar compuestos combinados de cloro, principalmente monocloramina, la cual es la forma de cloro que predomina en la práctica (EPA, 1999). En presencia de materia orgánica, se pueden producir subproductos de desinfección que incluyen a los trihalometanos, los cuales son carcinógenos.

Los subproductos de la desinfección con cloro (DBPs, por sus siglas en inglés) se forman cuando los productos químicos a base de cloro se agregan al agua para eliminar microorganismos nocivos. El cloro, las cloraminas y dióxido de cloro son utilizados con más frecuencia y controlan los microorganismos en la planta de tratamiento y en las tuberías de distribución de agua. Los productos químicos de desinfección reaccionan con los materiales orgánicos naturalmente presentes en el agua sin tratar, pero la mayoría de las instalaciones de tratamiento reduce la cantidad de materia orgánica antes del tratamiento con desinfectantes (CAREX, 2009).

Los niveles de trihalometanos son generalmente más altos en agua superficial tratada que en agua subterránea tratada, debido al alto contenido de materia orgánica contenida en lagos y ríos y será mayor en los meses más cálidos, debido a las altas concentraciones de materiales orgánicos precursores en el agua cruda y especialmente porque la tasa de formación de subproductos de la desinfección se incrementa a mayores temperaturas (Health Canada, 2006).

Las variables ambientales que afectan a la toxicidad del cloro residual son el pH y la temperatura del agua receptora. Debido al aumento de cloro libre disponible, la toxicidad aumenta con la disminución del pH. La toxicidad también tiende a aumentar con el aumento de la temperatura (EPA, 1999). La figura 27 muestra que a 20°C y un pH de 7.5 existe una distribución equitativa de ácido hipocloroso (HOCl) y de iones de hipoclorito (OCl^-). A pH 8, el 20% de cloro libre está presente como HOCl , y el 80% como OCl^- . A pH 6.5, el 90% está presente como HOCl (Morris, 1982). Como muestra la gráfica, a diferentes temperaturas es diferente la proporción de uno y otro, de tal modo que se afectaría la

eficiencia. A mayor temperatura decrece la presencia de iones hipoclorito (OCl^-), quienes efectúan la desinfección.

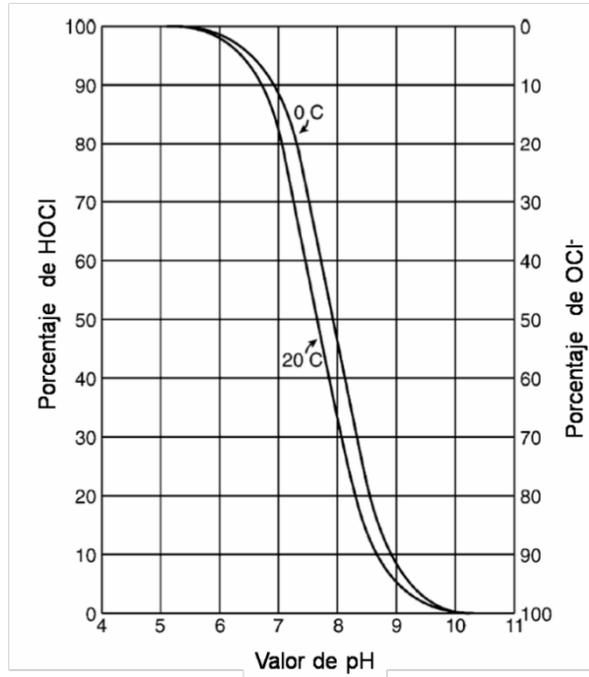
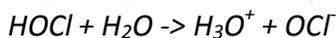


Figura 27. Distribución del ácido hipocloroso y los iones de hipoclorito en agua a distintos valores de pH y temperatura (Morris, 1982)

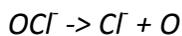
Cuando el cloro se adiciona al agua se forman ácido hipocloroso:



Dependiendo del valor de pH, el HOCl se transforma parcialmente en iones de hipoclorito:



Esto se disocia en átomos de cloro y oxígeno:



Los primeros estudios sugirieron una asociación entre el consumo de agua clorada y el cáncer de vejiga, de intestino grueso y de recto en los seres humanos. Estudios posteriores hechos a finales de los 90's sugieren asociaciones entre DBPs y el cáncer cerebral, rectal y de colon, aunque los datos no son suficientemente fiables para confirmar una relación dosis-respuesta.

1.5.6. Otros impactos

Acidificación e incremento del nivel del mar. La acidificación del agua de mar por una mayor disolución de dióxido de carbono en el agua de mar ha reducido el pH en dos décimas en los últimos 15 años. Debe recordarse que la escala es logarítmica y por tanto, un cambio de una décima corresponde a un porcentaje significativo. La acidificación reduce la calcificación de conchas y esqueletos, irrumpe los ecosistemas irreversiblemente especialmente en los altamente sensibles a cambios de pH como los arrecifes coralinos- y daña también moluscos y ciertos tipos de plancton (Stern, 2006). Se calcula que para 2100, el cambio de pH puede ser del orden de 0.5 unidades, lo que equivale a un 300% más de protones que antes de 1990. En Hawaii (figura 28) el pH superficial del mar se redujo de 8.12 a 8.08 en 20 años (Dore *et al.*, 2009). Si bien se ha documentado para el océano concentraciones más estables que el agua dulce, la reducción del pH permite una mayor disolución de metales.

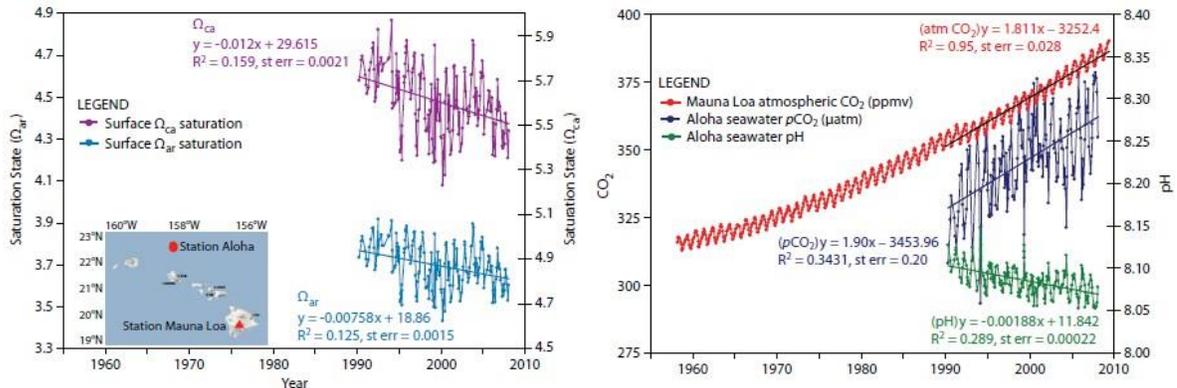


Figura 28. Relación pH y dióxido de carbono en agua de mar, estación Mauna Loa (Dore *et al.*, 2009)

El IPCC ha hablado de incremento en el nivel del mar (figura 29), con gran certidumbre hacia su ocurrencia pero de magnitud incierta, lo que supondrá para los cuerpos de agua es el incremento en la tendencia de intrusión salina en acuíferos costeros y el incremento de salinidad en los cuerpos de agua costeros con modificación a su régimen hidrológico.



Figura 29. Inundaciones por fuertes lluvias

Así mismo, para el océano, se ha demostrado un incremento de las zonas anóxicas del 15% (Stramma *et al.*, 2008) en toda la historia de las mediciones (figura 30).

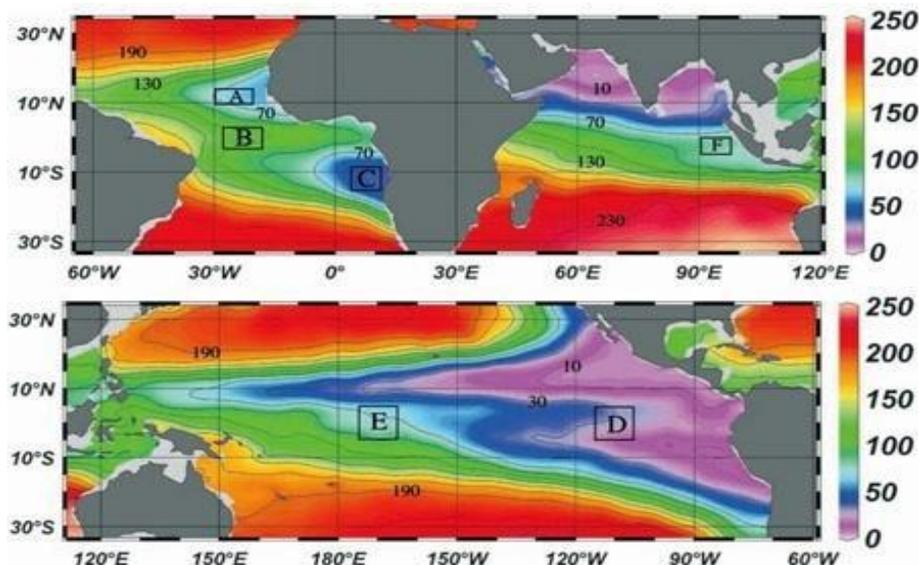


Figura 30. Promedio climatológico de las concentraciones de oxígeno disuelto (Stramma *et al.*, 2008)

1.6. Referencias bibliográficas

- Anderson L. and K.W. Bruland. 1991. Biogeochemistry of arsenic in natural waters: the importance of methylated species. *Environmental Science Technology*. 25: 420-427.
- Appelo C.A.J. and D. Postma. 1993. *Geochemistry, groundwater and pollution*. Ed. Balkema. 536 pp.
- Australian Drinking Water Guidelines 6. 2004. National Water Quality Management Strategy. Natural Resource Management Ministerial Council. NHMRC. <http://www.nhmrc.gov.au>.
- Barak P. 1999. Essential elements for plant growth. Department of soil Science. U Wisconsin at Madison. On line at <http://www.soils.wisc.edu/~barak/soilscience326/essential.htm>
- Bates B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu y J.P. Palutikof, Eds., 2008. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.
- Beman J., Chow C., King A., Feng Y., Fuhrman J., Andersson A., Bates N., Popp B., and Hutchins D. (2011): Global declines in oceanic nitrification rates as a consequence of ocean acidification. *PNAS*. Vol. 108., No. 1, Pag. 208-213.
- Breuer L., R. Kiese y K. Butterbach-Bahl. 2002. *J Soil Science*, 66, 834-844.
- Brient L., C. Vézic y G. Bertru. 2001. Université de Rennes I. Francia. Disponible en: www.euabretagne.fr/lecture
- CAREX Canada. 2009. Carcinogen profile-Chlorination by-products. Disponible en: <http://www.carexcanada.ca/en/chlorination.pdf>

- Chapman D. 1996. Water Quality Assessments. A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring. Chapman & Hall. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, World Health Organization and United Nations Environment Program. Great Britain. Second Edition 651 pp.
- CONAGUA. 2007. Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales Eds. Rodríguez, T. J., Jaimes, M. O. México, 263 pp
- CONAGUA-IMTA. 2000. Serie Autodidáctica de Medición de la Calidad del Agua, 23 pp.
- Conde A.C. y C. Gay. 2008. Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional Primera versión. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, 105 pp.
- Cromwell J.E., J.B. Smith y R.S. Raucher. 2007. Association of Metropolitan Water Agencies. Washington. D.C. 20 pp.
- Cullen W.R. and K.J. Reimer. 1989. Environmental Arsenic Chemistry. Chem Rev. 89, 713-764
- Dachs J., R. Lohmann, W.A. Ockenden, L. Méjanelle, S.J. Eisenreich y K.C. Jones. 2002. Environ. Sci. Technol. 36, 4229-4237.
- Dokulil M.T. y K. Teubner. 2000. Hydrobiologia. 438:1-12.
- Dore J., Lukas R., Sadler D., Church M., and Karl D. 2009. Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific. PNAS. Vol. 106., No. 30, Pag. 12235-12240.
- Dowdle P.R., A.M. Laverman and R.S. Oremland. 1996. Bacterial dissimilatory reduction of Arsenic (V) to Arsenic (III) in anoxic sediments. Appl Environ Microbiol 62, 5, 1664-1669.
- Dyer J.A., N.C. Scrivner and S.K. Dentel. 1998. A practical guide for determining the solubility of metal hydroxides and oxides in water. E.I. DuPont de Nemours and Co., Wilmington, DE, USA. Environmental Progress, 17(1), 1-8.
- Environment Protection Agency (EPA). 1999. 1999 Update of Ambient Water Quality Criteria for Ammonia. EPA-822-R-99-014. Washington D.C. 153 pp.
- Environmental Protection Agency. 2007. Framework for Metals Risk Assessment. 2007. EPA 120/R-07/001. Washington. 171 pp
- Estadísticas del agua en México 2010, CONAGUA. Subdirección general de agua potable, drenaje y saneamiento
- European Environment Agency (EEA). 2007. Climate change and water adaptation issues. EEA Tech. Report no. 2/2007, Copenhagen, Denmark.
- Friberg L, T Kjellström and GF Nordberg. 1986. Cadmium. In: Friberg L, GF Nordberg and VB Vouk. Handbook on the toxicology of metals. Elsevier Amsterdam. 662-679 pp.
- Gleick P.H. y D.B. Adams. 2000. The Report of the Water Sector Assessment Team of the National Assessment of the Potential Consequences of Climate Variability and Change. USCC.
- Hagelberg E. 2006. The matrix dependent solubility and speciation of mercury. Örebro University. Sweden. 31 pp.
- Hammond D. y R. Pryce. 2007. Science Report SC060017/SR. Environment Agency. Gran Bretaña. 111 pp.
- Hari R. E., D.M. Livingstone, R. Siber, P. Burkhardt-Holm y H. Güttinger. 2006. Global Change Biology, 12, 10-26.

- Health Canada. 2006. Guidelines for Canadian Drinking Water Quality Guideline Technical Document Trihalomethanes. Disponible en: <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/trihalomethanes/index-eng.php>
- Heide-Jorgensen M-P., T. Härkönen, R. Dietz y P.M. Thompson. 1992. Dis. Aquat. Org. 13, 37-42.
- Huerta Diaz M.A., A. Tessier and R. Carignan. 1998. Geochemistry of trace metals associated with reduced sulfur in freshwater sediments. Appl. Geochemistry, 13, 2, 213-233.
- IPCC. 2001. Scientific Basis. Third Evaluation Report. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Ishinishi N., J.C. Ng and A. Shraim. 2003. A global health problem caused by arsenic from natural sources. Chemosphere 52 1353-1359 pp.
- Jackson D.A., P.R. Peres-Neto and J.D. Olden. 2001. What controls who is where in freshwater fish communities, the roles of biotic, abiotic, and spatial factors. Can Jour of Fisheries and Aquatic Sciences. 58, 1, 157-166.
- Jacob J. 2008. Segundo Panel internacional sobre cambio climático: La zona costera y su impacto ecológico, económico y social. INECOL, Xalapa, Ver. 16 de octubre.
- Jacoby H.D. 1990. Water Quality. In: Climate Change and U.S. Water Resources, P. E. Waggoner (Editor). John Wiley and Sons, New York, New York, pp. 307-328.
- Jeney G. y J. Nemcsók. 1992. Aquaculture 104:149-156.
- Jiménez C. B. 2001. La contaminación en México. Instituto de Ingeniería UNAM. Ed. Limusa FEMSA y Colegio de Ingenieros Ambientales de México A.C. 154 pp.
- Kiparsky M. and P.H. Gleick. 2003. Climate change and California Water Resources: a Survey and summary of the literature. California Energy Commission Public Interest Energy Research Programm. 65 pp.
- Koycheva J. and B. Karney. 2009. Stream Water temperature and climate change- An ecological perspective. International Symposium on Water management and Hydraulic Engineering. Macedonia. 1-5 Septiembre. 771-777 pp.
- L'vovich, M.I., White G.F. con la colaboración de Belyaer A.V., Kindler J, Koronkevic N.I., Lee T.R. y Voropaer G.V. 1995. "Use and transformation of terrestrial water systems". En: B.L. Turner II, (ed). The Earth as transformed by human action. Cambridge University Press.
- Lanno R.P. (ed). 2003. Contaminated soils: from soil-chemical interactions to ecosystem management. Pensacola. SETAC Press. 427 pp.
- Leal M.T., D.V. Millán y C. Vázquez. 2009. Impact of climate change on quality of water. FCO/IMTA.
- Levitus S., J.I. Antonov, T.P. Boyer y C. Stephens. 2000. Science. 287, 2225-2259.
- MacDonald R.W., D. Mackay, y F. Li y B. Hickie. 2003. Human and Ecological Risk Assess. 9, 643-660.
- MacDonald R.W., T. Harner y J. Fyfe. 2005. Sci. Total Environ. 342, 5-86.
- Magaña O.V. 2008. Mapas elaborados para los escenarios A2 y A1B, propuestos por el IPCC, que muestran proyecciones para las climatologías 2020s, 2050s y 2080s. Instituto de Ciencias de la Atmósfera UNAM.

- Magaña O.V. y E. Caetano. 2007. Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector. Instituto Nacional de Ecología – SEMARNAT. Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/cclimatico/descargas/e2007o.pdf>
- Manzione M.A. and D.T. Merrill. 1989. Trace metals removal by iron coprecipitation: Field evaluation. Technical Report EPRI-GS-6438. 379 pp.
- Martínez A. 2002. En: Memorias del Encuentro sobre uso y resultados de la aplicación de tecnologías económicas para la purificación de aguas en América Latina. Buenos Aires, 8 y 9 de noviembre.
- McRae C.M. 1995. Geochemistry and origin of arsenic-rich pyrite in the Uphapee Creek, Macon County, Alabama. M.S. thesis, Department of Geology, Auburn University, Alabama.
- Milly P.C.D., K.A. Dunne and A.V. Vecchia. 2005. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*. 438, 347-350.
- Mitchell R.J., M. D. Morecroft, M. Acreman, H.Q.P. Crick, M. Frost, M. Harley, I.M.D. Maclean, O. Mountford, J. Piper, H. Pointer, M.M. Rehfish, L.C. Ross, R. J. Smithers, A. Stott, C.A. Walmsley, O. Watts y E. Wilson. 2007. Department for Environment, Food and Rural Areas. United Kingdom. Report No. CR0327. 194 pp
- Moore J.N., W.H. Ficklin and C. Johns. 1988. Partitioning of arsenic and metals in reducing sulphides sediment. *Environ. Sci. Technol.*, 22, 432-437 pp.
- Moore M.V., M.L. Pace, J.R. Mather, P.S. Murdoch, R.W. Howarth, C.L. Folt, C.Y. Chen, H.F. Hemond, P.A. Flebbe, y C.T. Driscoll. 1997. *Hydrological Processes*, Vol. 11, pp. 925-947.
- Mulholland P.J., G.R. Best, C.C. Coutant, G.M. Hornsberger, J.L. Meyer, P.J. Robinson, J.R. Stenberg, R.E. Turner, F. Vera-Herrera and R. Wetzel. 1997. Effects of Climate Change on Freshwater Ecosystems of the South-Eastern United States and the Gulf Coast of Mexico. *Hydrological Processes* 11:949-970.
- Nash L. 1993. Water quality and health. In Gleick PH (ed) *Water in Crisis: A guide to the world's fresh water resource*. Oxford University Press. New York. 25-39 pp.
- National Research Council Canada. 1982. Environment Canada.
- Nemcsók J., L. Orbán, B. Asztalos y É. Vig. 1987. *Bull Environ Contam Toxicol* 39:370-378. Paquin
- P.R., K. Farley, R.C. Santore, C.D. Kavvas, K.G. Mooney, R.P. Winfield, K.B. Wu and D.M. Di Toro (eds). 2003. *Metals in aquatic systems. A review of exposure, bioaccumulation, and toxicity models*. Pensacola, SETAC Press. 168 pp.
- Parkhurst D.L. and C.A.J. Appelo. 1999. User's guide to PHREEQC (version 2)-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations.
- Peryea F.J. and R. Kammereck. 1997. Phosphate-enhanced movement of arsenic out of lead arsenate-contaminated topsoil and through uncontaminated soil. *Water, Air & Soil Pollution*. 93,
- Rabalais N.N., R.E. Turner, R.J. Díaz and D. Justic. 2009. Global change and eutrophication of coastal waters. – *ICES Journal of Marine Science*, 66: 1528–1537.

- Rao D., G. V. Prasada y M.A.Q. Khan. 2000. *Water Environment Research*, 72, 2, 175-178.
- Rathore R. S. y Khangarot B. S. 2002. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 53 (1), 27-36 pp.
- Reichert B.K., R. Schnur y L. Bengtsson. 2002. Global ocean warming tied to anthropogenic forcing. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29 (11), 10.1029/2001GL013954.
- Restrepo J.D. and B. Kjerfve. 2002. The San Juan Delta, Colombia: tides, circulations, and salt dispersion. *Continental Shelf Research*. 22, 8, 1249-1267.
- Ross P.S. 2002. *Hum. Ecol. Risk Assess.* 8, 277-292.
- Sande P., J.M. Mirás, E. Vidal y A. Paz. 2005. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol VII*. F.J. Samper Calvete y A. Paz González.
- Schindler D.W. 1997. Widespread Effects of Climatic Warming on Freshwater Ecosystems in North America. *Hydrological Processes* 11:225-251.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. 1989. *Criterios Ecológicos de Calidad del Agua*. Diario Oficial de la Federación. 13 de diciembre.
- Stern N. 2006. *Stern review on the Economics of Climate Change*. Disponible en: www.sternreview.org.uk
- Stramma L., Johnson G., Sprintall J. and Mohrholz V. 2008. Expanding Oxygen-Minimum Zones in the Tropical Oceans. *Science* 320, 655.
- Stumm W. and J.J. Morgan. 1996. *Aquatic Chemistry: an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters*. John Wiley & Sons. Nueva York. 583 pp.
- Ureña-Amate M.D., M. Socías-Viciano, E González-Pradas y M. Saifi. 2004. Effects of ionic strength and temperatura on adsorption of Atrazine by a heat treated kerolite. *Chemosphere* 59, 1, 69-74.
- Vega-Gleason S. 2001. Riesgo sanitario ambiental por la presencia de arsénico y fluoruros en los acuíferos de México. Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, México D.F.
- Volunteer Water Quality Monitoring Program. 2009. Missouri Department of Natural Resources. Chapter 7 Water Chemistry, Introduction to Volunteer Water Quality Monitoring Training Notebook En: <http://www.dnr.mo.gov/env/wpp/vmqmp/vwqm-intro07.pdf> Consulted on: 17/10/2009.
- Welch E.B, Jacoby J.M. Horner R.R. and Seeley M.R. 1998. Nuisance biomass levels of periphytic algae in streams. *Hidrobiologia*. 157: 161-168.
- Zhu T., M.W. Jenkins y J.R. Lund. 2006. PIER Project Report Number 2006-003. California Energy Commission. 60 pp.

DETECCIÓN DE IMPACTOS EN LA CALIDAD DEL AGUA EN MÉXICO

Con el objeto de contribuir en la detección de impactos en México, el actual capítulo presenta el desarrollo de una guía general que provee una metodología de detección de impactos en la calidad del agua como consecuencia del cambio climático. La metodología se utilizó, en primera instancia, para determinar la correlación entre la temperatura del aire y temperatura del agua, y a la postre para estimar la variación de la temperatura en los cuerpos superficiales de agua para el periodo 1991-2008, tomando como base el periodo 1975-1990. El análisis se realizó con la ayuda de las bases de datos climatológica y de calidad del agua proporcionada por la CONAGUA.

Los modelos que se han utilizado para predecir los cambios en la temperatura del agua se pueden clasificar en dos grupos: 1) Los modelos deterministas que tratan de simular explícitamente los procesos que rigen la temperatura del agua, estos modelos generalmente calculan el transporte e intercambio de calor del cuerpo de agua a través de la interfase agua – aire. 2) El análisis inferencial de datos que es un cuerpo entero de métodos estadísticos tales como la estimación, la predicción, el contraste de hipótesis y la toma de decisiones basadas en un modelo estocástico (o distribución de la probabilidad) específico, a partir de los datos observados y con propósitos determinados. Dentro de estos métodos estadísticos están los estudios que utilizan ecuaciones de regresión para determinar la temperatura del agua en función de variables independientes. Los estudios que a la fecha se han realizado han utilizado la temperatura del aire como variable independiente, ya que ambas variables por lo general tienen estrecha correlación.

La metodología utilizada en este caso se enfoca en el análisis inferencial, con el fin de reducir y describir un conjunto de datos que se tienen, buscando fundamentalmente presentarlos de forma más manejable y facilitar su interpretación.

Una vez obtenidos los datos de calidad del agua, los sitios de estudio se seleccionaron con base al mayor tiempo de operación y cantidad de datos de los sitios de monitoreo. Terminada la selección de sitios, el paso final fue el análisis estadístico de cada uno de ellos.

2.1. Obtención de registros

2.1.1. Fuentes de información de calidad del agua

Para obtener la información referente a datos de calidad del agua, se recurrió a la red de monitoreo del país que coordina la CONAGUA, quien ha conformado una base de datos. Institucionalmente se solicitó la información y ésta fue proporcionada por la Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua de la CONAGUA. La base de datos está integrada por tres archivos los que fueron agrupados en un archivo en Excel con la finalidad de hacer amigable su manejo.

2.1.2. Fuentes de información climatológica

Es esencial como parte de la metodología contar con sitios de referencia que hayan experimentado todas las influencias climatológicas generales a los sitios de estudio, con el fin de encontrar coherencias exclusivas a factores climatológicos. En el estudio se utilizó como sitios de referencia las estaciones climatológicas operadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), cuya base de datos fue proporcionada para fines del estudio.

2.2. Metodología de detección de impactos

La metodología se conforma de las etapas mostradas en la figura 31, y es una transformación de la *Guidance on Metadata and Homogenization*, desarrollada en el campo de meteorología (Aguilar *et al.*, 2003) con el objetivo de adaptar esta experiencia en el contexto del manejo de los datos de calidad del agua.

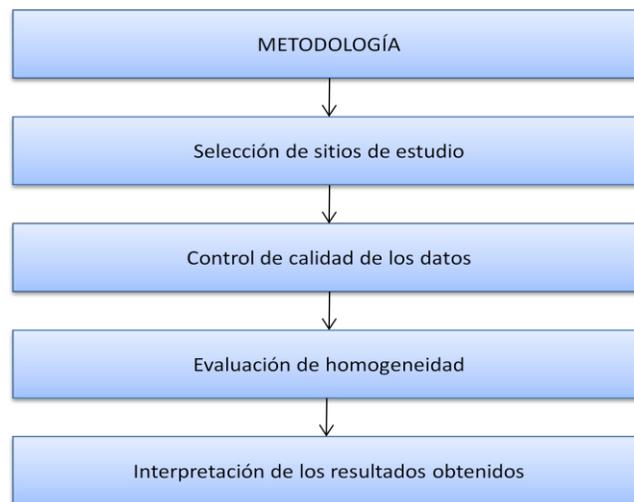


Figura 31. Etapas en las que se desarrolla la metodología

2.2.1. Selección de los sitios a estudio

Hasta el 2008, la Red Nacional de Monitoreo a cargo de la CONAGUA, contó con 1 186 sitios, distribuidos a lo largo y ancho del país, estas estaciones pueden estar operando o no y están ubicadas en aguas epicontinentales, costeras y subterráneas. Es necesario definir con qué estaciones trabajar. En la figura 32 se muestra el proceso de selección de los sitios a estudio.

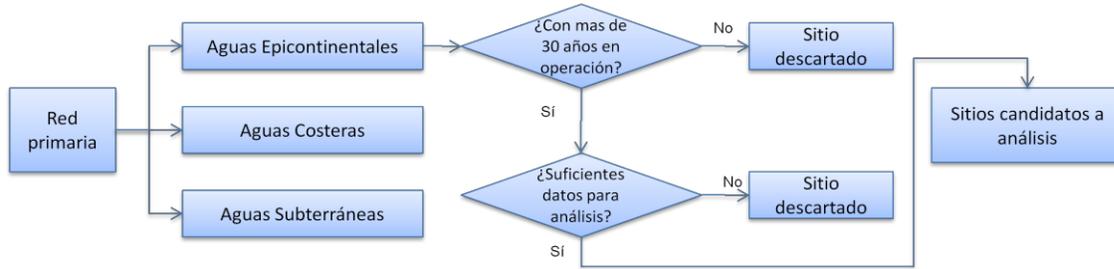


Figura 32. Flujograma del proceso de selección de los sitios a estudio

2.2.2. Control de calidad de los datos

El control de calidad (CC) se conforma por una serie de procedimientos que permiten detectar e identificar los errores cometidos en el proceso de grabar, manipular, formatear, transmitir y archivar datos. El objetivo es evaluar la validez de las observaciones y mejorar el uso de los datos, así como eliminar datos erróneos y detectar cualquier falta de homogeneidad estadística.

En este proceso, se recurre a la gráfica de control que es una herramienta estadística utilizada para monitorear y detectar los cambios entre las características de cualquier tipo con respecto al tiempo y detectar rápidamente cualquier anomalía respecto al patrón correcto, en la figura 33 se muestran los elementos que conforman una gráfica de control.

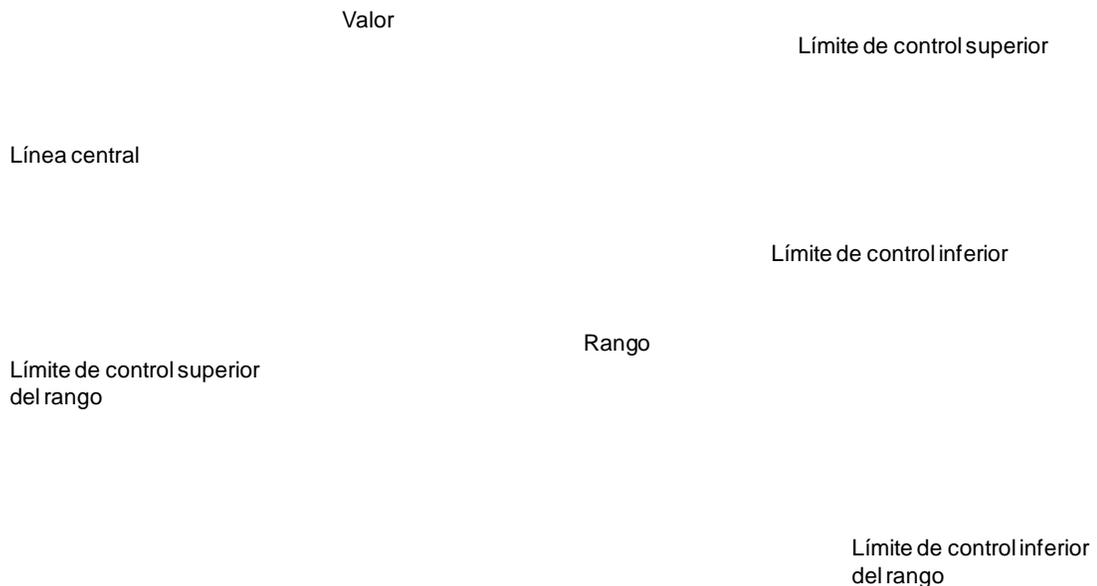




Figura 33. Gráfica de control de promedios y rangos móviles



Embajada Británica



Instituto Nacional de Ecología



El análisis en la gráfica de control se efectúa de forma visual, representando la variabilidad de las mediciones para detectar la presencia de un exceso de variabilidad no esperada sólo por azar, y probablemente atribuible a alguna causa específica que se podrá investigar y, si es posible, corregir.

A continuación se muestra en la figura 34, los procedimientos aplicados en el proceso de control de calidad de los datos.

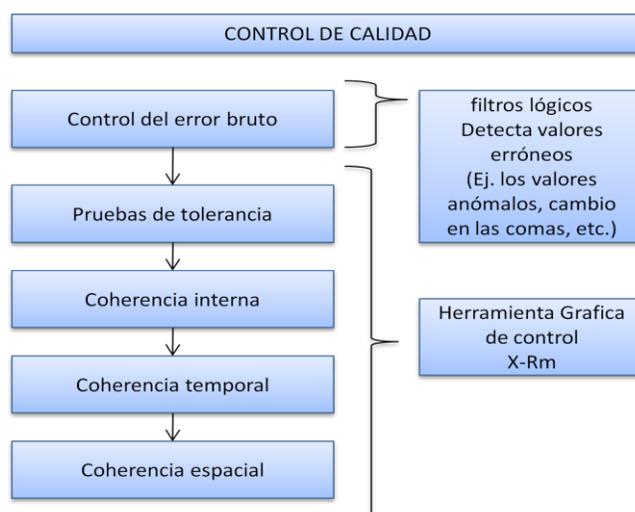


Figura 34. Proceso de control de calidad de los datos

La descripción de los procesos se indica a continuación.

Control del error bruto

Se trata de un filtro lógico y se utiliza para detectar valores erróneos. Por ejemplo, los valores anómalos, cambio en las comas, errores de dedo, entre otros.

Pruebas de tolerancia

Se establecen los límites de control superior e inferior calculados estadísticamente, con el fin de identificar los valores atípicos u aberrantes y su probable exclusión de la base de datos. En esta etapa se grafican los valores en la gráfica de control.

Coherencia interna

Es el proceso de validar los datos realizando una inspección de los mismos para identificar la coherencia entre los parámetros asociados dentro de cada registro. Por ejemplo, valores de temperatura mínima mayores a la temperatura máxima en la misma estación.

Coherencia temporal

Es cualquier prueba que permita detectar si los valores observados son coherentes en cualquier intervalo de tiempo y evaluar el cambio de signo a partir de una observación a la siguiente. Ejemplo, encontrar tendencias positivas de temperatura del agua en meses calurosos, es una coherencia temporal, lo que en meses fríos sería una incoherencia temporal. Identificación de tendencias, corridas o sesgos pueden servir como pruebas de coherencia temporal.

Coherencia espacial

Prueba que ayuda a determinar si cada observación es consistente con las tomadas en el mismo momento con las estaciones vecinas, afectadas por condiciones climatológicas similares. Como la variable de estudio es la temperatura del agua, se toma la estación climatológica como estación vecina, si ésta se encuentra en un radio no mayor a cinco kilómetros. La temperatura de una estación de calidad del agua con respecto a la temperatura de una estación climatológica puede esperar condiciones climatológicas similares.

2.2.3. Evaluación de homogeneidad

Las pruebas de homogeneidad se realizan para garantizar que las fluctuaciones de tiempo en los datos sólo se deben a condiciones climatológicas. La homogeneidad en el tiempo de un registro de calidad del agua es esencial en la investigación, sobre todo cuando los datos se utilizan para validar los modelos, las estimaciones por correlaciones o para evaluar el cambio climático.

En la figura 35, se presenta un diagrama que proporciona orientación sobre cómo se hizo frente a los problemas de la falta de homogeneidad en los datos.

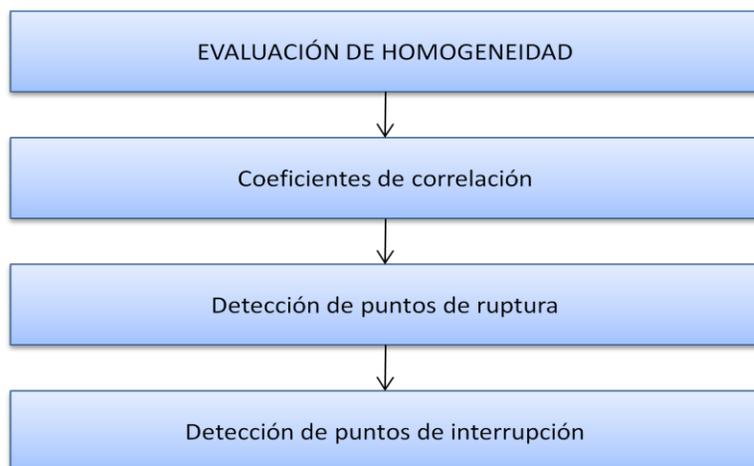


Figura 35. Proceso de evaluación de homogeneidad de la serie de datos

Parámetro que permite determinar el grado de correlación lineal que existe entre dos variables aleatorias. En la práctica, mide hasta qué punto las dos variables pueden relacionarse mediante una función lineal de tipo $y=ax+b$. Dos consideraciones sobre el coeficiente de correlación debido a que se trata de una medida matemática que debe ser interpretada:

- a) Aunque un alto grado de correlación indique buena aproximación a un modelo matemático lineal, su interpretación puede no tener ningún sentido.
- b) Aunque el grado de correlación sea cercano a cero (pobres aproximaciones al modelo lineal) eso no significa que no haya relación entre las dos variables. Puede ser que dicha relación sea no lineal.

Una variable aleatoria y que haya experimentado influencias climáticas generales del sitio de estudio, es la temperatura ambiente obtenida de la estación climatológica más cercana con el fin de encontrar alguna relación entre la temperatura del agua y temperatura del ambiente. Como ayuda visual es importante comparar las series de tiempo de ambos parámetros, con el fin de encontrar diferencias en su patrón de comportamiento. Dichas diferencias en el patrón de comportamiento serán ajenas a influencias climáticas. Las estaciones climatológicas tienen un área representativa de cinco kilómetros de radio aproximadamente en terreno plano, excepto en terreno montañoso (OMM, 2010), por lo que se debe considerar esta regla para la selección de la estación climatológica que aportará los datos de la temperatura ambiente.

Detección de puntos de ruptura

Es el procedimiento de decidir cuándo se trata de eventos que producen un salto repentino en la serie. Se identifican visualmente en la gráfica de control evidenciados por patrones de inestabilidad tales como: adhesiones a la línea central o límites de control y sesgos.

Detección de puntos de interrupción

Consiste en identificar los espacios de ruptura por interrupción, debido a la falta de datos en intervalos de tiempo considerablemente largos. Son muy evidentes ya que se presentan series discontinuas.

Una vez que la identificación de punto de interrupción ha finalizado, el siguiente paso es decidir qué puntos de corte van a ser aceptados como inhomogeneidades reales. En primer lugar se busca una causa física posible en los metadatos. Cuando no se encuentra, la opinión de los expertos es necesaria para distinguir entre los puntos de interrupción real y falsos positivos. La gráfica de control es una herramienta para trazar la diferencia o relación de series de tiempo, ya que su inspección visual permite evaluar objetivamente la posibilidad de encontrar los puntos de interrupción y, a la inversa, dar cuenta de los problemas no detectados. De hecho, algunos científicos calificados no usan ninguna prueba estadística para encontrar los puntos de ruptura y se basan sólo en la evaluación de la diferencia o relación de parcelas de series de tiempo.

2.2.4. Interpretación de patrones de comportamiento de las series de tiempo

La parte más importante del análisis de la gráfica de control, es la referente a su interpretación y esto dependerá del comportamiento del patrón que obedezca la serie de tiempo.

La versatilidad de esta herramienta permite detectar puntos de interrupción y al mismo tiempo, interpretar de la manera correcta los patrones de comportamiento, los que cómo su nombre lo indica son comportamientos específicos que muestran la presencia de causas especiales, tales como puntos fuera de control, tendencias, corridas (series) y adhesiones (línea central o límites de control). Estos patrones se enmarcan en un círculo rojo preferentemente.

Puntos fuera de los límites de control

Son aquellos puntos que tienen valores fuera de los límites de control calculados, véase figura 36.

Interpretación:

- Límites mal calculados
- *Presencia de causas especiales.* Estas causas pueden ser lecturas erróneas, errores de cálculo en el promedio de los valores, monitoreo en condiciones de tiempo y espacio diferente al estándar. Algunas observaciones fuera de control pueden deberse a alguna precipitación significativa que haya ocasionado escurrimientos importantes, recordar que este factor proporciona cambios repentinos en la temperatura y/o aumentos repentinos de temperatura cuando la estación está cerca de una zona urbanizada (Nelson y Palmer, 2007).
- La variación entre temperatura y temperatura o la dispersión de la distribución ha incrementado.
- Rotación de las personas que efectúan el muestreo y la medición.
- Cambios en la forma de efectuar el monitoreo.

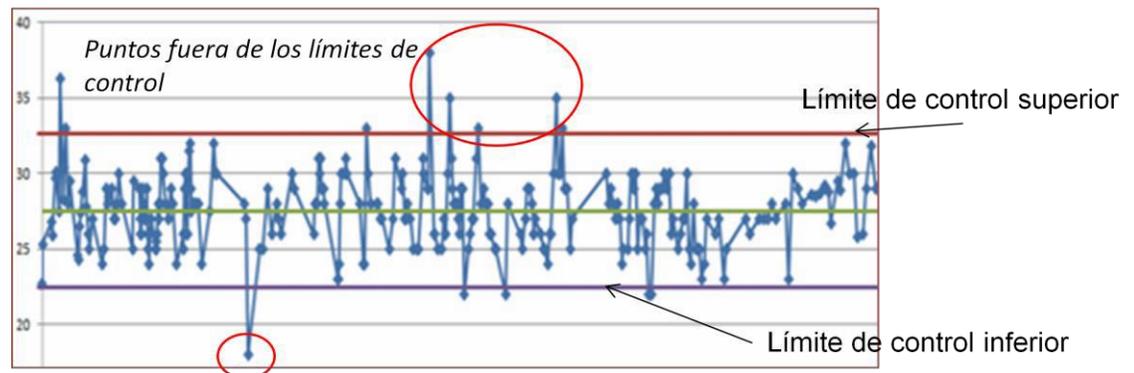


Figura 36. Puntos fuera de los límites de control

Tendencias

Sucesión de siete o más puntos consecutivos ascendentes o descendentes, como se muestra en la figura 37.

Interpretación:

Si la tendencia es ascendente

- La dispersión de la fuente está aumentando. Posiblemente se han presentado cambios importantes en el uso de suelo, la pérdida de vegetación ribereña profundiza el efecto en el proceso de intercambio de calor entre la temperatura media del aire y la temperatura del cuerpo de agua. La industrialización de la zona también puede influir en una tendencia ascendente de la temperatura del agua. Otro factor importante que marca tendencias ascendentes son los cambios en la temporalidad estacional, marcando ligeras tendencias ascendentes, principalmente durante los meses más calientes.

Si la tendencia es descendente

- La dispersión de la fuente está aumentando. Frecuentemente se observa cuando se analizan los promedios mensuales, ya que existen tendencias descendentes durante los meses fríos del año. Cuando se analizan promedios anuales pudiera existir el caso especial de una tendencia descendente, si es que se llevaron a cabo acciones dentro del sitio como reforestación, tratamiento de descargas de agua residual al cuerpo de agua que pudieran modificar la temperatura del agua, programas de recuperación de caudal, entre otros, pueden llevar a una ligera tendencia descendente de temperatura.

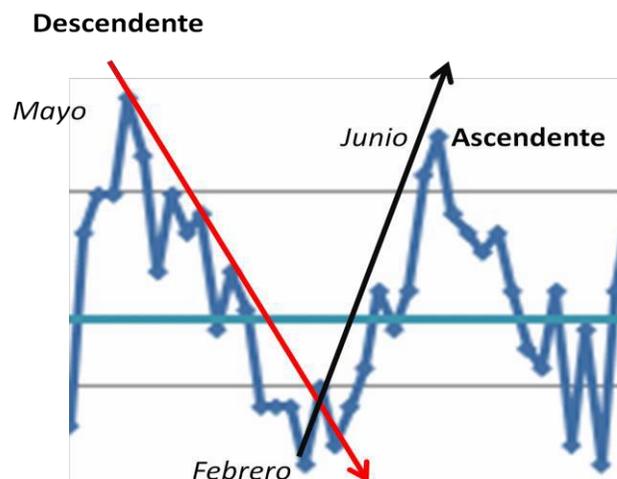


Figura 37. Tendencias descendentes y ascendentes

Corridas o series

Sucesión de siete puntos o más puntos consecutivos por encima o por debajo del promedio ó rango promedio. Si algún punto está sobre la línea central se rompe la corrida o serie. Véase figura 38.

Interpretación:

- Si la sucesión de puntos es por encima del rango promedio, la dispersión del sistema está aumentando (los valores tienen mayor diferencia entre sí). Observable en ciertas estaciones del año (ejemplo, meses más cálidos).
- Si la sucesión de puntos es por debajo del rango promedio, la dispersión del sistema está disminuyendo. Observable en ciertas estaciones del año (ejemplo, meses más fríos).

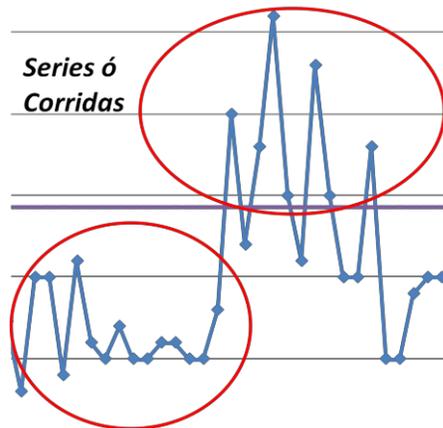


Figura 38. Ejemplo de series ó corridas

Adhesión a la línea central o límites de control

Si el 68% o más de los puntos caen en el tercio central de los límites de control, se tiene una adhesión a la línea central. Si menos del 40% de los puntos caen en un tercio central se tiene una adhesión a los límites de control. Un ejemplo se muestra en la figura 39.

Interpretación

- Los límites de control o los puntos graficados han sido mal calculados o graficados.
- El muestreo o los métodos de muestreo están estratificados, lo que es uno de los problemas más frecuentes en el análisis de los datos de la calidad del agua. Las adhesiones debido a la estratificación de los datos, suele existir debido a que un alto porcentaje de monitoreos están

cargados a ciertas temporadas o ciertos meses del año. Otro factor puede ser la variación del caudal del cuerpo de agua debido a la temporada de lluvias o estiaje.

- Los datos han sido editados, manipulados o inventados.

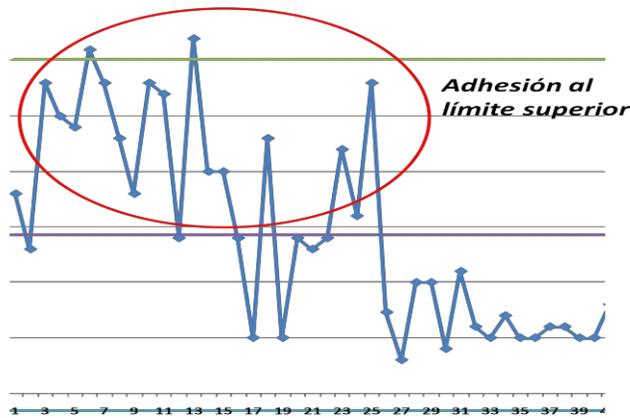


Figura 39. Adhesiones al límite de control

Sesgos

50% de los puntos a cada lado de la línea central. Ver figura 40.

Interpretación

- Los límites de control o los puntos graficados han sido mal calculados o graficados.
- El muestreo o los métodos de muestreo están estratificados. Datos muy cargados a ciertos meses, sesgos muy marcados, posiblemente la estación de monitoreo fue reubicada. Puede suceder que los datos hayan sido agrupados de diferentes fuentes de información o error en la agrupación entre fuente y fuente (diferentes cuerpos de agua).
- Los datos han sido editados, manipulados o inventados.

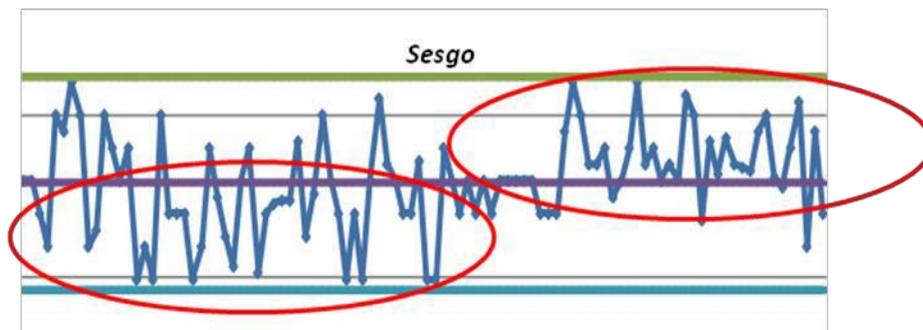


Figura 40. Ejemplo de sesgos

En caso de encontrar en algún gráfico patrones de inestabilidad, se deben analizar de inmediato los siguientes aspectos:

1. Identificar el patrón de inestabilidad en la gráfica de control, encerrando en un círculo preferentemente rojo.
2. Identificar las causas del patrón de inestabilidad que afectaron a la fuente e indicar las acciones correctivas documentándolas en la gráfica.

Recalcular límites de control

Se recalculan los límites de control siempre y cuando exista la oportunidad de mejora y de minimizar la variación atribuida a causas especiales. Una vez identificadas y corregidas las causas especiales de variación, se recalculan los límites de control, excluyendo los efectos de los puntos corregidos. Si un punto es omitido de la gráfica de rangos también se omite de la gráfica de promedios.

2.2.5. Estimación de la variación

Para la estimación de la variación el análisis se divide en tres estimaciones diferentes: la variación entre periodos (1975 - 1990) y (1991 – 2009), variación de promedios anuales y variación por promedios mensuales.

Variación entre periodos (1975-1990) y (1991-2008)

Calcular el promedio de todos los valores de 1975 a 1990 (o los años que se tengan) y comparar contra el promedio de todos los valores entre 1991 y 2009.

La variación de la temperatura será la diferencia entre el promedio del periodo 1991-2009 y el periodo 1975-1990.

Sin embargo, se debe considerar que este tipo de estimación es recomendada cuando se tiene una muestra estadísticamente grande (más de 30 datos representativos), donde los datos tienen la misma consistencia y no existan causas especiales que pudieran interferir en el análisis.

Comparación de promedios anuales

Esta estimación puede ser de utilidad cuando la distribución muestral anual es proporcionalmente representativa durante el tiempo de monitoreo.

Para esta estimación se compara el promedio de los promedios anuales durante el periodo hasta 1990, contra el promedio de los promedios anuales después de 1990. Es importante utilizar una gráfica de control para obtener un diagnóstico visual e identificar la homogeneidad de la serie de datos. Este último gráfico es útil para identificar una tendencia, si es que existe.

Variación por promedios mensuales

Es común encontrar registros con bases de datos estratificados a ciertas épocas del año dejando huecos por largos periodos de tiempo, ocasionando así un análisis erróneo, ya que puede ser que se compare el promedio de un año cargado de datos en el mes de enero contra un año cargado de datos en el mes de junio. Evidentemente, esto ocasionará una variación significativa y pobre correlación de datos, lo que llevará a conclusiones erróneas.

En la figura 41 se observa un claro ejemplo de datos estratificados, donde el promedio anual de la temperatura del agua en 1976 fue de 15,58°C y de 19,82°C en 1979 existe así una variación de 4.24°C, lo que resulta preocupante., Sin embargo, es que la distribución muestral anual en 1976 no es estadísticamente proporcional para efectuar dicha comparación, debido a estratificación (sólo considera los meses de época de estiaje).

Año	Enero	Feb	Mar	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
1975	15	17						19,5	21,5	19	17,5	13	17,50
1976	14,5	14	15	15	16					19			15,58
1977													#DIV/0!
1978	16	18		16	18					23	21	18	18,57
1979	21	18	16	17	22	20	20	24	21	18	21		19,82
1980		18	22	20	19	22	22	20		20	18	16	19,70
1981	18	20	19	20	17			21	25	22	21	23	20,60
1982	16		22		18,533		23	20		26	19		20,65

Figura 41. Ejemplo de datos estratificados

Cuando se presentan estos casos se sugiere estimar la variación de la temperatura por comparación de promedios mensuales de un mismo mes, tomando la información del mes con mayor número de datos.

2.3. Referencias bibliográficas

- Aguilar E., Auer I., Brunet M., Peterson T., y Wieringa J. 2003. Guidance on metadata and homogenization.
- Nelson C. K., Palmer A. M. (2007): Stream temperature surges under urbanization and climate change: data, models, and responses. Journal of the American Water Resources Association, 43, No.2, 440-452.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). 2010

RESULTADOS

Con base en la metodología desarrollada y expuesta en el capítulo anterior, se realizó el análisis de los datos proporcionados por la CONAGUA correspondientes a la Red de Nacional de Monitoreo.

3.1. Selección de sitios de estudio

Se realizó una preselección de los sitios, seleccionando aquellos con un tiempo de operación mayor a 30 años, posteriormente se identificaron cuáles eran los sitios que aún están en operación y que presentaron un mayor número de datos de temperatura del agua. La selección de sitios se limitó a cuerpos de agua epicontinentales, en la tabla cinco, se muestra un resumen del número de sitios identificados conforme al proceso de preselección.

Tabla 5. Resumen de preselección de sitios

Condición	Número de sitios de monitoreo
Con más 30 años en operación	912
Actualmente en operación	215
Epicontinentales en operación con un mínimo de 150 datos proporcionalmente distribuidos	19

3.2. Control de calidad de los metadatos

Con el objeto de realizar el control de calidad de los datos, a los 19 sitios resultantes de la primera etapa se les aplicó un análisis por control de error bruto, con el objetivo de eliminar errores de lógica, de dedo y de transmisión de datos. Una vez realizado este paso se construyó una gráfica de control para cada uno de los sitios y se realizó la prueba de tolerancia, dicha prueba consistió en eliminar los datos atípicos o aberrantes, siendo aquellos que se encontraban fuera de los límites de control calculados con los datos correspondientes a cada sitio.

Una vez eliminados los errores, se realizaron las pruebas de coherencia interna, la cual consistió en comparar la temperatura del agua contra la temperatura diaria mínima ambiente registrada.

Para la prueba de coherencia temporal se analizaron los patrones de inestabilidad, lo que consistió en el análisis de las tendencias ascendentes y descendentes, así como de las corridas o series observadas en sus respectivas gráficas de control.

En el caso de la coherencia espacial se aparearon los datos de temperatura del agua con los datos de la temperatura del aire, y se calculó el coeficiente de correlación de Spearman que es una prueba estadística que permite medir la correlación o asociación de dos variables, estudios anteriores especifican que una correlación mayor a 0.7 puede considerarse significativa para efecto de estudios de este tipo.

En la tabla seis se muestran las pruebas realizadas a cada sitio y su resultado.

Tabla 6. Matriz de aprobación de control de calidad de los datos para cada uno de los sitios

Sitio	Control de calidad				
	Control del error bruto	*Pruebas de tolerancia	Interna	Coherencia Temporal	**Espacial
Catemaco	Si	10	Si	Si	0,94
Chapala	Si	5	Si	Si	0,85
Puente Internacional Reynosa	Si	3	Si	No	
Puente Negro Culiacán	Si	15	Si	No	
Limite Internacional	Si	22	Si	No	
Emiliano López Zamora	Si	14	Si	Si	0,75
Derivadora Morelos	Si	14	Si	Si	0,72
Puente Villahermosa	Si	18	Si	No	
Presa El Carrizo	Si	10	Si	Si	0,71
Puente Chablé	Si	6	Si	No	
Puente Acaponeta	Si	11	Si	No	
Puente Temixco	Si	11	Si	No	
Puente Chalco	Si	13	Si	No	
Puente Puebla	Si	12	Si	No	
Hidrométrica Echeverría	Si	13	Si	No	
Puente San Isidro	Si	7	Si	No	
Puente Coahuayana	Si	5	Si	No	
Puente Tlaxcala-San Martin	Si	8	Si	No	
Presa Villita	Si	6	Si	No	

*Número de datos excluidos después de aplicar prueba de tolerancia
 ** Coeficiente de correlación de Spearman, prueba de coherencia espacial, utilizando como variable dependiente la temperatura ambiente.

En la tabla seis se observa que catorce sitios no aprobaron la coherencia temporal. En la figura 42 se muestra como ejemplo de este caso el sitio Puente Chalco, con incoherencia temporal.

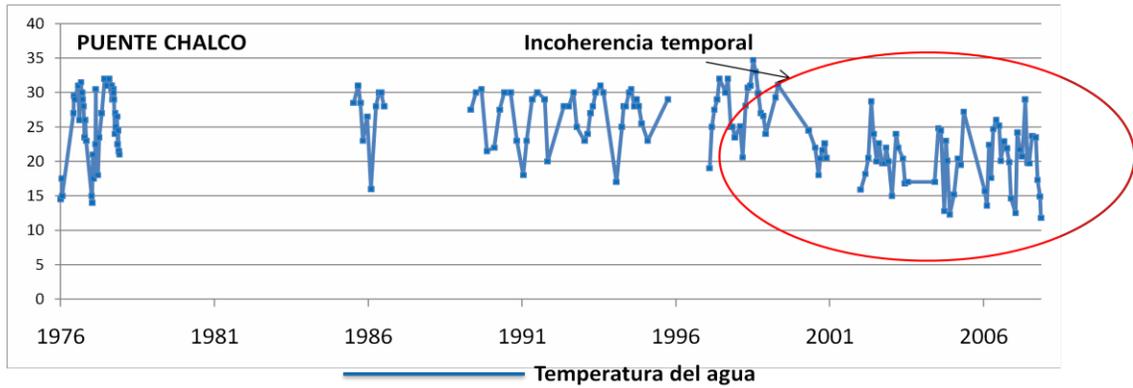


Figura 42. Incoherencia temporal y espacial en el sitio Puente Chalco

Otro ejemplo en la figura 43 en el sitio de Límite internacional, no existe una coherencia temporal (incoherentes con respecto a la temporada climática) en los últimos 15 años de los datos. También se puede observar que los datos están estratificados entre el periodo 1975-1990, lo que dificulta la estimación de la variación de la temperatura del agua en este sitio.

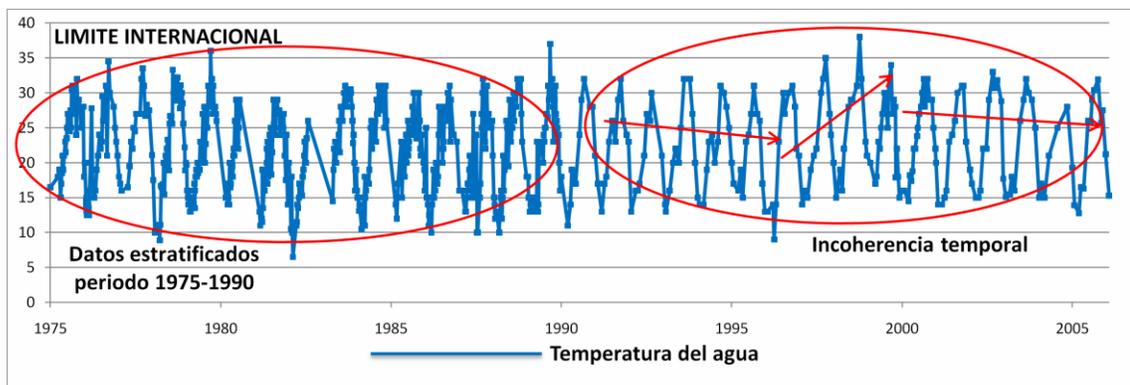


Figura 43. Estratificación de datos en el sitio Límite Internacional

De los 19 sitios, cinco estaciones aprobaron todas las etapas de control de calidad, de las cuales se prosiguió su análisis en la evaluación de homogeneidad que consiste en el estudio de puntos de ruptura, interrupción y patrones de inestabilidad con respecto a su serie de referencia, con el objeto de obtener la serie más homogénea y estimar la posible variación de temperatura del agua con respecto al tiempo.

3.3. Evaluación de homogeneidad

El parámetro de temperatura del agua de los cinco sitios de estudio tiene una fuerte correlación de Spearman con respecto a la temperatura del aire. En la tabla siete, se muestra el coeficiente de correlación de Spearman que representa una correlación positiva entre ambas variables.

Tabla 7. Coeficientes de correlación de Spearman para los cinco sitios aprobados

Sitio	Coefficiente de Correlación de Spearman
Catemaco	0,94
Chapala	0,85
Emiliano López Zamora	0,75
Derivadora Morelos	0,72
Presa El Carrizo	0,71

En la figura 44, se representan las gráficas de las series de tiempo de temperatura del agua y del ambiente, con el objeto de visualizar sus comportamientos y compararlos. Debido a que los datos climatológicos han pasado por pruebas de calidad y homogeneidad, éstos pueden considerarse como una herramienta importante para comparar su patrón de comportamiento con respecto a la temperatura del agua.

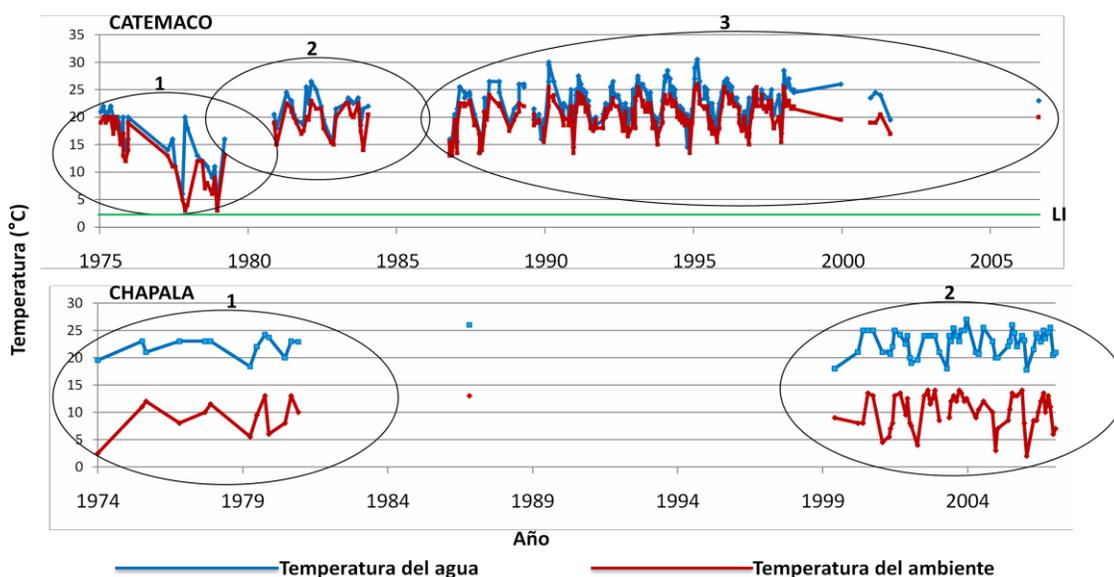


Figura 44. Gráficas de referencia de Catemaco y Chapala

En el caso de la laguna de Catemaco la serie se encuentra dividida en tres partes homogéneas con puntos de interrupción, con clara tendencia general ascendente, en la primera parcela de datos se observa una pequeña sección de adhesión al límite inferior (LI). Es preferible que para cuestiones de estimación de variación de temperatura esta sección sea excluida, por no presentar homogeneidad con respecto a la serie de datos general.

En el lago de Chapala existe un periodo aproximado de 18 años sin datos, resultando dos tramos homogéneos sin posibilidad de un ajuste, por lo que se analizan dichas series por separado.

La figura 45, presenta las series de los sitios de tres presas Emilio López Zamora, Derivadora Morelos y El Carrizo (sitios de estudio).

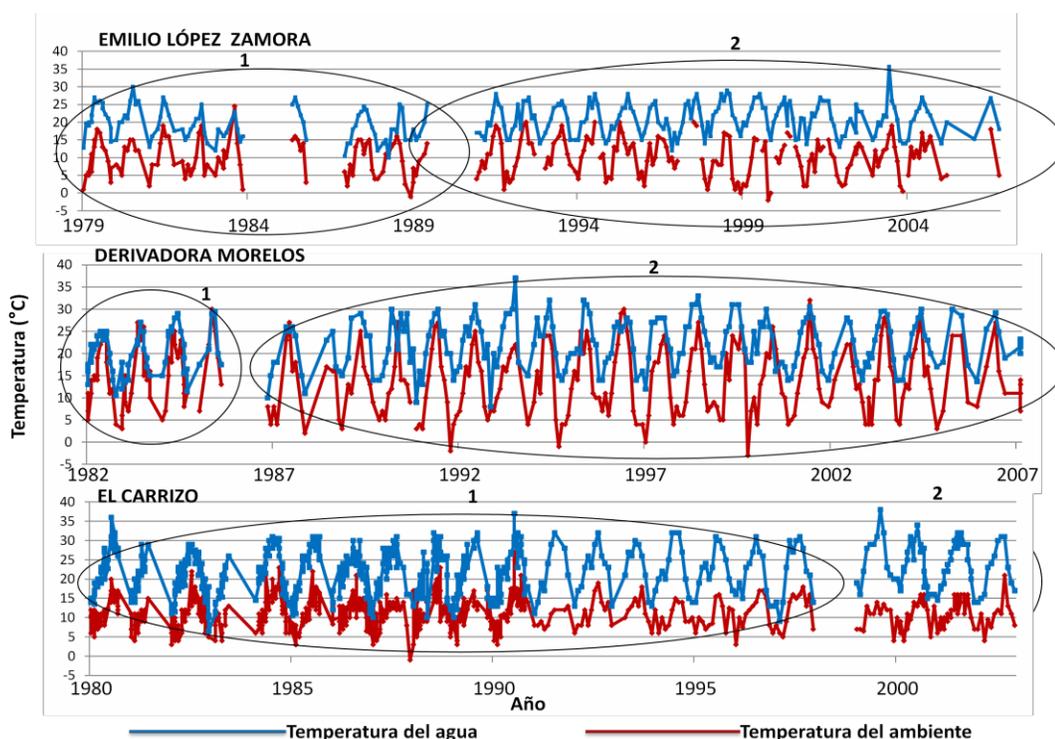


Figura 45. Gráficas Emilio López, Derivadora Morelos y El Carrizo

En el caso de las presas se observan series más homogéneas con respecto a Catemaco y Chapala, esto debido posiblemente a un mayor número de datos. Los tres sitios de estudio presentan puntos de

interrupción en las series, que no afectan la homogeneidad de la serie total, por lo cual son considerados todos sus tramos para estimaciones de variación de temperatura del agua.

3.4. Estimación de variación de temperatura

Una vez completado el proceso de control de calidad de los datos y evaluado su homogeneidad, se estima su variación de temperatura. La estimación de variación de temperatura es diferente para cada sitio, ya que se tiene que evaluar las condiciones particulares de cada una de la serie de datos, su distribución muestral anual, mensual y proporcionalidad en los datos.

3.4.1. Variación entre periodos (1975-1990) y (1991-2008)

En la tabla ocho, se muestra la variación de la temperatura entre periodos, considerando el promedio de los datos del periodo de 1975-1990 y su diferencia con el promedio del periodo 1991-2008.

Tabla 8. Variación de la temperatura entre los periodos (1975-1990) y (1991-2008)

Sitio	Tipo	Temperatura promedio		Variación (°C)
		(1975-1990)	(1991-2008)	
Catemaco	Laguna	20,95	22,78	1,83
Chapala	Lago	22,22	23,13	0,91
Emiliano López Zamora	Presa	20,08	21,03	0,95
Derivadora Morelos	Presa	21,12	21,99	0,88
Presa El Carrizo	Presa	22,15	23,45	1,30

En los datos presentados en la tabla ocho se observa la mayor variación de la temperatura en la laguna de Catemaco, pero hay que hacer mención que los datos de Catemaco están estratificados en el periodo 1990 – 2000, y que en el cálculo del promedio del periodo 1975-1990 se consideró una pequeña parcela del tramo uno y el tramo dos de la serie. La presa El Carrizo también presentó una variación elevada, donde la mayor parte de los datos se concentraron en el periodo 1975 – 1990. Es importante aclarar que esta estimación considera a todos los datos del sitio sin considerar la proporcionalidad y distribución muestral.

3.4.2. Variación por promedios mensuales

La tabla nueve, muestra la estimación de la variación de la temperatura del agua entre el promedio del periodo 1975 – 1990 y el promedio de promedios mensual de las series homogéneas de cada sitio. Lo anterior implicó hacer un promedio mensual y realizar una gráfica de control mensual, eliminando los meses aberrantes que en este caso fueron aquellos que se establecieron fuera de los límites de control calculados y que no tenían una distribución y proporcionalidad muestral.

Tabla 9. Variación de la temperatura entre periodo (1975-1990) y variación del promedio mensual de la serie homogénea

Sitio	Tipo	Temperatura promedio		Variación (°C)
		(1975-1990)	*Promedio de promedio mensual	
Catemaco	Laguna	20,95	22,33	1,38
Chapala	Lago	22,22	22,94	0,72
Emiliano López Zamora	Presa	20,08	20,96	0,88
Derivadora Morelos	Presa	21,12	21,86	0,74
Presa El Carrizo	Presa	22,15	23,05	0,90

***Promedio de promedio mensual de los series homogéneas del periodo (1991 – 2008)**

De los datos reportados en la tabla nueve, se observa que la variación estimada mayor fue en la laguna de Catemaco con un valor de 1.38°C. Debido a que ciertos procesos regulan la temperatura del agua, como pueden ser, una alimentación importante de agua subterránea (Hannah *et al.*, 2004), radiación neta de onda corta y larga (Li, 2002), (Webb y Zhang, 1997 y 1999) y a la cobertura vegetal, que pueden disminuir la incidencia de estas radiaciones que contribuyen en un 80% a 90% en el balance de calor (Sridhar *et al.*, 2004; Moore *et al.*, 2005; Caissie, 2006), uno puede asumir que está variación es debida a estos factores.

Una vez analizados los resultados obtenidos con respecto a la variación de temperatura del agua en los dos periodos evaluados, se observa que:

- La base de datos tiene serias limitaciones en su aplicación para un estudio de este tipo. Los cambios de localización de estaciones, las interrupciones y la disminución en el número de estaciones analizadas son los principales factores limitantes.
- Se utilizaron estaciones climatológicas localizadas dentro de un radio de 5 km de distancia de la estación de calidad del agua. Se demostró una correlación fuertemente significativa entre la temperatura del agua y la temperatura del aire en algunos cuerpos de agua.

- c. De todas las estaciones analizadas, sólo cinco presentaron la suficiente fortaleza en sus datos. Las cinco estaciones analizadas presentan una correlación lineal positiva y fuerte entre temperatura del agua y temperatura del aire (mayor a 0.7). Esto significa que hay un incremento general de la temperatura del agua de dimensión variable en los cuerpos de agua que fueron estudiados.
- d. Con los resultados, se conoce que el incremento de la temperatura del agua se encuentra en el rango de 0.72°C a 1.38°C, considerándose como un valor promedio aproximado de 0.9°C, valor que fluctuará en función de las características del sitio estudiado.
- e. Las implicaciones de dicho incremento en los cuerpos de agua es incierta, es necesario que las instituciones responsables de las mediciones estén conscientes de la importancia de sus mediciones. En cuanto a la base de datos de calidad del agua, es necesario que la CONAGUA implemente la captura de metadatos, lo que permitirá mejorar la calidad de la base.

3.5. Transferencia de la metodología

La guía metodológica fue mostrada y transferida a 18 estados de la república mexicana cuyos planes estatales de acción ante el cambio climático (PEACC) ya han sido iniciados, a través de un taller denominado **“Impacto del Cambio Climático en la Calidad del Agua en México”** que tuvo lugar en las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), cuyo propósito principal es que la metodología se introduzca como parte de sus respectivos PEACC.

La inauguración del evento se realizó el día 22 de marzo y estuvo a cargo del Dr. Polioptro F. Martínez Austria, Director del IMTA. Lo acompañaron en el evento la C. Madeleine Penman, Directora de Programas del Fondo Estratégico de la Embajada Británica en México, el M. en C. Miguel Angel Altamirano del Carmen, Subdirector de Estudios sobre Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático del Instituto Nacional de Ecología y la Dra. Gabriela E. Moeller Chávez, Coordinadora de Tratamiento y Calidad del Agua del IMTA.

Adicionalmente, los resultados de la investigación junto con la guía fueron presentados en una reunión de alto nivel con representantes de CONAGUA, Organismos Operadores de Agua Potable y COFEPRIS, como principales actores del sector gubernamental en el campo del agua.

3.5. Referencias bibliográficas

- Hannah D., A. Malcolm, C. Soulsby, and F. Youngson. (2004). Heat exchanges and temperature within a salmon spawning stream in the Cairngorms, Scotland: Seasonal and sub-seasonal dynamics. *River Research and Applications*, 20, 635-652.
- Caissie D. (2006): The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology*, 51, 1389-1406.
- Webb B. W., Zhang Y. (1997): Spatial and seasonal variability in the components of the river heat budget. *Hydrological Processes*, 11, 79-101.
- Webb B. W., Zhang Y. (1999): Water temperatures and heat budgets in Dorset chalk water courses. *Hydrological Processes*, 13, 309-321.
- Sridhar V. Amy L. Sansone, Jonathan LaMarche, Tony Dubin, and Dennis P. Lettenmaier (2004): Prediction of stream temperature in forested watersheds. *Journal of American Water Resources Association*, 40(1), 97-213.
- Moore R. D., Spittlehouse D. L., Story A. (2005): Riparian microclimate and stream temperature response to forest harvesting: a review. *Journal of American water resources association*, 41(4), 813-834.
- Li Y. Simulation of the Heat Budget of the River Neckar. (2002): Studienarbeit, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.

ADAPTACIÓN

En los primeros capítulos se estableció la manera de determinar cuáles serían los problemas que un determinado cuerpo de agua podría desarrollar, habida cuenta de sus características, desarrollo social regional, cuidado ambiental de la zona, etc.

Sin embargo, las características multifactoriales de la contaminación y sus efectos no permiten establecer medidas generales de adaptación, más bien este estudio intenta sentar las bases para que los directamente responsables de implementar medidas de adaptación y de enfrentar la problemática a venir, puedan tomar las mejores decisiones acerca de la adaptación regional o local necesarias.

Las medidas de adaptación se pueden desarrollar desde diversas perspectivas. En este caso, basados en los resultados obtenidos en los ejercicios de las secciones anteriores, se plantean algunas medidas de adaptación resultantes de la problemática detectada. Se delinearán algunas acciones posibles de emprender para incrementar la resiliencia de los sistemas acuáticos, entendida ésta como la capacidad de volver al estado inicial, una vez que el impacto ha pasado. Debe señalarse que una medida de adaptación puede llevar efectos beneficios en diferentes niveles y que un efecto puede influir en diversos niveles también, en una suerte de cascada.

De manera general hemos abordado los impactos generados por el incremento en el **contenido de los gases GEI** que han modificado la concentración de algunos componentes del agua, específicamente la alcalinidad y el pH, con consecuencias como permitir una mayor solubilidad de los metales presentes. Así mismo la consecuencia del **incremento en la temperatura ambiente**, el incremento en la intensidad de la precipitación pero paradójicamente la disminución de **precipitaciones**.

Se desprenden diversas consecuencias para la calidad del ambiente acuático, con algunas acciones posibles recomendadas.

Ambiente acuático. Incremento de nitrificación, Incremento en la toxicidad por metales y Pérdida de oxígeno

- Limpia de acequias y canales
- Manejo de desechos comunitarios (líquidos y sólidos)
- Acciones de reducción de nutrientes en cuerpos de agua
- Mejora del tratamiento de agua residual a nivel cuenca para la reducción de contenido de materia orgánica en descargas de ríos.
- Remediación en cuerpos de agua para reducir la disponibilidad de nutrientes
- Vigilancia sobre cuerpos de agua afectados por hipoxia
- Acciones de oxigenación y/u oxidación de materia orgánica en casos extremos
- Elaboración de mapas de riesgo y monitoreo por florecimiento de cianobacterias
- Enfoque especial de la vigilancia en cuerpos de agua donde confluyen pH bajo, contaminación por metales y lluvia ácida
- Propiciar la precipitación de carbonatos y metales con incremento del pH

- Mapeo de cuerpos de agua con alta probabilidad de solubilización de metales provenientes de sedimentos afectados por acidificación

Disponibilidad de agua

- Reforestación de cuencas y recuperación de vegetación riparia
- Captación y tratamiento de agua meteórica
- Reforzamiento de la reducción de fugas en el sistema de agua potable
- Reforzamiento de prácticas de ahorro
- Sectorización de las redes de distribución de agua potable
- Recuperación de caudales en ríos con gastos mayores al ecológico
- Recuperación de caudales por reúso de agua en otros usos
- Programa de reducción de la extracción en cuerpos de agua afectados
- Mejora de la gestión de los sistemas públicos

Fuentes de abastecimiento de agua, salud humana por metales y compuestos orgánicos persistentes

- Programa especial de reducción de nutrientes en fuentes de abastecimiento con presencia de florecimientos de cianobacterias y materia orgánica por descargas a ríos
- Programa de acciones de retención de sólidos suspendidos en cauces de ríos
- Acciones de retención de suelos en pendientes altas
- Monitoreo y vigilancia de oxígeno, metales y COP's
- Adaptación del proceso de potabilización para la remoción de cianotoxinas, metales, COP's y presencia de mayor turbiedad

En cuanto al **incremento en el nivel del mar**, algunas acciones de adaptación podrían ser (DEFRA, 2010):

- Mapas de zonas vitales de protección costera
- Separación del drenaje pluvial del de agua residual
- Inyección de agua de lluvia
- Mayores acciones de infiltración de agua de lluvia en zonas costeras
- Modificación de códigos de construcción para permitir la infiltración de agua de lluvia en cada predio
- Implementar el pago de servicios de agua
- Protección de ecosistemas costeros, especialmente los humedales de la urbanización

Pueden establecerse medidas generales que incrementen la resiliencia de los sistemas o que permitan tener una vigilancia de los cambios que suceden. Entre ellas están la rehabilitación de cuerpos de agua fuertemente contaminados, monitoreo y generación de información sobre calidad del agua, incremento de la eficiencia del riego, mejora del manejo de los sistemas públicos de agua, separación de drenajes pluviales de los sanitarios, inclusión y adaptación de la legislación al cambio climático (DCC, 2010).

- Integración de un programa de monitoreo de calidad del agua de cuerpos y apoyo de iniciativas locales que lo impulsen
- Acceso público a datos de calidad del agua
- Apoyo a acciones de monitoreo comunitario
- Gestión integrada de aguas superficiales y subterráneas
Adopción de tecnologías mejoradas
- Establecimiento de mercados eficientes y tarifas reales para el agua
- Separación de drenajes sanitarios y pluviales
- Elaboración de una legislación y de marcos normativos que contemplen el cambio climático
- Apoyo financiero a acciones de mitigación
- Elaboración de planes estatales de adaptación
- Apoyo financiero y técnico a acciones de adaptación
- Acciones conjuntas de los tres órdenes de gobierno
- Acciones de educación ambiental en el tema

4.1. Referencias bibliográficas

- Department of Climate Change. 2010. Adapting to Climate Change in Australia. 200 pp.
- Department for Environment Food and Rural Affairs. 2010. Climate Change Plan. London. 172 pp.

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CALIDAD DEL AGUA Y SU INCIDENCIA EN LA GESTIÓN DE GOBIERNO

5.1. Del contexto de la propuesta

Uno de los objetivos fundamentales del enfoque de Política Pública, es el establecimiento de una relación intensa entre el quehacer de la política y la búsqueda constante por materializar en el tiempo y en el espacio los acuerdos generados en el proceso de debate y negociación, es decir, la concreción de resultados respecto del problema identificado. El desarrollo de Política Pública se ha asociado como un campo de conocimiento capaz de comprender el complejo proceso decisorio que parte de la significación de la política en una doble dimensión. La primera, en tanto negociación y búsqueda por la generación de acuerdos (consensos); y la segunda, en su concepción más técnica como el conjunto de acciones racionales dirigidas al cumplimiento de objetivos específicos en el ejercicio de gobierno respecto del quehacer de la política en la solución de los asuntos públicos.

Desde este sentido, podemos entender que todas las políticas que instrumenta el gobierno en su conjunto guardan eminentemente un carácter público, debido a que su marco de atribuciones se encuentra considerado por el bien común instituido en las leyes que rige la acción de gobierno. No obstante, el carácter público de la política demanda apertura y proximidad entre gobiernos y ciudadanos, cuya aproximación determina la comprensión de los problemas públicos desde el hecho de la existencia de racionalidades múltiples que convergen en la sociedad, así como desde la interacción de actores (institucionales/extraintitucionales) que permitan el reconocimiento de las múltiples dimensiones del problema en tanto su planteamiento desde su permanente interrelación con el entorno en el que se sitúa la propuesta.

Así, tanto para la preparación del documento –informe de los resultados del proyecto, como la proyección de las recomendaciones que derivan de ello, se utilizaron elementos metodológicos (ver anexo: Metodología de Política Pública) tanto en la caracterización de la información relevante que permita situar su delimitación, como en su análisis para ponderar las acciones propuestas que recomienda el proyecto como se muestra en el siguiente esquema. En éste, la columna izquierda configura la integración de la Información relevante que sintetiza algunos puntos sustanciales derivados de los resultados arrojados por las investigaciones realizadas, por lo que la Información **Relevante** corresponde con el desarrollo del proyecto en sí mismo; las columnas centrales concretan los elementos de apoyo y las debilidades reconocidas a la luz de la delimitación del problema y de las propuestas de acción respectivamente, y la columna derecha apunta las propuestas derivadas del análisis de los elementos en su conjunto con respecto del problema que atiende el proyecto.

Este esquema se complementa con las secciones siguientes del documento en las que se apuntan el desarrollo de la propuesta y los elementos normativos de referencia parte su caracterización a fin de concretar las recomendaciones de acciones con las que se estima posible orientar el cumplimiento de los objetivos generales de la propuesta.



Impacto del cambio climático en la calidad del agua: metodología de análisis de la información y su incidencia en la gestión de gobierno.

Existe evidencia de que el cambio climático impactará la calidad del agua.

En México, los datos de calidad del agua necesarios para analizar este fenómeno son insuficientes, y

no existe una metodología específica desarrollada para ponderar los efectos.

Es necesario redefinir los parámetros, reforzar los monitoreos, generar los datos y construir los instrumentos de análisis que permitan organizar y evaluar la información para observar estos impactos en la calidad del agua.

En México, las agendas del agua y de cambio climático no consideran a la fecha la relación cambio climático-calidad del agua.

Se desarrolla un proyecto donde uno de los objetivos es la construcción de la Metodología de Medición y Análisis de variables vinculadas con la calidad del agua y el cambio climático.

El proyecto hace énfasis en la importancia de considerar esta relación del tema del agua en México, así como su posicionamiento en la agenda pública gubernamental.

-SEMARNAT
-IMTA

-INE
-Universidad Veracruzana.
- Comunidad científica.
- Embajada/Consejo Británico.
- Convenios con institutos de educación superior y universidades.
- Publicaciones conjuntas IMTA- institutos de educación superior, universidades y la Red de Revistas Científicas América Latina y el Caribe (Redalyc).
- Congresos, paneles, conferencias magistrales, talleres y seminarios.
- Utilizar y posicionar institucionalmente la metodología.
- Incidir en los tomadores de decisiones.
- Gestionar apoyos para diseñar las estrategias tendientes a que la metodología se incorpore en los procesos de decisión.

-Ausencia en la Ley de Aguas Nacionales (LAN) y en la Norma Oficial Mexicana (NOM 127) de una metodología de análisis y evaluación de los datos.
-Incumplimiento del marco jurídico vigente en materia de monitoreo.
-Incumplimiento de la operación institucional dentro de los ámbitos reglamentarios vigentes.
-No se ha materializado la formalización del Comité Técnico Especializado de Información en materia de Agua (CETAGUA).
- CONAGUA
- Comunidad Científica.

-Propuesta para la incorporación a la Ley de Aguas Nacionales (LAN), el referente de cambio climático.

- Incorporar en los monitoreos, parámetros específicos para evaluar el

efecto del cambio climático en la calidad del agua.

- Presentar la metodología de análisis de metadatos para adicionar en la NOM-127-SSA1-1994 y en la LAN en lo que se refiere a aguas superficiales.

- Coadyuvar a la formalización de CETAGUA.

-Reforzamiento interinstitucional sobre el problema del cambio climático.

- Posicionar institucionalmente la Metodología de análisis y medición generada (Guía metodológica).

- Incidir en los tomadores de decisión para el uso de la metodología.

- Generar convenio institucional IMTA-UAEMex.

-Generar nuevos cuadros de ambientalistas con una visión de administradores públicos enriqueciendo los programas de posgrado del IMTA.

-Promover la publicación institucional de los resultados de la investigación.

-Coadyuvar a la materialización de una gestión integral del agua.

5.2. Del desarrollo de la propuesta

El proyecto “Impacto del Cambio Climático en la Calidad del Agua”, se ha configurado en términos de construir y de proporcionar suficiente evidencia empírica (información) a los tomadores de decisión. El estudio surge ante la necesidad determinar una relación causal entre calidad del agua- cambio climático. Asimismo, la investigación abarca el análisis del marco jurídico-legal vigente para la identificación de los actores institucionales involucrados y para establecer si existe algún tipo de inconsistencia en el tratamiento de la problemática. Los alcances del proyecto están determinados por el diseño de una propuesta de Política Pública con base en los siguientes criterios:

- La incorporación del tema cambio climático-calidad del agua en la agenda pública gubernamental del cambio climático.
- Análisis del marco jurídico-legal en cuanto al marco de atribuciones de los actores se refiere.
- Fortalecimiento de los monitoreos.
- El análisis y resultados de la base de datos de calidad del agua.
- Normar el análisis de los datos a través de una metodología.
- Posicionar institucionalmente la propuesta.

Ahora bien, la implementación de estas acciones recomendadas de Política Pública permitirá avanzar en el tratamiento del problema en los siguientes ejes:

- Establecimiento de relaciones causales entre cambio climático-calidad agua que permitan hacer recomendaciones para futuras acciones en cuanto al manejo del recurso hídrico; considerando una secuencia lógica en tres ámbitos: monitoreo, evaluación y administración de los datos.
- Generar y difundir la información generada a la sociedad, comunidad científica y a los tres órdenes de gobierno. Así como identificar, cuantificar y definir el estatus de calidad del agua, sus tendencias y causas.
- Conocer cómo el problema de calidad del agua es distinto en cada área geográfica específica.
- Recuperar y suministrar información en una dimensión espacio-temporal específica y aportar evaluaciones, para que los tomadores de decisiones y las dependencias de gobierno utilicen en el diseño de sus planes, programas y proyectos, alternativas viables y en decisiones pertinentes.

Analizando las acciones recomendadas, se vislumbra que los costos de no atender la problemática son mayores económica, política y socialmente. Algunas de las consecuencias de la no acción son:

- No se contará con un plan integral de prevención del que deriven las recomendaciones sobre las relaciones del cambio climático y su efecto en la calidad del agua, por lo que se tendrá incapacidad de hacer recomendaciones a futuras acciones.
- Existirá carencia de información fehaciente para identificar las zonas vulnerables a este fenómeno en las entidades federativas.
- Una deficiente cantidad y calidad de información para el público, comunidad científica y los tres órdenes de gobierno, dé incertidumbre e incapacidad para identificar y cuantificar las tendencias de los problemas de calidad del agua que tienen lugar en un área geográfica específica.
- Los tomadores de decisiones, las dependencias de gobierno y administradores del recurso tomarán decisiones en suposiciones y no podrán evaluar alternativas a falta de información confiable.
- Ejercicios de planeación limitados de los recursos financieros, e incapacidad de establecer relaciones causales con los sectores de salud, agricultura, educación, etc. Afectando en última instancia a la población.
- No se asumirán los principios que sustentan la viabilidad y factibilidad de una política hídrica nacional, de acuerdo a lo que establece la ley en vigor, como un asunto de carácter prioritario y de seguridad nacional. (Art. 14 Bis 5. Ley de aguas nacionales, DOF 18-04-2008).

5.3. De las acciones propuestas.

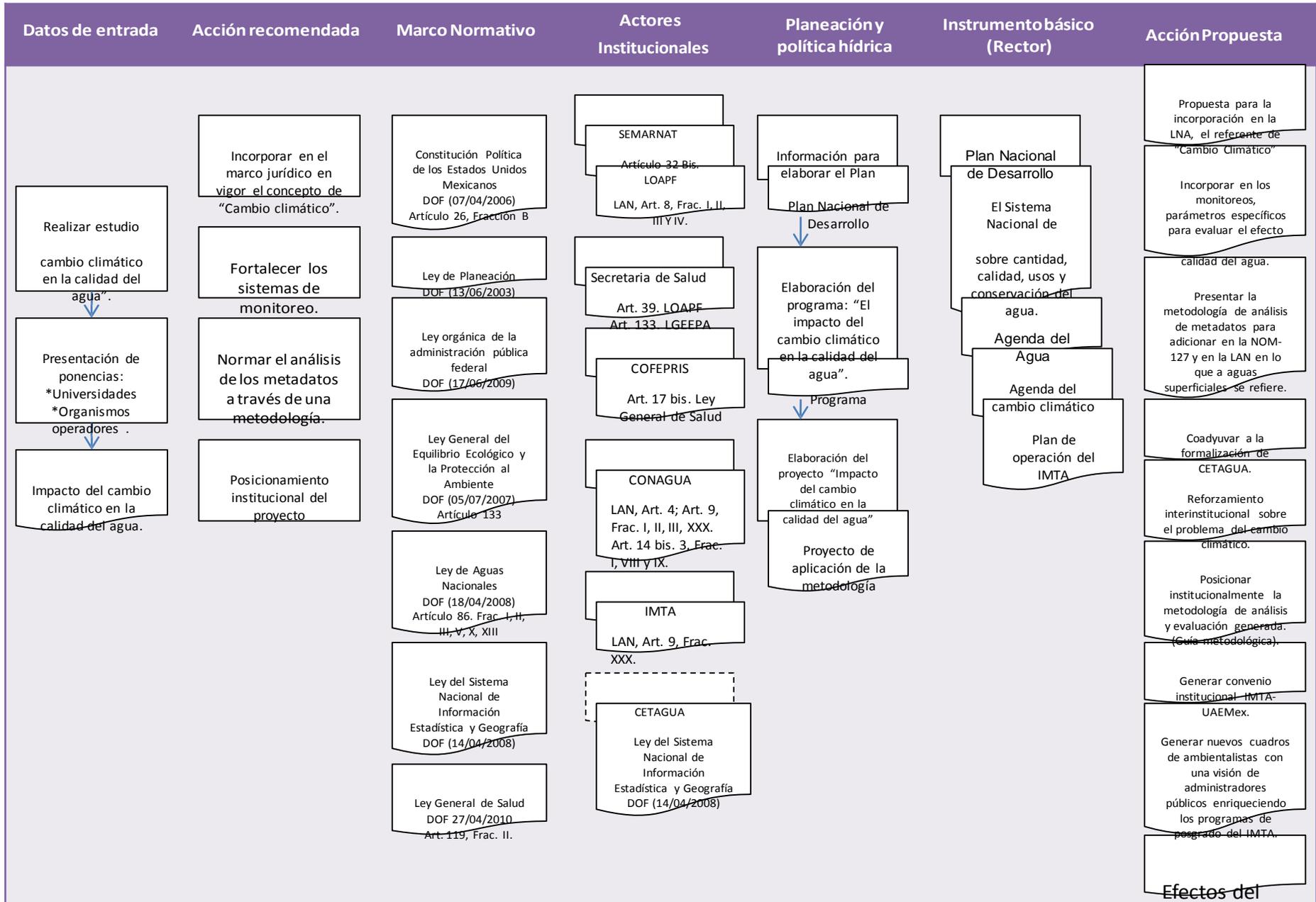
Después de un intenso análisis del marco legal en vigor, de la identificación del marco de atribuciones correspondiente a cada uno de los actores involucrados, y del análisis de los apoyos y debilidades que enfrenta la propuesta de Política Pública, se consideran las siguientes acciones recomendadas como elementos a instrumentar para concretarla:

1. Incorporar en los monitoreos, parámetros específicos para evaluar el efecto del cambio climático en la calidad del agua
2. Propuesta para la incorporación en la Ley de Aguas Nacionales el referente de Cambio Climático.
3. Proponer la metodología de análisis de datos para adiccionarla en la NOM-127-SSA1-1994 y en la Ley de Aguas Nacionales en lo que se refiere a aguas superficiales.
4. Posicionar institucionalmente la Metodología de análisis y evaluación generada (Guía metodológica).
5. Coadyuvar a la formación de CETAGUA.
6. Reforzamiento interinstitucional sobre el problema del cambio climático.
Así mismo, de importancia relevante es:
 1. Generar nuevos cuadros de ambientalistas con una visión de administradores públicos enriqueciendo los programas de posgrados del IMTA.
 2. Promover la publicación institucional de los resultados de la investigación.
 3. Coadyuvar a la materialización de una gestión integral del agua.



4. Generar convenio institucional Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)- Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex).

Finalmente, en el esquema que se presenta a continuación se muestran gráficamente las relaciones entre las partes involucradas en la definición del problema de Política Pública y las acciones recomendadas para su atención conforme se consideraron en su análisis.



cambio climático en la calidad del agua y su incidencia en la gestión de gobierno

Promover la publicación
institucional de los
resultados de la inv.

5.4. Del Marco Normativo

La propuesta de Política Pública está circunscrita bajo el entramado legal correspondiente que define el marco de atribuciones de los actores identificados. El marco normativo se encuentra establecido legalmente de la siguiente manera:

- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. DOF (07/04/2006).
- Ley de Planeación. DOF (13/06/2003), Artículo 26, Frac. B.
- Ley Orgánica de la Administración Pública Federal. DOF (17/06/2009).
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente. DOF (05/07/2007).
- Ley de Aguas Nacionales. DOF (18/04/2008), Artículo 86. Frac. I, II, III, V, X, XIII.
- Ley del Sistema Nacional de Información, Estadística y Geografía. DOF (14/04/2008).
- Ley General de Salud. DOF (27/04/2010), Artículo 119, Frac. II.

5.4.1. De los actores institucionales

a) Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Se establece en la Ley orgánica de la Administración Pública Federal. Última reforma publicada (DOF 17-06-2009) y en la Ley de Aguas Nacionales. Última reforma publicada (DOF 18-04-2008), lo siguiente:

- *Ley Orgánica de la Administración Pública Federal.*

Artículo 32 Bis.- A la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, corresponde el despacho de los siguientes asuntos:

- I.** Fomentar la protección, restauración y conservación de los ecosistemas y recursos naturales y bienes y servicios ambientales, con el fin de propiciar su aprovechamiento y desarrollo sustentable;
- II.** Formular y conducir la política nacional en materia de recursos naturales, siempre que no estén encomendados expresamente a otra dependencia; así como en materia de ecología, saneamiento ambiental, agua, regulación ambiental del desarrollo urbano y de la actividad pesquera, con la participación que corresponda a otras dependencias y entidades;
- IV.** Establecer, con la participación que corresponda a otras dependencias y a las autoridades estatales y municipales, normas oficiales mexicanas sobre la preservación y restauración de la calidad del medio ambiente; sobre los ecosistemas naturales; sobre el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y de la flora y fauna silvestre, terrestre y acuática; sobre descargas de aguas residuales, y en materia minera; y sobre materiales peligrosos y residuos sólidos y peligrosos;

V. Vigilar y estimular, en coordinación con las autoridades federales, estatales y municipales, el cumplimiento de las leyes, normas oficiales mexicanas y programas relacionados con recursos naturales, medio ambiente, aguas, bosques, flora y fauna silvestre, terrestre y acuática, y pesca; y demás materias competencia de la Secretaría, así como, en su caso, imponer las sanciones procedentes;

VI. Proponer al Ejecutivo Federal el establecimiento de áreas naturales protegidas, y promover para su administración y vigilancia, la participación de autoridades federales o locales, y de universidades, centros de investigación y particulares;

XIV. Evaluar la calidad del ambiente y establecer y promover el sistema de información ambiental, que incluirá los sistemas de monitoreo atmosférico, de suelos y de cuerpos de agua de jurisdicción federal, y los inventarios de recursos naturales y de población de fauna silvestre, con la cooperación de las autoridades federales, estatales y municipales, las instituciones de investigación y educación superior, y las dependencias y entidades que correspondan;

XVI. Conducir las *políticas nacionales sobre cambio climático* y sobre protección de la capa de ozono;

XVII. Promover la participación social y de la comunidad científica en la formulación, aplicación y vigilancia de la política ambiental, y concertar acciones e inversiones con los sectores social y privado para la protección y restauración del ambiente;

XXIII. Organizar, dirigir y reglamentar los trabajos de hidrología en cuencas, cauces y álveos de aguas nacionales, tanto superficiales como subterráneos, conforme a la ley de la materia;

XXIV. Administrar, controlar y reglamentar el aprovechamiento de cuencas hidráulicas, vasos, manantiales y aguas de propiedad nacional, y de las zonas federales correspondientes, con exclusión de los que se atribuya expresamente a otra dependencia; establecer y vigilar el cumplimiento de las condiciones particulares que deban satisfacer las descargas de aguas residuales, cuando sean de jurisdicción federal; autorizar, en su caso, el vertimiento de aguas residuales en el mar, en coordinación con la Secretaría de Marina, cuando provenga de fuentes móviles o plataformas fijas; en cuencas, cauces y demás depósitos de aguas de propiedad nacional; y promover y, en su caso, ejecutar y operar la infraestructura y los servicios necesarios para el mejoramiento de la calidad del agua en las cuencas;

XXVI. Regular y vigilar la conservación de las corrientes, lagos y lagunas de jurisdicción federal, en la protección de cuencas alimentadoras y las obras de corrección torrencial;

XXVII. Manejar el sistema hidrológico del Valle de México;

XXXV. Participar con la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, en la determinación de los criterios generales para el establecimiento de los estímulos fiscales y financieros necesarios para el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y el cuidado del medio ambiente.

- *Ley de Aguas Nacionales.*

ARTÍCULO 8. Son atribuciones del Secretario del Medio Ambiente y Recursos Naturales:

I. Proponer al Ejecutivo Federal la política hídrica del país;

II. Proponer al Ejecutivo Federal los proyectos de ley, reglamentos, decretos y acuerdos relativos al sector;

III. Fungir como Presidente del Consejo Técnico de "la Comisión";(CONAGUA)



V. Expedir las Normas Oficiales Mexicanas en materia hídrica en los términos de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, a propuesta de "la Comisión

b) Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)

Se establece en la Ley de Aguas Nacionales Última reforma publicada (DOF 18-04-2008), lo siguiente:

ARTÍCULO 4. La autoridad y administración en materia de aguas nacionales y de sus bienes públicos inherentes corresponde al Ejecutivo Federal, quien la ejercerá directamente o a través de "la Comisión".

ARTÍCULO 9. "La Comisión" es un órgano administrativo desconcentrado de "la Secretaría", que se regula conforme a las disposiciones de esta Ley y sus reglamentos, de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal y de su Reglamento Interior.

"La Comisión" tiene por objeto ejercer las atribuciones que le corresponden a la autoridad en materia hídrica y constituirse como el Órgano Superior con carácter técnico, normativo y consultivo de la Federación, en materia de gestión integrada de los recursos hídricos, incluyendo la administración, regulación, control y protección del dominio público hídrico.

I. Fungir como la Autoridad en materia de la cantidad y de la calidad de las aguas y su gestión en el territorio nacional y ejercer en consecuencia aquellas atribuciones que conforme a la presente Ley corresponden a la autoridad en materia hídrica, dentro del ámbito de la competencia federal, con apego a la descentralización del sector agua, excepto las que debe ejercer directamente el Ejecutivo Federal o "la Secretaría" y las que estén bajo la responsabilidad de los Gobiernos de los estados, del Distrito Federal o municipios;

II. Formular la política hídrica nacional y proponerla al Titular del Poder Ejecutivo Federal, por conducto de "la Secretaría", así como dar seguimiento y evaluar de manera periódica el cumplimiento de dicha política;

III. Integrar, formular y proponer al Titular del Poder Ejecutivo Federal, el Programa Nacional Hídrico, actualizarlo y vigilar su cumplimiento;

XXX. Promover y propiciar la investigación científica y el desarrollo tecnológico, la formación de recursos humanos, así como difundir conocimientos en materia de gestión de los recursos hídricos, con el propósito de fortalecer sus acciones y mejorar la calidad de sus servicios, para lo cual se coordinará en lo conducente con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

c) Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)

Se establece en la Ley de Aguas Nacionales. Última reforma publicada (DOF 18-04-2008) lo siguiente:

ARTÍCULO 14 BIS 3. El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua es un organismo público descentralizado sectorizado a "la Secretaría", que tiene por objeto, de acuerdo con su instrumento de creación y estatuto orgánico, realizar investigación, desarrollar, adaptar y transferir tecnología,

prestar servicios tecnológicos y preparar recursos humanos calificados para el manejo, conservación y rehabilitación del agua y su entorno, a fin de contribuir al desarrollo sustentable.

I. Coordinar, fomentar y dirigir las acciones de investigación y desarrollo tecnológico en materia de agua, incluyendo su difusión, y la formación y capacitación de recursos humanos a nivel nacional.

VIII. Proponer orientaciones y contenidos para la Política Nacional Hídrica y el Programa Nacional Hídrico, y encabezar los trabajos de planificación e instrumentación de programas y acciones para la investigación científica y desarrollo tecnológico en materia de agua y su gestión, así como para la formación y capacitación de recursos humanos en las mismas materias;

IX. Sistematizar y publicar la información técnica asociada con los recursos hídricos del país, en coordinación con "la Comisión".

d) Instituto Nacional de Información, Estadística y Geografía (INEGI).

Se establece en la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (Última reforma publicada DOF 05-07-2007) y en la Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (Última reforma publicada DOF 16/04/2008), lo siguiente:

- *Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*

ARTICULO 159 Bis La secretaria (SEMARNAT), desarrollará un sistema nacional de información ambiental y de recursos naturales que tendrá por objeto *registrar, organizar, actualizar y difundir la información ambiental nacional, que estará disponible para su consulta y que se coordinará y complementará con el sistema de cuentas nacionales a cargo del instituto nacional de estadística, geografía e informática.*¹

- *Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica*

ARTÍCULO 27.- El Subsistema Nacional de Información Geográfica y del Medio Ambiente, en su componente del medio ambiente, procurará describir el estado y las tendencias del medio ambiente, considerando los medios naturales, las especies de plantas y animales, y otros organismos que se encuentran dentro de estos medios.

ARTÍCULO 17.- El Sistema contará con los siguientes Subsistemas Nacionales de Información:

- I. Demográfica y Social;
- II. Económica, y
- III. Geográfica y del Medio Ambiente.

¹ En dicho sistema, la secretaria deberá integrar, entre otros aspectos, información relativa a los inventarios de recursos naturales existentes en el territorio nacional, a los mecanismos y resultados obtenidos del monitoreo de la calidad del aire, del agua y del suelo, al ordenamiento ecológico del territorio, así como la información señalada en el artículo 109 bis y la correspondiente a los registros, programas y acciones que se realicen para la preservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente. La secretaria reunirá informes y documentos relevantes que resulten de las actividades científicas, académicas, trabajos técnicos o de cualquier otra índole en materia ambiental y de preservación de recursos naturales, realizados en el país por personas físicas o morales, nacionales o extranjeras, los que serán remitidos al sistema nacional de información ambiental y de recursos naturales.

Cada Subsistema tendrá como objetivo producir, integrar y difundir Información demográfica y social; económica y financiera, y geográfica y del medio ambiente, según corresponda.

El Instituto deberá emitir las disposiciones generales para regular el funcionamiento de los Subsistemas Nacionales de Información.

La Junta de Gobierno, previa opinión favorable del Consejo, podrá crear otros Subsistemas que sean necesarios para el adecuado funcionamiento del Sistema.

El Subsistema referido en el párrafo anterior, deberá generar, como mínimo, indicadores sobre los siguientes temas: atmósfera, *agua*, suelo, flora, fauna, residuos peligrosos y residuos sólidos.

ARTÍCULO 28.- El Instituto elaborará, con la colaboración de las Unidades, los indicadores a que se refieren los dos artículos anteriores a partir de la información básica proveniente de:

- I. El Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales;
- II. Un sistema integrado de inventarios y encuestas sobre recursos naturales y medio ambiente, y
- III. Los registros administrativos que permitan obtener Información en la materia

ARTÍCULO 29.- Cada Subsistema contará con un Comité Ejecutivo que se integrará por un vicepresidente de la Junta de Gobierno, quien lo presidirá, así como por al menos los coordinadores de las Unidades que a continuación se señalan para cada Subsistema Nacional de Información:

- I. Demográfica y Social: Los coordinadores de las secretarías de Gobernación; de Seguridad Pública; de Desarrollo Social; de Educación Pública; de Salud, y del Trabajo y Previsión Social, así como del Poder Judicial;
- II. Económica: Los coordinadores de las secretarías de Hacienda y Crédito Público y de Economía, y del Banco de México, y
- III. Geográfica y del Medio Ambiente: Los coordinadores de las secretarías de la Defensa Nacional; de Marina; del Medio Ambiente y Recursos Naturales; de Energía, y de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

Por acuerdo de la mayoría de los miembros de cada Comité Ejecutivo, se podrá invitar a participar como miembro del mismo a representantes de otras Unidades o determinarse la necesidad de reducir el número de miembros.

A las sesiones de los Comités que se refiere este artículo podrán asistir los invitados que cada Comité determine.

El Instituto nombrará al servidor público -del propio Instituto- que fungirá como secretario técnico en cada uno de los Comités a que se refiere este artículo.

Los integrantes de los Comités Ejecutivos desempeñarán sus funciones en dichos órganos colegiados de manera honoraria.

ARTÍCULO 36.- A efecto de apoyar en la capacitación y actualización de los servidores públicos de las Unidades, así como en la investigación permanente en temas de producción y análisis de la Información, el Instituto podrá realizar las funciones siguientes:

- I. Elaborar un programa permanente y actualizado, de formación y perfeccionamiento de las capacidades técnicas de los servidores públicos de las Unidades, así como un programa de investigación permanente en temas de producción y análisis de la Información, para atender las necesidades de las Unidades;
- II. Realizar estudios relativos al Sistema;
- III. Realizar investigaciones sobre nuevas metodologías para la producción y difusión de Información.

e) Secretaría de Salud

Se establece en la Ley orgánica de la Administración Pública Federal. Última reforma publicada (DOF 17-06-2009) y en la Ley de Aguas Nacionales. Última reforma publicada (DOF 18/04/2008), lo siguiente:

- *Ley Orgánica de la Administración Pública Federal.*

Artículo 39.- A la Secretaría de Salud, corresponde el despacho de los siguientes asuntos:

I.- Establecer y conducir la política nacional en materia de asistencia social, servicios médicos y salubridad general, con excepción de lo relativo al saneamiento del ambiente; y coordinar los programas de servicios a la salud de la Administración Pública Federal, así como los agrupamientos por funciones y programas afines que, en su caso, se determinen.

Ley de Aguas Nacionales.

ARTÍCULO 86. "La Autoridad del Agua" tendrá a su cargo, en términos de Ley:

XI. Atender las alteraciones al ambiente por el uso del agua, y establecer a nivel de cuenca hidrológica o región hidrológica las acciones necesarias para preservar los recursos hídricos y, en su caso, contribuir a prevenir y remediar los efectos adversos a la salud y al ambiente, en coordinación con la Secretaría de Salud y "la Secretaría" en el ámbito de sus respectivas competencias.

5.4.2. De las obligaciones

De acuerdo con las acciones recomendadas y al sustento legal de la propuesta, uno de los actores principales es la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, quien con base en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (Última reforma publicada DOF 05/07/2007) y en la Ley de Aguas Nacionales (Última reforma publicada DOF 18/04/2007), tiene la obligación de:

- *Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente.*

ARTÍCULO 133. La Secretaría, con la participación que en su caso corresponda a la Secretaría de Salud conforme a otros ordenamientos legales, realizará un sistemático y permanente monitoreo de la calidad de las aguas, para detectar la presencia de contaminantes o exceso de desechos orgánicos y aplicar las medidas que procedan. En los casos de aguas de jurisdicción local se coordinará con las autoridades de los Estados, el Distrito Federal y los Municipios.

- *Ley de Aguas Nacionales.*

ARTÍCULO 86. "La Autoridad del Agua" tendrá a su cargo, en términos de Ley:

I. Promover y, en su caso, ejecutar y operar la infraestructura federal, *los sistemas de monitoreo y los servicios necesarios para la preservación, conservación y mejoramiento de la calidad del agua en las cuencas hidrológicas y acuíferos, de acuerdo con las Normas Oficiales Mexicanas respectivas* y las condiciones particulares de descarga;

III. Formular programas integrales de protección de los recursos hídricos en cuencas hidrológicas y acuíferos, considerando las relaciones existentes entre los usos del suelo y la cantidad y calidad del agua;

V. Realizar la inspección y verificación del cumplimiento de las disposiciones de las Normas Oficiales Mexicanas aplicables, para la prevención y conservación de la calidad de las aguas nacionales y bienes señalados en la presente Ley;

X. *Instrumentar en el ámbito de su competencia un mecanismo de respuesta rápido, oportuno y eficiente, ante una emergencia hidroecológica o una contingencia ambiental, que se presente en los cuerpos de agua o bienes nacionales a su cargo;*

XIII. Realizar:

1. *El monitoreo sistemático y permanente de la calidad del agua, y mantener actualizado el Sistema de Información de la Calidad del Agua a nivel nacional, coordinado con el Sistema Nacional de Información sobre cantidad, calidad, usos y conservación del Agua en términos de esta Ley.*

5.4.3. De los instrumentos rectores

Para la propuesta de Política Pública, los instrumentos rectores constituyen el sustento legal que dota de viabilidad y factibilidad a la propuesta. Los instrumentos rectores son:

- *LEY DE PLANEACIÓN*

Artículo 1o.- Las disposiciones de esta Ley son de orden público e interés social y tienen por objeto establecer:

I.- Las normas y principios básicos conforme a los cuales se llevará a cabo la Planeación Nacional del Desarrollo y encauzar, en función de ésta, las actividades de la administración Pública Federal;

II.- Las bases de integración y funcionamiento del Sistema Nacional de Planeación Democrática;

III.- Las bases para que el Ejecutivo Federal coordine sus actividades de planeación con las entidades federativas, conforme a la legislación aplicable;

IV. Las bases para promover y garantizar la participación democrática de los diversos grupos sociales así como de los pueblos y comunidades indígenas, a través de sus representantes y autoridades, en la elaboración del Plan y los programas a que se refiere esta Ley, y

Fracción reformada DOF 13-06-2003

V.- Las bases para que las acciones de los particulares contribuyan a alcanzar los objetivos y prioridades del plan y los programas.

Artículo 3o.- Para los efectos de esta Ley se entiende por planeación nacional de desarrollo la ordenación racional y sistemática de acciones que, en base al ejercicio de las atribuciones del Ejecutivo Federal en materia de regulación y promoción de la actividad económica, social, política, cultural, de protección al ambiente y aprovechamiento racional de los recursos naturales, tiene como propósito la transformación de la realidad del país, de conformidad con las normas, principios y objetivos que la propia Constitución y la ley establecen.

Párrafo reformado DOF 23-05-2002

Artículo 16.- A las dependencias de la administración pública federal les corresponde:

Párrafo reformado DOF 23-05-2002

I.- Intervenir respecto de las materias que les competan, en la elaboración del Plan Nacional de Desarrollo, observando siempre las variables ambientales, económicas, sociales y culturales que incidan en el desarrollo de sus facultades;

Fracción reformada DOF 23-05-2002

II.- Coordinar el desempeño de las actividades que en materia de planeación correspondan a las entidades paraestatales que se agrupen en el sector que, conforme a la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, determine el Presidente de la República.

III. Elaborar programas sectoriales, tomando en cuenta las propuestas que presenten las entidades del sector y los gobiernos de los estados, así como las opiniones de los grupos sociales y de los pueblos y comunidades indígenas interesados;

Fracción reformada DOF 23-05-2002, 13-06-2003

IV.- Asegurar la congruencia de los programas sectoriales con el Plan y los programas regionales y especiales que determine el Presidente de la República.

V.- Elaborar los programas anuales para la ejecución de los programas sectoriales correspondientes;

VI.- Considerar el ámbito territorial de las acciones previstas en su programa, procurando su congruencia con los objetivos y prioridades de los planes y programas de los gobiernos de los estados;

VII.- Vigilar que las entidades del sector que coordinen conduzcan sus actividades conforme al Plan Nacional de Desarrollo y al programa sectorial correspondiente, y cumplan con lo previsto en el programa institucional a que se refiere el Artículo 17, fracción II; y

VIII.- Verificar periódicamente la relación que guarden los programas y presupuestos de las entidades paraestatales del sector que coordinen, así como los resultados de su ejecución, con los objetivos y prioridades de los programas sectoriales, a fin de adoptar las medidas necesarias para corregir las desviaciones detectadas y reformar, en su caso, los programas respectivos.

Artículo 21.- El Plan Nacional de Desarrollo deberá elaborarse, aprobarse y publicarse dentro de un plazo de seis meses contados a partir de la fecha en que toma posesión el Presidente de la República, y su vigencia no excederá del período constitucional que le corresponda, aunque podrá contener consideraciones y proyecciones de más largo plazo.

El Plan Nacional de Desarrollo precisará los objetivos nacionales, estrategia y prioridades del desarrollo integral y sustentable del país contendrá previsiones sobre los recursos que serán asignados a tales fines; determinará los instrumentos y responsables de su ejecución, establecerá los lineamientos de política de carácter global, sectorial y regional; sus previsiones se referirán al conjunto de la actividad económica y social, tomando siempre en cuenta las variables ambientales que se relacionen a éstas y regirá el contenido de los programas que se generen en el sistema nacional de planeación democrática. *Párrafo reformado DOF 23-05-2002*

La categoría de Plan queda reservada al Plan Nacional de Desarrollo.

Artículo 22.- El Plan indicará los programas sectoriales, institucionales, regionales y especiales que deban ser elaborados conforme a este capítulo.

Estos programas observarán congruencia con el Plan, y su vigencia no excederá del período constitucional de la gestión gubernamental en que se aprueben, aunque sus previsiones y proyecciones se refieran a un plazo mayor.

- LEY DE AGUAS NACIONALES

ARTÍCULO 14 BIS 5. Los principios que sustentan la política hídrica nacional son:

I. El agua es un bien de dominio público federal, vital, vulnerable y finito, con valor social, económico y ambiental, cuya preservación en cantidad y calidad y sustentabilidad es tarea fundamental del Estado y la Sociedad, así como prioridad y asunto de seguridad nacional;

X. La gestión integrada de los recursos hídricos por cuenca hidrológica, se sustenta en el uso múltiple y sustentable de las aguas y la interrelación que existe entre los recursos hídricos con el aire, el suelo, flora, fauna, otros recursos naturales, la biodiversidad y los ecosistemas que son vitales para el agua;

XIX. El derecho de la sociedad y sus instituciones, en los tres órdenes de gobierno, a la información oportuna, plena y fidedigna acerca de la ocurrencia, disponibilidad y necesidades de agua, superficial y subterránea, en cantidad y calidad, en el espacio geográfico y en el tiempo, así como a la

relacionada con fenómenos del ciclo hidrológico, los inventarios de usos y usuarios, cuerpos de agua, infraestructura hidráulica y equipamiento diverso necesario para realizar dicha gestión;

ARTÍCULO 14 BIS 6. Son instrumentos básicos de la política hídrica nacional:

VI. La prevención, conciliación, arbitraje, mitigación y solución de conflictos en materia del agua y su gestión;

VIII. *El Sistema Nacional de Información sobre cantidad, calidad, usos y conservación del Agua. (Artículo adicionado DOF 29-04-2004).*

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo representa el primer intento por cuantificar los impactos en la calidad del agua por efecto del cambio climático en México. La metodología desarrollada se utilizó para estimar la variación de la temperatura en los cuerpos superficiales de agua para el periodo 1991-2008, tomando como base el periodo 1975-1990. Los resultados muestran una relación estrecha entre la temperatura del agua y la temperatura del aire, ya que se obtienen correlaciones entre el 70 y 95%. En cinco sitios de estudio, entre ellos el lago de Chapala y la laguna de Catemaco, la temperatura promedio del agua presenta incremento para el periodo 1991-2008, con respecto al periodo base. Cuantitativamente este incremento fluctúa, en función de las características del cuerpo de agua, entre 0.7 y 1.3 °C, considerándose un valor promedio aproximado de 0.9 °C.

El desarrollo de la metodología representa un importante avance en la detección de impactos en la calidad del agua por efecto del cambio climático en México. Sin embargo, no se podrán tomar decisiones acertadas para la protección del recurso hídrico si no se cuenta con una base de datos de calidad del agua sólida y adecuada para la evaluación de impactos. Para ello es necesario, como primera etapa, redefinir los sitios de monitoreo así como los parámetros de calidad del agua, pues ellos, en primera instancia, fueron seleccionados sin considerar el tema de cambio climático. Claro, esto implica un gasto importante que el gobierno federal, municipal y estatal deberán cubrir en el corto plazo para poder proponer acciones que permita atenuar los impactos de manera regionalizada.

Con base en los resultados obtenidos en el trabajo, queda de manifiesto que es necesario la incorporación del tema de cambio climático en la planeación y gestión de los recursos hídricos. Se puede considerar que la meta más relevante es la incorporación del tema cambio climático-calidad del agua en la Ley de Aguas Nacionales (LAN) tal y como lo plasma las recomendaciones de políticas públicas propuestas en el trabajo. En este sentido, será un compromiso del gobierno federal y de las instituciones académicas el revisar y a la postre impulsar estas recomendaciones para poder cristalizarlas, y de esta manera ayudar a alcanzar un nivel razonable de sustentabilidad en el uso del recurso hídrico en México.

ANEXOS

7.1. Metodología de política pública

Desde este sentido, podemos entender que todas las políticas que instrumenta el gobierno en su conjunto guardan eminentemente un carácter público, debido a que su marco de atribuciones se encuentra considerado por el bien común instituido en las leyes que rige la acción de gobierno. No obstante, el carácter público de la política demanda apertura y proximidad entre gobiernos y ciudadanos, cuya aproximación determina la comprensión de los problemas públicos desde el hecho de la existencia de racionalidades múltiples que convergen en la sociedad, así como desde la interacción de actores (institucionales/extraintitucionales) que permitan el reconocimiento de las múltiples dimensiones del problema en tanto su planteamiento desde su permanente interrelación con el entorno en el que se sitúa la propuesta.

En este sentido, el proyecto “Impacto del cambio climático en la calidad del agua” constituye un esfuerzo de Política Pública que contextualiza la forma en cómo se ha configurado el problema del cambio climático y sus efectos en la calidad del agua en tanto la acción de gobierno decanta alternativas de acción para su atención. Sin ser el marco exclusivo de su comprensión, el proyecto ha considerado esta labor desde los elementos que se representan gráficamente en el siguiente “Modelo de Política Pública” y se describen a continuación:

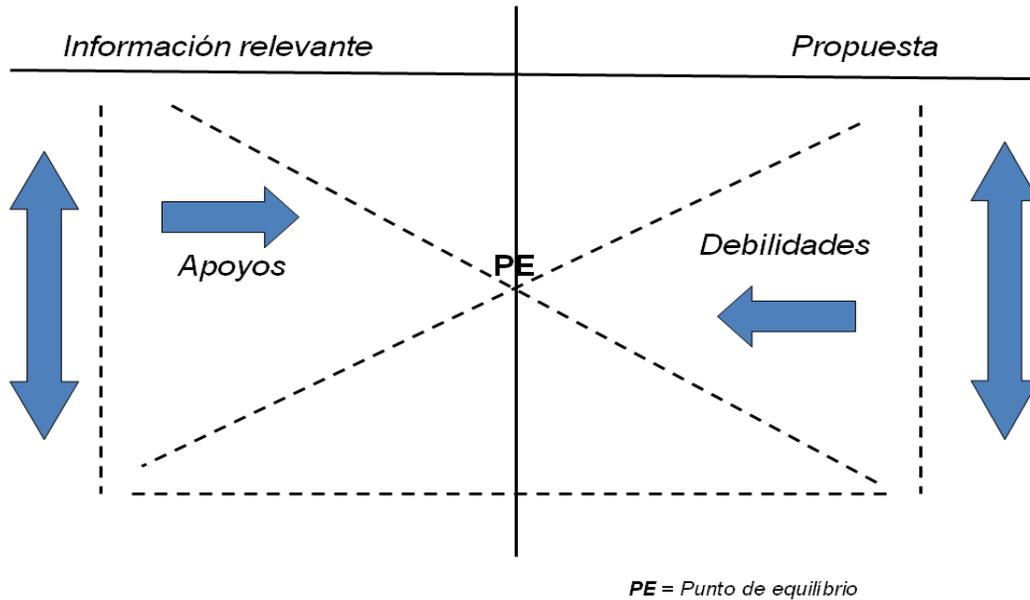
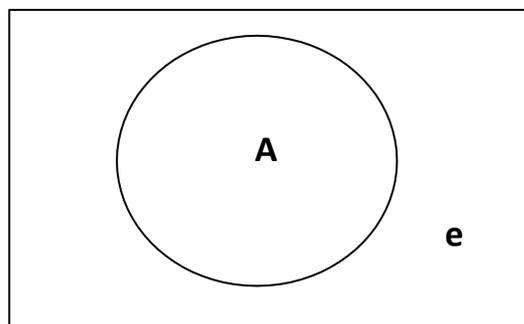


Figura 46. Modelo Prospectivo de Política Pública

Los componentes del modelo que se expone constituyen una metáfora gráfica que nos permite conocer los principales elementos que lo integran y que posibilitan el diseño, operación y evaluación de Políticas Públicas para la solución de problemas desde múltiples ópticas de racionalidad, en dimensiones espacio/temporales diversas.

En términos generales la Información Relevante (IR) está conformada por bases de datos correlacionales, referidas al modelo en su conjunto y que constituyen el elemento fundamental para conocer el problema y el entorno. Se construye de forma permanente a fin de soportar la caracterización del problema y de la propuesta de atención del mismo. En lo que al encuadre de la información se trata, no se refiere sólo al problema sino al contexto dinámico del entorno multivariado en el que se sitúa y se manifiesta, siendo así susceptible de iteración y autoreferencia que gráficamente puede expresarse de la siguiente manera.



$A/e = \text{infinito}$.

Figura 47. Representación gráfica de la relación entre la política Pública y el Espacio o Entorno

Así, la problemática y la propuesta, al estar interrelacionadas con la alimentación de la información permiten establecer formas múltiples de comprender su vinculación con el entorno, y poder así plantear estrategias efectivas de respuesta o atención. Se considera que éstas parten de la ponderación de los costos de un proceso de toma de decisiones específico, derivado de los resultados en el tiempo y en el espacio de las funciones de iteración y autoreferencia que permiten la realización o visualización de simulaciones, vía la construcción de escenarios prospectivos.

De esta forma, la problemática y la propuesta deberán considerarse a partir de la premisa del *continuum debilidad - apoyo - debilidad - apoyo* (disenso – consenso – disenso – consenso) que señala la importancia de la argumentación, la generación de evidencia y la búsqueda de apoyos a la propuesta de acuerdo con el entorno analizado a partir de la información. La estimación adecuada de los disensos y los consensos que permiten la construcción de incentivos y desincentivos en un *continuum* que siempre pondera los beneficios a alcanzar (lo que se va a ganar y lo que se va a dejar de ganar), con una pretensión de adhesión incremental a la propuesta de Política Pública en un marco de flexibilidad que permite adecuarla a los cambios en el entorno producto de su permanente autoreferencia (León y Ramírez, 2006).

7.2. Referencias bibliográficas

León y Ramírez, Juan Carlos (2006), “Modelo Prospectivo de Política Pública” en: León y Ramírez, Juan Carlos y Mora Velázquez Salvador (coordinadores), Ciudadanía, democracia y Políticas Públicas, UNAM, México