

*Sobreexplotación
y contaminación
en aguas subterráneas*

Gonzalo Alducin González
María del C. Carmona Lara
Ismael Herrera Revilla
J. Joel Carrillo Rivera
Adolfo Chávez Rodríguez
Rubén Martínez Guerra
María Aurora Armenta Hernández
Alfredo Faud David Gidi
Ramiro Rodríguez Castillo

IMTA 
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA

SUBDIRECCION GENERAL DE ADMINISTRACION DEL AGUA

G
553.79
A66
25718

SERIE DIVULGACION 27

Septiembre
mayo 1993
IMTA

Sobreexplotación y contaminación en aguas subterráneas



Preámbulo

Gonzalo Alducin González: Instituto de Geofísica, UNAM
María del C. Carmona Lara: Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM
Ismael Herrera Revilla: Instituto de Geofísica, UNAM

Sobreexplotación

J. Joel Carrillo Rivera: Instituto de Geofísica, UNAM
Adolfo Chávez Rodríguez: Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua
Rubén Martínez Guerra: Consultivo Técnico, Comisión Nacional del Agua

Contaminación

María Aurora Armenta Hernández: Instituto de Geofísica, UNAM
Alfredo Faud David Gidi: Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental, SEDUE
Ramiro Rodríguez Castillo: Instituto de Geofísica, UNAM

Septiembre, 1990

Clasif. 9 553.79

A66

25718

C.B. 42987

Proced. DONACIÓN

Fecha 11.03.03

Preámbulo

Cantidad y calidad son la definición del satisfactor agua. El estudio de ambas características y sus alteraciones reviste obvia importancia. Más ahora, cuando ya se empieza a percatar que el agua es finita y sensible, y que nosotros somos su factor de alteración. Los problemas consecuentes se vienen presentando tan de súbito que frecuentemente, o no se está preparado para enfrentarlos, o no hay tiempo para esperar las depuradas soluciones formales de cada caso. "Caminante, no hay camino. Se hace camino al andar", dice el poeta.

Este Coloquio estuvo centrado en la sobreexplotación y la contaminación del agua subterránea, como conceptos cuya definición requieren de una parametrización en términos de cantidad y calidad (lenguaje, conceptualización, metodología y experiencia están en sus esencias). Fue intención de inicio que el evento se desarrollara en un ambiente informal, propicio para la crítica constructiva y el análisis conjunto; el lugar fue idóneo. Dentro de las naturales limitaciones, facilidades y omisiones involuntarias, se pretendió que los ponentes fueran una muestra representativa de lo mejor que dispone el país en estos rubros. La invitación fue abierta, por carteles, y desde allí se motivó al público a participar.

Dada la naturaleza de los conceptos bajo análisis, los expositores deberían representar las esencias básicas que concretaran interrogantes y definieran actitudes para los sectores oficial, académico, así como para la práctica privada. El marco de discusión debería contemplar lo técnico y lo legislativo; los puntos de vista desde el abstracto gabinete hasta la pragmática ejecutiva, dentro de una relación del estudiante y el profesional. La mecánica del Coloquio fue el enfrentamiento, y el objetivo específico incidir sobre la uniformidad del lenguaje. Tenemos la convicción de que acciones como ésta, serán necesarias en el camino del entendimiento, la cooperación y la maduración en el campo de las aguas subterráneas en nuestro país y en cualquier otro.

En este documento sólo se pudo transcribir una parte de las ponencias expuestas y, desafortunadamente, tampoco se pudieron anexar las interesantes y vivas discusiones que se generaron. Quedará al lector forjarse su propio criterio.

Se agradece a los ponentes su entusiasmo y desinteresada colaboración. A la anónima audiencia su participación. A las instituciones organizadoras su respaldo, y en especial al Centro de Innovación Tecnológica de la UNAM el haber facilitado su estupendo auditorio.

J. Joel Carrillo Rivera

Coordinador

Jaime Durazo

Secretario Técnico



Conceptos Legales de Contaminación y Sobreexplotación de las Aguas Subterráneas en México

María del Carmen Carmona Lara
Instituto de Investigaciones Jurídicas
UNAM

El presente análisis tiene por objeto dar a conocer cómo aborda los conceptos de contaminación y sobreexplotación de las aguas subterráneas, la legislación ecológica y de aguas en México con el fin de que estos sean difundidos en la comunidad científica para dar pie a su revisión y perfeccionamiento, provocando así una eficacia de la normatividad en la materia, y la congruencia entre los conceptos que son operativos en la ciencia y los que son aplicables, a través de la legislación a casos concretos.

Nada más difícil que intentar un cierre semántico en el mundo de la ciencia, los conceptos varían con enorme frecuencia debido al avance de la investigación, esta situación no se da con tal rapidez en el campo de la legislación, en donde los conceptos comúnmente tardan años en ser revisados, retardando así la actualización de la legislación.

Esta situación no se convertiría en problema, si los conceptos que la legislación recoge no fueran pauta para ciertas acciones de los individuos y del Gobierno, de ahí que en los últimos años se ha hecho necesario, a través de análisis interdisciplinarios, la integración de conceptos llamémosles "operativos", que tengan un sustento científico, que avalen su racionalidad, y una aplicación práctica que sirva de guía para ciertas actividades.

En los últimos años se ha tomado conciencia del problema de la contaminación y sus efectos, pero para poder imponer un freno, es necesario aclarar qué se entiende por ello, y a través de qué parámetros, índices y niveles ya podemos considerar que se está contaminando. Aquí es en donde encontramos la necesaria relación entre la ciencia, la técnica y la normatividad, ya que serán ellas las que propondrán, en cierta forma, el modelo a seguir, y lo que puede ser vertido o emitido sin alteración profunda al entorno.

De ahí la necesidad de hacer una revisión de estos conceptos para darles congruencia. Queremos aclarar que el presente análisis es tan sólo un primer intento de ello. Apelamos a la comprensión de los científicos en la materia. Si bien no se aborda con profundidad el aspecto técnico-científico, ya que esto queda fuera de nuestra especialidad, reseñaremos lo que ha trascendido a la legislación, recordando así el famoso juego del "teléfono descompuesto" al que tal vez ha jugado el legislador tergiversando ciertos términos.

Una aclaración más, este ejercicio desde el punto de vista jurídico es indispensable, ya que recordemos que las leyes, para poder aplicarse deben ser interpretadas, por lo que cualquier análisis de los conceptos es útil en esta materia.

MARCO CONCEPTUAL DE REFERENCIA

Generalidades

Hablar de contaminación es entrar a un mundo de contradicciones y de pesares desde el punto de vista conceptual. Para poder allanar un poco este tortuoso camino, es necesario hacer una serie de aclaraciones.

La contaminación es un fenómeno, un proceso que, como tal, se integra por una serie de elementos y momentos. No podemos hablar de contaminación sin hacer referencia a qué la produce y a qué elemento de la naturaleza afecta. Así, encontramos que la contaminación necesita para su análisis de un apellido, es decir, de una referencia al elemento natural que altera.

Para Fernando Parra "contaminación, en sentido amplio, es cualquier sustancia extraña a un medio dado. También se habla de contaminación atmosférica para designar cualquier impureza contenida en el aire por actividades humanas; acuática, ídem para las aguas, o según la actividad de la que proceda: industrial, urbana, electromagnética. Originalmente el término estaba exclusivamente restringido a la contaminación radioactiva. Un término sinónimo es polución. Para los ecólogos es una enfermedad del transporte ya que en esencia consiste en juntar elementos de por sí dispersos y soltarlos juntos en un punto, también es un ciclo mal cerrado. Se considera, por los medios de comunicación, el problema ambiental por antonomasia." ¹.

Por ello la contaminación tiene que ser clasificada como: contaminación del suelo, del agua, de la atmósfera. También se utiliza este concepto para denominar el deterioro del paisaje, a través de la contaminación visual, y se ha llevado el concepto a niveles tales como la contaminación mental.

En el caso que nos ocupa, la contaminación del agua, también es necesario hacer una clasificación, atendiendo a la clasificación que a su vez tiene el agua. Así encontramos la contaminación de las aguas marinas, superficiales y subterráneas.

También es preciso aclarar que la contaminación de las aguas, ha creado un nuevo tipo de clasificación, existiendo ahora las aguas residuales como un concepto clave en el análisis del concepto de contaminación del agua en general.

Para el tema de contaminación de las aguas se tiene que hacer referencia a la calidad del agua, ya que de su tipo de uso dependerá su grado de depuración. Así encontramos que existe una serie de clasificaciones de las aguas de acuerdo a su uso.

La Comisión de Sanidad del Agua de Carolina del Norte, después de haber realizado una lista de los recursos con que contaba el estado, clasificó las aguas de la siguiente forma:

A-I Agua que necesita solamente una desinfección efectiva para ser apropiada para beber, cocinar o procesar alimentos.

A-II Agua que necesita otros procesos de desinfección para ser empleada en los usos antes citados.

B Agua adecuada para el aseo o cualquier uso que no sea beber, cocinar o procesar alimentos.

C Agua adecuada para la pesca pero no para usos indicados en A y B.

¹ Fernando Parra *Diccionario de ecología, ecologismo y medio ambiente*, Alianza Editorial, Madrid, 1984, p. 100]

D Agua adecuada para la agricultura, el enfriamiento industrial y la supervivencia de los peces, pero no para los usos indicados en A, B y C.

E Agua adecuada para la navegación o la eliminación de las aguas cloacales, pero no en ninguna de las otras clasificaciones.

SA, SB, SC, SE Aguas salinas adecuadas para la pesca de mariscos, higiene (bajo control sanitario), la pesca en general y la navegación ².

Como se puede apreciar, el concepto de contaminación se relaciona a su vez con otros conceptos, necesitándose una revisión integral de los mismos.

Sobreexplotación

Si el concepto de contaminación es difícil de definir, el término sobreexplotación lo es aún más, debido a que en cierta forma hace referencia a un "quantum" que necesariamente tiene que basarse en valores subjetivos a pesar de que existen datos a nivel científico.

Lo primero a dilucidar para aclarar el concepto es responder a las preguntas: ¿Qué es sobreexplotación? ¿Quién lo determina? ¿Con qué bases?

El concepto de sobreexplotación tiene que ver con las aguas subterráneas. Los depósitos subterráneos constituyen una fuente principal de agua dulce. En función de la capacidad de almacenamiento, las capas acuíferas subterráneas mundiales contienen más del 90% del agua fresca total con la que se cuenta para uso humano. Mucha de esta agua se encuentra a grandes profundidades lo que hace muy costosa su explotación ³.

El agua profunda se suele mover muy lentamente. Su flujo se mide en pies por año en comparación con las corrientes superficiales, cuyas velocidades se dan en pies por segundo. Debido a esto, la composición de cualquier pozo es por lo general bastante constante. Aunque los pozos poco profundos pueden variar estacionalmente en su temperatura, la mayor parte de los pozos también mantienen constante su temperatura. Puesto que el agua ha pasado a través de kilómetros de formaciones de rocas porosas, invariablemente está clara si el pozo se ha perforado adecuadamente al evitar que la arena fina entre en el recubrimiento ⁴.

Puesto que la composición está relacionada con la química de las formaciones geológicas a través de las cuales ha pasado el agua, las aguas de los pozos perforados en diferentes estratos tienen características diferentes. Algunos mantos acuíferos son tan grandes que pueden cubrir varios estados en el área total, y los pozos perforados en un manto acuífero particular producen agua de composición similar ⁵.

Si el grado de flujo total de un acuífero es mayor que la proporción de agua que entra a través de los estratos porosos circundantes, la capa de agua freática disminuye perceptiblemente. Esta disminución en la carga hidrostática es más o menos proporcional a la cantidad de agua que se pierde. La capacidad específica de un pozo generalmente es el grado de descarga dividido por el descenso del nivel. El descenso del nivel Drawdown (Drawdown: descenso del nivel de un pozo determinado por el grado de extracción de agua

² H.G. Deming. *El Agua. Un recurso insustituible*, Ed. Nuevomar, México, 1979, p. 249

³ Frank N. Kemmer y John McCallion *Manual del Agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones*, McGraw-Hill, México, 1982, p. 2-10

⁴ *Ibid.*, p. 2-11

⁵ *Ibid.*

comparado con su grado de realimentación natural) consiste en la declinación de la carga hidrostática de un pozo debido al bombeo ⁶.

El drenaje de los pantanos, o un exceso de pozos de agua en un área determinada, pueden disminuir seriamente la capa de agua freática mucho tiempo antes de que se note qué está sucediendo. En muchas regiones la retroalimentación natural es suficiente para asegurar una provisión estable de agua en la proporción que se usa actualmente. Las zonas áridas, en las cuales los niveles de agua bajan permanentemente, requieren de la alimentación artificial porque la natural tardaría varios siglos.

Como se puede ver, después de esta breve revisión de conceptos, para determinar que un pozo o manto está sobreexplotado se requiere de una serie de estudios que avalen esta afirmación. No basta con el descenso del nivel, se requiere también evaluar la capacidad de retroalimentación del manto.

A las preguntas de quién determina que existe sobreexplotación, y cuando ocurre ésta, las respuestas las encontramos en la legislación de aguas, que a continuación reseñaremos.

Análisis de los Conceptos Legales

A. Ley Federal de Aguas y su Reglamento Relativo a Aguas Subterráneas

La *Ley Federal de Aguas* regula la explotación, uso y aprovechamiento de las aguas de propiedad de la Nación. En este sentido cabe aclarar que el artículo 27 Constitucional enumera cuáles son las aguas que entran dentro de esta categoría. Sin embargo, dentro de éstas están también las subterráneas, que en el texto constitucional se encuentran de forma ambigua en el art. 5º fracción XIX, y las aguas residuales que conforme al art. 8º, son también propiedad de la Nación.

El artículo 4º de la Ley tiene una serie de definiciones, en ellas no encontramos ni el término contaminación, ni el término sobreexplotación.

Se declara de interés público el control de la extracción y utilización de las aguas del subsuelo, inclusive de las libremente alumbradas, conforme lo dispongan los reglamentos que al efecto dicte el Ejecutivo Federal.

Podemos inferir, a través del análisis de la Ley, que existe un interés de preservar los recursos hidráulicos a través de medidas de conservación. Un ejemplo de ello es el artículo 40 que establece que en los casos de disminución, escasez o contaminación de las fuentes de abastecimiento y para proteger los servicios de agua potable, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos podrá restringir y aún suspender otras explotaciones y aprovechamientos.

La figura de la veda se encuentra en íntima relación con el concepto de sobreexplotación. Al respecto, en el capítulo de aguas del subsuelo, la Ley señala que los decretos de veda servirán para regular la explotación del manto, y en todo caso se regulará a través de la inclusión de medidas que eviten la contaminación del acuífero.

El *Reglamento de Aguas del Subsuelo* (29 de diciembre de 1956), establece una serie de requisitos para llevar a cabo la explotación de las aguas del subsuelo. En su artículo 70 da una serie de definiciones, en las que no encontramos ni el término sobreexplotación, ni el término contaminación. Esto es explicable por la fecha de expedición del Reglamento, ya que es la prueba más fiel de la falta de revisión y actualización de la legislación en materia de aguas.

⁶ H.G. Deming, Op. cit., p. 71

Sin embargo, existen conceptos relacionados con los anteriores tales como:

Aguas del subsuelo: las que se obtengan por medio de pozos, norias, galerías filtrantes y las aguas termales, aún cuando broten naturalmente del terreno.

Acuífero: roca, formación, napa o manto que tiene agua en cantidad, en poros, grietas u otras cavidades en forma que permita su extracción por gravedad o bombeo.

Abatimiento: descenso del agua a partir del nivel estático producido por bombeo; por drenaje de gravedad, el descenso del nivel correspondiente después de establecido el régimen con cierto gasto extraído.

Balance de Aguas Subterráneas o Equilibrio Hidrológico: estimación detallada de la cantidad de agua agregada a un receptáculo de aguas subterráneas (incremento) comparada con la cantidad de agua extraída del mismo receptáculo (decremento).

El problema de la sobreexplotación es abordado en el reglamento de forma vaga en el artículo 32, que tiene por objeto regular la "reglamentación" de las aguas del subsuelo a través de las vedas.

Así se dice que la Secretaría establecerá las vedas y reglamentará el alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo, en los casos en que no se afecta el interés público. Entre ellos se encuentra la Fracción Primera que señala: "cuando por SOBREENPLOTAION de los acuíferos se corra el peligro de su agotamiento o de un abatimiento de los niveles que impida su explotación económica".

No tenemos idea del daño que ha causado esta forma tan ambigua e irresponsable de manejar la conservación de los mantos acuíferos. La legislación sólo hace un balance aproximado y mediante él impide la extracción de aguas del subsuelo vedándolas, o bien, es el caso más grave, permite su extracción sin tomar en cuenta el manto y su nivel y calidad.

Un país como el nuestro, con recursos hidráulicos escasos, requiere una regulación seria para evitar estos problemas a los que hay que enfrentarse con todo el avance científico y tecnológico generado, con un avance que trascienda la legislación que es la guía para determinar las conductas individuales al respecto.

Como puede apreciarse, urge una revisión interdisciplinaria de la legislación, y la participación de los especialistas en la materia con el necesario y urgente objeto de analizar la reglamentación del agua.

B. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

La llamada *Ley Ecológica* es de reciente aparición, 1988; podemos decir que estamos ante su nacimiento. Su gestación fue muy dura y tardía; la primera ley en la materia data de los años setenta. Un fallido intento en 1982 hizo que dicha Ley casi no tuviera fundamento constitucional ni aplicación práctica, lo que ocasionó que los problemas ambientales avanzaran sin remedio.

Esta Ley Ecológica, aparecida en 1988, establece que contaminación es la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico.

En este sentido la misma Ley señala que materia contaminante es toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural.

La Ley señala además que la alteración de las relaciones de interdependencia entre los elementos naturales que conforman el ambiente y que afecta negativamente la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos, es un desequilibrio ecológico.

Para el caso que nos ocupa, el aprovechamiento de las aguas del subsuelo tendrá que ser racional considerando como criterio la protección de suelos, áreas boscosas y selváticas, el mantenimiento de caudales básicos de las corrientes de agua, y la capacidad de recarga de los acuíferos.

Este criterio deberá de ser considerado en el establecimiento de vedas de aguas del subsuelo y en las suspensiones que decreta el Ejecutivo Federal en los términos de la Ley Federal de Aguas de todos aquellos aprovechamientos, obras y actividades que dañen los recursos hidráulicos nacionales o afecten el equilibrio ecológico de una región.

Consideraciones Finales

Esta breve revisión es tan sólo una muestra de la necesidad de actualización de la legislación de aguas en nuestro país. Sabemos que esto se puede realizar a través de las siguientes acciones en materia legislativa:

- La reforma constitucional al Artículo 27 para dar un régimen específico a las aguas del subsuelo y a las residuales.
- La reforma integral de la Ley Federal de Aguas y la actualización de su reglamentación, en donde se establezca un régimen adecuado y moderno a las aguas del subsuelo.
- La expedición del *Reglamento de Control de la Contaminación del Agua* en el que se incluyan las aguas del subsuelo y la protección de los acuíferos.
- La expedición de normas técnicas para que se aclaren los niveles de abatimiento y sobreexplotación, atendiendo a parámetros regionales y a los avances científicos que existen en esta materia.

No basta con saber que el problema del agua es uno de los más graves que enfrenta nuestro país; se requiere una verdadera toma de decisión de lo que dependerá nuestro futuro. Esta decisión no incumbe exclusivamente al Gobierno, debe ser compartida por todos y en especial por el sector científico. De ahí que estas breves notas sean una exhortación para que este sector promueva una legislación adecuada para dar la batalla al problema del agua. Las leyes deben ser las fórmulas de solución, no los obstáculos para el adecuado manejo de los recursos naturales.

Control de la Contaminación del Agua en México

Ing. Alfredo Fuad David Gidi
Director de Coordinación Intersecretarial
Dirección General de Prevención y Control
de la Contaminación Ambiental. SEDUE

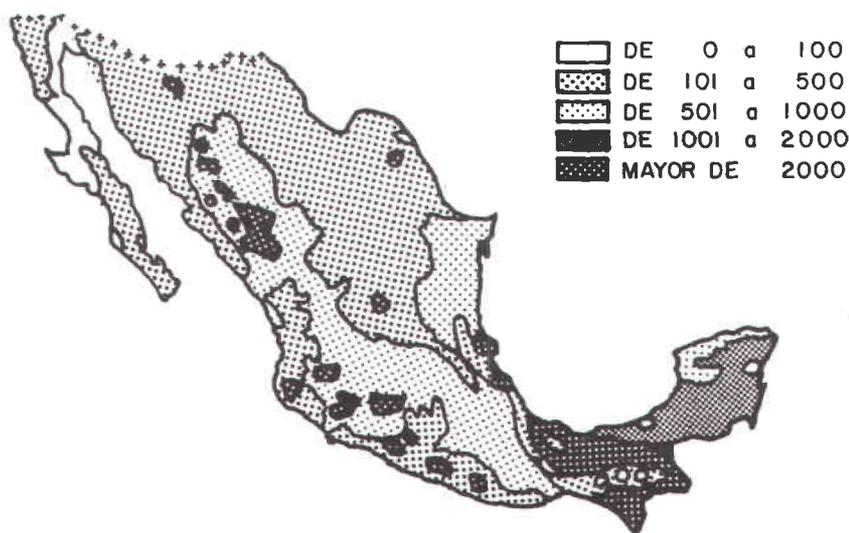
México enfrenta actualmente grandes problemas. Entre ellos destacan la disminución acelerada de la disponibilidad de agua en las zonas más pobladas y la creciente contaminación de los cuerpos de agua susceptibles de servir como fuentes de abastecimiento. Nuestro país no ha podido sustraerse de las consecuencias de un desarrollo acelerado que ha propiciado el aumento en la extracción y el consumo de agua. Esto se traduce, consecuentemente, en una mayor generación de aguas residuales que, al ser descargadas sin tratamiento en los cuerpos receptores, perjudican sus usos legítimos y disminuyen su potencial de aprovechamiento, por lo que posiblemente, en el futuro cercano se presentarán déficits críticos en algunas regiones, lo que plantea un serio desafío para las autoridades a cargo de la administración y distribución del agua y disposición de las aguas residuales.

Distribución Geográfica del Agua

México cuenta con suficientes volúmenes de agua como para satisfacer las demandas de abastecimiento de todos los sectores. Sin embargo, su distribución geográfica es completamente adversa para casi la mitad del territorio nacional. El país se encuentra dividido en 320 cuencas hidrológicas, con un escurrimiento medio anual de aproximadamente 410,000 millones de metros cúbicos en promedio, cifra que representa prácticamente el total disponible como recurso renovable. El estudio de su distribución nos indica que en el norte sólo se tiene un escurrimiento de 12,300 millones de metros cúbicos, que representan 3% del total en una área equivalente al 30% del país, mientras que se tienen 205,000 millones de metros cúbicos en el sureste, que representan el 50% de la disponibilidad total en una área no mayor al 20% del territorio.

Dicho de otra manera, la mayor disponibilidad de agua se encuentra por debajo de los 500 m.s.n.m. y al sur de los paralelos de 28° y 24°, en las fajas costeras del Pacífico y Golfo de México, respectivamente; en tanto que las mayores necesidades se presentan arriba de esta altitud y al norte de los paralelos mencionados. (fig 1).

FIGURA I PRECIPITACION MEDIA ANUAL



Comparando las zonas de disponibilidad del recurso con las de asentamientos humanos e industriales, existen situaciones contrastantes, tales como que más del 85% del agua del país se encuentra en la zona baja, 500m abajo de la costa, mientras que más del 70% de la población y el 80% de la planta industrial se localizan en la zona alta, 500m arriba de la costa; de ésta última el 55% se encuentra en el Valle de México, que sufre graves problemas de agua.

Entre los usos a que se destina el recurso hidráulico, están:

- a) Doméstico
- b) Agrícola
- c) Producción de energía eléctrica
- d) Industrial
- e) Conservación y desarrollo de flora y fauna acuáticas
- f) Recreación y navegación

Uso doméstico

Este, de acuerdo con la legislación actual, tiene preferencia sobre las otras clases de usos y su abastecimiento está en acuerdo con la importancia política, económica y grado de desarrollo de la población. En las localidades rurales menores de 5,000 habitantes, la dotación de agua es la necesaria para satisfacer las necesidades primarias de la población; en tanto, en las grandes urbes, la dotación es para satisfacer plenamente las necesidades de los habitantes, incluyendo usos públicos, domésticos, industriales y comerciales, comprendiendo los sistemas de abastecimiento en tomas domiciliarias con agua entubada dentro de las viviendas.

La dotación varía de acuerdo con el lugar y con la disponibilidad del agua; existen localidades rurales situadas en las zonas áridas del norte, en donde la dotación llega a ser de 10 litros por habitante por día, mientras que en otros lugares es mayor a 300 litros.

En el cuadro 1 se muestra el consumo anual de acuerdo a la población total.

Uso energético

Si algo puede afectar grandemente la actividad económica es la falta de generación de energía eléctrica, pues es bien sabido que el desarrollo, progreso y bienestar humano, entre otras cosas, se deben a ella.

La capacidad instalada en México es de 4,175 millones de kw y la energía asciende a 14,717 millones kw/h anuales, que se obtienen a razón de 8,637 millones en plantas hidroeléctricas; 5,700 en plantas termoeléctricas; 377 en plantas de combustión interna y; 3 millones en plantas geotérmicas. Aproximadamente el 20% de la energía hidroeléctrica se genera en las plantas instaladas en presas destinadas a diversos propósitos, especialmente riego y control de avenidas; aún no se conoce el volumen de agua empleada, ya que el agua utilizada es de paso y posteriormente se emplea en actividades prioritarias.

Uso industrial

Es considerable la cantidad de agua utilizada en la mayor parte de las industrias primarias y secundarias en procesos de elaboración, transformación y en algunos casos

para enfriamiento. La demanda depende del tipo de industria. Resulta muy difícil precisar la cantidad de agua requerida para producir un determinado artículo, pero de acuerdo con la información existente, se requiere un metro cúbico para obtener cualquiera de las siguientes cantidades: 30 kg de acero, 70 kg de pulpa de madera, 12 kg de hule sintético, 50 litros de gasolina, 20 kg de productos petroquímicos, 18 litros de cloro, 4 kg de tela; ésto nos da una idea del volumen requerido.

Cuadro 1 CONSUMO DE AGUA PARA USO DOMESTICO

AÑOS

CONCEPTO	1970	1980	1990	2000
Población Total (1)	51.09	71.93	99.67	135.09
Consumo Anual (2)	2050	3580	7558	10958
Población Urbana (1)	30.47	47.99	71.98	102.93
Consumo Anual (2)	1894	2390	7390	10710
Población Rural (1)	20.62	23.95	27.69	32.16
Consumo Anual (2)	156	190	228	248

Fuente: Plan Nacional Hidráulico.

(1) En millones de habitantes.

(2) En millones de metros cúbicos.

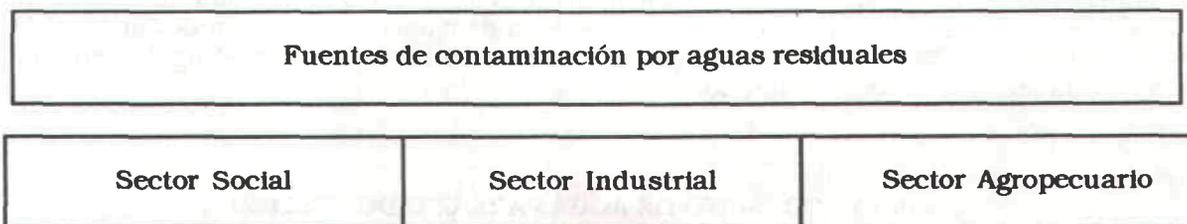
Se estima que en 1980 se ocupó un volumen anual de 4,600 millones de m³. Los consumos para 1990 y 2000, de acuerdo con la información existente, que fueron obtenidos en forma aproximada por medio de proyecciones del crecimiento de la demanda de productos y el volumen requerido para no declinar la tasa de desarrollo general, serán de 9,500 y 22,700 millones de m³ respectivamente.

Fuentes de Contaminación

Un aspecto fundamental en la definición de la problemática de contaminación del agua en el país lo es sin duda la identificación de las fuentes a través de las cuales se incorporan las cargas contaminantes que deterioran el recurso hidráulico y comprometen el sano desarrollo de la población y su actividad productiva.

En México, como en muchos países del mundo, las principales fuentes de contaminación se han agrupado de acuerdo con su procedencia en tres sectores. (Fig. 2).

Figura 2 CLASIFICACION DE LAS FUENTES DE CONTAMINACION



- El social, que corresponde a las cargas de residuos de origen doméstico y público que constituyen las aguas residuales municipales.

- El agropecuario, representado por los afluentes de instalaciones dedicadas a la crianza y engorda de ganado mayor y menor, así como por las aguas de retorno de los campos agrícolas.

- El industrial, representado por las descargas originadas por el desarrollo de actividades correspondientes a la extracción y transformación de recursos naturales en bienes de consumo y satisfactores para la población.

Sector Social

En relación con las aguas residuales municipales, su generación es importante en el contexto nacional, pues se relaciona con la cobertura de los servicios de agua potable y alcantarillado con que cuentan las poblaciones.

Dicha cobertura se ha visto favorecida en los grandes asentamientos urbanos, mientras que en las zonas rurales y pequeñas ciudades muestran significativo rezago.

La población de la república mexicana ha mostrado una fuerte inclinación a concentrarse en las grandes ciudades, de manera tal que la población urbana se incrementó del 50% en el año de 1960 al 70% en el de 1986, sin que se haya logrado aún frenar tal situación (cuadro 2).

Cuadro 2 . COMPORTAMIENTO DE LA POBLACION URBANA EN MEXICO

AÑO	POBLACION URBANA %
1960	50
1970	59
1980	66
1986	70

La población del país para 1987 se estimó en 79 millones de habitantes; 70% población urbana y 30% población rural, los cuales se distribuyen en 125,300 poblaciones clasificadas de la siguiente manera:

- Dispersa: población menor a 1,000 habitantes.
- Centro de integración: población mayor de 1,000 y menor de 15,000 habitantes.
- Centro pequeño: población mayor de 15,000 y menor de 50,000 habitantes.
- Centro mediano: población mayor de 50,000 y menor de 1,000,000 de habitantes (ciudades medias).
- Areas metropolitanas: población mayor de 1,000,000 de habitantes (ciudades grandes) de acuerdo a lo indicado en el cuadro.

Hay que destacar que el 50.73% de la población del país se asienta en 98 de las 125,300 poblaciones del país.

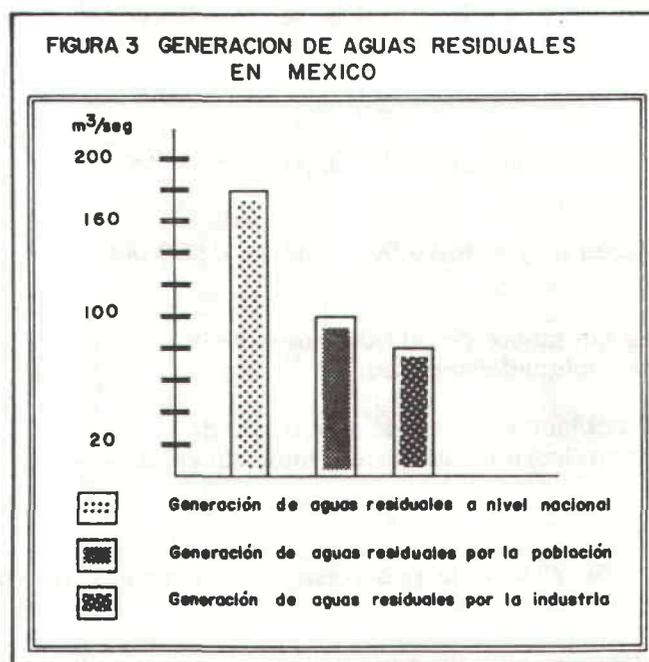
Por lo que respecta a los servicios de agua potable y alcantarillado, debe citarse que la cobertura para población urbana es de 76% en agua potable y 65% en alcantarillado, mientras que para la población rural es de 49% en agua potable y 12% en alcantarillado (cuadro 3).

Cuadro 3 COBERTURA DEL SERVICIO DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO EN MEXICO

SERVICIO	COBERTURA URBANA (%)	COBERTURA RURAL (%)	TOTAL NAL. (%)
AGUA POTABLE	76	49	68
ALCANTARILLADO	65	12	49

De lo anterior se concluye que actualmente 25.3 millones de habitantes no tienen acceso al servicio de agua potable, mientras que 40.1 millones no tienen servicio de alcantarillado.

Las localidades que concentran la mayor proporción de habitantes son aquellas en las que se concentra también la mayor parte de las actividades industriales de la nación y las que disponen de una mayor cobertura en los servicios de agua potable y alcantarillado. Estas constituyen las fuentes principales de generación de aguas residuales. Los ejemplos más claros son las zonas localizadas en torno a las ciudades de México, Monterrey y Guadalajara que generan 46m³/s; 8.5 y 8.2m³/s de aguas residuales respectivamente, lo que corresponde al 34.0% del total generado a nivel nacional, estimado en 184 m³/s. De ellos 105 corresponden a la población y 79 a la industria (fig. 3).



Las expectativas en cuanto al comportamiento en la generación de aguas residuales respectivamente indican que para el año 2000, de una generación de 207 m³/s, 118.4 corresponderá a la población y 89.4 a la industria.

Sector agropecuario

Respecto al sector agropecuario, las superficies en producción agrícola de riego y temporal acumuladas entre los años 1982, 1985, 1990 y 2000, totalizan: 19.3, 20.6, 22.9 y 26 millones de hectáreas respectivamente, de acuerdo con la información y expectativas del Plan Nacional Hidráulico (cuadro 4).

Cuadro 4 SUPERFICIE DEL PAIS EN PRODUCCION Y A FUTURO

AÑO	SUPERFICIE Ha. (En millones)
1982	19.3
1985	20.6
1990	22.9
2000	26.0

Respecto a la demanda de agua y generación de aguas residuales se observa que en el año de 1980 se extrajeron 44,760 millones de metros cúbicos de agua, cifra que se incrementará para los años 1990 y 2000 en 69,542 y 92,380 millones de metros cúbicos respectivamente (cuadro 5).

Cuadro 5 EXTRACCION DE AGUA Y GENERACION DE AGUAS RESIDUALES POR LA ACTIVIDAD AGRICOLA

AÑO	EXTRACCION MILLONES DE M3	DESCARGA MILLONES DE M3
1980	44 760	8 056.8
1990	69 542	8 345.0
2000	92 380	11 085.0

No obstante la diversidad de técnicas de riego utilizadas en el país, se estima un consumo del 82% del agua aplicada, lo que proporciona un indicador de la generación de aguas residuales provenientes de esta fuente, la cual se estima en las siguientes cifras expresadas en metros cúbicos por año:

1990 - 8,345 m³/s

2000 - 11,085 m³/s

Evidentemente las aguas de retorno agrícola constituyen una fuente de contaminación muy importante, cuyo impacto se ha manifestado ampliamente en el país, sobre todo en el elevado porcentaje de cuerpos de agua que se encuentra en condiciones potenciales de eutroficación.

Sector Industrial

En relación con el sector industrial, en México se logró hacia el año 1979 un ritmo anual de crecimiento continuo superior al 8%, lo que permitió el surgimiento de una fuerte planta productiva la cual se desarrolló con una alta concentración principalmente en las ciudades de México, Monterrey y Guadalajara (fig. 4).

Por otra parte, el uso del agua como vehículo de desechos contaminantes y la poca importancia dada a su manejo y disposición, ha convertido a este sector en un elemento fundamental que debe considerarse en el control para la preservación del recurso hidráulico cuya disponibilidad se ve comprometida en amplias zonas del país (fig. 5).

FIGURA 4. REGIONALIZACION DE ACTIVIDADES INDUSTRIALES

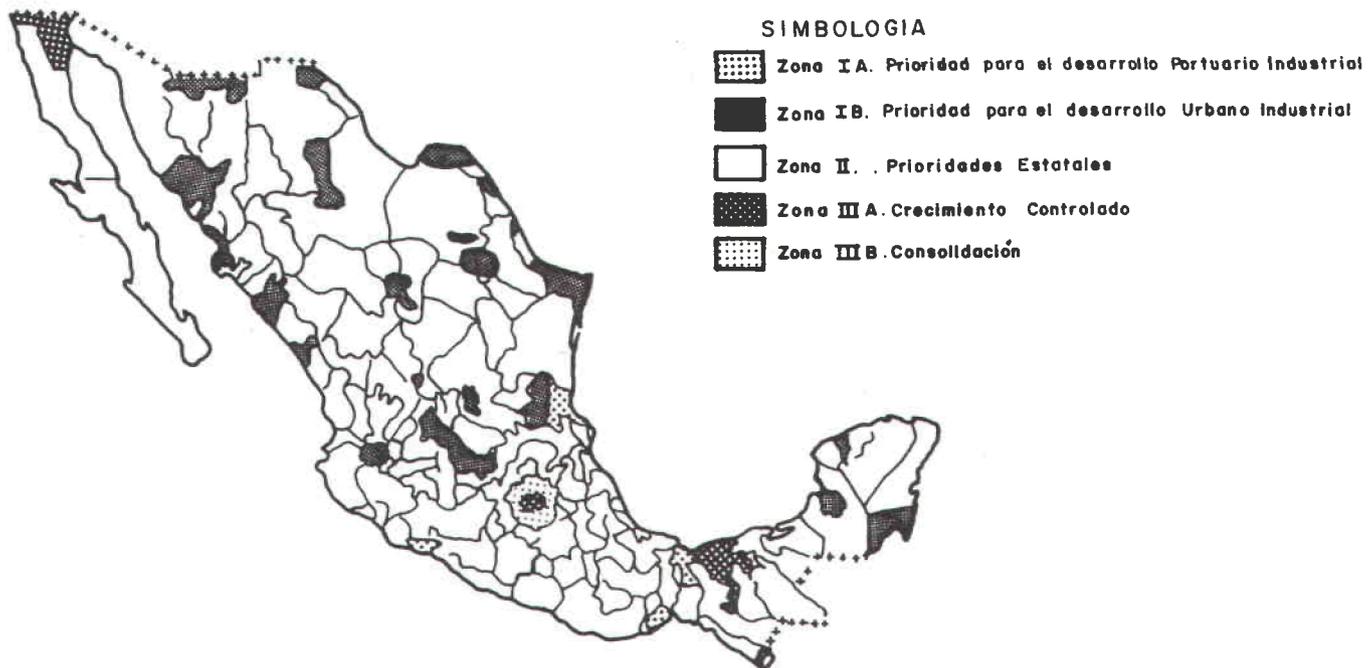
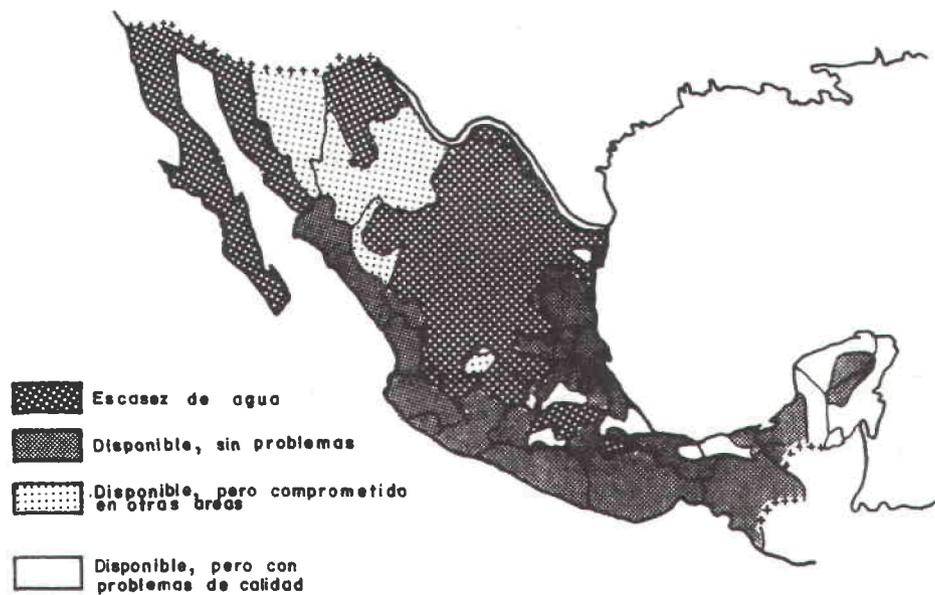


FIGURA 5. DISPONIBILIDAD REGIONAL DE AGUA



El sector industrial en México se encuentra clasificado en 39 grupos que, de acuerdo con los índices de extracción, consumo y contaminación, son los más importantes dentro de este contexto. Se señalan como los principales giros industriales responsables de la generación de mayores descargas de aguas residuales los siguientes: azúcar, química, papel y celulosa, petróleo, bebidas, textil, siderúrgica, eléctrica y alimentos (cuadro 6).

Cuadro 6

GRUPOS INDUSTRIALES QUE INCIDEN MAYORMENTE EN LA PROBLEMÁTICA DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO

GRUPO 13	Extracción y beneficio de minerales metálicos	143
GRUPO 20	Fabricación de alimentos	25,835
GRUPO 21	Elaboración de bebidas	878
GRUPO 23	Industria textil	1,753
GRUPO 24	Fabricación de prendas de vestir y otros artículos confeccionados con textiles y otros materiales, excepto calzado	30
GRUP 25	Fabricación de calzado e industrias del cuero	390
GRUPO 26	Industria y productos de madera y corcho excepto muebles	281
GRUPO 28	Industria de papel	545
GRUPO 30	Industria Química	1,838
GRUPO 31	Refinación de Petróleo y derivados del carbón mineral	64
GRUPO 32	Fabricación de productos de hule y plástico	195
GRUPO 33	Fabricación de productos minerales no metálicos: excepto del petróleo y del carbón	4,644
GRUPO 34	Industria metálica básica	324
GRUPO 35	Fabricación de productos metálicos excepto maquinaria y equipo	1,610
GRUPO 37	Fabricación y ensamble de maquinaria, equipos, aparatos, accesorios y artículos electrónicos y sus partes	194
GRUPO 38	Construcción, reconstrucción y ensamble de equipo de transporte y sus partes	885
GRUPO 39	Otras industrias manufactureras	91

39,700

TOTAL

Como puede observarse, tales giros corresponden en conjunto a prácticamente al 82% del total de las aguas residuales generadas por el sector, destacando las industrias azucarera y química con el 59.8% del total (cuadro 7).

Cuadro 7

**PRINCIPALES GIROS INDUSTRIALES RESPONSABLES DE LAS MAYORES
DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN MEXICO**

INDUSTRIA	EXTRACCION % RELATIVO	CONSUMO % RELATIVO	DESCARGA % RELATIVO
AZUCARERA	35.2	22.3	38.8
QUIMICA	21.7	24.4	21.0
PAPEL Y CELULOSA	8.2	16.1	6.0
PETROLEO	7.2	3.7	8.2
BEBIDAS	3.3	6.4	2.4
TEXTIL	2.6	2.4	2.7
SIDERURGICA	2.5	5.5	1.7
ELECTRICA	1.5	4.7	0.7
ALIMENTOS	0.2	0.3	0.2
RESTO DEL SECTOR	0.17	14.1	18.1

Sin embargo, considerando no solamente los volúmenes de agua manejados, sino las circunstancias locales en las que se desenvuelve la industria, se han establecido como las más importantes en el ámbito de la prevención y control de la contaminación del agua en México, las siguientes: azúcar y alcohol; refinación de petróleos y petroquímica; papel y celulosa; curtiduría; química; textil y alimenticia.

Identificación de la problemática

Para la actualización del estudio y evaluación mediante indicadores del grado de contaminación del agua en las cuencas del país, referido en el inciso 2, se tomó como base información estadística publicada por la Secretaría de Programación y Presupuesto, así como de otras dependencias. Se consultaron además los planes y programas de desarrollo,

tanto urbano, industrial, agrícola y ganadero, como los relativos a prevención y control de la contaminación ambiental.

La información se manejó a nivel municipal, estatal y de cuenca hidrológica, cubriéndose el total del territorio nacional por medio de datos estadísticos. Se analizaron 218 cuencas hidrológicas que cubren el 77% de la superficie del país: 72% de la producción total industrial; 98% del área bajo riego y 93% de la población existente del país.

Para estimar los factores de descarga de contaminantes tanto de origen urbano como industrial, se analizaron algunos estudios realizados al respecto, registros de descarga de aguas residuales, y una serie de bibliografías relacionadas con el tema. Los factores investigados fueron: demanda y consumo de agua y descarga de aguas residuales, carga de DBO por la población y por las 259 diferentes clases de actividades industriales.

Una vez conocidos estos factores se aplicarán a la información estadística, obteniéndose el consumo de agua, descarga de aguas residuales y descarga de DBO para los tres niveles estudiados (municipal, estatal y cuenca hidrológica).

Como resultado del estudio citado se concluyó que a nivel nacional se generará una carga contaminante total en términos de DBO de 2,359,275.3 toneladas por año que corresponden: 846,216.4 al sector municipal y 1,513,058.9 al sector industrial, lo que representa el 35.87 y 64.13 por ciento del total, respectivamente.

El caudal total de aguas residuales a nivel nacional se estimó en 184 m³/s.

Con la información recabada y estimada se llevó a cabo un ordenamiento de los municipios, de acuerdo con la generación de materia orgánica medida como demanda bioquímica de oxígeno. De estos fueron seleccionados 180 con base en una generación de DBO, tanto de origen urbano como industrial, que fuese igual o mayor que el equivalente de una población de 64,000 habitantes (cuadro 8).

**Cuadro 8 .
ORDENAMIENTO DE MUNICIPIOS DE ACUERDO CON LA MAGNITUD DE D.B.O.**

LUGAR	ESTADO	MUNICIPIO	Q. AGUAS RESID. l/seg.	DBO TOTAL kg/año	% DBO INDUST	% DBO URBAN A	SECTORES INDUSTRIALES PRINCIPALES Y SU PORCIENTO EN DBO INDUSTRIAL
1	D.F. MEX.	zona metropolitana de la Cd. de México. (1)	41,495	513,180,756	44.34	55.66	papel 23.46%; alimentos 17.41%; química 14.58%; textil 3.14%, automotriz 0.25%; bebidas 18.48%; Met. básicas 1.31%; Pemex 14.39%.
2	JAL.	zona metropolitana de Guadalajara. (2)	5,658	152,190,910	75.07	24.93	Bebidas 81.0%; alimentos 9.02%; papel 4.24%; química 2.0%; Fertimex 1.1%.
3	SIN.	Cullacán	3,571	85,689,794	92.39	7.61	azúcar 81.8%; bebidas 3%; textil 1%.
4	N.L.	zona metropolitana de Monterrey. (3)	7,135	85,642,319	62.37	37.63	bebidas 30%; alimentos 12.28%; papel 17.2%; química 2.0%; básica 28.48%; editorial 0.1%
5	VER.	Córdoba	2698	69,563,822	96.59	3.41	azúcar 84.07%

Continuación del cuadro 8

6	SIN.	Ahome	2,497	63,673,624	96.53	3.47	azúcar 81.2%; textil 3.6%; bebidas 1%.
7	MICH.	La Piedad	130	38,999,010	97.80	2.20	granjas porcícolas 97.80%
8	OAX.	Tuxtepec	1,430	37,540,724	97.56	2.44	azúcar 83.22%; papel 2%.
9	VER.	Minatitlán	1,795	36,017,483	95.25	4.75	Bebidas 1.63%; alimentos 1.13%; Pemex 96.20%; Fertimex 1.04%.
10	S.L.P.	Ciudad Valles	1,228	31,287,022	95.66	4.34	azúcar 83.31%; bebidas 1%.
11	N.L.	Cadereyta	1,620	30,819,709	90.26	9.74	Pemex 98.32%; alimentos 0.1%; bebidas 0.68%.
12	VER.	Atoyac	1,054	28,656,345	98.99	1.01	azúcar 84.92%
13	VER.	Coatepec	995	26,277,062	97.52	2.48	azúcar 84.69%
14	VER.	Coatzacoalcos	4,024	26,235,556	85.50	14.50	Fertimex 83.45%; pemex 15.08%; química 0.7%; alimentos 0.3%.
15	VER.	Lerdo de	996	26,235,556	85.50	14.50	azúcar 84.92%.
16	MOR.	Zacatepec	918	24,322,702	97.71	2.29	azúcar 84.84%
17	NAY.	Tepic	996	22,786,838	88.71	11.29	azúcar 80.68%; bebidas 5%.
18	JAL.	Tequila	119	20,771,368	98.37	1.63	bebidas 99.9%.
19	VER.	Cosamaloapan	829	20,238,977	93.41	6.59	azúcar 80.90%.
20	TAMPS.	Mante	838	20,211,920	92.67	7.33	azúcar 82.38%; bebidas 3%.
21	PUE.	Puebla	1,832	19,929,455	38.04	61.96	bebidas 27.91%; textil 22.90%; alimentos 20.99%; met. básica 14.84%.
22	HGO.	Tula	110	19,800,762	96.48	3.52	Pemex 94.00%; alimentos 1.7%; bebidas 3.7%.
23	E. DE MEX.	Toluca	1,190	18,352,055	61.17	38.83	bebidas 60.65%; alimentos 23.76%; química 11.73%; met. básica 2.03%
24	OAX.	Salina Cruz	992	18,046,304	96.50	3.50	Pemex 96.40%; alimentos 2.2%; bebidas 1.4%.
25	JAL.	Tamazula	634	16,800,940	97.71	2.29	azúcar 84.92%.
26	VER.	Cosoleacaque	1,275	16,798,619	98.15	1.85	Pemex 96.89%; alimentos 1.7%; química 1.35%.
27	VER.	Ixtazcoquiltán	753	15,324,333	80.00	20.00	bebidas 16.01%; química 3.32%.
28	JAL.	Tala	541	14,112,483	96.82	3.18	azúcar 84.64%.
29	CHICH.	Juárez	1,301	13,896,431	23.02	76.98	bebidas 71.97%; alimentos 12.8%; textil 6.40; papel 6.09%.
30	VER.	Orizaba	842	12,961,874	78.43	21.57	papel 62.92%; bebidas 34.38%; alimentos 0.90%.

Cuadro 10
ORDENAMIENTO DE CUENCAS DE ACUERDO CON LA MAGNITUD DE D.B.O.

Nombre	Q.Res. (l.p.s.)	D.B.O. Ind. (kg/año)	D.B.O. Ind. (kg/año)	D.B.O. Total (kg/año)	% Nat.	% Ac.
Pánuco	43,925	296'570,226	293'597,010	590'167,236	26.59	26.59
Lerma-Stgo.	18,773	114'905,211	205'070,198	319,975,409	14.42	41.01
Sn. Juan	9,965	49'280,320	86'235,745	135'516,065	6.11	47.12
Balsas	8,616	43'722,726	76'727,400	120'450,126	5.43	52.55
Blanco	5,147	7'215,282	109'296,103	116'511,385	5.25	57.80
Papaloapan	4,162	6'788,406	106'452,742	113'241,148	5.10	62.90
Culiacán	3,574	6'522,830	79'178,239	85'701,069	3.86	66.76
Coatzacoal.	7'912	5'672,400	76'772,589	82'444,989	3.71	70.47
Fuerte	2,549	2'442,052	62'012,630	64'454,682	2.90	73.37
Jamapa	1,431	6'757,801	39'424,514	46'182,315	2.08	75.45
La Antigua	1,741	4'349,208	36'371,203	40'720,411	1.83	77.28
Guayalejo	1,426	1'482,430	32'165,467	33'647,897	1.52	78.80
Grijalva	2,141	10'112,242	14'437,338	24'549,580	1.11	79.91
Nazas	1,972	12'005,202	11'652,491	23'657,693	1.07	80.98
Coahuayana	1,090	2'759,008	20'811,881	23'570,889	1.06	82.04
Armería	1,145	4'250,850	18'669,076	22'919,926	1.03	83.07
Ameca	993	2'198,987	20'483,978	22'682,965	1.02	84.09
Conchos	2,456	10'625,367	11'533,890	22'159,257	1.00	85.09
Tijuana	1,391	10'548,631	8'690,999	19'239,630	0.87	85.96
Tehuantepec	882		16'787,755	16'787,755	0.76	86.72
Salado	1,996	11'445,062	5'099,874	16'544,936	0.75	87.47
Colorado	1,244	9'617,035	4'697,003	14'314,038	0.64	88.11
Bravo	1,301	10'697,717	3'199,035	13'896,752	0.63	88.74
Yaqui	888	4'287,122	9'355,183	13'642,305	0.61	89.35
Nautla	580	1'170,648	10'814,278	11'984,926	0.54	89.89
Sonora	799	5'275,670	3'822,039	9'097,709	0.41	90.30
Sn. Pedro	727	5'689,789	1'623,362	7'313,151	0.33	90.63
Lag. Coyuca	633	5'197,534	1'603,761	6'801,295	0.31	90.94
Purificación	220		6'790,955	6'790,955	0.30	91.24
Presidio	496	3'886,106	2'017,999	5'904,105	0.26	91.50
Concepción	521	3'007,657	2'740,788	5'748,445	0.25	91.75

TOTAL	130,696 (89.76%)	658'483,519 (82.85%)	1'378'135,525 (96.72%)	2'036'619,044 (91.75%)
--------------	----------------------------	--------------------------------	----------------------------------	----------------------------------

Esquema Legal Vigente

De acuerdo con el Reglamento para Prevenir y Controlar la Contaminación de Aguas, publicado el 29 de marzo de 1973, la estrategia se enmarcó en dos premisas fundamentales:

1. Aprovechar la capacidad de los cuerpos receptores para asimilar contaminantes, y
2. El responsable de la generación de los contaminantes es quien debe responsabilizarse de su control.

La primer premisa se refiere, por una parte, a prevenir la contaminación de todas aquellas aguas del país que aún guardan sus características naturales. Sin embargo, esta prevención no implica tratar de conservarlas tal como se encuentran en su estado natural,

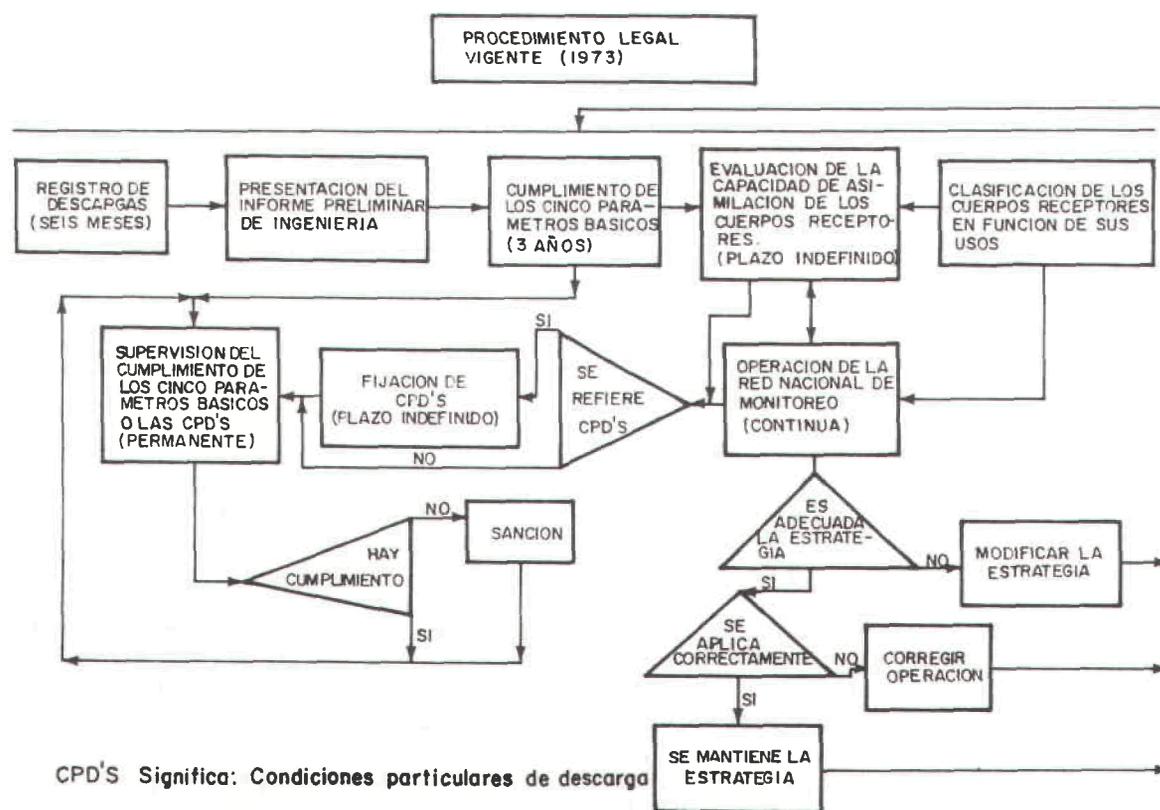
sino aprovechar racionalmente su capacidad de asimilación de manera que no se altere su calidad para el uso que se haga o se pretenda hacer de ellas.

En este sentido, en el caso de depósitos o corrientes cuya calidad se ha deteriorado, se haría el control de la contaminación con el objeto de que adquirieran gradualmente la calidad necesaria para el uso que se hace de ellas; con este fin se establecieron criterios para clasificar las aguas en función de uso y calidad.

Este esquema se concibió como un plan de acción que implica el desarrollo de una serie de actividades a ejecutar en tres etapas básicas que son:

Primera etapa: durante ésta se realizaría ante las autoridades competentes el registro de todas las descargas de aguas residuales provenientes de usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas o pecuarios, con excepción de las originadas en las casas habitación (fig. 6).

FIGURA 6. PROCEDIMIENTO LEGAL VIGENTE (1973)



Se estipuló un plazo de tres años a partir de la fecha de registro para que las descargas de aguas residuales cumplieran con cinco características de calidad, para las cuales se fijaron valores máximos tolerables en el Artículo 13 de dicho Reglamento. Estas características son:

1. Sólidos sedimentables, valor máximo: 1.0 ml/l
2. Grasas y aceites, valor máximo: 70 mg
3. Materia Flotante: Ninguna que pueda ser retenida por malla de 3 mm de claro libre cuadrado
4. Temperatura : 35 grados C
5. Potencial hidrógeno (pH): 4.5 a 10.0

Los responsables de las descargas que requieran obras o instalaciones de purificación para que su calidad cumpliera con lo requerido para las cinco características de calidad anteriores, deberían presentar a las autoridades dentro de un plazo de diez meses contando a partir de la fecha de terminación de registro, un Informe Preliminar de Ingeniería (IPI) detallado que contuviera las siguientes fases sucesivas:

- a) de trabajos internos;
- b) de trabajos externos;
- c) de adquisiciones;
- d) de construcción y
- e) de cumplimiento.

Cuando se trate de descargas que se viertan en los alcantarillados de las poblaciones, se permitiría que los responsables de las mismas optaran, dentro de un plazo de diez meses contando a partir de la fecha de registro, por pagar las cuotas que como derechos fijase la autoridad local correspondiente, para cubrir los costos de operación de la planta de tratamiento que instale dicha autoridad para las aguas residuales del alcantarillado.

Segunda etapa: esta segunda etapa se refirió al cumplimiento, por parte de los responsables de las descargas, de lo que indicaron en su Informe Preliminar de Ingeniería, a fin de que como consecuencia las descargas de aguas residuales satisficieran los requisitos de calidad para las cinco características mencionadas.

Durante el desarrollo de esta etapa la autoridad competente vigilaría el cumplimiento, por parte de los responsables de las descargas, a fin de que todas las descargas de aguas residuales al final de esta etapa, que duraría tres años, contaran con tratamiento primario como mínimo para cumplir con lo requerido por el Reglamento.

Tercera etapa: durante esta etapa, que no tendría lapso previsto de ejecución, las autoridades determinarían y fijarían las condiciones particulares para las descargas de aguas residuales. Estas condiciones particulares consistirían en el conjunto de características físicas, químicas y bacteriológicas que deberían satisfacer las aguas residuales antes de su descarga a un cuerpo receptor.

Las condiciones particulares de descarga las fijarían las autoridades en función de los estudios de calidad del agua de los cuerpos receptores. Estos estudios se llevarían a cabo en

las cuencas hidrológicas del país, a fin de clasificar las aguas de acuerdo con sus usos, de conocer su capacidad de asimilación y de dilución.

El plazo para cumplir con dichas condiciones particulares no podría ser menor de un año ni mayor de tres y serían susceptibles de modificarse después de un lapso de 5 años si las condiciones demográficas y ecológicas lo requirieran, excepto cuando se pusiera en peligro la salud pública, en cuyo caso podrían modificarse en cualquier tiempo.

Durante el desarrollo de esta tercera etapa, las autoridades continuarían la vigilancia del cumplimiento por parte de los responsables de las descargas, de los 5 parámetros de calidad a que hace referencia el artículo 13 del Reglamento, así como de las condiciones particulares que llegaran a señalarse.

Esquema legal propuesto

El cumplimiento de los cinco parámetros básicos, a los que se hizo referencia en la descripción de la estrategia vigente, no significó realmente un control de la contaminación debido a que la mayoría de las descargas industriales, inclusive las municipales, tienen contaminantes importantes no considerados por dichos parámetros básicos.

Además de lo anterior, el establecimiento de restricciones que aseguraban el control efectivo de la contaminación se daba sólo hasta que eran fijadas las condiciones particulares de descarga. Lo que exige la realización de estudios detallados y complejos dirigidos a la determinación de la capacidad de asimilación entre las descargas en el área de interés.

Tales estudios requieren de especialistas, de una gran cantidad de horas-hombre y demandan la erogación de fuertes presupuestos que, en el pasado y en el futuro inmediato, constituyeron y constituirán serias limitaciones para su realización. Se estima que actualmente existen a nivel nacional alrededor de 40,000 industrias pertenecientes a giros que generan contaminantes del agua y, en los últimos 12 años, solamente se han fijado cerca de 4,000 condiciones particulares de descarga.

Es evidente que el procedimiento de control mediante la fijación de condiciones particulares de descarga es tan lento que acarrea las siguientes desventajas:

1. No se da control de la contaminación con la rapidez que demanda la problemática actual, y
2. El control de la contaminación incide con gran desfase en empresas de un mismo giro; por lo que, con los costos que implica el control de la contaminación, puede haber un desbalance en los niveles de competitividad de las industrias que producen artículos semejantes.

Con lo anterior no se quiere decir que fijar condiciones particulares de descarga sea un procedimiento equivocado; por el contrario, se reconoce como el único método que puede hacer factible el respeto de la premisa de esta estrategia, es decir, el aprovechamiento racional de la capacidad natural de los cuerpos de agua para asimilar contaminantes. Por este motivo, la fijación de condiciones particulares de descarga debe mantenerse como el procedimiento global apoyado por medios que den resultados adecuados en el corto plazo. Para lograrlo se propone la aplicación de restricciones intermedias entre los parámetros básicos y las condiciones particulares de descarga.

Tal complemento debe cumplir con las siguientes características:

1. Significar un verdadero control de la contaminación.

2. Constituir un avance en relación con el control mínimo demandado por los cinco parámetros básicos del Reglamento de 1973.
3. Ser, cuando más, tan estrictos como lo podrían ser las condiciones particulares de descarga.
4. Ser factibles técnica y económicamente.

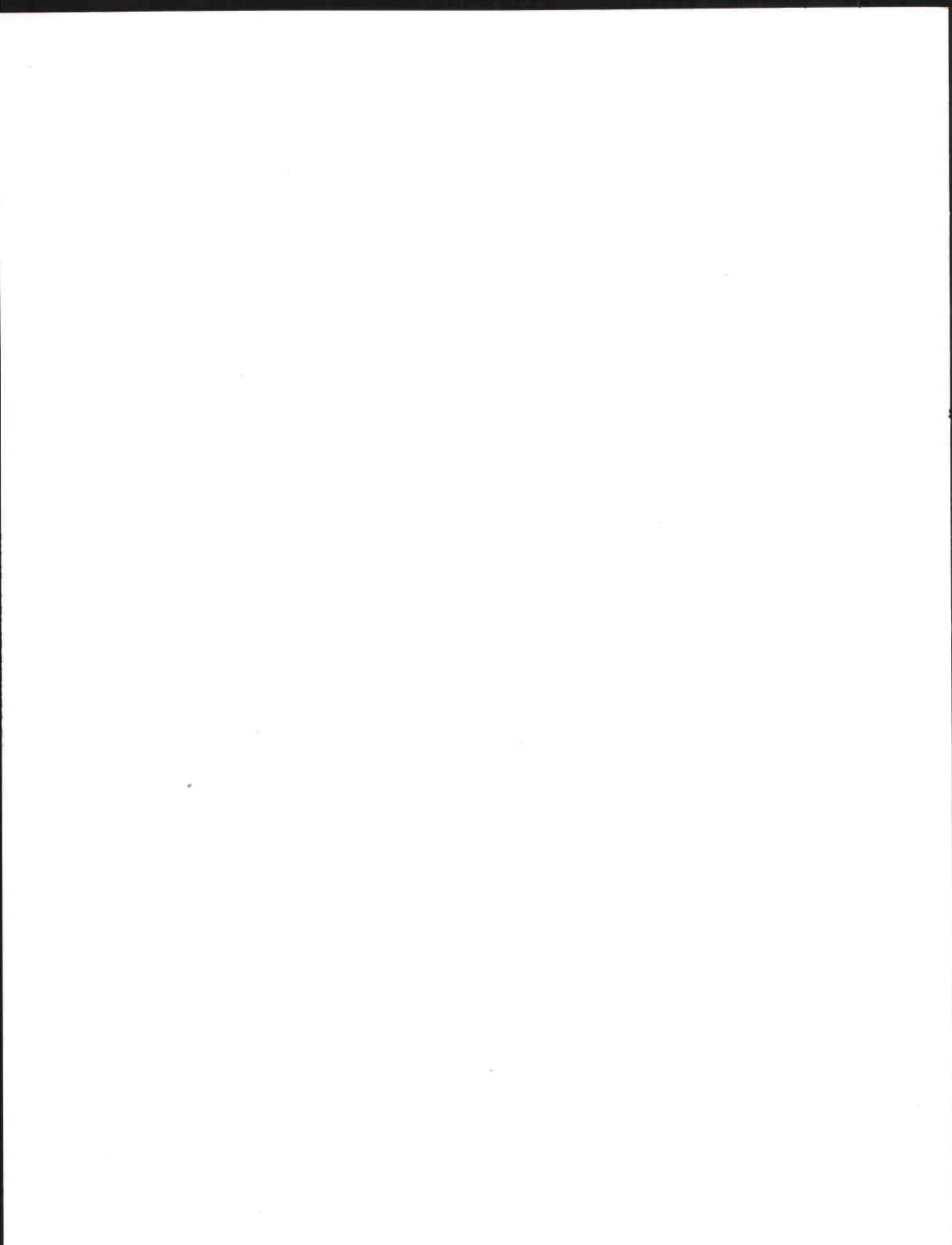
Dichas restricciones intermedias están constituidas por las Normas de descarga, que serán aplicables a las industrias consideradas relevantes desde el punto de vista de la generación de residuos líquidos. Estas normas definirán los límites máximos permisibles para los parámetros de contaminación más característicos de cada giro industrial, de tal manera que se restringirán efectiva y específicamente los contaminantes que cada tipo de industria puede generar.

La introducción de las normas de descarga significa que de ahora en adelante el número de descarga que cuenta con restricciones explícitas será superior al 80% y que sólo será urgente fijar condiciones particulares de descarga en aquellos giros no previstos en dichas normas, los cuales se estiman de no más del 10% del universo de descargas. En contraste con la situación anterior podemos decir que si antes sólo el 10% de los industriales conocía sus restricciones en relación a la calidad de las aguas residuales, ahora más del 80% las conocerá y por lo tanto no tendrá excusa para retrasar los proyectos y obras requeridas para el establecimiento de instalaciones de tratamiento de aguas residuales.

Política presupuestal

De acuerdo con lo anterior se ha establecido como adecuado programar la asignación de recursos y la ejecución de actividades legales en función de la prioridad de atención bajo los siguientes criterios:

- Atender en primera instancia las problemáticas de alcance regional y las críticas.
- Atender las fuentes de contaminación que descargan a cuerpos de agua con usos sensibles.
- Atender las fuentes contaminantes tóxicas o peligrosas.
- Atender las fuentes mayores antes que las menores.



Algunos aspectos a considerar en los estudios de Contaminación de Acuíferos

M. A. Armienta H.

El conocimiento adecuado de la extensión y el grado de contaminación de un acuífero, sólo es posible si se consideran diversos aspectos en su estudio, mismos que a continuación señalaré brevemente.

En primer lugar, para delimitar el volumen contaminado deben cubrirse dos aspectos: el muestreo y el análisis químico.

En relación con el muestreo es necesario definir su extensión (ubicación de los lugares a muestrear), de manera que abarquen tanto horizontal como verticalmente la zona contaminada, debe también especificarse la periodicidad del mismo, ya que es posible que varíe estacionalmente la concentración de las especies contaminantes. Asimismo, para conocer los valores de la concentración en tres dimensiones, es indispensable saber las características de la construcción y profundidad de los pozos, o, lo que sería más adecuado, perforar pozos y colocar piezómetros a profundidades predeterminadas.

Otros aspectos a considerar son el que se refieren a las condiciones bajo las cuales es necesario tomar la muestra, de tal manera que las características químicas del agua no se alteren por esta operación; y el de la definición de los parámetros que deben determinarse en el campo. Cabe señalar que además de ciertas precauciones generales en el muestreo, existen otras particulares relativas a los recipientes y preservadores que dependen de la especie a determinar.

Respecto al análisis, es necesario definir las especies a cuantificar en función de las posibles fuentes contaminantes. El método analítico dependerá de la especie que se requiera cuantificar, así como de los equipos disponibles y de los niveles de detección requeridos. Existen compuestos que aún en concentraciones sumamente bajas (ppb) son muy tóxicos y cuya detección sólo puede realizarse con equipo muy costoso. Puede aducirse, como ya se ha hecho en este coloquio, que debido a la situación económica del país es imposible adquirir dichos equipos; sin embargo, considero que a las empresas, principales causantes de la contaminación, se les debería exigir una cuota para su adquisición, ya que han permanecido muchos años con un mínimo control de sus residuos contaminantes, ahorrando con ello grandes cantidades.

Se ha dicho también que sería muy costosa la capacitación de personal para la operación de los equipos mencionados anteriormente: en este sentido estoy convencida de que los químicos egresados de las universidades mexicanas tienen los conocimientos necesarios para aprender en poco tiempo la operación de dichos equipos, por lo que no se justifica no adquirirlos.

En segundo lugar, se requiere conocer los factores que están determinando el movimiento de los contaminantes en un cierto acuífero, ya que de ello dependerá la evolución de la zona con agua de mala calidad. Dicho movimiento está determinado de manera general por la advección, que es la capacidad de transporte dada por el flujo del agua; por la dispersión, que es efecto de procesos de mezcla; por la difusión, que resulta de las diferencias en concentración; así como por procesos químicos, bioquímicos y radiactivos en su caso. La influencia de cada uno de estos procesos dependerá de las características del medio poroso, del agua, del flujo subterráneo y de las propiedades químicas de los contaminantes.

Los contaminantes inorgánicos presentes en las aguas subterráneas pueden experimentar reacciones ácido-base, oxidación-reducción, disolución-precipitación, complejación, absorción e intercambio iónico. Los contaminantes orgánicos pueden absorberse o degradarse. Estos procesos además de modificar la movilidad pueden influir en la toxicidad de las sustancias, ya que en muchas ocasiones diferentes grados de oxidación de un elemento provocan efectos muy diversos en la salud.

Otro de los aspectos a investigar es el comportamiento del contaminante desde su fuente hasta su introducción en el acuífero.

La concentración de una especie química en el agua subterránea dependerá de la forma en que se produzca su entrada en la misma. El contaminante puede introducirse por percolación a través del suelo, inyección directa, o lixiviación de depósitos del contaminante, entre otras posibilidades. Esto causará una diferente interacción con el medio poroso modificando el grado y velocidad de su propagación en el acuífero.

Además, las otras especies y organismos que acompañen al contaminante desde su fuente pueden modificar sus características. Por ejemplo, si la sustancia se encuentra dentro de aguas negras es posible que participe en diversas reacciones químicas y bioquímicas, situación que no se produciría de igual forma si su entrada al agua se realizara a través de lixiviación de alguno de sus compuestos puros.

En resumen, diferentes "historias" de un mismo contaminante pueden dar origen a muy diversos grados de contaminación de un cierto acuífero.

Todos estos conceptos planteados de manera muy general, tienen como objetivo invitar a la reflexión sobre la necesidad de realizar estudios químicos profundos, esto, si realmente se desean encontrar soluciones adecuadas para mejorar la calidad de las aguas subterráneas e impedir el daño que ya se ha provocado en varios lugares.

Sobreexplotación Acuífera

Rubén Martínez Guerra
Consultivo Técnico
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Introducción

El término sobreexplotación de acuíferos se ha aplicado bajo diferentes acepciones y comúnmente se asocia a la diferencia entre la explotación por extracción de agua subterránea y la recarga que recibe el sistema acuífero. En ocasiones esta sobreexplotación se relaciona con el abatimiento sistemático de niveles piezométricos en una región a través del tiempo. En acuíferos costeros este término se asocia con el fenómeno de intrusión salina y en general con la disminución paulatina de un almacenamiento de agua subterránea a través del tiempo.

Por lo general, cuando una región se califica como sobreexplotada, la acción inmediata es una veda de extracción y consecuentemente se transforma en un foco de atención para observarla y cuidarla. De esta manera se pretende asegurar los derechos establecidos, evitando que los usuarios y la región sufran un deterioro mayor.

Síntomas de sobreexplotación

La denominada explotación racional es aquella que aprovecha los recursos subterráneos de una región sin producir efectos irreversibles o inconvenientes en la misma. Con respecto al agua subterránea sería aquella extracción que, aunque produzca en el acuífero una depresión piezométrica, permita la evolución media de los niveles con pequeños o nulos abatimientos residuales y no cause cambios substanciales en el medio ambiente y la economía de la región.

Evidentemente las regiones sin explotación acuífera presentan descargas cuyo volumen promedio debe ser igual al promedio de la recarga, pero sus manifestaciones de agua subterránea no llegan a ser aprovechadas, bien sea porque se evaporen hacia la atmósfera, se drenen superficial o subterráneamente hacia los cauces de ríos y arroyos, o bien porque salgan subterráneamente.

En estos casos la recarga media puede ser menor que la capacidad de la región, pues el almacenamiento puede estar lleno.

Cuando se inicia el aprovechamiento de este recurso a través de una extracción del acuífero, los niveles piezométricos descienden, resultando en una disminución de la evaporación, una reducción de descargas por manantiales y un menor drenaje hacia los cauces de ríos y arroyos, o una menor descarga subterránea

En este caso se puede aprovechar la recarga máxima de la región al dejar espacios en el acuífero y de esta forma utilizar una mayor capacidad de regulación. Si se aumenta la extracción y la región soporta este aprovechamiento, la recarga se mantiene constante y las descargas del acuífero continúan disminuyendo hasta que desaparecen.

Cuando la región corresponde a un acuífero costero y se capta parcial o totalmente la recarga, se llega a establecer un equilibrio con la intrusión salina y la disminución del almacenamiento puede no producir abatimientos residuales, pues se presenta una sustitución de agua dulce por agua salada. En el caso de contaminación acuífera, la reducción del almacenamiento depende del contaminante y del efecto de difusión y dispersión del medio.

Efectos no reversibles

Aún cuando sólo se explote el volumen correspondiente a la recarga media, el acuífero reaccionará con una disminución temporal de su almacenamiento para tender hacia un nuevo estado de equilibrio. A partir de este estado se pueden lograr otros cuando la extracción aumenta y se puede incrementar la recarga al hacer intervenir nuevos almacenamientos. Sin embargo, estos nuevos estados normalmente producen efectos irreversibles en el medio ambiente.

El más común es el drenado de capas superiores acompañado de consolidación por disminución de porosidad, lo que puede provocar fallas en el terreno o simplemente hundimiento del mismo. Esto propicia una disminución en la capacidad de recarga por reducción en la permeabilidad vertical, lo que para una extracción fija corresponde a un desbalance mayor con la recarga.

Las zonas invadidas por agua salada en acuíferos costeros muy difícilmente pueden ser recuperadas y representan regiones donde se disminuye la disponibilidad hidráulica, por lo que su efecto es irreversible aún en tiempos largos. Si esta invasión es por contaminación con sustancias tóxicas puede representar también una reducción no reversible de esta disponibilidad.

Otras situaciones que producen efectos irreversibles en regiones acuíferas son: urbanización en zonas de recarga, deforestación y captación de escurrimientos superficiales que normalmente se infiltran en el acuífero, entre otros.

Concepto de sobreexplotación

Por lo anterior, se propone que el concepto de sobreexplotación acuífera sea un término elástico que considere los efectos irreversibles e inconvenientes que se produzcan en la región en cuyo ámbito se encuentra, que no dependa sólo del desbalance hidráulico del sistema, y que tome en cuenta el impacto socioeconómico en la cuenca.

Este concepto puede referirse a diversos grados de calificación o estados de sobreexplotación por el deterioro causado, pues puede afectar, no sólo a la región misma, sino a las regiones vecinas y podría ser conveniente establecer una escala en función de los efectos causados.

La Sobreexplotación de Sistemas Acuíferos

Dr. Adolfo Chávez Rodríguez
División de Investigación y Posgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Chihuahua

El concepto de sobreexplotación en agua subterránea aparece generalmente vinculado con aquellas funciones asociadas al manejo de los sistemas acuíferos; funciones que incluyen de manera general la evaluación, la planeación y la administración integradas de los recursos hidráulicos y el control de los impactos ambientales y sociales.

Aún cuando el término "sobreexplotación" es de uso común en la práctica geohidrológica, no existe acuerdo general en cuanto a una definición precisa del concepto y tampoco en lo que se refiere a su aplicación en casos específicos.

El concepto de sobreexplotación se aplica a nivel de cuenca geohidrológica, debido a que el rendimiento de agua subterránea se visualiza mejor en el contexto del sistema tridimensional completo que representa la cuenca.

El término "rendimiento seguro" como un indicador del caudal máximo de extracción compatible con la estabilidad del sistema acuífero fue primero definido por Lee (1915), en términos puramente hidrológicos, y evolucionó a través de Meinzer (1923), quien le dio un matiz económico; Conkling (1946), quien tomó en cuenta el posible deterioro de la calidad del agua inducido por el bombeo; y Banks (1953), quien incluía en su definición la consideración de los derechos existentes sobre el agua. Más recientemente, Todd (1959) formuló una definición compacta del rendimiento seguro como la cantidad de agua que se puede extraer anualmente sin producir ningún efecto indeseable. En este sentido, cualquier extracción por encima del rendimiento seguro es sobreexplotación.

Todos estos autores concebían el rendimiento seguro como un valor único, y la inclusión ambigua de consideraciones hidrológicas, económicas, ecológicas y legales en su definición ha acarreado gran controversia. En la práctica, este concepto de rendimiento seguro ha sido difícil de aplicar y se le ha dado un mal uso, por lo que algunos autores han sugerido abandonarlo.

Cualquier definición útil de rendimiento seguro para un sistema geohidrológico requiere que los valores cuantitativos de este rendimiento se establezcan de acuerdo con el balance de masas y una definición precisa del grado de tolerancia hacia los efectos indeseables. Por consiguiente, el rendimiento seguro de un sistema acuífero no es en general un caudal de extracción único y fijo, sino un caudal variable que depende de muchos factores interrelacionados, entre los cuales las condiciones hidrológicas son sólo uno de ellos.

Algunos autores han sugerido que el rendimiento seguro de una cuenca geohidrológica sea definido por la extracción anual de agua que no exceda la recarga anual promedio. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, este concepto es incorrecto, ya que una explotación intensa del agua subterránea puede cambiar significativamente el régimen de recarga-descarga del acuífero en el transcurso del tiempo. Esto significa que el rendimiento de la cuenca depende tanto de la manera en que los efectos del bombeo se transmiten a través del acuífero, como de los cambios en los caudales de recarga y descarga inducidos por el bombeo.

Considerando lo anterior, el "rendimiento sostenido" de la cuenca geohidrológica se ha definido como el caudal de extracción igual a la suma de los cambios en recarga y descarga que ocurren como consecuencia de las extracciones y del descenso de los niveles de agua por bombeo (Water Resources Council, 1973). A estos ajustes en los caudales de recarga y descarga se les conoce como "captura", y el rendimiento sostenido se halla limitado por

ella. En este sentido, la excedencia de la captura máxima posible sería sobreexplotación. Sólo en el caso de que la captura condujera a una cancelación total de la descarga natural, el rendimiento sostenido estaría determinado por la nueva recarga anual promedio (que incluye captura por recarga inducida).

De acuerdo con esta definición, el rendimiento sostenido será, en general, mayor al rendimiento seguro, debido a los efectos indeseables que pueden aparecer en un caudal de extracción inferior sostenido, como son incosteabilidad económica, violación de derechos sobre el agua, asentamientos del terreno, o intrusión de agua de mala calidad.

El término "sobreexplotación" se emplea comúnmente para caracterizar la condición donde las extracciones exceden a la recarga anual promedio, consideración hecha, supuestamente, por los efectos de captura. Sin embargo, una explotación persistente superior al rendimiento sostenido, que en el mejor de los casos será igual a esta recarga, conducirá finalmente al agotamiento total de la reserva de agua subterránea.

Por otra parte, se ha introducido el concepto amplio de "rendimiento óptimo" para reemplazar a los anteriores. Este concepto contempla la explotación del agua subterránea con un enfoque socioeconómico dentro del marco general de la teoría de la optimización. Domenico (1972) revisó el desarrollo de este concepto en el que el agua tiene valor en virtud de su uso exclusivamente, y el cual se define simplemente como aquel esquema de explotación que establece un uso óptimo de agua subterránea.

El rendimiento óptimo se debe determinar mediante la selección del esquema óptimo de explotación del agua subterránea a partir de un conjunto de esquemas alternativos posibles. El esquema óptimo es aquel que satisface mejor un conjunto de objetivos económicos y sociales asociados con el uso del agua. Como lo señalaron Freeze y Cherry (1979), en algunos casos y puntos en el tiempo, la consideración de los beneficios y costos presentes y futuros puede determinar un rendimiento óptimo que implique el "minado" del agua subterránea, incluso posiblemente hasta el agotamiento total; en otras situaciones, el rendimiento óptimo puede reflejar la necesidad de una conservación total del recurso; con mayor frecuencia, la explotación óptima del agua subterránea se situará entre estos dos extremos.

La explotación óptima del recurso implica que los beneficios netos contemplen los costos de impacto ambiental al mismo tiempo que los costos más tradicionales de capital, operación y mantenimiento. Los beneficios del aprovechamiento del agua subterránea se pueden ver atenuados por impactos negativos concurrentes sobre el medio ambiente.

Más ampliamente, la explotación óptima de los recursos hidráulicos de una cuenca depende del uso en conjunto de las aguas superficiales y subterráneas, lo cual ha permitido un campo fértil para la aplicación de técnicas de optimización (Maddock, 1974). Asimismo, se ha reconocido plenamente la utilidad de los modelos digitales de simulación en el manejo del agua subterránea (Bachmat, 1980). Estos modelos, al integrarse con modelos económicos o de decisión, constituyen una herramienta poderosa para el diseño de políticas de explotación óptima de los sistemas acuíferos.

Modelación Matemática de Sistemas Geofísicos

Gonzalo Alducin y Jorge Carrera
Instituto de Geofísica, UNAM

Descripción

En la Geofísica, así como en otras ramas de la ciencia, la creación de modelos que expliquen y describan tanto aspectos cuantitativos como cualitativos de fenómenos de interés es de suma importancia.

Una vez que se han postulado las propiedades y establecido los parámetros relevantes de un cierto fenómeno, como por ejemplo el flujo del agua en el subsuelo o el escurrimiento de lava sobre las paredes de un volcán, se procede a la elaboración de un modelo físico, que queda plasmado en un sistema de ecuaciones e inecuaciones de campo con condiciones y restricciones en el tiempo y en el espacio. Este modelo refleja la realidad física, dentro de ciertas limitaciones, y su resolución permite conocer la evolución temporal y la variación espacial de aquellas magnitudes que caracterizan al fenómeno.

Estos modelos físicos se estructuran y se desarrollan con base en las teorías de la mecánica y termodinámica, y son las matemáticas las que permiten manejar en forma científica los conocimientos en los cuales están basados estos modelos conceptuales. Los modelos geofísicos, debiendo responder a objetos de estudio inmersos en la naturaleza, y debido a su propia escala espacial y temporal, son sujetos especialmente apropiados al método científico.

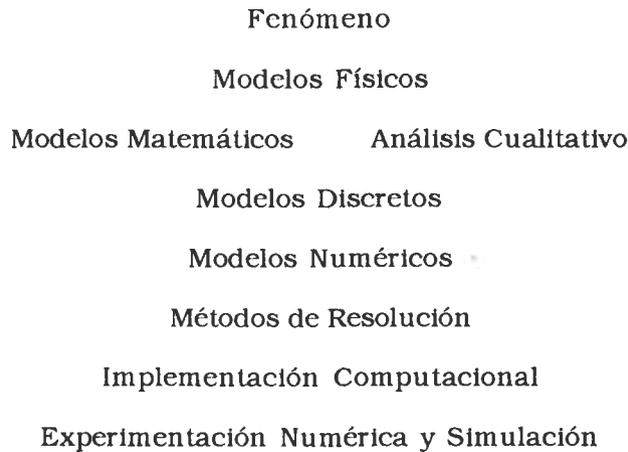
La resolución de modelos físicos no es inmediata ni sencilla. Métodos y técnicas matemáticas de alto nivel son necesarios para realizar análisis cualitativos y cuantitativos de los problemas propuestos. Además dichas metodologías son necesarias para generar diversos modelos numéricos, implantables en computadora, a través de los cuales se efectúan simulaciones del comportamiento del sistema en consideración, dentro de ciertos rangos de precisión e incertidumbre.

La metodología actual para estudiar y resolver un sistema de ecuaciones e inecuaciones de campo centra su atención en el desarrollo de principios variacionales que lo caracterizan y lo modelan matemáticamente, cuya estructura intrínseca ha probado ser el marco natural para los métodos de análisis cualitativo y procesos de discretización. En el análisis cualitativo se determina el marco funcional apropiado para el estudio del modelo en cuanto a existencia, unicidad y regularidad de soluciones, así como su comportamiento a lo largo del tiempo y la estabilidad de sus movimientos y estados de equilibrio. En lo relativo a procesos de discretización, éstos se sistematizan replanteando el problema en espacios de dimensión finita, lográndose así esquemas algebraicos que modelan discretamente al fenómeno.

Una vez modelado discretamente el fenómeno, la selección de técnicas para su concreción y métodos numéricos apropiados para su resolución tienen lugar, siendo el siguiente paso la implantación del esquema en computadora. Este se divide en el diseño del programa y su codificación en algún lenguaje de alto nivel.

Finalmente, el modelo computacional obtenido deberá ser validado y afinado con base en su confrontación con la realidad fenomenológica bajo estudio.

El proceso total puede ser resumido en el diagrama siguiente:



Las consideraciones anteriores y el esquema conceptual expuesto constituyen la base teórica y metodológica sobre la cual se fundamentan las actividades científicas contemporáneas en esta área del conocimiento.

En este marco se pueden identificar los siguientes objetivos básicos dentro del área de la modelación matemática:

- Fundamentación matemática de modelos físicos.
- Generación de modelos matemáticos apropiados para realizar análisis cualitativo.
- Derivación de modelos discretos y su análisis de convergencia.
- Construcción de técnicas de aproximación numérica y su análisis de error.
- Desarrollo de infraestructura computacional.

Bases científicas

Las actividades de la modelación matemática de sistemas geofísicos se basan primordialmente en conocimientos de las siguientes disciplinas: mecánica de los medios continuos; análisis funcional aplicado; ecuaciones diferenciales e integrales; análisis numérico; probabilidad, estadística y computación.

Es importante recalcar el carácter interdisciplinario de las matemáticas aplicadas, lo que conlleva una gran interacción entre grupos de investigación tanto teórica como aplicada. Dentro de esta interacción se establece la fundamentación de los modelos físicos que dan inicio al proceso de modelado indicado en el diagrama de la sección precedente.

Esta situación da lugar a las diferentes orientaciones de los miembros que integran grupos interdisciplinarios en la matemática aplicada. Desde quien se especializa en la fundamentación y análisis de modelos físicos hasta el que se avoca a la modelación y análisis matemáticos; el que se especializa en la modelación discreta y numérica como el que desarrolla aspectos computacionales.

Respecto al estudio dentro de las disciplinas de ciencias naturales, se puede describir su dinámica bajo el marco conceptual siguiente. Una vez definidos los objetos de estudio e identificados los fenómenos de interés tiene lugar la aplicación y generación de métodos de observación y medición. De aquí se postulan principios físicos y teorías generales que fundamentan los diversos modelos físicos del fenómeno. Métodos de procesamiento de datos y de experimentación física complementan el desarrollo y verificación de los mismos, los cuales a su vez son estudiados mediante métodos matemáticos. Asimismo métodos de análisis son aplicados e innovados, como aquellos orientados a la simulación numérica del fenómeno.

La mecánica de los medios continuos provee el marco racional para el estudio y formulación de modelos físicos, ya que a la fecha su desarrollo y axiomatización han alcanzado un estadio de madurez conceptual y metodología. Los grandes temas de la mecánica son la cinemática, la cinética así como la teoría axiomática de las ecuaciones constitutivas. Sus enfoques fundamentales son el de la mecánica de fluidos y el de la mecánica de sólidos. El primero se desarrolla bajo el concepto de flujo, el cual está integrado por la terna de campos espaciales de velocidad, densidad y esfuerzo de Cauchy. El segundo, se perfila mediante el concepto de proceso dinámico, caracterizado por los campos materiales de deformación y esfuerzo de Piola-Kirchhoff. Dentro de la aplicación de esta disciplina ha de destacarse la definición de lo que es llamado el entorno espacio-temporal del sistema. Esto es, la geometría y dinámica de la región espacial donde el fenómeno se desarrolla, la interacción del sistema con el exterior y el estado inicial a partir del cual evoluciona.

La modelación matemática contemporánea tiene sus fundamentos en la teoría matemática del análisis funcional. Por análisis funcional aplicado se puede entender la conceptualización y axiomatización del estudio de conjuntos provistos de estructuras topológicas y algebraicas, así como de relaciones y transformaciones entre ellos. Así, pues, algunos de los temas primordiales del análisis funcional son la teoría de conjuntos, las estructuras topológicas, las estructuras algebraicas, la teoría de operadores y funcionales y los espacios de Banach y Hilbert.

En el contexto de la modelación de sistemas geofísicos, algunas de las aplicaciones principales del análisis funcional corresponden a las teorías siguientes: distribuciones; espacios de Sobolev; operadores integrales; operadores diferenciales; análisis variacional; análisis convexo y multiconvexo, y teoría de semigrupos y sistemas dinámicos. Son estas teorías las que establecen el avance actual de los métodos de análisis matemático y de análisis numérico contemporáneos.

Algunos temas de investigación

Dentro de las actividades de investigación en el Instituto de Geofísica, a manera de ejemplo se pueden mencionar los siguientes trabajos. El desarrollo de modelos de flujo y transporte con aplicaciones principalmente en aguas subterráneas. En estos modelos se han incorporado fronteras libres tanto de superficies freáticas como de interfases entre agua dulce y agua salada mediante la formulación de desigualdades variacionales.

Otros modelos desarrollados son los de técnicas de "upwind" para difusión-advección, los cuales han sido formulados en el contexto del análisis convexo y cuyos resultados permiten concluir simulaciones numéricas que resuelven el problema de la modelación de las características hiperbólicas en el caso de advección dominante.

En lo referente a problemas de contaminación de acuíferos y su rehabilitación, la metodología empleada ha sido la de las teorías de control y de control óptimo. Esencialmente, estos planteamientos corresponden a formulaciones subdiferenciales no lineales con restricciones y, en general, no potenciales.

De manera específica, las líneas de investigación básica hacia las que se dirigen los estudios de modelación matemática son: modelación física de fenómenos macroscópicos; modelación en sistemas de primer orden en el tiempo y su análisis cualitativo; formulaciones variacionales de modelos físicos; modelación discreta y numérica de modelos matemáticos; análisis numérico y métodos de resolución. Dentro de las líneas de investigación con carácter aplicado se encuentran, por ejemplo, las siguientes: técnicas de aproximaciones de elementos finitos con upwind; análisis y aproximación de problemas en dominios con fronteras libres vía desigualdades variacionales; formulación variacional y aproximación de problemas con control en el interior y sobre la frontera, así como problemas de control óptimo con inecuaciones de estado.

Formación de recursos humanos

El marco conceptual de la modelación matemática anteriormente expuesto, permite sentar las bases y orientar la formulación de proyectos académicos de posgrado dentro de la modelación en las ciencias aplicadas. De ahí claramente se perciben tres orientaciones científicas fundamentales. Una, la orientación del análisis matemático dentro de la que figuran las disciplinas del análisis funcional aplicado; ecuaciones diferenciales; las teorías variacionales; el análisis convexo; la teoría de semigrupos y sistemas dinámicos y el análisis numérico.

En segundo término, la orientación de la matemática numérica y computacional, cuyas disciplinas son, entre otras, los métodos numéricos; las técnicas avanzadas de programación y la modelación computacional en las diversas áreas de las ciencias aplicadas. Como tercera orientación se tiene la de las ciencias teóricas, en el sentido de la fundamentación del modelaje de fenómenos físicos, estando presentes aquí las disciplinas de estudio específicas de cada una de las ciencias naturales.

En el contexto de la geofísica estos planteamientos han dado lugar a la propuesta para la creación de una nueva opción dentro del posgrado en geofísica, UACPyP, con los niveles de doctorado y maestría, denominada "Modelación Matemática y Computacional de Sistemas Geofísicos". Esta opción se ha concebido con un carácter interdisciplinario en relación con las cuatro opciones de estudio ya existentes: aguas subterráneas; estudios espaciales; exploración geofísica; y sismología y física del interior de la tierra.

La Sobreexplotación en Aguas Subterráneas Una Definición del Concepto

J. Joel Carrillo R.
Instituto de Geofísica, UNAM
Coyoacán, C.U. 04510, D.F.

El concepto de sobreexplotación en aguas subterráneas ha venido usándose en forma tradicional como un sinónimo que implica que el (sistema) acuífero está en vías de una extinción inmediata. En algunos casos, pretende significar que la recarga natural ha sido estimada como menor a la descarga artificial calculada. En otros, la declinación de los niveles estáticos, resultado de un bombeo que comúnmente se incrementa en forma continua en el tiempo, es también considerada sobreexplotación; como también lo es la intrusión de agua de mar.

Es claro que no siempre las acciones arriba mencionadas, tendrán como resultado directo el poner en peligro la integridad de la existencia del acuífero. Esto más bien implica una serie de limitantes que van desde definir a través de estudios confiables la optimización en el uso del recurso, hasta el costo de nuevas perforaciones más profundas, equipos de bombeo con potencia adicional e incluso la construcción de obras de captación y conducción muy especializadas. Sin embargo, el adjetivo sobreexplotación se ha utilizado para tratar de comunicar que el acuífero quedará extinto en términos cuantitativos o cualitativos de la disponibilidad de agua, y posiblemente el acuífero quedará dañado permanentemente y, en algunos casos el efecto sufrido se sentirá en el exterior por la compactación del suelo. Este adjetivo pretende establecer una preocupación en términos de recuperación del agua subterránea, lo que sugiere que el concepto puede ser considerado con varias acepciones: la hidrológica, la tecnológica, la económica, la social, la ingenieril y hasta la política.

Acepción Hidrológica

Está vinculada con la disponibilidad y el manejo óptimo del agua subterránea, en una cuenca o sistema acuífero, en donde se ha obtenido su divergencia. Aquí, aunque se asuma que se conoce el modelo geológico en tres dimensiones del sistema acuífero, existen varios componentes del agua subterránea que sólo pueden ser calculados y no obstante el detalle del análisis realizado para el cómputo respectivo, sólo se puede llegar a una estimación:

- i) Al calcular las entradas de flujo subterráneo, si en ocasiones se tienen dudas con respecto a la magnitud de las horizontales, en especial en medios fracturados (que cubren una amplia superficie del territorio); las verticales no son del todo identificadas y rara vez reconocidas, especialmente las de abajo hacia arriba.
- ii) Las salidas naturales de flujo subterráneo pueden, sin duda, presentar interrogantes similares a las entradas; más aún cuando se tratan otros conceptos como los modelos de evaporación. En muchos casos la aplicación de estos estudios no es del todo entendida, y se desconoce si su uso pueda realizarse bajo las condiciones climáticas y de información existentes en el país.
- iii) Si los caudales son los únicos que pueden ser físicamente medidos, éstos, en muchos estudios son calculados.

Lo anterior, aunado a la estimación de la recarga, implica una serie de preguntas cuyas interrogantes impiden claridad y solidez a cualquier conclusión que de esos cálculos se pueda desprender.

Acepción Tecnológica

Al principio, algunos grupos humanos se asentaron en zonas semiáridas del país, debido a la presencia de alguna fuente de agua, río o manantial que satisfizo las necesidades de ese tiempo. En esa época se pensaba que si los manantiales se secaban, no habría nada más que hacer excepto emigrar y buscar otra fuente. El encontrar agua en excavaciones realizadas, seguramente para otros fines, estas horadaciones que eran practicadas en aluvión abrieron una nueva posibilidad de obtener el líquido. Sin embargo, cuando en estas fuentes los niveles comenzaron a abatirse hacia profundidades que se temía llegarían más allá de los límites permitidos por la tecnología de ese tiempo, llevó a pensar, una vez más, que esa fuente de abastecimiento, en otro tiempo suficiente, se vería agotada. Esto claramente implicaría un caso de sobreexplotación.

Más tarde, la disponibilidad de máquinas de percusión para realizar perforaciones a más de 100 m permitió el acceso a recursos hidráulicos más profundos y abrió otra posibilidad más a los acuíferos en material de relleno (aluvión) que fueron ampliamente captados.

En su tiempo se visualizó que era la única fuente de agua subterránea, pues, a más profundidad, la roca, que requería de equipo especializado de perforación, se pensaba era impermeable. La limitante fue una vez más la tecnología disponible, a lo que se aunaba la inferencia de que al perforar más allá de los materiales de relleno (roca preferentemente de tipo riolítico), no se tendría agua en cantidades suficientes para los diversos usos. Se consideraba que al estar esas rocas por debajo de columnas litológicas en espesores de varios centenares de metros, los esfuerzos cerrarían cualquier conducto que permitiera almacenar el agua subterránea e impediría su movimiento, por lo que la perforación de pozos exitosos de más de 200 m de profundidad, en roca, parecía imposible, pues se consideraba que no habría agua a tal profundidad, especialmente para cubrir una demanda cada vez más creciente.

Actualmente existen pozos productores a profundidades del orden de 500 m y, una vez más, se sigue pensando que a mayor profundidad no habrá espacios (almacenamiento). En la Unión Soviética (Kola) y Austria (Estiria), por mencionar un par de ejemplos, han encontrado agua en condiciones favorables a los 7,000 y 1500 m de profundidad, respectivamente. Este último país ha tenido pozos surgentes produciendo agua con un contenido bajo en sales (<1,500mg/l) y 21°C de temperatura.

Estas últimas líneas, a forma de ejemplo, pretenden ser aceptadas como una aplicación justificada, en cada tiempo histórico, de un caso de sobreexplotación. Por otro lado, también es reconocida en muchos casos la limitante en cuestión de bombas, conducción y distribución de aguas que en ciertos momentos especiales puede ser usada implicando ideas de sobreexplotación. Esto es, se ha podido manejar como sobreexplotación cuando no hay tecnología suficiente y disponible para enfrentarse a cada problema en su tiempo.

Otro caso asociado es la intrusión de agua salada cuando se pretende extraer el agua dulce que la sobreyace. La captación eficiente de este recurso, en la India (Punjab) y Paquistán (Karachi), ha sido resultado de estudios detallados y la aplicación de la tecnología existente, a través del uso de pozos que extraen en forma simultánea agua dulce y salada.

Acepción Económica

Costo-retribución. Dentro de este rubro es importante enfatizar que muchas de las condiciones mencionadas con anterioridad pudieran cambiar de tenerse liquidez bancaria. Sin embargo, el esquema económico del agua en el país establece como prohibitivo el uso de maquinaria de perforación para grandes profundidades, el uso de equipos de bombeo de gran potencia, construcción y manejo de pozos, de bombeo simultáneo a dos profundidades, conducciones a grandes distancia, etc., factores más allá del presente costo-retribución por el uso del agua. A éste se deben agregar los problemas inherentes al uso del agua (normalmente en grandes volúmenes) en actividades de poca

retribución económica. Aún sin tomar en cuenta dichos costos, existen otros que, se consideran, han estado más relacionados con el concepto de sobreexplotación, por ejemplo:

Costo de estudios. Cuando se habla de la acepción hidrológica se establece la necesidad de conocer el funcionamiento de un sistema acuífero para poder determinar la naturaleza de su comportamiento y definir esquemas más factibles de extracción, incluso dentro de un marco de sobreexplotación reconocido. Para esto, el entendimiento del funcionamiento del sistema al que se precisa llegar, sólo es posible por medio de un estudio hidrogeológico. En ocasiones el desconocer el funcionamiento hidrogeológico de un sistema acuífero lleva a prejuzgar cualquier respuesta a las excitaciones marcadas por la mano del hombre.

Si bien el equivalente al costo de un pozo de profundidad (300 m) con diámetro promedio, para las presentes necesidades, puede ser suficiente para pagar un estudio de evaluación de una cuenca de tamaño mediano ($\pm 2,000$ km²), en ocasiones la falta de fondos, para el manejo de ciertas técnicas, no permite conocer el funcionamiento del sistema acuífero de interés. Ante tal incógnita a veces, se opta por etiquetarlo como sobreexplotado. Eliminando de esta manera, en lo posible, el uso inadecuado de dicho sistema. En este caso el concepto sobreexplotación se fija como de protección mientras se alcanza un conocimiento más exacto de su funcionamiento. Inexplicablemente, el valor de toda la infraestructura que depende del recurso es tan grande que, un valor fraccionario equivalentemente insignificante, bastaría para tener resultados que tenderían al uso más óptimo y eficiente del recurso.

Este esquema lleva a sugerir que es importante contemplar el sistema de manejo del agua como inversión, no como gasto directo e irre recuperable. Invertirla en usos de mayor rendimiento económico. De esto hay ejemplos abundantes en la literatura y no son prerrogativas de países con una economía sin problemas. La India (Gujarat y Coimbatore) y los Estados Unidos (valle del Silicón, Calif. y Phoenix, Arz.) pueden citarse como ilustrativos. En el primer país con esa visión se realizó el uso extremo del agua subterránea para proporcionar beneficios directos a la industria y a la agricultura que, como en el segundo país, han creado una infraestructura y poder económico suficiente que permitieron la importación de agua para cumplir con sus necesidades. Esto es, una sobreexplotación dirigida adecuadamente puede crear una prosperidad, que aunque frágil, permita crear condiciones para nuevas formas de desarrollo.

Acepción Ingenieril

Los esquemas anteriormente expuestos pueden relacionarse con escenarios de extracción excesiva e inadecuada y que causan fenómenos de subsidencia. Estos no son sufridos en forma necesaria por los que se beneficiaron originalmente con su inadecuado uso, mismo que, al reducir la capacidad del acuífero, le infiere un daño permanente.

Esto incluye, al aplicarse el término de sobreexplotación a la zona afectada, una componente social que si bien puede implicar muchos de los aspectos arriba establecidos, permite, sin embargo, dar confianza a la población. Tan importante es el compromiso de controlar los aspectos de subsidencia y otros relacionados con una explotación no controlada mediante la aplicación de esquemas de funcionamiento óptimo, producto de estudios detallados, en los que las técnicas incluyan los avances del conocimiento en su tiempo.

Aquí se puede incluso, considerar el aspecto de que la contaminación de un acuífero es resultado de una sobreexplotación. Concepto que, si se revisa a fondo en sus aspectos hidrológico y tecnológico, puede demostrar que en muchas zonas sólo existe una explotación inadecuada en tiempo y espacio de los recursos hidráulicos subterráneos.



Contaminación de Acuíferos Elementos para definir el Concepto

Ramiro Rodríguez Castillo
Departamento de Recursos Naturales
del Instituto de Geofísica de la
UNAM

La definición del concepto de contaminación de acuíferos conduce a una reflexión sobre causa y efecto, y a una revisión exhaustiva de los elementos que se deben considerar para establecer, partiendo del concepto de contaminante o poluyente, una definición lo más amplia posible.

Desde el punto de vista "acuífero" podrá tomarse como válida la definición para contaminante propuesta por Cherry (Freeze, A. et Cherry, J., 1979). "Todos los solutos introducidos al ambiente hidrológico como resultado de la actividad del hombre son referidos como poluentes".

No se debe entrar en detalles sobre los mecanismos de incorporación o introducción del poluyente en el flujo subterráneo ni en su carácter temporal (corto, mediano o largo plazo), así como tampoco en los factores físicos o químicos que controlan la migración del mismo.

Definido el concepto de contaminante habría que pasar al de contaminación de sistemas de acuíferos, ampliando así el término de acuífero, que en sí mismo podría conllevar a sutilezas en la definición.

Un sistema implica la presencia de diversas entidades acuíferas que tienen o pueden mantener comunicación hidráulica. Esto, significa que el contaminante puede llegar a estar presente en un momento dado en cualquiera de sus componentes.

Calidad

La presencia del contaminante llega a alterar la calidad del agua subterránea, la cual debe darse en términos de su mineralización, contenido de compuestos orgánicos y de microorganismos (bacterias, hongos, virus). Esta parametrización se tiene que referir a niveles de contenidos en aguas tipo, dependiendo de su uso. El concepto de calidad genera una discusión semántica entre el establecimiento de niveles, normas o estándares y de lo que podría considerarse calidad "natural" del agua. Esta conceptualización permite referirnos a concentraciones que causan degradación o alteración de la calidad del agua.

La normatividad tiene que perder su carácter regional para adquirir una connotación universal y llegar a tener peso jurídico en aquellos países en los cuales es ambigua o está en desuso por no existir mecanismos para su actualización.

Los estándares permiten comparar los resultados químicos inorgánicos y orgánicos, así como los bacteriológicos con valores establecidos como máximos recomendables para un uso determinado, siendo uno de los primeros el del agua potable o para consumo humano.

Las concentraciones permisibles de constituyentes inorgánicos han sido fijadas desde hace un par de décadas, considerando principalmente sus efectos sobre la salud humana. Sin embargo, para compuestos orgánicos aún no se han podido establecer con precisión los efectos nocivos, por lo que en muchos casos no existe normatividad.

Para el uso agropecuario los estándares no son tan estrictos como para el consumo humano, aunque en este campo también se presentan algunos problemas debidos, en la

mayoría de los casos, a la desconexión existente entre la hidrogeología, el sector salud y la jurisprudencia.

Polución de Sistemas Acuíferos

El término polución, tomado como equivalente de contaminación, debe limitarse a aquellos casos en los que las concentraciones de poluante alcanzan niveles que pueden ser considerados como objetables para un uso específico ya sea humano o agropecuario.

En aquellos casos en los que la calidad del agua se ve alterada por la incorporación natural de elementos que rebasen las concentraciones establecidas para algún uso, se deberá llamar al proceso no polución sino degradación natural de la calidad del agua subterránea. Se ubican en esta categoría la intrusión marina y los sistemas acuíferos que llegan a contener elementos como boro, arsénico o litio que se pueden asociar a aguas termales.

Panorama Actual

El conflicto actual en la definición del concepto es provocado por la violenta irrupción en el agua subterránea de compuestos orgánicos productos de la variada y compleja actividad industrial.

Es práctica común asociar el término de contaminación al de salinización y mineralización, ya que las principales determinaciones analíticas son inorgánicas. Si un análisis químico se limita a estos términos no es factible en la actualidad establecer el concepto de polución de sistemas acuíferos.

Debido a que existen mecanismos de autodepuración para algunos poluentes, se tendría que tomar en cuenta también, aunque suene reiterativo, que se trata de agua subterránea en explotación, ya que un poluante puede permanecer periodos mayores a los requeridos para su eliminación y degradación natural, y entonces su carácter contaminante puede alterarse, minimizarse o perderse.



42987

IMTA

CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA



IMTA
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA

CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA

PAPELETA DE DEVOLUCION

El lector se obliga a devolver este libro antes del
vencimiento del prestamo señalado por el último sello

--	--	--

Apartado Postal 202 CIVAC, Mor. 62500
Jutepec, Mor.



42987

IMTA
CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA