



**El Colegio
de la Frontera
Norte**



**CONSIDERACIONES GEOHIDROLÓGICAS
Y LEGALES EN LA GESTIÓN DEL AGUA
SUBTERRÁNEA DEL VALLE DE MEXICALI, BAJA
CALIFORNIA, ANTE EL REVESTIMIENTO
DEL CANAL TODO AMERICANO**

Tesis presentada por

Karen Melissa Cázares Zepeda

para obtener el grado de

**MAESTRA EN ADMINISTRACIÓN INTEGRAL
DEL AMBIENTE**

Tijuana, B. C., México
2008

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Director de Tesis:

Dr. Jaime Herrera Barrientos

Aprobada por el Jurado Examinador:

1. _____

2. _____

3. _____

Dedicatoria

A Dios

Por permitirme concluir mis estudios de posgrado y haberme dado salud y hermosas bendiciones para lograr mis objetivos; además de su infinita misericordia, cuidado y protección en el camino.

A mi esposo Víctor Julián

Por el amor, la comprensión, el apoyo y la fortaleza que me brindas al emprender nuevos retos. Por no dejarme flaquear ante las adversidades, por su generosidad y ejemplo de superación. Gracias por la hermosa familia que estamos formando.

A mi hijo Víctor Alberto y a ti que estás en mi vientre

Por ser la alegría que ilumina mi vida, el motor que me da la fuerza para realizar todo. Por tenerme paciencia mientras realizaba mis estudios, por acompañarme en todo momento incluso mientras se formaban.

A mi madre Graciela

Por cuanto amor y dedicación nos das, por apoyar en todo momento a mi familia y a mí, por sus cuidados y oraciones en los momentos difíciles, por tus valores y el ejemplo que siempre me das para ser una persona de bien.

A mi padre Jorge Alberto

A quien le debo todo en la vida, le agradezco el cariño, la comprensión, la paciencia, los consejos y el apoyo que me brindó para culminar mis estudios, pero sobretodo por su amor incondicional.

A mis hermanas

Yasmín, Kenia, Jackeline y Linda por apoyarme en todo momento, por sus cuidados y cariño que siempre me brindan, por sus consejos y motivación en la culminación de mis estudios.

A mis amigos

Refugio, Julieta y Jenny, por todo el apoyo y motivación que recibí de Ustedes para culminar nuestros estudios, pero sobretodo por su amistad.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico que se nos brindó para realizar nuestros estudios, así como por el seguimiento que se nos da al egresar.

A El Colegio de la Frontera Norte (El Colef), por la preparación y facilidades recibidas para el desarrollo de éste posgrado.

Al Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), por contribuir grandemente en nuestra formación; por darnos las facilidades para realizar nuestro trabajo; y por tan cálido trato recibido por parte de su personal.

A la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en la persona del Mtro. Edgar Yuri Mendoza por la información otorgada para la realización de éste trabajo.

A mi director y amigo, el Dr. Jaime Herrera Barrientos por guiarme tan atinadamente en la elaboración de este trabajo. Por su paciencia y dedicación para culminar este proyecto, y por sus conocimientos compartidos.

A los lectores externo e interno de este trabajo, el Mtro. Francisco Bernal Rodríguez y el Dr. Thomas Kretschmar, por su tiempo otorgado a la revisión de este trabajo, así como por sus recomendaciones ofrecidas como oportunidades de mejora desde la perspectiva de su área de investigación.

A mis maestros por su gran apoyo y motivación para la culminación de mis estudios, por su tiempo compartido y por impulsar el desarrollo de nuestra formación profesional. De manera especial a la Dra. Escofet, Dr. Josué Álvarez, Dr. Herrera, Dr. Vicente Sánchez, Dr. Ricardo Santés, Dr. Riemman, Mtra. Adriana Álvarez, Dra. Flamand, Dr. Carlos Vázquez y Dr. Roberto Enríquez. A todos cuantos contribuyeron a mi desarrollo profesional, ¡gracias!

RESUMEN

En este trabajo se plantea como problema de estudio el revestimiento del Canal Todo Americano (CTA) y con ello, la pérdida de infiltraciones que aportan agua al acuífero de Mexicali. Para la formulación de políticas ambientales referentes a la gestión del agua subterránea en el Valle de Mexicali se ha determinado: *a)* el funcionamiento del domo subterráneo formado por las infiltraciones del CTA; *b)* el comportamiento histórico (1957-2006) de la recarga en un área de 34 x 15 km² localizado en la porción mexicana y contigua a la frontera con los Estados Unidos a la altura del tramo de 37 km de longitud del proyecto de revestimiento; *c)* por medio de un código numérico bidimensional en diferencias finitas se determina el comportamiento del nivel freático del acuífero, así como la influencia en la dirección de flujo del CTA; mediante entrevistas se conoce la opinión de algunos usuarios del agua en el Valle de Mexicali; y a través de información pública, se construye una matriz de actores institucionales que intervienen en la política ambiental con la finalidad de identificar sus competencias en éste tema. Con estos insumos se revisan los riesgos potenciales que encierra el Tratado de Aguas de 1944 entre México y Estados Unidos, recomendándose que el órgano administrativo nacional competente, la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA/IBWC) emprenda las propuestas de tratado con los Estados Unidos en el cual se garantice el agua en el Valle de Mexicali y con ello evitar un posible conflicto por extracciones que causen perjuicios en las vecindades.

ABSTRACT

This research establish as a problem the All-American Canal (AAC) Lining Project so in that form, the lost of percolations that contribute to the Mexicali aquifer recharge. To create environmental policies relating to the groundwater management in the Mexicali Valley we determined: *a)* the operation of the groundwater mound created by the All-American Canal (AAC) percolations; *b)* the recharge historical fluctuations (1957 – 2006) in an area of 34 x 15 km² adjacent to the AAC lining project; *c)* using a bidimensional numerical code in finites differences we determined the aquifer water table and the influence of the AAC related to the flow direction. Some actors in this problem were interviewed to understand their opinions in this matter; and using public information we created a table of the actors who participate in the environmental policy to identify their competences in this theme. With all these information we review the potential risks that are enclose in the Water Agreement of 1944 between Mexico and USA, recommending to the International Boundary Water Commission (IBWC/CILA) to make an agreement proposal with USA to warrantee water for the Mexicali Valley and that form prevent a possible conflict for extractions who can cause detriment in the neighborhoods.

ÍNDICE GENERAL

	Página
RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. GENERALIDADES	5
I.1. Antecedentes	5
I.2. Planteamiento y justificación del problema	6
I.3. Objetivos	8
I.3.1. Objetivo general	8
I.3.2. Objetivos específicos	8
I.4. Hipótesis de trabajo	9
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL	10
II.1. Importancia del agua subterránea	10
II.2. Disponibilidad de agua	11
II.2.1. Distribución nacional de la precipitación y población	11
II.2.2. Definición de cuenca y acuíferos	12
II.2.3. El agua subterránea en México	12
II.2.4. Disponibilidad de agua en Baja California	13
II.3. Medio físico	13
II.3.1. Localización y extensión del área de estudio	13
II.3.2. Cuerpos de agua superficial	13
II.3.2.1. Ríos	13
II.3.2.2. Drenes y canales agrícolas	16
II.3.2.3. Canal Todo Americano (All-American Canal)	16
II.3.3. Vegetación en el área de estudio	17
II.4. Tipos de acuíferos atendiendo su nacionalidad	18
II.5. Actores que demandan agua en el estado de California, EE.UU., para contextualizar las razones del revestimiento del CTA por los Estados Unidos	18
II.5.1. El revestimiento del Canal Todo Americano (CTA)	26

II.6. Propiedades físicas del medio acuífero	29
II.6.1. Porosidad eficaz	29
II.6.2. Coeficiente de almacenamiento	29
II.6.3. Permeabilidad	29
II.6.4. Transmisibilidad	30
II.6.5. Gradiente hidráulico	30
II.6.6. Velocidad real	30
II.6.7. Caudal de flujo	31
II.7. Manto acuífero	31
II.8. Planicie fluvio – deltáica	31
II.9. Fuerzas que actúan en el subsuelo	31
II.9.1. Ley de Darcy: alcances y limitaciones	32
II.9.1.1. Limitaciones a la Ley de Darcy	34
CAPÍTULO III. GESTIÓN DEL AGUA EN MÉXICO	36
III.1. Gestión ambiental	36
III.2. Competencias en la formulación de la política ambiental	36
III.3. Principios rectores de la protección ambiental	37
III.4. Visión histórica de la política hídrica en México	38
III.5. Naturaleza jurídica del agua	39
III.6. Naturaleza internacional del agua	41
III.7. Derecho internacional del agua	43
III.7.1. Declaraciones en materia ambiental	43
III.7.1.1. Conferencia de Estocolmo	43
III.7.1.2. Cumbre de la Tierra	44
III.7.1.3. Cumbre de Johannesburgo	45
III.7.2. Tratados internacionales	46
III.7.2.1. Tratado de Libre Comercio de América del Norte	46
III.7.2.2. Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte	47
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA	48

IV.1. Métodos y técnicas utilizadas	48
IV.1.1. Modelo numérico por diferencias finitas	48
IV.1.2. Elevación máxima de un domo subterráneo	51
IV.1.3. Estimación de la recarga	55
IV.2. Descripción de actores en el problema de estudio	56
CAPÍTULO V. RESULTADOS	65
V.1. Modelo de flujo	65
V.1.1. Discretización	66
V.1.2. Parámetros hidráulicos	66
V.1.2.1. Transmisibilidad, T y conductividad hidráulica, K	66
V.1.2.2. Carga hidráulica	66
V.1.2.3. Coeficiente de almacenamiento	67
V.1.2.4. Espesor del acuífero	67
V.1.2.5. Gastos de extracción	67
V.1.2.6. Series piezométricas	67
V.1.3. Condiciones iniciales y de contorno	77
V.1.3.1. Condiciones de contorno	77
V.1.3.2. Condiciones iniciales	77
V.2. Descripción del anexo 1	83
V.3. Método de Hantush	84
V.3.1. Prueba de sensibilidad	84
V.4. Recarga al acuífero	91
V.5. Gestión sustentable del agua en el Valle de Mexicali	94
V.5.1. Acciones realizadas por los actores	96
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	101
VI.1. Conclusiones	101
VI.2. Recomendaciones	103
LITERATURA CITADA	106
ANEXO 1	112
ANEXO 2	124

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura II.1. Componentes del ciclo hidrológico mexicano (valores medios anuales)	11
Figura II.2. Cuenca del río Colorado	14
Figura II.3. Proyecto de revestimiento del Canal Todo Americano	28
Figura II.4. Esquema de la instalación utilizada en la experiencia de Darcy	33
Figura V.1. Piezometría de 1957	68
Figura V.2. Piezometría de 1979	68
Figura V.3. Piezometría de 1980	68
Figura V.4. Piezometría de 1981	69
Figura V.5. Piezometría de 1982	69
Figura V.6. Piezometría de 1984	69
Figura V.7. Piezometría de 1985	70
Figura V.8. Piezometría de 1986	70
Figura V.9. Piezometría de 1987	70
Figura V.10. Piezometría de 1988	71
Figura V.11. Piezometría de 1989	71
Figura V.12. Piezometría de 1990	71
Figura V.13. Piezometría de 1991	72
Figura V.14. Piezometría de 1992	72
Figura V.15. Piezometría de 1993	72
Figura V.16. Piezometría de 1994	73
Figura V.17. Piezometría de 1995	73
Figura V.18. Piezometría de 1998	73
Figura V.19. Piezometría de 1999	74
Figura V.20. Piezometría de 2000	74
Figura V.21. Piezometría de 2001	74
Figura V.22. Piezometría de 2002	75
Figura V.23. Piezometría de 2003	75
Figura V.24. Piezometría de 2004	75

Figura V.25. Piezometría de 2005	76
Figura V.26. Piezometría de 2006	76
Figura V.27. Piezometría de 1998 a 109.2 días	78
Figura V.28. Piezometría de 1998 a 387.5 días	78
Figura V.29. Piezometría de 1998	78
Figura V.30. Piezometría de 1999	79
Figura V.31. Piezometría de 1998 a 1187.4 días	79
Figura V.32. Piezometría de 1998 a 2161.1 días	79
Figura V.33. Piezometría de 2006	80
Figura V.34. Piezometría de 2006 a 109.2 días	80
Figura V.35. Piezometría de 2006 a 387.4 días	81
Figura V.36. Piezometría de 2006 a 1187.4 días	81
Figura V.37. Piezometría de 2006 a 2161.1 días	81
Figura V.38. Piezometría de 2006 a 109.2 días	82
Figura V.39. Piezometría de 2006 a 387.5 días	82
Figura V.40. Piezometría de 2006 a 1187.4 días	83
Figura V.41. Piezometría de 2006 a 2161.1 días	83
Figura V.42a. Infiltración, $I = 0.48$	85
Figura V.42b. Infiltración, $I = 0.6$	86
Figura V.42c. Infiltración, $I = 0.72$	86
Figura V.43. Alturas máximas (h_m) del montículo en función del tiempo para un valor de conductividad hidráulica ($K=128$), coeficiente de almacenamiento ($S=0.15$), e infiltración ($I=0.48, 0.6, 0.72$).	88
Figura V.44a. Coeficiente de almacenamiento, $S = 0.05$	89
Figura V.44b. Coeficiente de almacenamiento, $S = 0.15$	89
Figura V.45. Recarga serie 1957 – 2006	92
Figura V.46. Abatimiento equivalente	93
Figura V.47. Recarga vs. abatimiento	93
Figura V.48. Origen de la administración pública federal	94
Figura V.49. Interrelación de la CILA / IBWC con otros actores	95

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla II.1. Localización y extensión del área de estudio	13
Tabla IV.1. Descripción de actores	57
Tabla V.1. Simbología de las piezometrías	76
Tabla V.2. Alturas máximas (h_m) del montículo en función del tiempo para un valor de coeficiente de almacenamiento ($S=0.15$), conductividad hidráulica, (K) e infiltración, (I) dados.	87
Tabla V.3. Alturas máximas (h_m) del montículo en función del tiempo para un valor de coeficiente de almacenamiento ($S=0.05, 0.15$), conductividad hidráulica (K) e infiltración ($I=0.6$).	90

INTRODUCCIÓN

Para Raúl Brañes (López, 2006) la gestión ambiental es “el conjunto de las actividades humanas que tienen por objeto el ordenamiento del ambiente”. Para este autor los componentes principales de la gestión son: a) *la política ambiental*; b) *derecho ambiental*; c) *la administración ambiental*; por lo que la formulación de la política y la legislación ambiental es una actividad que forma parte de la gestión ambiental de tal suerte que, el conjunto de actividades humanas a que hace referencia el maestro Raúl Brañes requieren de un conjunto de actos normativos y materiales que buscan la ordenación del ambiente; esto implica un proceso que comprende desde la formulación de la política ambiental hasta la realización de acciones materiales que tienen este propósito.

Lo antes expuesto indica que, hablar de gestión ambiental implica un basto espectro de actividades complejas multi, intra y transdisciplinarias, por lo que, en este trabajo de tesis se abordan algunos aspectos de la gestión ambiental: la formación del domo de infiltración del Canal Todo Americano (CTA), la importancia del CTA como fronteras del acuífero del Valle de Mexicali, Baja California y fuente de suministro de agua a éste acuífero; la recarga histórica al acuífero en una porción próxima al CTA; la identificación de los actores institucionales en la política ambiental nacional en un contexto de coordinación con la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA); el ámbito constitucional; y la opinión de usuarios del agua en el Valle de Mexicali. Estos elementos se concatenan en el contexto de los riesgos del Tratado de aguas de 1944, para así reflexionar sobre la importancia para México a través de la CILA de emprender el planteamiento de un tratado en materia de aguas subterráneas con los Estados Unidos de América.

El agua es un recurso escaso en el estado de Baja California ya que según el Programa Estatal Hidráulico 2003 – 2007 hay un déficit de 17 Mm³ anuales sin contabilizar las disminuciones que producirá el revestimiento del Canal Todo Americano, por lo que conocer la afectación volumétrica de la porción mexicana así como la distribución de ésta en la porción noroeste del Valle de Mexicali es un asunto de interés para los tres ordenes de gobierno, ya que habrá afectaciones a los usuarios del agua del Valle de Mexicali. Varios

autores estiman (CNA, 1991; Bradley, 1996; Díaz 2001; Herrera, *et al*, 2004) que dejarán de infiltrarse al subsuelo nacional del orden de 100 Mm^3 anuales sin señalarse cómo es el funcionamiento hidráulico del CTA.

El agua subterránea y superficial proveniente del Río Colorado y del acuífero del Valle de Mexicali. Estas son las principales fuentes de agua del estado de Baja California, ya que el agua del Valle de Mexicali se trasvasa a la ciudad de Tijuana, Tecate, así como a San Luis Río Colorado, Sonora y se tienen proyecciones para hacerlo a la ciudad de Ensenada. Estos trasvases demandarán cada vez más agua ya que la población de Baja California de 1940 al 2000 incrementó del orden de 30 veces, y el consumo por habitante aumentó al doble, mas no así el volumen disponible de este recurso. Según la Comisión Estatal del Agua (CEA) el consumo promedio por habitante en los centros de población es de 271 litros por día, en cambio para los que viven fuera de las cabeceras municipales es de 108 litros por día por habitante, de forma que el crecimiento de las ciudades es más demandante que las zonas rurales. Se estima que para el 2035 la población del estado será de 6'000,000 millones de habitantes, es decir, casi se triplicará en relación a la población del año 2000, por lo que cualquier disminución en el volumen de agua en el Valle de Mexicali representa en la actualidad y en el futuro un impacto ambiental, económico y social.

Para cuantificar el efecto (formación – extinción y volúmenes asociados) del revestimiento del CTA se utilizarán dos esquemas de cálculo:

- a) mediante un método de solución analítica al problema de la formación – extinción de un domo subterráneo debido a la infiltración por un cuerpo de agua superficial propuesto por Hantush (1967), y llevado a un código de cálculo numérico en este trabajo ya que Hantush (*ibid*), sólo llega al cálculo en forma tabular de la función S^* . Finnemore (1995), al utilizar ésta solución analítica, calcula la altura máxima del domo mediante un método de solución iterativo, resolviendo las integrales del pozo, error y M^* , mediante la integración de desarrollos en series de potencia. Aquí se resuelven las integrales anteriores mediante método numérico de cuadratura.

A través del procedimiento antes descrito se analiza en forma aislada el funcionamiento hidráulico del CTA, observándose que el fenómeno de formación y extinción del domo subterráneo es independiente de la acción de los pozos de bombeo o inyección.

- b) Mediante el método de las diferencias finitas se analizan diversos escenarios que combinan la presencia y ausencia del CTA y el Río Colorado, ya que el primero es la frontera norte y el segundo la este del área de estudio. El modelo integra las características hidráulicas del acuífero y condición iniciales de las series de observaciones de la altura del nivel freático de 1998 y 2006. Los resultados del modelo indican que las fronteras (CTA y Río Colorado) son determinantes en la dirección del flujo subterráneo y que, dicha dirección cambia conforme transcurre el tiempo para un régimen de bombeo determinado.

Para contextualizar el sentido de los ascensos o descensos del ápice del domo se calcula la recarga en el área de estudio a través de las fluctuaciones interanuales del nivel freático, encontrándose que en el área de estudio en el período 1957 a 2006 se ha presentado un descenso promedio del nivel freático del orden de 4 m asociado a una extracción del orden de 400 Mm³. De la relación recarga – abatimientos para el área de estudio, se deduce que los volúmenes asociados a los abatimientos naturales del domo de infiltración una vez que cese ésta, son importantes y en breve tiempo por lo que, la identificación de los actores institucionales en la gestión del agua en su vertiente del manejo y, en particular de políticas públicas es importante, ya que el Tratado de aguas de 1944, encierra riesgos potenciales para México que, ante una contingencia de ausencia de agua por las condiciones de riesgo natural o casuístico estipulado en el tratado, México deberá buscar fuentes alternas de agua, la subterránea; fuente regional, lo que sería un conflicto potencial con los Estados Unidos, ya que la naturaleza del agua subterránea transfronteriza está regulada por principios del derecho internacional y los principios internacionales de protección al ambiente, generados en las conferencias de Estocolmo, Río de Janeiro y Johannesburgo (1972, 1992, 2002, respectivamente).

En el ámbito nacional se esbozan los principios constitucionales que regulan al órgano legal encargado de coadyuvar en la formulación de la política ambiental asociada al agua transfronteriza, la CILA, el cual es creado por la vía administrativa y está facultada para coordinar las acciones necesarias con otras instituciones manteniendo la unidad orgánica de objetivos.

Para conocer la percepción de varios usuarios del agua en el valle sobre los efectos que pueda tener el revestimiento del CTA se realizan varias entrevistas, encontrándose que los participantes opinan que el asunto del revestimiento del CTA es una facultad soberana de los Estados Unidos, que en el valle se tienen revestidos los canales de irrigación y los Estados Unidos no ha dicho nada a ello. Sin embargo opinan que México debe negociar con los Estados Unidos ya que el agua que llega por el CTA, debe continuar recibéndose.

En el primer capítulo se presentan generalidades sobre el área de estudio, planteamiento y propósitos de la tesis. En el segundo capítulo se desarrolla el marco teórico conceptual. En el capítulo tercero se aborda el tema de la gestión del agua en México, enmarcando la naturaleza jurídica de ésta en relación con los órganos constituidos y facultados para la gestión ambiental. El cuarto capítulo describe: *a)* el método numérico utilizado para el cálculo de la recarga en la zona de estudio; *b)* el método de cálculo de las fluctuaciones del domo subterráneo ante el revestimiento del CTA; *c)* modelación por diferencias finitas del efecto del CTA y el Río Colorado; *d)* descripción esquemática de los actores que intervienen en la gestión de las políticas en materia de conservación del agua nacional transfronteriza. En un quinto capítulo se exponen los resultados de los esquemas numéricos utilizados, así como la descripción de los actores asociados a la gestión ambiental del agua. Finalmente, el capítulo sexto expone las conclusiones y las recomendaciones a éste trabajo.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

I.1. Antecedentes

El Canal Todo Americano (CTA) nace en la Presa Imperial, a 32 km al noreste de Yuma, Arizona, EE.UU, la cuál está sobre el cauce del Río Colorado. Por dicho canal discurren 3200 hm³ de agua al año, los cuales se utilizan para regar más de 200 000 hectáreas en el Valle Imperial, así como suministrar agua a nueve ciudades en los Estados Unidos. El canal comenzó a funcionar en 1940 llevando agua hacia el Valle Imperial; en su recorrido, el canal pasa cerca de la frontera con México, por el Valle de Mexicali, lugar por el cual se produce una infiltración subterránea debido a que el canal no está revestido y el gradiente hidráulico subterráneo tiene dirección hacia México; el agua infiltrada por éste canal produce una elevación del nivel freático en su recorrido que varía de 12.2 m a 24.4 m (Venegas, 2004), alimentándose así el acuífero del Colorado y, con ello, el área mexicana en el Valle de Mexicali con un volumen del orden de 80.0 hm³/año (Herrera, *et al*, 2004) de agua que representa la de mejor calidad al noreste del valle.

Se han planteado diversos modelos de flujo que toman en cuenta el acuífero del Valle de Mexicali, como el bidimensional de flujo horizontal por la Comisión Nacional del Agua en 1991; el tridimensional de Bradley (1996); el bidimensional de Díaz (2001). En estos modelos se analiza el comportamiento de la elevación del nivel freático en el Valle de Mexicali, a excepción del trabajo de Bradley que lo extiende hacia el área de Yuma, Arizona. En el modelo de la Comisión Nacional del Agua se considera que, de reducirse la infiltración en 80% debido al revestimiento del CTA y de mantenerse el régimen de explotación en el valle en los últimos 10 años, en las proximidades del CTA se tendrían abatimientos del orden de 6m; asimismo las afectaciones serían notables hasta una distancia de 10 km del CTA en el territorio mexicano. Por otra parte Díaz estima que de revestirse el CTA se tendrán abatimientos al término de 19 años por debajo del nivel del mar en las zonas de mayor explotación del valle. Bradley (1996), analiza las fuentes del suministro que originan la profundidad somera del nivel del agua en Yuma; asimismo, calculan que si se reviste el CTA en la porción de Yuma, Arizona, se impediría la infiltración subterránea de 138.15 hm³/año

de agua al acuífero y que al término de cuatro años se lograrían 2.8 m de abatimiento del nivel freático en las proximidades del CTA.

No obstante que varios autores han calculado que del orden de 100 Mm³ anuales dejarán de infiltrarse al acuífero del Valle de Mexicali ante el revestimiento del CTA, no se tiene conocimiento de trabajos que calculen las fluctuaciones espaciales y temporales del nivel freático y de la recarga a detalle en las proximidades al CTA, por lo que conocer el proceso de formación y extinción del domo subterráneo debido al CTA, así como el comportamiento del acuífero en las proximidades del CTA ante su revestimiento, son insumos necesarios en la gestión de las políticas públicas para el desarrollo armónico y sustentable de ésta importante región agrícola del país.

I.2. Planteamiento y justificación del problema

El agua que consume el estado de Baja California proviene principalmente del Río Colorado. El suministro del vital líquido se rige por el Tratado de Aguas de 1944, firmado entre México y Estados Unidos, de acuerdo con el cual a nuestro país le corresponden poco más de 1850 millones de metros cúbicos de agua de este río binacional. El Distrito de Riego 014, localizado en la región del delta del Colorado, es el beneficiario inicial en tiempo y espacio de estas asignaciones. Esta agua ha constituido por muchas décadas el motor de la agricultura de exportación y de granos básicos del distrito; al mismo tiempo que ha contribuido al desarrollo industrial en esta región árida. El 85 por ciento de sus volúmenes se destina a usos agrícolas y el 15 por ciento restante a los industriales y urbanos.

Del agua también depende el mantenimiento de los procesos naturales que contribuyen a sustentar el desarrollo regional. Sin embargo, la que proviene del Colorado se encuentra enmarcada en una compleja problemática ambiental en la que intervienen, entre otras cosas: el uso altamente consuntivo que se hace del líquido, que sobresa por su escasez; el dinámico desarrollo económico y poblacional de esta zona fronteriza, que implica mayor demanda del recurso hídrico; el complejo marco jurídico internacional que regula su manejo.

A este escenario hay que agregar el nuevo marco administrativo al que está sujeto el agua para uso agrícola, esto después de la transferencia de los módulos de riego a los usuarios en 1992. Sin embargo, el manejo ambientalmente adecuado del líquido, no sólo depende de nuevas reglas, sino que también está condicionado por las acciones de nuevos actores en torno a su manejo y por la percepción que ellos tengan acerca de los problemas que se presentan con el recurso. Así, las acciones y actitudes de los usuarios pueden contribuir a mejorar o a empeorar la situación. Lo que ellos perciben con relación a lo que es un problema ambiental, puede influir en su marco de decisión. De todas formas, identificar tanto unos como otros, contribuirá a diseñar estrategias encaminadas a promover una cultura de uso ambientalmente adecuado del agua en esta región, todavía una meta lejos de alcanzar.

Por otro lado, el revestimiento del Canal Todo Americano como ya se indicó, reducirá la recarga del acuífero de Mexicali. Esto traerá como consecuencia el abatimiento en los niveles del manto freático, la modificación de la calidad del agua subterránea; ya que en 1961 el promedio de salinidad considerando un muestreo de 451 pozos fue de 1,100 ppm y en 1992 de 1,700 ppm (P.E.H., 2003-2007:48). Es imperante tener una calidad de agua necesaria para el desarrollo de las actividades agrícolas e industriales propias de ésta región; al igual que para el consumo de los habitantes del Valle de Mexicali, y con ello preservar la salud humana y cuidado del ambiente.

El problema que se presenta en el Valle de Mexicali ante el revestimiento del CTA marca la necesidad de atenderlo no de manera aislada, sino como fuente de diversos acontecimientos sociales y políticos en el Delta del Río Colorado. Este problema en parte se origina porque no existe un acuerdo sobre las aguas subterráneas compartidas entre los Estados Unidos y México.

Trabajos anteriores han mencionado que al revestir el Canal Todo Americano, se abatirán los niveles freáticos en el Valle de Mexicali, pero no existe aún una estimación que englobe los volúmenes fluctuantes asociados a la disminución de los niveles freáticos. Al conocerlos se puede contribuir en proponer alternativas para gestionar las aguas subterráneas compartidas entre los Estados Unidos y México.

I.3. Objetivos

I.3.1. Objetivo general

Identificar los actores principales en el manejo del agua en el Valle de Mexicali considerando la recarga en un área contigua a los Estados Unidos de América, al conocer el efecto en la altura del nivel freático, asumiendo situaciones de revestimiento y no revestimiento del CTA; para así recomendar una gestión que garantice los volúmenes anuales de agua asignada a México.

I.3.2. Objetivos específicos

- a) Estimar las fluctuaciones considerando el promedio histórico del nivel freático y la recarga asociada a éstas en un área de dimensiones 34 x 15 km² localizada en la porción noreste del Valle de Mexicali.
- b) Determinar la evolución teórica y factores que intervienen en la formación del domo de agua subterránea del CTA.
- c) Determinar las fluctuaciones del nivel freático en el área de estudio, ante diversos escenarios:
 - Al considerar como cuerpos permanentes de agua a el CTA y al Río Colorado;
 - Al analizar sólo a el Río Colorado como cuerpo permanente de agua;
 - Sin considerar al CTA y al Río Colorado como cuerpos permanentes de agua.
- d) Identificar a los actores asociados a la gestión del agua que intervienen en el manejo de ésta en el Valle de Mexicali.

I.4. Hipótesis de trabajo

El revestimiento del Canal Todo Americano reducirá significativamente la recarga al acuífero del Valle de Mexicali, afectando el volumen disponible de agua en éste.

La identificación de los actores nacionales en la defensa del agua nacional permitirá una gestión adecuada vía conservación del recurso agua.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL

II.1. Importancia del agua subterránea

El subsuelo mexicano aloja gran número de acuíferos, fuentes de agua que funcionan a la vez como vasos de almacenamiento de agua dulce. La importancia del agua subterránea es mayor en países como México con extensas regiones áridas, donde el subsuelo suele ser la principal y única fuente permanente de agua.

El conocimiento de los recursos de las aguas subterráneas, la evaluación de sus reservas, su explotación racional y su conservación son de vital importancia para la valorización del desarrollo agrícola, económico e industrial de una región, máxime si ésta es árida como es el caso. Además de esto, en una zona de fuerte demanda de agua por tener frontera con el país de economía más poderosa del mundo.

Para entender el proceso de formación del domo subterráneo, producto de la infiltración, así como el comportamiento del nivel freático y recarga del acuífero se precisa de conocimientos sobre geohidrología, en particular sobre la teoría de flujo en medios porosos, así como diversos métodos de cálculo numérico y matemático.

Para identificar los actores nacionales que intervienen en la gestión ambiental en lo referente a conservación, explícitamente en la ejecución y propuestas de políticas, se abordan conceptos sobre legislación ambiental en lo tocante a los fundamentos del derecho, y con ello identificarlos jurídicamente y señalar a los que pueden actuar en la defensa del agua nacional ante las autoridades de los Estados Unidos.

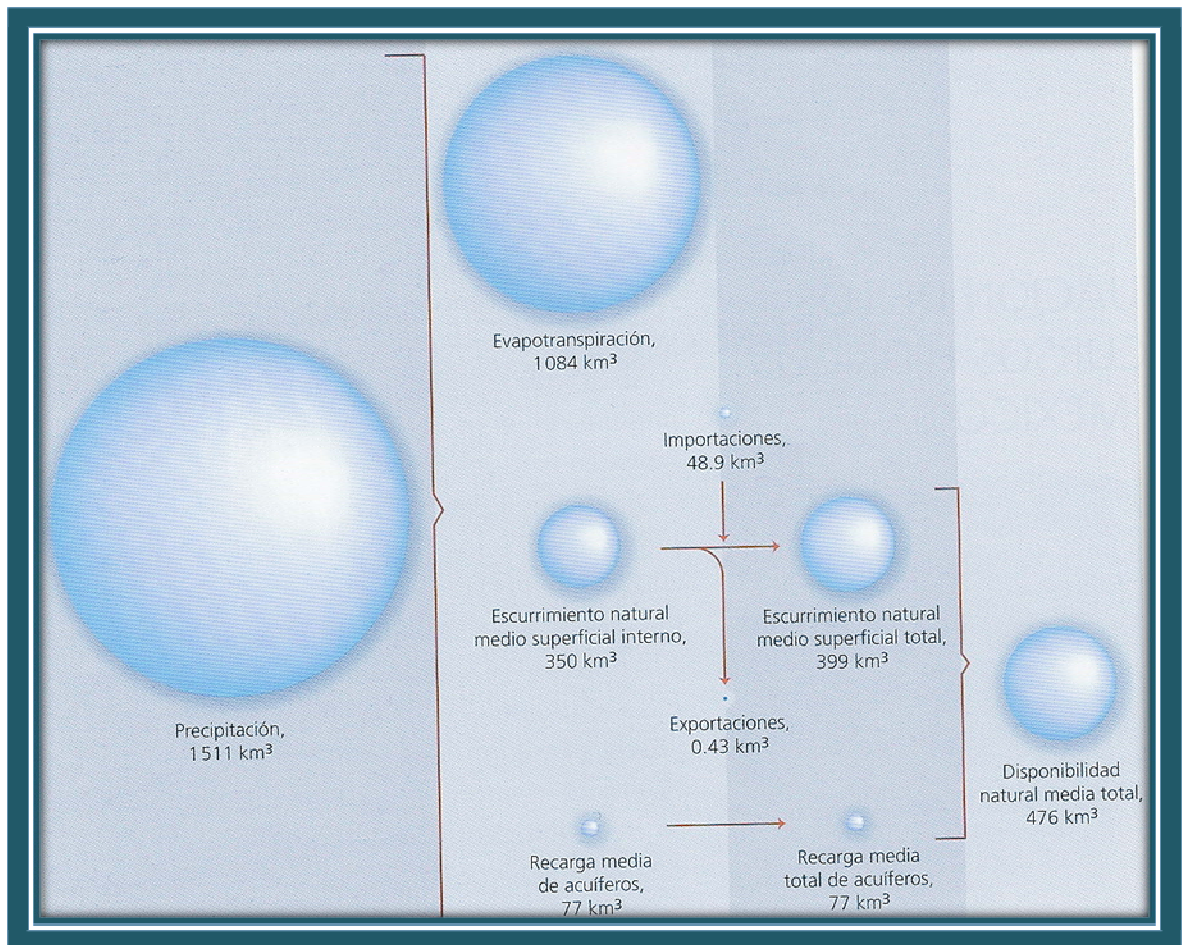
Considerando que la conservación del agua en el noroeste de México, en particular en el área de estudio, es un asunto de aguas transfronterizas, binacionales e interestatales, se exponen los principios ambientales que deben regular este componente de la gestión ambiental, la conservación. También se enuncian los instrumentos legales de carácter coercitivo que México firmó en materia ambiental y que conforman marcos en los cuales se pueden establecer convenios para regular el agua binacional subterráneo.

II.2. Disponibilidad de agua

II.2.1. Distribución nacional de la precipitación y población

En México, el 67 por ciento de la lluvia se concentra en cuatro meses del año y 68 por ciento del escurrimiento del agua de los ríos se encuentra en el sureste del país, donde habita el 23 por ciento de la población. Alrededor del 77 por ciento de la población se concentra en territorio árido y semiárido que ocupa dos terceras partes del país y presenta sólo el 32 por ciento del escurrimiento superficial (P.E.H. 2003 – 2007:13).

Figura II.1. Componentes del ciclo hidrológico mexicano (valores medios anuales)



Fuente: CNA 2004 tomado de Carabias y Landa, 2005:24.

II.2.2. Definición de cuenca y acuífero

Los espacios terrestres que por sus características físicas y naturales captan el agua de lluvia constituyen las cuencas hidrográficas. La cuenca es definida como “una unidad del territorio, diferenciada de otras unidades, en donde el agua ocurre de distintas formas y se almacena o fluye hasta un punto de salida que puede ser el mar o algún cuerpo receptor interior”, (Carabias y Landa, 2005:26).

Un acuífero se define como “cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectadas entre sí, por las que circulan o en las que se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento”, (*ibid.*:27). En el país, las aguas subterráneas se han clasificado en 653 acuíferos. La dificultad y alto costo de exploración de ellos conlleva al poco conocimiento sobre el volumen verdadero de agua subterránea y su distribución.

En la figura II.1, se muestra que el potencial de agua naturalmente disponible en el país es de 476 km³. Se estimó que para el año 2004, este tipo de disponibilidad sería del orden de 4547 m³ por año, lo cual coloca a México como un país de baja disponibilidad natural¹ de agua.

II.2.3. El agua subterránea en México

Se estima que alrededor del 35 por ciento del agua utilizada en el país es de origen subterráneo, y sirve para atender las necesidades de más de dos tercios de la población y un tercio de la superficie total irrigada. La presión sobre los acuíferos se ha incrementado debido a la extracción excesiva y a los volúmenes de infiltración reducidos por la pérdida de zonas de recarga a consecuencia de la deforestación y de los cambios de uso de suelo. De los 653 acuíferos del país, actualmente 102 se encuentran sobreexplotados; tal es el caso del acuífero del Valle de Mexicali, (Carabias y Landa, *op. cit.*:59).

¹ Carabias y Landa (2005), describen la “disponibilidad natural” como el volumen de agua que durante cierta época del año escurre por un tramo específico de una corriente superficial o que está almacenado en un reservorio o en un acuífero. Esta difiere de la “disponibilidad jurídica” debido a que la primera es el agua que escurre o se almacena físicamente, mientras que la segunda es el volumen susceptible de ser concesionado o asignado.

II.2.4. Disponibilidad de agua en Baja California

El estado de Baja California, se localiza al noroeste y dentro de la extensa zona árida y semiárida del norte de México, tiene poca disponibilidad de agua, sin embargo se ha caracterizado por emplear las tecnologías más avanzadas, para transportar y abastecer de agua a sus poblaciones.

II.3. Medio físico

II.3.1. Localización y extensión del área de estudio

El área de estudio se encuentra en el extremo NE del acuífero del Valle de Mexicali y corresponde a una franja de 15 kilómetros de ancho y 34 km de longitud, paralela a la línea internacional rumbo de 84,2890 NE, con una superficie aproximada de 510 km². El vértice NE del área de estudio coincide con el Banco nacional 20-7 que está al norte del poblado algodones. Este poblado es el más septentrional del país.

Tabla II.1. Localización y extensión del área de estudio

Nombre del acuífero	Superficie de la zona de estudio	Límites geográficos	
		Latitud Norte	Longitud Oeste
Valle de Mexicali	510 (km ²)	32 ⁰ 44'20'' a 32 ⁰ 36'15''	114 ⁰ 41'03'' a 115 ⁰ 05'21''

Fuente: elaboración propia.

II.3.2. Cuerpos de agua superficial

II.3.2.1. Ríos

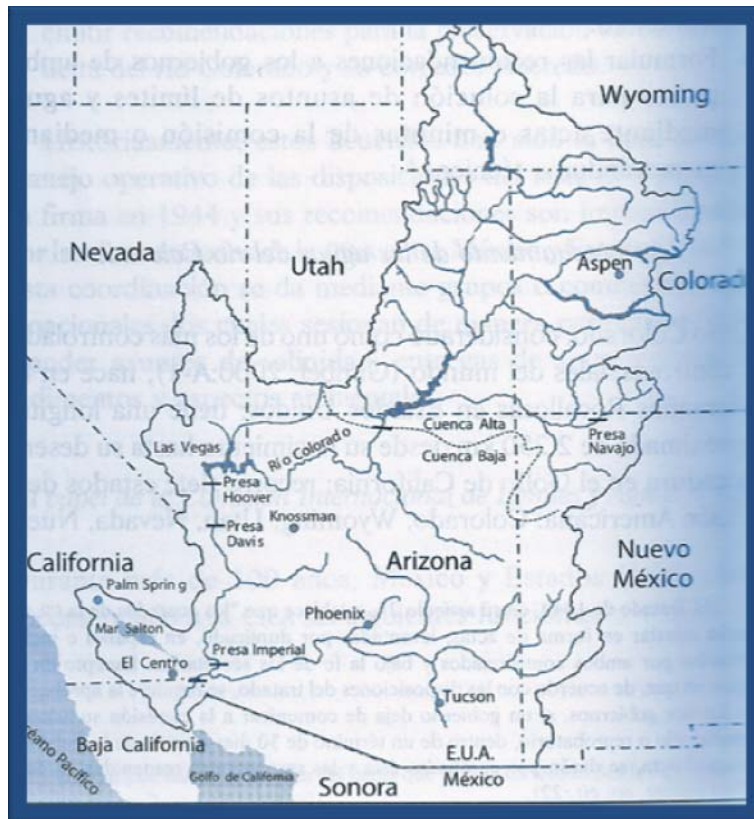
En el Valle de Mexicali discurren tres ríos: el *Río Colorado*, el *Río Nuevo* y el *Río Hardy*. Los dos últimos han servido como drenes para el agua de retorno de riego.

El Río Colorado tiene una longitud total de 2,730 km, de los cuales 29 km conforman la frontera entre México y Estados Unidos, específicamente en los estados de Baja California y Arizona. El escurrimiento del Río Colorado se origina principalmente por los deshielos en la parte montañosa de la *Meseta del Colorado* y desemboca en el Golfo de California con

dirección norte a sur y con una pendiente de 0.3 por ciento (Colección del Archivo Histórico Diplomático Mexicano, 1975).

Este río posee uno de los más grandes sistemas de regulación del caudal de los Estados Unidos, con presas derivadoras y de almacenamiento entre los que caben destacar *Glenn Canyon* y *Hoover*, con capacidad máxima de 34,538 y 35,200 Mm³, respectivamente. Esta última entró en funcionamiento en 1935 reduciendo el caudal del Río Colorado (Bernal, 2005:385). El Río Colorado tiene un volumen anual de escurrimiento de 18,000 Mm³ y beneficia a más de 19 millones de habitantes; de los cuales 17.5 millones se ubican en los Estados Unidos y el resto en Baja California y en una pequeña porción de Sonora. México tiene asignado recibir 1,850 Mm³ anuales conforme al Tratado Internacional de Aguas celebrado entre México y Estados Unidos en 1944.

Figura II.2. Cuenca del río Colorado



Fuente: Bernal, 2005:376.

La cuenca del Río Colorado cuenta con una superficie total de 631,700 km², abarca siete estados de la Unión Americana (Wyoming, Nevada, Utah, Colorado, California, Arizona y Nuevo México), y en México dos entidades federativas (Baja California y Sonora) en donde posee un área de 7,085.12 km² de los cuales 5,052.62 km² pertenecen al estado de Baja California, (INEGI, 1995; Bernal, 1995).

El nacimiento del Río Nuevo se localiza a 3.2 km al sureste de Mexicali, pasa por la Cd. de Mexicali y cruza el límite fronterizo entre México y Estados Unidos al oeste de Caléxico, dirigiéndose al norte hacia el Mar del Salton. El caudal del Río Nuevo se compone del drenaje agrícola y retornos de riego del Distrito de Riego 014 en el Valle de Mexicali, cuyo drenaje natural tiene pendiente hacia el norte, por descargas de aguas negras y desagües de ésta ciudad provenientes de las lagunas de oxidación de la Colonia Progreso y de las lagunas de González Ortega (P.E.H., 2003 – 2007:83), siendo en promedio 221 Mm³/año (USGS, Internet). El agua de éste río “está fuertemente contaminada y no se recomienda para ningún uso” (P.E.H., 2003 – 2007:43).

El Río Hardy presenta un desarrollo de meandros que contrasta con el estrecho valle fluvial del cauce principal del Río Colorado. Actualmente drena al extremo suroccidental del acuífero superficial del valle - la antigua zona de la *Laguna de los Volcanes* - y las escorrentías ocasionales en los abanicos aluviales de la Sierra *El Mayor*. En la antigua configuración del delta y hasta épocas recientes, el Río Hardy era parte del *Río Paredones* y juntos formaban uno de los principales canales distributarios del delta en épocas de avenidas (Dutcher et al., 1972). El Río Hardy tiene las características de un río en etapa madura o senil, poco competente y con una carga muy pequeña de sedimentos de fondo.

La Presa Morelos se encuentra construida sobre el cauce del Río Colorado en los linderos del límite internacional con los EE.UU, en el punto de intersección de los estados de Arizona, California y Baja California. Tiene una capacidad de derivación de 9,900 m³/s y una altura de 42.10 m (P.E.H., 2003 – 2007:63).

II.3.2.2. Drenes y canales agrícolas

La red de drenaje a cielo abierto del Distrito de Riego 014 cuenta aproximadamente con una longitud de 1425 km, esto incluye las redes principal y secundaria. Este sistema de drenaje fue diseñado con el objeto de desalojar el agua excedente del riego, evitando con ello la concentración de sales en las primeras capas del suelo y de mayor interés agrícola. La circulación de la red se inicia donde termina la zona antigua de pozos al NE del valle avanzando en dirección SW, hasta la parte central del valle en donde la red de drenaje se divide en dos direcciones: una dirige su descarga hacia el Río Nuevo fluyendo hacia el norte y descargando a la cuenca del Saltón; y otra, hacia el sur en dirección al Río Colorado para descargar en el Golfo de California. El parte-aguas en la zona central del valle se debe a la topografía del terreno.

La red de canales de conducción de agua para riego del Distrito 014, cuenta con aproximadamente 3442 km de longitud entre red primaria y la red secundaria, ambas recubiertas con concreto hidráulico. La red de canales se construyó con el objeto de distribuir el agua que proviene del Río Colorado. El agua de éste río llega a la Presa Morelos para posteriormente derivarla por los canales que cruzan el Valle de Mexicali con direcciones de norte a sur y de este a oeste.

II.3.2.3. Canal Todo Americano (All-American Canal)

A principios del siglo XX, tanto México como Estados Unidos iniciaron sus actividades agrícolas utilizando conjuntamente las aguas del Río Colorado para regar tierras del *Valle de Mexicali* (México) y del *Valle Imperial* (EE.UU). La utilización conjunta del agua era debida a la topografía, ya que para que el agua escurriera por gravedad tenía que entrar al Valle de Mexicali y regresar al Valle Imperial. Para 1904 se concesionó a Estados Unidos la construcción del *Canal El Álamo* para derivar y conducir por territorio mexicano aguas del Río Colorado hacia el Valle Imperial, y así el Valle de Mexicali utilizaría la mitad de esas aguas (Colección del Archivo Histórico Diplomático Mexicano, 1975). En el año de 1911, se inicia el anteproyecto del Canal Todo Americano en territorio norteamericano paralelo al límite fronterizo entre México y Estados Unidos, y así, independizarse de México en lo referente al aprovechamiento de las aguas en el Bajo Río Colorado.

El CTA inicia en la Presa del Valle Imperial sobre el Río Colorado aproximadamente a 32 km al NE de Yuma, Arizona y transporta agua por gravedad a lo largo del límite fronterizo entre México y Estados Unidos en territorio estadounidense, cruzando 22 km de dunas arenosas sobre el lado este del Valle Imperial. Cruza por nueve ciudades hasta llegar a la zona agrícola del Valle Imperial.

El CTA tiene una longitud de 132 km, un ancho que varía de 45 – 60 m, una profundidad de 2 a 6 m y una pendiente de 0.04 (USGS, Internet).

II.3.3. Vegetación en el área de estudio

La zona riparia dentro de ésta área se extiende seis millas al sur de la Presa Morelos en la Frontera Internacional. El área con vegetación es angosta, y cubre el 68 por ciento de la planicie de inundación, 170 ha (420 acres) en total. Esta área riparia está dominada por densos matorrales de sauces, la mayoría de los cuales mide hasta 4 m, con plantas más viejas que miden entre 7 y 17 metros. Aunque también se encuentran álamos, estos aparecen sólo como individuos aislados. Las plantas son predominantemente de follaje medio (0.6 a 4.6 metros) con poca vegetación de follaje alto y bajo. La planicie de inundación no cubierta por sauces es suelo desnudo o está cubierto por arbustos, predominantemente pino salado y cachanilla. Estos densos grupos de sauce son una característica notable de la Zona 1, por ser escasos a lo largo del Río Colorado. Los sauces ya no son siquiera enumerados como un tipo de hábitat al norte de la presa Morelos en Estados Unidos (Valdés-Casillas et al, 1998 en Environmental Defense, 1999).

Los Humedales del delta del Río Colorado forman un interesante sistema fragmentado de humedales naturales y artificiales originados y mantenidos por la Cuenca el Río Colorado (cauce principal), el sistema hidráulico del Distrito de Riego 014 Río Colorado (Valles de Mexicali y San Luis Río Colorado), los Valles agrícolas de Yuma y Wellton Mohawk, Arizona y aguas marinas intermareales del Alto Golfo de California o Mar de Cortés. Existen varios tipos de humedales: dulceacuícolas, salobres, marinos-intermareales con extensa cobertura de vegetación riberrina (álamo-sauce mezquite), acuática emergente (tular-carrizo-junco), vegetación costera halófito o saladar (Salicornia-Batis-pasto saldo) y

extensas zonas con plantas invasivas (pino salado). Parte del Sitio forma parte de la Reserva de la Biosfera Alto Golfo de California y delta del Río Colorado, en especial su Zona Núcleo “Delta del Río Colorado” y una porción de la Zona de Amortiguamiento. Este sistema fragmentado de humedales del cual depende en gran medida la productividad en el Alto Golfo de California, en conjunto, albergan una gran diversidad biológica y productividad, que colocan a este sistema de humedales como únicos e importante para la conservación de las especies endémicas y en peligro de extinción y hábitat migracional para miles de aves acuáticas y terrestres migratorias.

II.4. Tipos de acuíferos atendiendo su nacionalidad

Un acuífero nacional se localiza completamente dentro de un Estado, mientras que uno de carácter internacional podría presentarse en una de las siguientes cuatro formas: 1) un acuífero confinado dividido por una frontera internacional; 2) un acuífero que se ubique completamente dentro de un Estado y está vinculado hidrológicamente a un río internacional; 3) un acuífero que se encuentra completamente dentro de un Estado y está vinculado hidrológicamente a un acuífero de un país vecino; y 4) un acuífero que se encuentra completamente en el territorio de un Estado, pero que su área de recarga se encuentra en otro país, (Barberis, 1991).

II.5. Actores que demandan agua en el estado de California, EE.UU., para contextualizar las razones del revestimiento del CTA por los Estados Unidos.

La frontera México - Estados Unidos representa un límite administrativo de 3,200 kilómetros de actividades socioeconómicas. Esta región fronteriza es una de las áreas de crecimiento constante y acelerado de Norteamérica porque gracias a su posición geográfica ofrece diversas oportunidades económicas. Esta área continuamente amplía sus actividades económicas y población en ambos lados. A principios de 2005 la población a lo largo de la frontera era de 10.5 millones, el 59 % en el lado estadounidense, concentrado en 12 ciudades. Hacia 2020 se estima un incremento a 19.4 millones (Frontera 2012, Programa Ambiental México-EE.UU). Este crecimiento requiere el acceso a una cantidad significativa de agua para usos humano, agrícola e industrial. Lamentablemente, los procesos de distribución no

son siempre visibles a los ciudadanos comunes quienes a menudo no ven los problemas que sus acciones generan o el impacto a largo plazo de sus decisiones sobre este recurso.

Los recursos hídricos compartidos a lo largo de la árida frontera México-EE.UU, pueden ser divididos en tres subregiones: la región occidental, dominada por la cuenca del Río Colorado (California, Arizona occidental y Sonora occidental), la región central "o la superficie seca", sin grandes sistemas de ríos (Sonora, Arizona, Nuevo México y Texas occidental); y la cuenca del Río Grande/Río Bravo (este de Nuevo México, Texas, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas).

Esta región fronteriza demuestra el desafío de trabajar a nivel binacional para desarrollar un plan de acción que considere las prioridades de ambas naciones. Los temas concernientes al agua son tanto complejos como numerosos porque, a pesar una larga historia de negociación sobre el agua en esta árida región, la asignación permanece todavía como un tema discutible (Van Shoick, 2003). La región fronteriza afronta una distribución desigual y pobre de infraestructura hidráulica. México depende de la misma agua que se necesita en California, Arizona y Nevada. Estos problemas son la realidad que opera contra el espíritu de integración regional. Desde la firma del Tratado de Libre Comercio (TLC / NAFTA) en 1992, la frontera México-EE.UU ha dominado agendas públicas recibiendo atención política independiente. Así, las decisiones de dirección no son mas soberanas (Mumme, 2005). Mientras, su ejecución es nacional, sus efectos son cada vez más binacionales.

Acuerdos binacionales sobre agua: la diplomacia binacional acerca del agua en la región fronteriza data desde la convención del 1 de marzo de 1889 cuando se estableció la Comisión Internacional de Límites (posteriormente "y Aguas") hoy conocida como la CILA. Esta institución promovió convenios sobre los flujos de cuencas binacionales y el principal acuerdo binacional se firmó en 1944: el Tratado para la Utilización de las Aguas de los Ríos Colorado y Tijuana, y Río Grande (conocido como el *Tratado 1944*). Este Tratado fue el primer instrumento significativo para regular el abastecimiento del agua de la frontera. México quedó, a partir de entonces, comprometido a proporcionar un tercio del flujo del Río Conchos (la parte inferior de Río Grande/ Río Bravo), a cambio del agua del Río Colorado.

Cada participante debe también asignar los excesos (Nitze, 2003). Mientras el Tratado de 1944 asigna cantidades específicas de agua, nada menciona sobre la calidad de la misma o la distribución de las aguas subterráneas. Además, el acuerdo no aborda la sequía a largo plazo, que ha contribuido a incrementar la deuda de agua de México sobre el lado noreste de la frontera.

Desde 1944 la CILA se ha convertido en la principal institución binacional con jurisdicción sobre límites territoriales, calidad y asignación del agua, así como saneamiento y tratamiento y de aguas negras. Las actividades de la CILA incluyen la planificación y construcción de plantas de tratamiento de aguas negras que operen en ambos lados de la frontera. Desde su concepción, esta institución se ha involucrado en cada significativa actividad acerca del agua en la frontera. Su autoridad, sin embargo, es limitada en las funciones que afectan directamente el límite internacional (Mumme y Brown, 2002).

El Río Colorado, bajo Delta del Río Colorado, California y México: el Río Colorado y sus tributarios componen una cuenca de 632,000 km² (kilómetros cuadrados), de los que 32,000 km² conforman la Delta de Río Colorado. Las aguas del Río Colorado son utilizadas por siete estados de EE.UU, cuatro en la cuenca superior (Colorado, Nuevo México, Utah y Wyoming), y tres en la cuenca inferior (Arizona, California y Nevada), más la parte de Baja California en México. Las presas construidas durante 1909 – 1935 cambiaron el carácter del río, de una naturaleza caliente, turbulenta, y con intenso aporte de sedimentos, a un frío y regulado caudal de agua clara (Cohen, 2002). Agotado por la parte estadounidense, el río se convierte en un riachuelo fangoso cuando llega a México.

El área del Delta Colorado es una de las más calientes y secas en Norteamérica donde los asentamientos humanos han sido posibles sólo porque las aguas del río crearon un llano fértil. La cuenca inferior del Río Colorado, que cubre 7770 km², fue una vez uno de los sistemas de pantanos más ricos en Norteamérica, ahora degradado y mal manejado (Anderson, 1999). En particular, las aguas de alta calidad de la parte alta del Río Colorado, son demandadas por Arizona, California y Nevada, con índices de crecimiento entre los más altos en EE.UU. Hacia 2020 se espera que 38 millones de residentes de la cuenca inferior

sean dependientes de esta agua. Durante este mismo período la población dependiente de este río aumentará el 91 por ciento (E.P.A., 2002). Sin embargo, la asignación de esta agua crea una competencia legal, económica y ambiental. Incluso antes del Tratado de 1944, la distribución del agua fue regulada por "La Ley del Río". Es decir, una colección de legislaciones, decisiones judiciales y otros documentos que han sido promulgados para regular el uso de las aguas del Río Colorado desde la mitad del siglo XIX. La puesta en práctica de estas leyes da la prioridad en derechos de agua a los primeros en asentarse. Con ellos, un sistema complejo de agua urbana y distritos de irrigación se convirtió en el marco para la toma de decisiones relacionada con un recurso cada vez más vulnerable.

Uno de los principales problemas que afronta el Río Colorado es la sobreasignación. Por lo general, cada vez es legalmente repartida más agua de la que en realidad fluye por el Río (Cohen, 2002). La sobreasignación es causada por el hecho de que estados de la cuenca alta, principalmente Utah y Colorado, no han definido bien sus cuotas de agua, permitiendo a estados de la cuenca baja, en particular California, usar más agua de la que formalmente tienen derecho. Conforme al Consejo de Cuenca del Río Colorado, los estados de cuenca alta y baja pueden utilizar 9250 Mm³ cada año. Una opción es concedida a los estados de la cuenca baja para el uso de 1230 Mm³ adicionales. El Acto de Limitación de California de 1929, restringe el uso anual de California a 5430 Mm³, más no más de la mitad de cualquier exceso o agua de sobra no repartida por el Consejo. Para su parte, el Metropolitan Water District (MWD, la institución encargada del manejo del agua en las zonas metropolitanas del sur de California) explica que el uso anual de California ha variado de 5550 a 6410 Mm³ a lo largo del pasado decenio. El uso histórico y corriente de hasta 6410 Mm³ por año, ha resultado de la existencia de condiciones de exceso y disponibilidad del agua repartida a, pero no utilizada, por Arizona y Nevada (MWD, "*The River*").

La presión sobre California para limitar su consumo de agua, ha generado preocupaciones y lucha de intereses. El desarrollo de provisiones de agua para uso doméstico/urbano, era considerado el "más prioritario y mejor uso" del agua en el estado; seguido por el uso agrícola (Davis, 1998). California ha crecido rápidamente importando el agua desde lugares distantes para satisfacer sus necesidades. Según Michael Cohen, el

manejo del agua en el oeste de EE.UU, se desarrolló bajo instituciones diseñadas para promover asentamientos humanos y el consumo de recursos hídricos. El sobreuso del estado y el alto consumo han causado lo que Davis llama "la pelea de titanes por el agua".

Los problemas de asignación también cruzan fronteras. El Valle Imperial en California (EE.UU) y el Valle de Mexicali en Baja California (México), han sido centros de desarrollo del bajo Delta de Río Colorado. La irrigación hizo estos establecimientos posibles. El Tratado de 1944 formalmente asignó a México 1850.234 Mm³ de las aguas de este delta (un décimo del flujo estimado del río). Pero el tratado también estipuló que durante los años de sequía extrema o accidentes en el sistema de irrigación de los EE.UU. se reducirá a México la asignación a la misma proporción en que los EE.UU. reduzcan sus consumos. En caso de excedentes a México se le asignará un máximo de 2096.931 Mm³. Esto implica que México no puede participar en los debates por el manejo del agua cuenca arriba y actualmente recibe cantidades de agua que resultan insuficientes debido a los términos desfavorables del tratado para México en materia de excedentes y déficits.

Curiosamente, en México el Tratado de 1944 fue considerado como una victoria nacionalista. El uso primario del agua entregada era para la agricultura. Como en el Río Grande y en la subcuenca Tijuana - San Diego, la agricultura es el usuario más grande de recursos del Río Colorado. Sobre el lado de los EE.UU de la frontera, casi el 25 por ciento del flujo anual del río es automáticamente asignado a usuarios agrícolas vía presas y acueductos construidos por el gobierno. El tratado nunca previó que el agua sería necesaria para sostener la increíble tamaño de estructura urbana e industrial que ha surgido desde entonces (Boime, 2000).

La intención original de acentuar la irrigación ha conducido casi exclusivamente a problemas crónicos ambientales y ha hecho obsoleta la gobernación del río. La demanda de agua de San Diego y el Acuerdo de trasvase del agua de Valle Imperial: El sur de California es sumamente el dependiente de la importación de agua. Esta actividad comenzó hace más de 100 años. Para afrontar crecientes desafíos en el abasto de agua, los funcionarios en materia hidráulica de San Diego fueron inspirados por la eficacia de los ingenieros hidráulicos de Los

Ángeles, quienes sentaron bases tempranas para la reclamación de todas las provisiones del agua del Río Los Ángeles y luego reclamaron el uso del Owen Valley. Así comenzó a importarse grandes cantidades de agua del Colorado y otros ríos del norte de California (Carle, 2000). Actualmente, entre el 75 y el 90 por ciento del agua del Condado de San Diego es importado. Como en Los Ángeles y sus transferencias del agua por canales desde el Río Colorado, San Diego se hizo famoso por traer el agua de fuentes distantes. De hecho, una preocupación principal que afronta la región hoy en día, es esta confianza sobre el agua importada. Mientras el desarrollo de tecnología apropiado ha sido necesario para exportar agua desde largas distancia, la clave para asegurar los recursos es el suficiente poder político para negociar inversiones, construir presas, y obtener la asignación requerida de agua, particularmente en áreas con vulnerabilidad hídrica. La carencia de agua y la necesidad de importarla representan una amenaza para la vitalidad de la población del sur de California y el ambiente, incitando a la región a mirar y buscar hacia otra parte, o internamente (esto distritos de irrigación) por soluciones. Se considera que la complicación principal en este caso no es la población en crecimiento, ni su respectiva demanda creciente; en cambio si es el hecho que los funcionarios locales han estado promoviendo el desarrollo urbano y económico de modo agresivo (a través de su poder político) para maximizar la asignación del agua.

En 1947 la presa San Vicente recibió la primera exportación de las aguas del Río Colorado, y desde ese momento la ciudad de San Diego ha sido dependiente del río. Además, la situación de este abasto de agua está estrictamente relacionada, y sumamente dependiente, del manejo de agua en Los Ángeles. El agua que San Diego comenzó a importar provenía del acueducto de Los Ángeles y el MWD, comprada a su vez del Acueducto del Río Colorado. Después de 1947 las proyecciones de crecimiento de San Diego a menudo eran infladas por objetivos de negociación del agua. Existe una conexión inexplicable entre el agua y oportunidades de negociación. La demanda del agua ha sido basada en lo que una comunidad puede negociar en vez de lo que necesita.

A pesar del éxito en estas negociaciones, San Diego a tenido momentos no gratos. La sequía que golpeó el sur de California desde 1987 hasta 1991, generó una tensa competencia

conforme a los acuerdos de asignación del agua a lo largo del Río Colorado y obligó a las autoridades hidráulicas de San Diego (SDCWA) a reenfocar su atención sobre fuentes locales.

El SDCWA abastece a más de 1.2 millones de personas que pueblan más de 518 km² de tierra desarrollada. A pesar de las negativas predicciones ambientales para el futuro de agua en San Diego, líderes locales económicos y políticos activamente negociaron la extensión de fuentes locales de agua. Ellos han mejorado y aumentado las plantas de desalinización y la extracción de aguas subterráneas, así como han desarrollado un plan de transferencia de agua durante el futuro próximo (www.sdcwa.org, consultado en junio de 2008).

El esfuerzo de San Diego por diversificar sus fuentes de abastecimiento de agua, dirigido por la SDCWA desde finales del siglo XX, ha obligado a líderes locales y estatales a reevaluar la relación campo-ciudad en la distribución del agua. Durante años, los funcionarios hidráulicos de San Diego habían mirado hacia el Distrito de Irrigación de Valle Imperial (Imperial Irrigation District, IID). En 1988 anunciaron por primera vez la probabilidad de un acuerdo de transferencia de agua, a pesar de la oposición vehemente de muchas personas en el Valle Imperial. Otro problema fueron las altas cotizaciones del precio del agua eventualmente que hicieron esta opción irrealizable para autoridades de San Diego en ese momento. En 1995, el SDCWA finalmente tenía bastante dinero para acercarse de nuevo a funcionarios del IID y retomar las negociaciones de transferencia de agua. Más recientemente, en 1997, el SDCWA presentó un proyecto de acuerdo de transferencia al IID para comprarle hasta 370 Mm³ del agua cada año al precio de 249 US dólares por 1233m³ (el equivalente de un acre pie) con un incremento de 311 US dólares por acre pie transferido después de 10 años. Los precios eran aún más altos de los pagos que SDCWA hacía al MWD por el agua de Los Ángeles (Hundley, 2001). El plan fue originalmente establecido para una duración de 45 años con una posible extensión de 30 años más. El director SDCWA hizo declaraciones a los medios de comunicación acerca de una nueva era de independencia económica y del agua de Los Ángeles y del MWD, si este acuerdo se concretaba.

Esta oferta de transferencia sin embargo, estuvo detenida durante seis años debido a la oposición presentada por granjeros locales. Además, algunos grupos ambientalistas tomaron una fuerte posición para proteger la restauración de Mar del Saltón (*Salton Sea*), dado que el agua implicada en la negociación era originalmente asignada para este proyecto ambiental. De hecho, el estudio de impacto ambiental se convirtió en un asunto particularmente urgente ya que tomó cuatro años para ser completado, desde 1998 hasta 2002. Un reporte socioeconómico tripartito fue completado hasta 2003 pero las autoridades entrevistadas del IID para esta investigación, no mencionaron la existencia de dicho reporte e incluso mencionaron que ningún estudio económico había sido completado. Muchas veces durante este período el IID intentó cancelar las negociaciones bajo la presión de ecologistas. Al final, los funcionarios del IID incluyeron el costo ambiental en un precio todavía más alto por acre pie.

En 2002 la negociación entre San Diego e IID de algún modo se transformó en una propuesta a nivel estatal para la conservación del agua. El Metropolitan Water District era presionado con severidad por los estados río arriba para reducir al mínimo la asignación de agua para Los Ángeles y San Diego. Estas ciudades eran también particularmente presionadas a reducir al mínimo su consumo. Sin embargo, porque San Diego luchaba por un acuerdo de transferencia de agua con el Valle Imperial, la estrategia del estado de California fue colocar el caso en un marco más amplio para dar con ello respuesta a las presiones de parte del Colorado River Compact (Consejo de cuenca) y enfocar su estrategia en el apoyo legal y político para concretar el acuerdo de transferencias de San Diego. Esta posición dio al IID la responsabilidad de ahorrar agua y responder a la presión política del sur de California sobre esta cuestión. Los derechos preferenciales y el voto de poder soportado por las decisiones de la corte estatal, fueron cruciales para definir la realización de este acuerdo de transferencia.

Una vez que el estudio de impacto ambiental fue terminado y la oposición ecologista se relajó, las agencias del agua del sur de California estaban listas para firmar un acuerdo para vender o comprar derechos del agua entre San Diego y el Valle Imperial. El acuerdo final fue firmado en octubre de 2003 en los términos siguientes: SDCWA recibirá hasta 246

Mm³ anuales de agua del IID, y también será responsable de pavimentar, junto con el estado de California, los canales Todo Americano (CTA) y Coachella, pagando hasta 235 millones de dólares. A cambio, SDCWA recibirá 95 Mm³ por año del CTA durante 110 años. Hasta 300 millones de dólares serán destinados para impactos socioeconómicos y ambientales en el Valle Imperial, incluyendo la restauración del Mar Saltón. El acuerdo, sin embargo, no especifica donde se derivará este dinero, y también no hay ningún estudio oficial del impacto socioeconómico de esta transferencia del agua en el Valle Imperial o en el lado mexicano de la frontera. Aparte de esta lucha ambiental, el plan de conservación de agua de California se traducirá en menos filtraciones de agua por el suelo arenoso para el abastecimiento de agua subterránea de Mexicali, amenazando la región agrícola de esa parte de Baja California.

II.5.1. El revestimiento del Canal Todo Americano (CTA)

Como se ha mencionado, el acuerdo de trasvase de aguas entre San Diego y Valle Imperial, implica necesariamente la pavimentación de dos canales, el CTA y el Coachella. El CTA fue construido desde 1929 hasta 1940, y ha sido el conducto principal del agua en la región, incluyendo más de 2000 km² de irrigación en los Valles Imperial y Coachella, y suministrando agua para nueve pequeñas ciudades californianas. En el sur el canal corre paralelamente al bajo Río Colorado, casi sobre la frontera, y entonces gira el oeste en una línea directamente paralela a la frontera por más de 80 kilómetros de su longitud de sus 132 kilómetros totales. Como el canal no está pavimentado y el gradiente es orientado a México, una cantidad importante de agua se filtra de allí hacia Mexicali. Según García e Ingram (2004), la historia del CTA revela que la racionalidad principal para su construcción fue la inseguridad de una ruta anterior que entregaba agua al Valle Imperial por México. De esta forma, y sin ningún documento legal binacional que gobernara esta entrega, cada año se asignaban (por infiltración) a México aproximadamente 80.0 Mm³ de agua subterránea, encima de los 1850 Mm³ de agua superficial conforme al tratado de 1944, llenando las capas acuíferas subterráneas del Valle de Mexicali (Herrera, Norzagaray *et. al.*, 2005). Esta interdependencia entre los valles Imperial y Mexicali, ha permitido el desarrollo agrícola, económico y urbano sobre el lado mexicano durante más de 60 años. Mexicali es ahora la tercera ciudad más grande de la frontera mexicana, con una población de cerca de un millón de habitantes.

El agua filtrada tiene la más alta calidad sobre el lado de noreste del Valle de Mexicali y ha sido tradicionalmente empleada para desarrollar la agricultura. El revestimiento del CTA limitará enormemente la recarga de aguas subterráneas en México. Pero este proyecto de pavimentación no es nuevo. En la segunda mitad del siglo XX se presentó una crisis de salinidad. El "agua oficial superficial" entregada por EE.UU a México era demasiado salada para ser utilizada lo que obligó a México a extraer el agua del subsuelo (Mumme, 1988).

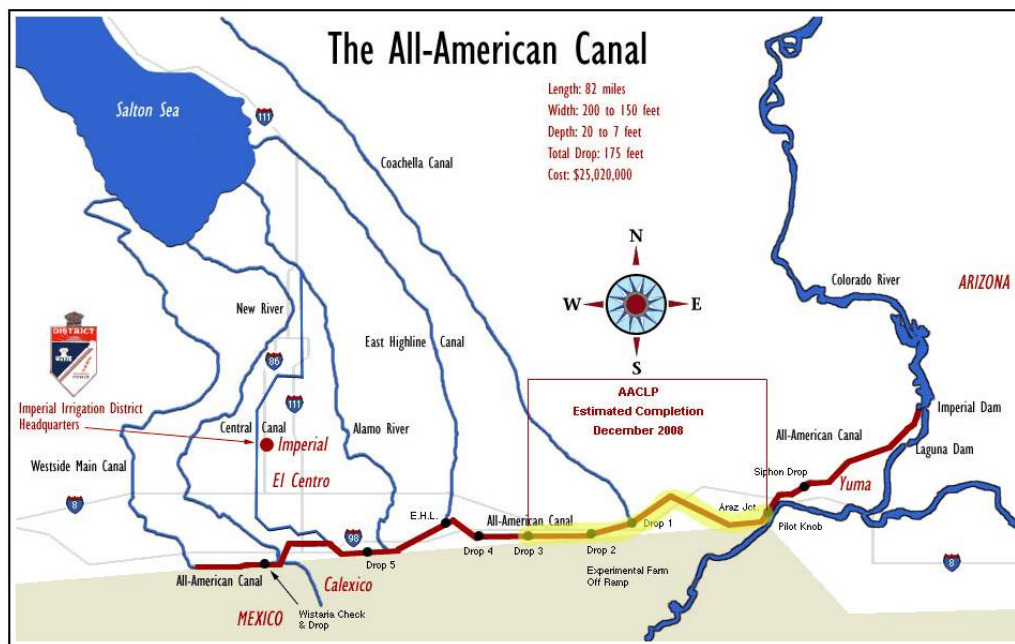
Después de esta crisis, ambos países acordaron de reportar cambios en la extracción de aguas subterráneas fronterizas con la perspectiva de alcanzar eventualmente un nuevo tratado de aguas subterráneas. Sin embargo, esto nunca ocurrió. Desde 1988, las autoridades del sur de California, incluyendo el SDCWA, han propuesto la pavimentación del CTA para recobrar el recurso "fugitivo". Sin embargo, debido a escaso financiamiento, la propuesta nunca se convirtió una prioridad para el Consejo del Río Colorado o para el MWD. Sólo recientemente, debido al citado acuerdo de 2003, la pavimentación se presenta como una realidad calificando el caso como un tema internacional significativo, porque abre la posibilidad de crear una imagen pública negativa de EE.UU en la política mundial (García-Acevedo e Ingram, 2004).

La posición de los líderes mexicanos, y usuarios de la frontera, es que el agua es suya debido al ejercicio de transferencia implícitamente establecido desde muchos años atrás, que ha permitido el beneficioso empleo de estas filtraciones. México se quejó de manera informal a través de la CILA sobre sus derechos de propiedad de esta agua y la obligación de EE.UU de consultarlo antes de la realización de cualquier proyecto de pavimentación (Sánchez, 2004).

El argumentó fue que si el tratado de 1944 no menciona de forma prohibitiva el empleo de estas aguas subterráneas, al menos es "permitido". Es decir "el silencio como parte de un acuerdo tácito" de transferencias por filtración. En su respuesta, EE.UU niega que México tenga cualquier derecho legal sobre estas aguas subterráneas, ya que el tratado de 1944 menciona solamente las obligaciones de entrega del agua superficial "que pertenece" a

EE.UU, y no así de las aguas subterráneas. Actualmente, este caso se ha convertido en un conflicto real ya que los trabajos de revestimiento han comenzado y hasta ahora las dos naciones no han alcanzado un acuerdo general sobre ese caso. Se espera que para diciembre de 2008 el CTA esté totalmente pavimentado.

Figura II.3. Proyecto de revestimiento del Canal Todo Americano



Fuente: Imperial Irrigation District (<http://www.iid.com/>, consultado en enero de 2008).

El proyecto de revestimiento considera la construcción de un canal paralelo revestido en un tramo de 37 km. De acuerdo con los estudios realizados por la CONAGUA, de llevarse a cabo dicha obra, el Valle de Mexicali se vería afectado en los siguientes aspectos (SEGOB, 2007):

- 1) Disminución de la recarga del acuífero del Valle de Mexicali en el orden de 100 Mm³;
- 2) Afectación de más de 1,200 hectáreas de riego de manera directa, que dependen de las aguas que se infiltran del canal y 15,800 hectáreas de forma indirecta;

- 3) Aceleración en el proceso de salinización del acuífero, dado que actualmente se recarga con aguas procedentes de excedentes o pérdidas de uso agrícola, incluidas las infiltraciones del CTA; y
- 4) Afectación de la flora y fauna de la región (daño a 3,300 hectáreas de humedales de la Mesa de Andrade).

El gobierno de Estados Unidos terminó el diseño en enero de 2006 e iniciaron los trabajos de construcción en julio de ese mismo año, con el propósito de iniciar operaciones en 2008. El estado de California y el condado de San Diego asignaron un presupuesto de 235 millones de dólares para el proyecto.

II.6. Propiedades físicas del medio acuífero

La *porosidad eficaz* y el *coeficiente de almacenamiento*, se relacionan al volumen de agua gravífica que puede ser liberado por el medio acuífero. La *permeabilidad* o *transmisibilidad hidráulica* determinan el caudal que se puede obtener del acuífero.

II.6.1. Porosidad eficaz, m_e

Según Castany (1975), es la relación entre el volumen de agua gravífica, V_g , y el volumen total V , expresado en porcentajes:

$$m_e = \frac{V_g}{V} 100 \quad (1)$$

II.6.2. Coeficiente de almacenamiento, S

Es el volumen de agua liberada por un prisma vertical de la capa acuífera, de sección igual a la unidad, para un descenso unitario del nivel piezométrico o de la carga. Se expresa en porcentajes, (*ibid.*, 160).

II.6.3. Permeabilidad, K

Para Domenico (1990), el *coeficiente de permeabilidad de Darcy*, K , es el volumen de agua libre que percola durante la unidad de tiempo a través de la unidad de superficie bajo un

gradiente hidráulico igual a la unidad, a la temperatura de 20⁰C. Se expresa en metros por segundo.

En términos genéricos la K es un tensor de segundo orden, cuyos componentes determinan las direcciones del flujo en el medio acuífero.

II.6.4. Transmisibilidad, T

Esta es igual al producto del coeficiente de permeabilidad de Darcy, por la potencia b o espesor de la capa acuífera libre o cautiva, en metros. Sus unidades se pueden expresar en m^2/s y tiene las dimensiones de una superficie por unidad de tiempo, (Castany, *Op. cit.*:183).

$$T = Kb \quad (2)$$

II.6.5. Gradiente hidráulico, I

Fetter (1994), lo considera la pérdida de carga por unidad de longitud, es decir, es la pendiente de la superficie piezométrica si se acepta que los hilillos sobre una misma vertical son paralelos entre ellos.

II.6.6. Velocidad real, V_e

Castany (*Op. cit.*: 210), dice que la velocidad real del flujo de las aguas subterráneas se refiere a la acción real de flujo determinada por la porosidad eficaz m_e . Si A es la superficie total de la sección flujo en m^2 y Q es el caudal del flujo de las aguas subterráneas en m^3/s :

$$v_s = \frac{Q}{A m_e} = \frac{K I}{m_e} \quad (3)$$

La velocidad real es mayor que la velocidad media obtenida según la formula de Darcy:

$$v = \frac{Q}{A} = K I \quad (4)$$

Estas dos velocidades se relacionan según la ecuación:

$$v_g = \frac{v}{m_g} \quad (5)$$

II.6.7. Caudal de flujo, Q

Según Fetter (1994), es el volumen de agua en m^3 que atraviesa una sección total de la capa acuífera, o sección de flujo (en m^2), normal a la dirección de flujo, en la unidad de tiempo (un segundo). Se expresa en m^3/s .

II.7. Manto acuífero

El manto acuífero objeto de estudio, se considera *libre* ya que en su parte superior está limitado por el nivel freático, el cual está sujeto a la presión atmosférica. Este se caracteriza por dos tipos de factores geológicos: el estratigráfico, que determina las características físicas y químicas de la “roca almacén”, y el tectónico, que fija sus dimensiones y su geometría.

II.8. Planicie fluvio - deltáica

Se caracteriza por avenidas fluviales que depositan materiales en zonas de inundación. La planicie fluvio - deltáica se caracteriza por depósitos de gravas asociados a canales de flujo de mayor energía.

II.9. Fuerzas que actúan en el subsuelo

El agua subterránea posee energía en forma mecánica, de calor y química. Debido a la variación espacial de la cantidad de energía, el agua subterránea es forzada a moverse de una región a otra en un intento natural de eliminación de esta diferencia de energía. El flujo del agua en el subsuelo es controlado por las leyes de la física y termodinámica. Como en todo estudio termodinámico, es necesario establecer condiciones ideales en alguna propiedad del objeto de estudio, por ello, para examinar la energía mecánica se asume que el agua está a temperatura constante.

Existen tres fuerzas externas que actúan sobre el agua contenida en el subsuelo. La más obvia de estas es la *gravedad*, la cual hace descender el agua. La segunda fuerza es la *presión externa*: sobre la zona de saturación actúa la presión atmosférica. La combinación de la presión atmosférica y el peso excesivo del agua crea la presión en la zona de saturación. La tercera de las fuerzas es la atracción molecular, la cual causa que el agua se adhiera a superficies sólidas. También crea la tensión superficial cuando el agua es expuesta al aire. La combinación de estos dos procesos genera el fenómeno de la capilaridad, (Fetter, *Op. cit.*:131).

II.9.1. Ley de Darcy: alcances y limitaciones

La base de la teoría del flujo a través de un medio poroso está fundamentada en una experiencia muy simple y que desarrolló el Ing. Francés Henry Darcy en el siglo XIX.

Una muestra cilíndrica del medio poroso es encerrada en un tubo cuyas extremidades están comunicadas con dos depósitos. El líquido filtrante fluye del recipiente superior hacia el inferior a través de la columna porosa. Este asciende en los tubos piezométricos alcanzando niveles diferentes.

La experiencia demuestra que el caudal es proporcional a la pendiente de esta recta, y que la inclinación del tubo no modifica en nada la relación precedente. Estas constataciones se pueden resumir en la siguiente fórmula empírica:

donde v_D es la velocidad de Darcy.

$$v_D = \frac{Q}{A} \quad (6)$$

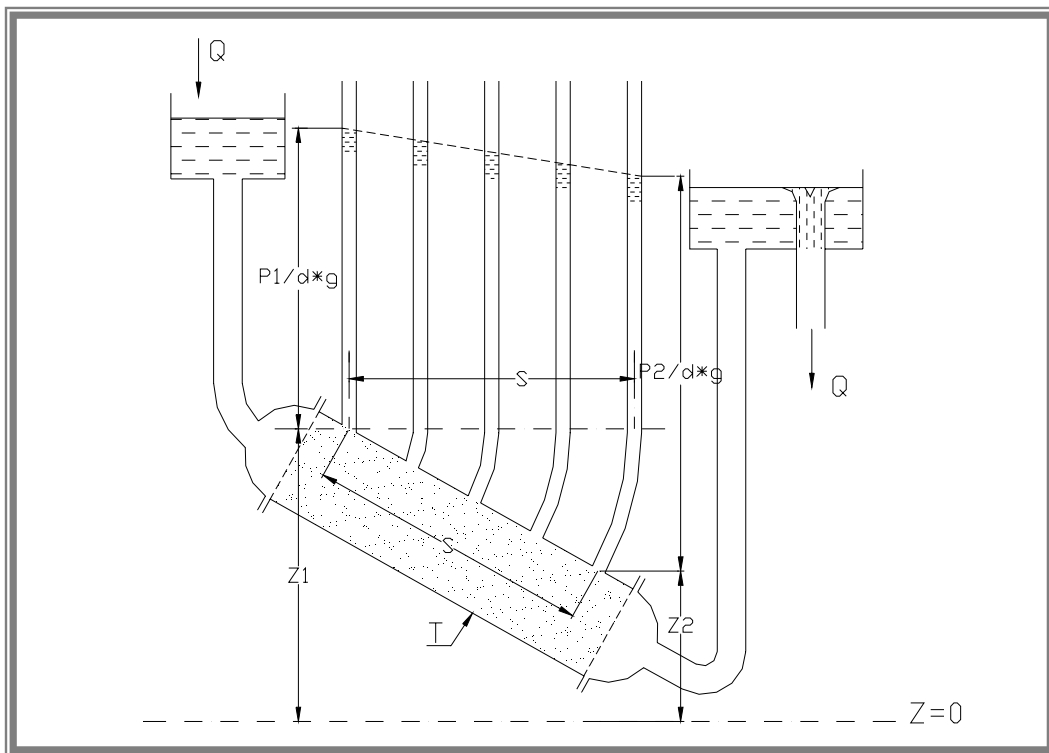
$$Q = -KA \left(\frac{h_A - h_B}{L} \right) = -KA \left(\frac{dh}{dl} \right) \quad (7)$$

Esta ley se denomina *Ley de Darcy*. La constante K de la ecuación (7) depende únicamente de la naturaleza del medio poroso y del líquido filtrante y se denomina conductividad hidráulica.

Las alturas piezométricas h corresponden a la energía potencial del fluido por unidad de peso en cada uno de los puntos considerados.

La pendiente de la línea de las alturas piezométricas no es pues otra cosa que el gradiente de la carga hidráulica o pendiente motriz, I y Q/A , es el caudal por unidad de área que fluye por el medio poroso. Tiene las dimensiones de una velocidad y se denomina velocidad de filtración, V , (Fetter, 1994:94, 142-144).

Figura II.4. Esquema de la instalación utilizada en la experiencia de Darcy.



Fuente: Fetter, 1994:95.

Con las notaciones precedentes, la fórmula de Darcy se escribe:

$$V_D = KI \quad (8)$$

II.9.1.1. Limitaciones de la Ley de Darcy

La Ley de Darcy, no es precisa por dos razones:

- 1) La constante de proporcionalidad, K , no es propia y característica del medio poroso, sino que también depende del fluido.

El factor K , puede expresarse de la siguiente forma:

$$K = k \frac{\gamma}{\mu} \quad (9)$$

donde K = permeabilidad de Darcy

k = permeabilidad intrínseca (sólo depende del medio poroso)

γ = peso específico del fluido

μ = viscosidad dinámica del fluido

En el agua, la salinidad apenas puede hacer variar el peso específico. Para la viscosidad solo se debe considerar la variación con la temperatura, ya que con ello se aumentaría la permeabilidad de Darcy y también el caudal circundante por la sección considerada del medio poroso. Afortunadamente, las aguas subterráneas presentan mínimas diferencias de temperatura a lo largo del año en un mismo acuífero.

Por lo tanto, aunque K depende tanto del medio como del fluido, como la referida al fluido normalmente suele ser despreciable, para las aguas subterráneas a efectos prácticos se asume que la K de Darcy, o conductividad hidráulica es una característica del medio poroso.

- 2) En algunas circunstancias, la relación entre el caudal y el gradiente hidráulico no es lineal. Esto puede suceder cuando el valor de K es muy bajo, o cuando las velocidades del flujo son muy altas.

En el primero de los casos si se calcula el flujo a través de una formación arcillosa, el caudal que se obtiene aplicando la Ley de Darcy es muy bajo, aunque en la práctica sino se aplica un gradiente elevado, el agua no llegaría a circular, siendo el caudal igual a cero.

Para el segundo de los casos, si el agua circula a gran velocidad, el caudal es directamente proporcional a la sección y al gradiente, pero no linealmente proporcional, sino que la función sería potencial:

$$q = -K \left(\frac{dh}{dl} \right)^n \quad (10)$$

donde el exponente n es diferente a uno.

En el flujo subterráneo las velocidades son muy lentas y prácticamente siempre con relación lineal, salvo en las proximidades de captaciones bombeando en ciertas condiciones, (Domenico, 1990:34 – 36).

CAPÍTULO III. GESTIÓN DEL AGUA EN MÉXICO

III.1. Gestión ambiental

Según Silvia Jaquenod citada en López (2006), la gestión integral es la conservación, protección y mejora del ambiente con el desarrollo sostenible, y para Raúl Brañes es “el conjunto de las actividades humanas que tienen por objeto el ordenamiento del ambiente”, (*ibid.*). Para este autor los componentes principales de la gestión son: a) *la política ambiental*; b) *derecho ambiental*; c) *la administración ambiental*; por lo que la formulación de la política y la legislación ambiental es una actividad que forma parte de la gestión ambiental de tal suerte que el conjunto de actividades humanas a que hace referencia Raúl Brañes requieren de un conjunto de actos normativos y materiales que buscan una ordenación del ambiente, implicando esto un proceso que comprende desde la formulación de la política ambiental hasta la realización de acciones materiales que tienen este propósito. Para la formulación de la política ambiental se requiere entender los órganos facultados para la generación de la norma así como para su aplicación. En este trabajo de tesis una vez cuantificado el impacto en los volúmenes de agua por el revestimiento del CTA, se esbozará el marco normativo necesario para la gestión de los recursos hídricos en relación con la política ambiental. Cuantificación del volumen de agua que tendrá el revestimiento del CTA permitirá contextualizar su importancia en el ámbito estatal y federal trazándose en este trabajo la ruta de los actores institucionales nacionales que habrán de participar en la toma de decisiones para minimizar o en su defecto evitar la disminución en los volúmenes de agua en el Valle de Mexicali. Disminución que tendrá múltiples externalidades negativas en el ámbito económico y ambiental, cuyo análisis escapa del objetivo de éste trabajo.

III.2. Competencias en la formulación de la política ambiental

Los métodos más importantes para la formulación de la política ambiental son la vía legislativa y la administrativa. La primera es la más importante para la formulación de la política ambiental ya que las disposiciones legales tienen un carácter coercitivo para las autoridades y los particulares de cara a la protección ambiental, dotando así a las autoridades y a los particulares de las facultades e instrumentos para llevar a cabo actos de gestión ambiental.

Respecto a la actividad legislativa la fracción XXIX–G del artículo 73 establece facultades al Congreso “para expedir leyes que establezcan la concurrencia del gobierno federal, de los gobiernos de los estados y de los municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico”. Lo anterior implica que el congreso tiene la facultad para establecer los mecanismos de coordinación entre los tres órdenes de gobierno para lograr una gestión ambiental integrada.

La formulación de políticas ambientales por la vía administrativa son las que tiene el Ejecutivo por mandato constitucional y que desarrolla mediante la planeación a través de la administración pública federal, ya centralizada, ya paraestatal. Por su especialidad dicha formulación recae principalmente en la SEMARNAT, así se estipula en la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal.

III.3. Principios rectores de la protección ambiental

Los siguientes principios se derivan en el derecho ambiental internacional, a saber:

a) Principios de prevención, reducción y control de daños ambientales. Este principio obliga a los Estados a no permitir el uso de su territorio en actividades que perjudiquen el medio ambiente de otros países. Este se deriva del Principio 21 de la Declaración de Estocolmo, 1972, y conlleva a la responsabilidad de reparar los daños ocasionados y el deber de prevención de daños futuros, así como perjuicios al Estado afectado.

b) Principios de cooperación internacional. Es la obligación de los Estados de dar aviso previo y anticipado a los países que estén en riesgo de sufrir daños ambientales por la realización de actividades en su territorio. Éste proviene del principio 24 de la Declaración de Estocolmo.

c) Principios de comunicación y consulta. Éste proviene del principio 19 de la Declaración de Río, en la cual los Estados se obligan a advertirse recíprocamente acerca de cualquier hecho que pueda causar daño al medio ambiente, fuera del límite de los territorios

en el que ejercen soberanía. López (2006), señala que Bassols dice que si un Estado realiza una obra que le va a traer beneficios ésta no se vea impedido por la postura intransigente del Estado afectado, buscándose una solución de forma que, si bien no se pueden evitar las consecuencias de la actividad por lo menos se minimicen sus efectos, o bien, generar acuerdos para repartirse los beneficios de forma que se compense el daño causado.

d) Principio “quien contamina paga”. Este se concibió en el seno de la OCDE en 1994, de tal forma que asigna costos económicos a quien genera cualquier actividad que produzca impactos ambientales. Mediante este principio se busca que los bienes y servicios causen contaminación consideren en sus precios el costo de las medidas de prevención y control.

e) Principios de responsabilidad común pero diferenciada. En este principio se asume que todos contaminan pero, unos más que otros, ya que los que están en vías de desarrollo lo hacen menos que los desarrollados.

f) Principios de precaución o de cautela. Cuando hay peligro de daño grave o irreversible, la falta de certeza científica absoluta no es razón para postergar la adopción de medidas eficaces que impidan la degradación del medio ambiente.

III.4. Visión histórica de la política hídrica en México

Después de la revolución la gestión del agua estuvo marcada por la construcción de grandes obras de infraestructura y el establecimiento de una administración orientada sobre todo hacia la utilización agrícola del recurso; esto gracias a la creación de la *Comisión Nacional de Irrigación* (1926) y la posterior *Secretaría de Recursos Hidráulicos* (1946). El desarrollo legislativo fue notable en ese período, debido a la expedición de la *Ley sobre Irrigación con Aguas Federales* en 1926 y, en 1928, la primera *Ley de Aguas de Propiedad Nacional*. En 1934 se expidió una segunda *Ley de Aguas de Propiedad Nacional*, que se reglamentó en 1936 y que se mantuvo en vigencia hasta 1972. De gran relevancia ambiental fueron: la *Ley de Conservación del Suelo y Agua* (1946), la *Ley de Riegos* (1946) y la *Ley Federal de Ingeniería Sanitaria* (1947). En 1956 se expidió la *Ley Reglamentaria del Párrafo Quinto del*

Artículo 27 Constitucional en materia de Aguas del Subsuelo, (La Gestión Ambiental en México, 2006).

Otros organismos gestores del agua fueron la Comisión Nacional del Plan Hidráulico (1976) y la Comisión Nacional del Agua (1989), pertenecientes a la Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos (SARH); el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (1986), mismo que con la Comisión Nacional del Agua (1989) formaron parte de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) en 1994. Estos dos organismos desde el 2000 forman parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

III.5. Naturaleza Jurídica del Agua

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos es la norma fundamental del ordenamiento jurídico mexicano. Ésta es la norma suprema elaborada por el poder constituyente originario, quien creó los poderes constituidos en una constitución rígida y escrita. Los poderes públicos constituidos tienen funciones específicas y atribuciones limitadas por la Constitución de tal forma que, para entender la naturaleza jurídica del agua hay que reconocer a qué poder constituido le corresponde dicha materia, de esta forma el artículo 124 señala que lo que no esté expresamente señalado a las autoridades federales se tienen reservadas a los Estados, por lo que la naturaleza jurídica del agua corresponde al Ejecutivo Federal quien para el cumplimiento de sus funciones constitucionales se apoya en la Administración Pública Federal, Centralizada y Paraestatal. En la primera se tiene a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales a través de su órgano desconcentrado denominado Comisión Nacional del Agua, la cual forma parte de ésta desde el año 2000 y tiene por objeto administrar y preservar las aguas nacionales (Fernández, 2006).

Entre las principales atribuciones de la CONAGUA, Fernández (2006) señala: 1) la de ejercer las facultades como autoridad en materia hidráulica en el ámbito de competencia federal (excepto las que ejerce directamente el Ejecutivo Federal), 2) elaborar, actualizar y vigilar el cumplimiento del Programa Hidráulico; 3) proponer los criterios y lineamientos para dar unidad y congruencia a las acciones del gobierno Federal en materia de Aguas

Nacionales, así como vigilar la coherencia entre los respectivos programas y la asignación de recursos para su ejecución; 4) promover el uso eficiente del agua y su conservación en todas las fases del ciclo hidrológico, e impulsar una cultura del agua que considere a este elemento como un recurso vital y escaso; 5) promover y, en su caso, organizar la investigación científica y el desarrollo tecnológico en materia de agua y la formación y capacitación de recursos humanos; 6) vigilar el cumplimiento y aplicación de la presente ley, interpretarla para efectos administrativos y aplicar las sanciones y ejercer los actos de autoridad en la materia que no estén reservados al Ejecutivo Federal.

La CONAGUA goza de autonomía técnica, administrativa (en el manejo de los recursos y bienes que se le destinen) y de gestión para el cabal cumplimiento de su objeto y de los objetivos y metas señalados en sus programas y presupuesto. Como se ha indicado los poderes federales tienen facultades explícitas conferidas por la Constitución. Por otra parte hay facultades implícitas las cuales el Poder Legislativo puede concederse así mismo o a cualquiera de los otros dos poderes federales como medio necesario para ejercer una facultad explícita, así lo expresa el artículo 73 fracción XXX al establecer que, el Congreso tiene facultad: *“para expedir todas las leyes que sean necesarias, a objeto de hacer efectivas las facultades anteriores y todas las otras concedidas por esta Constitución a los Poderes de la Unión”*. Para que pueda justificarse el otorgamiento de una facultad implícita al Poder Ejecutivo o por el Poder Legislativo se requiere: *a)* la existencia de una facultad explícita que por si sola no podría ejecutarse; *b)* la relación del medio necesario respecto al fin entre la facultad implícita y el ejercicio de la facultad explícita, de suerte que sin la primera no podría alcanzarse el ejercicio de la segunda; *c)* el reconocimiento por el Congreso de la Unión de la necesidad de la facultad implícita y su otorgamiento por éste.

Felipe Tena Ramírez (2006), según su doctrina explica en relación a los artículos 39 y 135 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, que el constituyente originario creó a el constituyente permanente (Congreso de la Unión y Legislaturas Locales) investido de plenitud y de soberanía para reformar o adicionar en cualquiera de sus partes la Constitución de manera que, por la vías de reformas o adiciones nada escapa de su competencia con tal de que subsista el régimen constitucional integrado por los principios de

la consciencia histórica del país y de la época, es decir, el constituyente permanente está acotado.

La Constitución faculta al poder público para proteger el medio ambiente y los recursos naturales; así como para preservar y restaurar el equilibrio ecológico a través del art. 27 constitucional, que en su primer y segundo párrafo establece lo siguiente:

“La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada”.

“Las expropiaciones sólo podrán hacerse por causa de utilidad pública y mediante indemnización”.

Estos párrafos señalan que la Nación detenta la propiedad original del agua y que en caso de asignarla a privados ésta puede volverla a su propiedad mediante la expropiación, de forma que el Estado dictará las medidas necesarias para restaurar y preservar el equilibrio ecológico haciendo el uso apropiado del agua y tierra (propiedad privada o pública).

III.6. Naturaleza internacional del agua

El aporte de aguas subterráneas del Canal Todo Americano, por estar éste en los EE.UU, y propiciar un gradiente hidráulico en dirección hacia México, genera un origen en otro país por lo que dichas aguas se comunican entre dos países soberanos² que tienen necesidades de disponer de dichos recursos, de tal forma que su uso las encuadra en una gestión binacional.

El artículo 133 de la Constitución determina como normas supremas a la Constitución, las leyes emanadas del Congreso de la Unión y los Tratados Internacionales. Respecto a la preeminencia de estas tres fuentes del derecho se tiene en primer término a la

² Entiéndase por soberanía la autodeterminación plena, nunca dirigida por determinantes jurídicos extrínsecos a la voluntad de dos estados que tienen soberanía.

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en segundo término a los tratados internacionales, y en tercer término a las leyes emanadas por el Congreso de la Unión, y posterior a estas tres, otras disposiciones.

La preeminencia de los tratados internacionales sobre leyes reglamentarias se aclara por Jurisprudencia de la Corte,³ por lo que para la gestión de las aguas subterráneas binacionales precisa la revisión de los convenios o tratados con los EE.UU. al ser revestido el CTA.

Respecto a los Tratados Internacionales, es facultad del Ejecutivo Federal el suscribirlos, ya que el titular del Ejecutivo Federal es Jefe de Estado y de Gobierno. Para que los Tratados Internacionales sean Derecho Positivo Mexicano requieren de la aprobación del Senado de la República. Por ello, las posibles afectaciones que produzca el revestimiento del CTA en la disminución de volúmenes de agua en la porción mexicana deberán ser gestionadas por el Ejecutivo Federal, ya que éste es la autoridad facultada para hacerlo por lo antes expuesto.

Para las acciones que emprenda el Ejecutivo, titular de la Administración Pública Federal, éste se apoya para tratar asuntos con otras naciones a través de la Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE), a cuyo cargo queda el manejo de las relaciones diplomáticas con las naciones extranjeras y relaciones consulares. La SRE tiene las atribuciones de conducir la política exterior interviniendo en toda clase de tratados, acuerdos y convenciones en que el país sea parte; así como en las cuestiones relacionadas con los límites territoriales del país y las aguas internacionales, he aquí su competencia. A su vez, la SRE, para el cabal despacho de sus funciones cuenta con organismos públicos federales desconcentrados y coordina otros descentralizados.

³ La tesis de jurisprudencia es la P. LXXVII correspondiente a la novena época, publicado en el semanario judicial de la federación y su gaceta, Tomo 10, noviembre de 1999: 46, citado en López señaló que los Tratados Internacionales se encuentran por encima de las leyes federales y en un segundo plano respecto a la Constitución Federal.

III.7. Derecho Internacional Ambiental

Dada la importancia legal de los tratados internacionales cabe señalar estos y los convenios internacionales suscritos y ratificados por los Estados ya que obligan a los países firmantes a lo convenido en los mismos. Su cumplimiento en materia ambiental se rige por la Convención de Viena sobre el derecho de los tratados, la cual establece las obligaciones internacionales. Hay que establecer la diferencia entre tratado y declaratoria. Los primeros tienen carácter vinculante y generan compromisos a los Estados que los firman. Respecto a las segundas, son meras formulas o expresiones de buena voluntad que manifiestan buenos deseos de los firmantes, integrando un derecho no vinculante. Los Estados tienen mucho cuidado en firmar tratados en materia ambiental, ya que pueden sufrir restricciones en su desarrollo económico, de ahí que ahonden las declaraciones; mas no así los tratados y convenios internacionales.

III. 7.1. Declaraciones en materia ambiental

Las declaraciones más importantes en materia ambiental son las de Estocolmo, Suecia (5 y 6 de junio de 1972); denominada *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano*, en la cual asistieron 113 Estados. En esta Conferencia se generaron 26 principios, los cuales no tienen carácter vinculante para los Estados que participaron en la Conferencia; sin embargo, han sido guías importantes en la legislación ambiental de muchos países, entre ellos México.

III.7.1.1. Conferencia de Estocolmo

Respecto a esta convención llama la atención los principios 21, 22 y 24 que según López (2006) marcan:

- Principio 21

“No afectarán al medio ambiente de otros Estados.⁴ De conformidad con la Carta de las naciones Unidas y con los principios del derecho internacional, los Estados tienen el derecho soberano de explotar sus propios recursos en aplicación de su propia política ambiental, y la

⁴ Para Francisco Porrúa, el Estado es una sociedad humana, asentada de manera permanente en el territorio que le corresponde, sujeta aun poder soberano que crea, define y aplica un orden jurídico que estructura la sociedad estatal para obtener el bien público temporal a sus componentes, (Porrúa, 2006:198).

obligación de asegurarse de que las actividades que se lleven a cabo dentro de su jurisdicción o bajo su control no perjudiquen al medio ambiente de otros Estados o de zonas situadas fuera de toda su jurisdicción nacional”.

- Principio 22

“La responsabilidad por daños ambientales a otros Estados. Los Estados deben cooperar para continuar desarrollando el derecho internacional en lo que se refiere a la responsabilidad y a la indemnización a las víctimas de la contaminación y otros daños ambientales que las actividades realizadas dentro de la jurisdicción o bajo el control de tales Estados causen a zonas situadas fuera de su jurisdicción”.

- Principio 24

“Cooperación ambiental entre países. Todos los países, grandes o pequeños, deben ocuparse con espíritu de cooperación y en pie de igualdad de las cuestiones internacionales relativas a la protección y mejoramiento del medio ambiente. Es indispensable cooperar mediante acuerdos multilaterales o bilaterales o por otros medios apropiados, para controlar, evitar, reducir y eliminar eficazmente los efectos perjudiciales que las actividades que se realicen en cualquier esfera puedan tener para el medio ambiente, teniendo en cuenta debidamente la soberanía y los intereses de todos los Estados”.

III.7.1.2. Cumbre de la Tierra

Del 3 al 14 de junio de 1992 en Río de Janeiro, Brasil con la participación de 176 Estados, entre ellos México se llevó a cabo la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y el Desarrollo también conocida como la “Cumbre de la Tierra”. En ella se consideraron como prioridades el tema de la protección ambiental,⁵ de tal forma que medio ambiente y desarrollo constituyan un binomio inseparable denominado “Desarrollo Sustentable”. En dicha Cumbre de formularon 27 principios sobre el ambiente y el desarrollo. De estos principios cabe señalar el 19 y 26 por su impacto en aspectos ambientales transfronterizos:

⁵ López, (2006), señala que en la LGEEPA (art 3ro, fracc. XXIV) se define la *protección* como el conjunto de políticas y medidas para mejorar el ambiente y mejorar su deterioro”.

- Principio 19

“Comunicación entre Estados sobre efectos ambientales transfronterizos adversos. Los Estados deberán proporcionar la información pertinente, y notificar previamente y en forma oportuna, a los Estados que posiblemente resulten afectados por actividades que puedan tener considerables efectos ambientales transfronterizos adversos, y deberán celebrar consultas con esos Estados en una fecha temprana y de buena fe”.

- Principio 26

“Resolución pacífica de conflictos ambientales entre países. Los Estados deberán resolver pacíficamente todas sus controversias sobre el medio ambiente por medios que corresponda con arreglo a la Carta de las Naciones Unidas”.

La *Convención sobre Cambio Climático* y la *Convención sobre la Biodiversidad Biológica* son documentos que se generaron en la *Cumbre de la Tierra* con carácter vinculante así como la *Agenda del Siglo XXI* con carácter no vinculante.

III.7.1.3. Cumbre de Johannesburgo

Del 26 de agosto al 4 de septiembre de 2002 se celebró en Johannesburgo, Sudáfrica, la Cumbre de las Naciones Unidas, en esta cumbre se reconoció que ha aumentado la pobreza en el mundo debido a que se ha incrementado las desigualdades entre individuos como entre naciones, también se reconoció que no ha habido avances respecto al desarrollo sostenible por lo que se realizó otra Declaración más sin carácter vinculante. En esta se establece como elemento actoral la divinidad humana que implica: acceso al agua limpia y saneamiento, energía, salud, seguridad alimentaria, diversidad biológica. También se reconoce la importancia de la tecnología, educación, capacitación y el empleo. En resumen en esta cumbre se busca generar planes de acción y radicar la pobreza y modificar las formas de consumo y producción no sostenidas así como la protección y gestión de los recursos naturales en el desarrollo económico y social.

III.7.2. Tratados internacionales

III.7.2.1. Tratado de Libre Comercio de América del Norte

El 17 de diciembre de 1992, México, EE.UU y Canadá firman el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN). En México entra en vigor el 1ro de enero de 1994.⁶

En materia de protección ambiental, el TLCAN establece lo siguiente: que los objetivos de libre comercio y la integración regional deben ser compatibles con la protección y conservación⁷ del medio ambiente; la promoción del desarrollo sustentable; el fortalecimiento de las actividades estatales relacionadas con la colaboración y aplicación de las leyes y reglamentos medio ambientales. Lo anterior indica que el TLCAN enmarca la compatibilidad en las políticas de libre comercio y la de protección del medio ambiente. Para lograr dichos objetivos el TLCAN regula seis instrumentos legales para que las partes pongan en práctica una política efectiva de protección ambiental, las cuales son:

- a) Solución en caso de concurrencia normativa entre el TLCAN y otras de carácter internacional en materia de protección del medio ambiente.
- b) Una clausula de escape que autoriza a las partes para que utilicen sus instrumentos y protejan así la vida y la salud humana, flora, fauna y en general el medio ambiente.
- c) Normas de protección contra el “dumping ecológico”.
- d) Jurisdicción obligatoria ante el panel del TLCAN en lo referente a la aplicación y cumplimiento de ciertas normas de protección ambiental.

⁶ Se publicó en el Diario Oficial de la Federación el 20 de diciembre de 1993.

⁷ Para Conservación, López establece que la Ley Ambiental del D. F. define a la Conservación en su art. 5 como: “el conjunto de políticas, planes, programas, normas y acciones de detección, rescate, saneamiento y recuperación, destinadas a asegurar que se mantengan las condiciones que hacen posible la evolución o el desarrollo de las especies y de los ecosistemas propios del Distrito Federal”, (López, 2006:38).

- e) Facultades de los paneles para hacerse de los medios necesarios para recabar información en aras de la preservación⁸ del medio ambiente.
- f) Normas sobre límites de emisiones de contaminantes de los automóviles producidos en la región de América del Norte.

III.7.2.2. Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte (ACAAN)

El 14 de septiembre de 1993, México firmó el ACAAN. Fue publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 21 de diciembre de 1993. Entre los objetivos del mencionado Acuerdo, son los siguientes: apoyar las metas y objetivos del TLCAN; promover políticas y prácticas para prevenir la contaminación⁹; incrementar la cooperación entre las partes encaminadas a conservar, proteger, y mejorar el medio ambiente.

⁸ López (2006), indica que en la LGEEPA fracc XXIV del art 3º, la Preservación jurídicamente, es definida como “el conjunto de políticas y medidas para mantener las condiciones que propicien la evolución y continuidad de los ecosistemas y hábitat naturales, así como conservar las poblaciones viables de especies en sus entornos naturales y los componentes de la biodiversidad fuera de sus hábitat naturales”.

⁹ De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS): “...el agua está contaminada cuando su composición o estado se encuentran alterados de tal modo que no reúne las condiciones para la utilización a la que se hubiera destinado en su estado original”.

CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para alcanzar los objetivos propuestos consistió fundamentalmente en lo siguiente:

1. Búsqueda y recopilación de la información.
La información geohidrológica se obtuvo para definir los parámetros que requiere el modelo numérico por diferencias finitas. La información se compone de una base de datos de altura del nivel freático que comprende datos desde 1957 a 2006 debidamente georeferenciados proporcionados por la CONAGUA, reportes técnicos, artículos científicos y tesis.
2. Selección de códigos numéricos para el estudio de las variaciones del nivel freático.
3. Búsqueda de procedimientos de cálculo de la altura del domo que se forma por la infiltración de un cuerpo de agua superficial.
4. Determinación de la recarga y su equivalente en elevación del nivel freático en la zona de estudio.
5. Identificación de actores en la gestión del agua en el área de estudio incluyendo entrevistas a un productor y a funcionarios públicos (CILA, CEA, CONAGUA, Jefe de Distrito de riego 014).
6. Elaboración de recomendaciones para la gestión del agua del Valle de Mexicali.
Respecto a esta se revisó la política hidráulica en el Valle de Mexicali, esbozando el impacto volumétrico, y de fluctuación del nivel freático en un contexto del desarrollo sustentable.

IV.1. Métodos y técnicas utilizados

IV.1.1. Modelo numérico por diferencias finitas.

Es el procedimiento que nos permite simular el comportamiento de un acuífero. Existen diferentes formas de hacerlo: analítica, matemática, analógica y numérica. Mediante el

modelo se intenta representar el comportamiento real de un acuífero, para ello intervienen diversos parámetros, a saber: tipo de acuífero, ya libre, ya confinado o semipermeable; geometría del acuífero, es decir, la profundidad del basamento considerando un *datum* de referencia, barreras laterales, entre otros; las propiedades físicas del medio, por ejemplo, transmisibilidad hidráulica, conductividad, coeficiente de almacenamiento; condiciones en los límites del acuífero, por ejemplo, de flujo nulo o constante, flujo variable y carga hidráulica constante; condiciones iniciales del sistema, es decir, a un tiempo $t = 0$ el comportamiento de la carga hidráulica o nivel piezométrico; las acciones de intercambio con el acuífero, por ejemplo, inyecciones, bombeos, pérdidas por evapotranspiración, recarga por infiltración de riegos, recarga artificial, flujo lateral debido al gradiente hidráulico regional o local, etc. Además de los elementos anteriores se requiere conocer las leyes que rigen el movimiento, en particular la Ley de Darcy y el Teorema de la Continuidad.

La ecuación diferencial parcial que describe el movimiento del agua en un acuífero artesano (Prickett, 1971) es:

$$\frac{\partial}{\partial x} (T \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T \frac{\partial h}{\partial y}) = S \frac{\partial h}{\partial t} + Q \quad (11)$$

donde:

T = transmisibilidad hidráulica $[L^2/T]$

h = altura piezométrica $[L]$

t = tiempo $[T]$

S = coeficiente de almacenamiento del acuífero

Q = extracción neta de agua subterránea por unidad de área $[L^3/T]$

x, y = coordenadas rectangulares

Esta no tiene solución analítica, por lo que una de las formas de resolverla es mediante el método de las diferencias finitas a través del código numérico descrito en la figura 63 de

Prickett (1971). El código numérico considera condiciones de acuífero libre a partir de la solución de la ecuación diferencial parcial de flujo no estacionario, bidimensional en un acuífero artesiano no homogéneo e isotrópico. Para considerar la condición de acuífero libre a partir de la solución de acuífero artesiano, Prickett considera que al drenarse el acuífero artesiano debido al bombeo, éste adquiere condición de libre, ya que la transmisibilidad hidráulica cambia conforme se abate el acuífero. La introducción de ésta condición de transmisibilidad cambiante en la solución de acuífero confinado permite su aplicación en el caso de un acuífero libre.

El código de Prickett se conoce en el mercado con el nombre del programa PLASM. Otros códigos utilizados en el mercado de amplia difusión que utilizan características del modelo de Prickett son el MODFLOW (Anderson, 1992:21), el cual se ha desarrollado para esquemas tridimensionales utilizando la base numérica del método implícito de las direcciones alternadas desarrollado por Prickett. Versiones de éste incluyen el proceso numérico de sobre-relajación sucesivo. No existen evidencias contundentes que muestren superioridad de éste método numérico sobre el implícito de direcciones alternadas.

La aproximación por diferencias finitas considera un desarrollo en series de Taylor de las derivadas parciales. Dicho desarrollo se trunca en los términos lineales bajo el supuesto de que términos de orden superior contribuyen poco en el valor de las derivadas, por lo que; la solución depende en gran medida del tamaño de la discretización, tanto en el espacio como en el tiempo.

La aplicación práctica del método de las diferencias finitas consiste en discretizar el área acuífera, para el caso bidimensional en celdas rectangulares de dimensiones Δx , Δy , y para el caso del tiempo en intervalos Δt . En cada celda se determinan parámetros (por ejemplo: T, S, H, Z, Q, etc.) promedio del acuífero.

El código numérico consiste en resolver sistemas de ecuaciones lineales en las cuales la variable h (altura del nivel freático) a determinar se expresa en forma implícita, por lo que; para obtener su valor se utiliza un método iterativo partiendo de un supuesto valor de h y

mediante iteraciones sucesivas se va mejorando la misma hasta que los errores sean considerados admisibles por el modelador (Servicio Geológico, 1972).

IV.1.2. Elevación máxima de un domo subterráneo

La presencia de un cuerpo de agua superficial, por ejemplo; un lago, laguna o canal debido a la infiltración, originan una elevación en el nivel freático. La determinación analítica de dicha elevación fue hecha por Hantush (1967a, b) y aplicada por Finnemore, (1993, 1995). Teóricamente para calcular la altura máxima del domo subterráneo que se forma bajo la zona de infiltración, por ejemplo el Canal Todo Americano se requiere resolver la ecuación de flujo:

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} + \left(\frac{2I}{K}\right)f(x, y) = \left(\frac{1}{v}\right)\frac{\partial Z}{\partial t} \quad (12)$$

En un acuífero homogéneo, isotrópico que descansa sobre una base horizontal impermeable, sujeto a la condición inicial se tiene que

$$Z(x, y, 0) = 0 \quad (13)$$

ésto significa que en un tiempo $t = 0$ no hay infiltración, y por lo tanto, la altura del nivel freático en cualquier punto del acuífero es la misma.

Las condiciones de frontera indican que cuando $x = y = 0$, es decir; el origen, el cual coincide con el centro de un rectángulo de longitud $2L$ y anchura $2W$ que contiene agua y es la causa de la infiltración se cumple:

$$\partial Z(0, y, t)/\partial x = \partial Z(x, 0, t)/\partial y = 0 \quad (14)$$

Otra condición de contorno es que en el infinito la h tiende a cero y no presenta cambios

$$\partial Z(\infty, y, t) / \partial x = \partial Z(x, \infty, t) / \partial y = 0 \quad (15)$$

en el cual,

$$Z = h^2 - h_i^2 \quad v = K \bar{h} / S_y$$

$$f(x, y) = f_1(y) \quad 0 < x < l$$

$$= 0 \quad x > l$$

con

$$f_1(y) = 1 \quad 0 < y < a$$

$$= 0 \quad y > a$$

donde $h(x, y, t)$ es la altura del nivel freático a partir de la base del acuífero; K y S_y son, respectivamente, la conductividad hidráulica y la permeabilidad efectiva del acuífero; I denota la constante de la percolación (infiltración); h_0 es la altura del nivel del agua sin percolación.

La solución de la ecuación de flujo considerando un sistema de coordenadas ($x = y = 0$), que coincide con el centro del canal, representado éste por un rectángulo de largo $2L$ y ancho $2W$. La solución en el origen es dada por Hantush, (1967a) y se expresa como

$$h_m^2 - h_0^2 = \frac{2It\bar{h}}{S_y} S^*(\alpha, \beta) \quad (16)$$

donde:

$$\bar{h} = 0.5(h_0 + h_m)$$

$$\alpha = \frac{L}{4} \left(\frac{S_y}{Kht} \right)^{1/2}$$

$$\beta = \frac{W}{L} \alpha$$

t, es el tiempo desde el inicio de la percolación, h_m es la altura máxima del domo subterráneo, es decir en su ápice; h_0 es la altura del nivel freático sin existir percolación. La función S^* viene dada por:

$$S^*(\alpha, \beta) = (1 + 2\beta^2) \operatorname{erf}(\alpha) \operatorname{erf}(\beta) + (4/\pi)\alpha\beta E(\alpha^2 + \beta^2) + (2/\sqrt{\pi})[\alpha e^{-\alpha^2} \operatorname{erf}(\beta) + \beta e^{-\beta^2} \operatorname{erf}(\alpha)] - 2[\beta^2 + (\alpha^2 - \beta^2)M^2(\beta/\alpha, \alpha^2)] \quad (17)$$

Donde $\operatorname{erf}(a)$ es la función error (Carslaw, 1947); E , es la función de pozo (Villanueva, 1984); y M^* es una función integral definida y tabulada por Hantush, (1967b). Las funciones anteriores se definen por:

$$M^*(\alpha, \beta) = \frac{2}{\pi} \int_0^\alpha e^{-\beta(1+u^2)} \frac{du}{1+u^2}$$

$$\operatorname{erf}x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du$$

$$E(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$$

Para encontrar la altura en el ápice del montículo es necesario resolver la ecuación (16). Obsérvese que h_m aparece en ambos miembros de la ecuación, es decir, se expresa en forma implícita. Para resolverla Finnemore (1995), utiliza el método numérico de Newton-Raphson (Hornbeck, 1975) para así encontrar la raíz en la variable z_m en términos de incrementos de ésta (Δz_m). Esto a través de iteraciones, terminando el proceso cuando los incrementos son menores a un error predeterminado, en el caso que nos ocupa fue de 1×10^{-6} . La relación entre h_m y z_m es

$$h_m = h_0 + z_m$$

Los incrementos en z_m son dados por la expresión

$$\Delta z_m = \frac{z_m - \left[\frac{ItS^*}{S_y} \right]}{1 - \left[\frac{(ItG)}{S_y \bar{h}} \right]}$$

donde $G = 0.5 \operatorname{erf}(\alpha) \operatorname{erf}(\beta) - 0.5S^*$

Para resolver la ecuación anterior, los términos de S^* se calcularon numéricamente mediante un *código fortran* en doble precisión, de tal forma que la función error se calculó mediante un desarrollo en series de potencias con un error de precisión $\leq 1.5 \times 10^{-7}$ (ecuación 7.1.26 de Gradshteyn, 1980:299), elaborándose una subrutina para dicho cálculo. Las funciones del pozo E y M^* se calcularon numéricamente mediante un método numérico de integración por cuadratura.

Para el cálculo de la altura máxima (h_m) del montículo en función del tiempo se necesita conocer lo siguiente: L , W , h_0 , k , I , z_0 . Esta última es la altura inicial para el proceso iterativo.

IV.1.3. Estimación de la recarga.

La recarga de agua al acuífero es el ingreso de agua a la zona saturada. Un método para su determinación es a través de las fluctuaciones del nivel freático descrito por Healy (2002). Este método se fundamenta en que el ascenso del nivel freático en un acuífero libre se debe a la recarga del acuífero. Esta se determina mediante la relación

$$R = S_y \frac{dh}{dt} \approx S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (18)$$

Donde S_y es la permeabilidad efectiva; h es la altura del nivel freático y t es el tiempo. La ecuación anterior indica que la razón de cambio del nivel freático multiplicado por el coeficiente de almacenamiento específico es la recarga por unidad de área para un intervalo de tiempo Δt .

IV.2. Descripción de actores en el problema de estudio

En este estudio, en materia de conservación ambiental del recurso hídrico, se plantea identificar los actores nacionales facultados por la legislación mexicana para la defensa del agua nacional.

Al continuar con la búsqueda de información, se generó una matriz de los actores participantes en este problema en la cual se consideró como variables a conocer: *a)* el nombre del actor, *b)* sus objetivos e interés, *c)* el instrumento regulador del recurso hídrico que utiliza, y *d)* su interrelación con otros actores.

Para conocer la perspectiva de varios actores se realizarán entrevistas que permitan identificar aspectos correlacionados con la conservación del agua en la zona de estudio. Las entrevistas se enmarcan en el uso de términos cualitativos de la metodología de la investigación, para lo cual, haciendo uso del método deductivo, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Preparación de la entrevista
2. Concertación de la cita
3. Información sobre la persona a entrevistar
4. Preparación del cuestionario básico
5. Inicio de la entrevista
6. Desarrollo de la misma
7. Conclusión

El cuestionario básico incluirá preguntas tales como: *¿considera que el revestimiento del Canal Todo Americano es un problema?, ¿a quién le compete defender esa agua que se presume se dejará de infiltrar?, ¿de qué manera se vería usted afectado por el revestimiento de este canal?, ¿qué se requiere para dar solución al problema?, ¿cómo contribuiría a esta solución?*

Una vez desarrolladas las entrevistas se analizarán para recopilar los datos sobresalientes e interrelacionarlos con la información de cada actor entrevistado.

Tabla IV.1. Descripción de actores

	ACTORES	Objetivos e intereses	Instrumento regulador del recurso hídrico	Interrelación con otros actores
INSTANCIAS DE GOBIERNO	Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE)	<p>Ampliar y profundizar las relaciones políticas, económicas, culturales y de cooperación con las distintas regiones del mundo a favor del desarrollo integral de todos los mexicanos.</p> <p>Preservar y fortalecer la soberanía e independencia de México y garantizar los intereses y la seguridad nacional con base en los principios constitucionales de política exterior.</p> <p>Asegurar la coordinación de las acciones y programas en el exterior de los tres niveles de gobierno y los distintos poderes que incidan en las relaciones de México con otros países. Vigorizar la expresión de la identidad cultural y la imagen de México".</p>	<p>La SRE regula el aprovechamiento directo de las aguas internacionales a través de la CILA que es un Organismo internacional integrado por una Sección mexicana y una Sección estadounidense, cada una de las cuales está dirigida por un Comisionado ingeniero designado por el Presidente de su respectivo país. Las oficinas centrales de la Sección mexicana se encuentran localizadas en Cd. Juárez, Chihuahua y las de la Sección estadounidense en El Paso, Texas, siendo esta área el punto medio de la frontera México/Estados Unidos, y la separación geográfica de la línea divisoria fluvial y la línea divisoria terrestre.</p>	<p>SEMARNAT</p> <p>EPA</p> <p>Departamento del Interior de los Estados Unidos (DOI)</p> <p>COCEF</p> <p>BANDAN</p> <p>CILA</p> <p>CNA</p> <p>SCT</p> <p>CAPUFE</p> <p>Buró de Reclamación del Departamento del Interior de Estados Unidos (USBR)</p> <p>Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos</p>
	Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA)	<p>Vigilar el cumplimiento de los tratados internacionales en materia de límites y aguas.</p> <p>Asistir al gobierno mexicano en las negociaciones diplomáticas de acuerdos internacionales sobre la materia.</p>	<p>La Comisión Internacional de Límites y Aguas se rige a través de diversos Tratados y Convenciones que desde 1848 han celebrado los gobiernos de México y Estados Unidos en materia de límites y distribución de las aguas de ríos internacionales.*</p>	<p>SRE</p> <p>COCEF</p> <p>SEMARNAT</p> <p>CONAGUA</p> <p>EPA</p> <p>IBWC</p>

		<p>Operar y mantener la infraestructura construida bajo dichos acuerdos asegurando la integridad territorial y promoviendo la conservación del recurso hidráulico con la participación ciudadana en un marco de transparencia y trabajo en equipo.</p>	<p>La Sección de los Estados Unidos mantiene oficinas foráneas en San Isidro, California, Yuma y Nogales, Arizona, del Río (Amistad), Falcón y Mercedes en Texas. Además mantiene una oficina de enlace con el Departamento de Estado de Washington, D.C.</p>	<p>Departamento del Interior de los Estados Unidos (DOI)</p> <p>Centro de Estudios de Desiertos y Océanos (CEDO)</p> <p>Living Rivers</p> <p>Pacific Institute</p> <p>Environmental Defense</p> <p>Asociación Ecológica de Usuarios del Río Hardy y Colorado (AEURHYC)</p> <p>Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF)</p> <p>Defenders of Wildlife</p> <p>Sonoran Institute</p> <p>University of Arizona</p> <p>IMAC</p>
	<p>Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza</p> <p>(COCEF)</p>	<p>Preservar, proteger y mejorar la salud humana y el medio ambiente de la región fronteriza entre México-Estados Unidos, mediante el fortalecimiento de la cooperación entre las partes interesadas y el apoyo a proyectos sustentables a través de un proceso binacional transparente en estrecha coordinación con el Banco de Desarrollo de América del Norte, instancias federales, estatales y locales, el sector privado y la sociedad civil.</p> <p>La función principal de la COCEF es certificar proyectos para su posterior financiamiento por parte del BDAN o de</p>	<p>La COCEF cuenta con un Manual de Participación Pública para comunidades fronterizas y promotores de proyectos que constituye una guía completa y sistematizada que les permite organizar y realizar sus acciones de participación comunitaria. Asimismo, constituye una herramienta fundamental que ofrece técnicas y metodologías para asegurar una participación social profunda y comprometida. Con este manual, es posible</p>	<p>BANDAN</p> <p>EPA</p> <p>Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte</p> <p>SRE</p> <p>SEMARNAT</p> <p>CILA</p> <p>SEDESOL</p> <p>BANOBRAS</p> <p>US Department of State</p> <p>Intenational Boundary and Water Comission (IBWC)</p> <p>US Bureau of Reclamation</p>

		<p>otras instituciones financieras. La aportación principal de COCEF radica en el proceso mismo a través del cual se certifican esos proyectos. La función considera principalmente los aspectos técnicos y financieros de los proyectos: una tecnología probada, no contaminante y de bajo costo de operación y mantenimiento; una estructura financiera viable, con impactos tarifarios accesibles y una mezcla de recursos equilibrada. La aportación consiste, principalmente, en los aspectos sociales y ambientales: la validación social del proyecto a través de la participación, la consulta y la información transparente; la atención y protección del medio ambiente y la aplicación efectiva de los principios de sustentabilidad. Asimismo, la COCEF facilita de manera importante el cumplimiento del proyecto con los requisitos y las normas específicas de instancias binacionales, federales, estatales y locales</p>	<p>significa una región fronteriza de gran dinamismo, en la que la tendencia es fortalecer la participación comunitaria en aquellas decisiones que afectan a los habitantes de la región y a las generaciones futuras.</p>	<p>US Department of Agriculture</p> <p>Dirección General de Ecología de Baja California</p> <p>Comisión Estatal de Agua de Baja California</p> <p>State Water Resources Control Board</p> <p>California Environmental Protection Agency</p> <p>Comisión Estatal de Agua de Sonora</p> <p>Secretaría de Infraestructura Urbana y Ecología de Sonora</p> <p>Arizona Department of Environmental Quality</p> <p>Arizona Department of Water Resources</p> <p>Dirección de Ecología de Chihuahua</p> <p>Junta Central de Agua y Saneamiento de Chihuahua</p> <p>New Mexico Environment Quality Department</p> <p>Instituto Coahuilense de Ecología</p> <p>Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento de Coahuila</p> <p>Texas Commission on Environmental Quality</p>
--	--	---	--	--

				<p>Texas Water Development Board</p> <p>Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas de Nuevo León</p> <p>Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas</p> <p>Secretaría de Agua y Drenaje de Monterrey, Nuevo León</p> <p>Dirección General de Recurso Agua de Tamaulipas</p> <p>Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología de Tamaulipas</p>
--	--	--	--	--

	<p style="text-align: center;">Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)</p>	<p>Promover el desarrollo sustentable, así como conducir y evaluar la política ambiental y de recursos naturales, con la participación de la sociedad.</p> <p>Promover la recuperación, conservación y aprovechamiento sustentable de los recursos forestales y servicios ambientales.</p> <p>Conservar los ecosistemas más representativos del país y su biodiversidad, especialmente las especies sujetas a alguna categoría de protección, con la participación corresponsable de todos los sectores sociales.</p> <p>Detener y revertir la pérdida de capital natural así como la contaminación de los sistemas que sostienen la vida (agua, aire y suelos), con la participación corresponsable de la sociedad.</p> <p>Procurar y fomentar el cumplimiento de la legislación ambiental y de recursos naturales mediante instrumentos de inspección y vigilancia, promoción de la participación voluntaria y una justicia pronta y expedita.</p> <p>Administrar de forma eficaz y eficiente los recursos humanos, materiales, financieros e informáticos asignados a la Secretaría.</p> <p>Administrar y preservar las aguas nacionales con la participación de la sociedad para lograr el uso sustentable de este recurso.</p>	<p>CONAGUA</p> <p>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</p>	<p>DOI BANDAN EPA CONANP CONAGUA CONAFOR IMTA INE PROFEPA CONABIO CONAPESCA</p> <p>SAGARPA</p>
--	---	---	---	--

<p>Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)</p>	<p>Administrar y preservar las aguas nacionales, con la participación de la sociedad, para lograr el uso sustentable del recurso.</p>	<p>Los Organismos de Cuenca son las responsables de administrar y preservar las aguas nacionales en cada una de las trece regiones hidrológico-administrativas en que se ha dividido el país.</p>	<p>SEMARNAT SAGARPA FORO MUNDIAL DEL AGUA USDA COCEF CILA EPA ORGANISMOS DE CUENCAS PRODUCTORES SOCIEDAD</p>
<p>Comisión Estatal del Agua (CEA)</p>	<p>Fungir como coordinador de las actividades relacionadas directamente con los servicios de agua potable, alcantarillado sanitario y saneamiento; así como coordinador en la elaboración y ejecución de los proyectos y políticas del gobierno del estado en la materia.</p>	<p>Programa Estatal del Agua Participación de la sociedad Acuerdos de cooperación binacional</p>	<p>CONAGUA ORGANISMOS DE CUENCAS SEMARNAT SAGARPA CILA</p>
<p>Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM)</p>	<p>Proporcionar los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario en calidad y cantidad adecuadas al menor costo, fomentando el ahorro y cultura del agua como medio indispensable para la vida y el desarrollo de la comunidad, así como un atención eficiente con sentido humano mediante el trabajo honesto de los que formamos el organismo.</p>	<p>Legislación del estado de Baja California Programa estatal del agua</p>	<p>CONAGUA SEMARNAT SAGARPA Secretaría de Infraestructura y Desarrollo Urbano CEA CESPT CILA</p>
<p>Consejo de cuencas</p>	<p>Un Consejo de Cuenca es una Instancia de</p>	<p>Reuniones de Grupos</p>	<p>CONAGUA</p>

		coordinación y concertación entre representantes de los Gobiernos Federal, Estatal y Municipal, así como de los diversos usuarios, que tiene por objeto principal formular y ejecutar programas para mejorar la administración del agua, desarrollar la infraestructura hidráulica y sus servicios, y coadyuvar en la conservación y restauración integral de la cuenca del Valle de Mexicali.	Especializados Programas de manejo hidráulico	SEMARNAT SAGARPA CESPM Distrito de Riego 014
	Distrito de Riego 014	Instrumento legal para la administración local del aprovechamiento aguas superficiales y profundas en un municipio	Junta Municipal, Asociación de usuarios. Organización técnica de producción, Recorridos, entrevistas, uso de modelos de simulación, captura, análisis y procesamiento de la información existente	BANDAN CILA SEMARNAT CONAGUA CEA CONSEJO DE CUENCAS

USUARIOS	Módulos de riego	Aprobar el aprovechamiento y extracción del agua en la subdivisiones administrativas del municipio	Juntas de Módulo.	Distrito de Riego Consejos de Cuenca
	Productores	Hacer un uso racional y eficiente del recurso agua.	Decisiones personales basadas en el óptimo grupal.	Módulo de riego Distrito de riego Consejo de Cuenca CESPM CEA CONAGUA SEMARNAT SAGARPA

ACTORES INTERNACIONALES	<p>Environmental Protection Agency (EPA)</p>	<p>Dirigir las ciencias ambientales de la nación.</p> <p>Desarrollar y cumplir las regulaciones ambientales.</p> <p>Ofrecer ayuda financiera para el desarrollo de proyectos que hagan uso sustentable de los recursos naturales (agua).</p> <p>Realizar investigaciones ambientales.</p> <p>Auspiciar consorcios y programas voluntarios.</p> <p>Educación ambiental adicional.</p>	<p>Acta del Agua Limpia, y la transferencia de fondos autorizados para los proyectos y estudios de saneamiento fronterizo acordados</p>	<p>Departamento del Interior de los Estados Unidos (DOI)</p> <p>Agencia de EE.UU. para el Desarrollo Internacional</p> <p>Centro Nacional de Salud Ambiental</p> <p>USDA COCEF BANDAN SEMARNAT SAGARPA SRE CONAGUA COCEF CILA</p>
	<p>International Boundary and Water Commission (IBWC)</p>	<p>Proveer soluciones binacionales a problemas que surgen durante la aplicación de los tratados binacionales México-Estados Unidos, referentes a la demarcación nacional fronteriza, propiedad nacional de aguas, sanidad, calidad del agua y control de enfermedades en la región fronteriza.</p>	<p>Tratados fronterizos de aguas entre México y Estados Unidos</p>	<p>EPA DOI CENTRO NACIONAL DE SALUD AMBIENTAL USDA COCEF BANDAN CONAGUA CILA COCEF CEA State Water Resources Control Board. California. California Environmental Protection Agency</p>
	<p>Border Environment Cooperation Commission</p>			

	BECC (ver COCEF)			
	<p style="text-align: center;">Metropolitan Water District (MWD)</p>	<p>Proveer servicios de agua potable a las 26 ciudades y distritos de agua en el área de manera confiable y adecuada para satisfacer las necesidades presentes y futuras de la población de manera económicamente responsablemente.</p>	<p>Junta de directores de los distritos municipales de aguas</p> <p>Reuniones y agendas.</p>	<p>EPA COCEF CILA</p> <p>State Water Resources Control Board. California</p> <p>California Environmental Protection Agency</p> <p>26 concejos municipales</p>
	<p style="text-align: center;">Imperial Irrigation Distric (IID)</p>	<p>Satisfacer las necesidades básicas de los habitantes del Valle Imperial en materia de agua para uso agrícola, industrial y social</p>	<p>Decisiones conjuntas de la Sección de Manejo y Planeación de Recursos (RPM por sus siglas en inglés) y la Unidad de Monitoreo y Manejo de Irrigación.</p>	<p>EPA CILA</p> <p>State Water Resources Control Board. California</p> <p>California Environmental Protection Agency</p>

CAPÍTULO V. RESULTADOS

En este capítulo se exponen los resultados de los esquemas numéricos utilizados, así como la descripción de los actores asociados a la gestión ambiental del agua.

Para determinar la importancia volumétrica y en la fluctuación del nivel del CTA se obtuvieron resultados de lo siguiente:

- a) Modelo de flujo
- b) Cálculo de la formación del ápice del domo subterráneo
- c) Evolución de la recarga y de la altura promedio del nivel freático

Como se indicó en el apartado sobre metodología, el modelo de flujo tiene limitantes de origen, ya que depende de la discretización inherente a la aproximación por diferencias finitas. Esto motivó a buscar una solución al problema de la formación del domo evitando en lo posible dependencia numérica por la discretización y entender en forma aislada el proceso de formación del domo y, para ello se desarrolló a través de un código numérico el cálculo de la altura máxima del domo en función del tiempo prefijando los parámetros que caracterizan al CTA y al medio acuífero. De esta forma se busca entender cómo se forma el domo subterráneo y la sensibilidad de su formación a parámetros como I , K y S . Además de conocer cómo se forma el domo, cómo fluctúa el nivel freático del acuífero ante la presencia de pozos de bombeo en la zona considerando el CTA y sin considerarlo, se calculó la recarga histórica (1957 – 2006) mediante el procedimiento descrito por Healy (2002).

V.1. Modelo de flujo.

Para determinar las variaciones del nivel freático bajo los escenarios:

- a) Con la presencia del CTA y el Río Colorado
- b) Cuando no exista el CTA pero si el aporte del Río Colorado
- c) Sin el CTA y con influencia del Río Colorado como una frontera de flujo constante

Para ello se aplicó el código de Prickett (1971), discretizando el área acuífera, se determinaron los parámetros hidráulicos del modelo, y se impusieron las condiciones de contorno e iniciales.

A continuación se describen las partes antes indicadas:

V.1.1 Discretización.

Se delimitó el área acuífera considerando la frontera internacional con los Estados Unidos de tal forma que ésta describe un rectángulo de 34 km de longitud y 15 km de ancho. El límite norte coincide con California y Arizona, el límite este con Arizona, el oeste y sur con Baja California (Valle de Mexicali). El área se discretizó en mallas cuadradas de un kilómetro por lado.

Respecto a la discretización en el tiempo es no uniforme y se consideró el *predictor* establecido por Prickett (tabla 1, 1971:16) considerando un $\Delta t = 30$ días y 15 pasos de discretización de tal forma que el tiempo de cálculo máximo fue 2161.9 días.

V.1.2. Parámetros hidráulicos

V.1.2.1. Transmisibilidad, T y conductividad hidráulica, K

Se tomaron de la tesis de Penélope Díaz Cabreara (2001) que a su vez los obtuvo de datos proporcionados por la CONAGUA. La conductividad hidráulica se obtuvo de la figura 38 “*Conductividades del modelo*” de su tesis, la cual reporta un valor de 128 m/d.

V.1.2.2. Carga hidráulica

Los valores de carga hidráulica fueron proporcionados a la autora de éste trabajo por la CONAGUA, los cuales se proporcionaron en hojas Excel 2003 clasificadas por series desde el año 1957 hasta el 2006, en las cuales se indicaba el valor de la profundidad del nivel estático, la altura de brocal referida al nivel del mar y la fecha de la medición del nivel estático.

V.1.2.3. Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento se obtuvo de las tesis de Lauro Sánchez y Alejandro Velázquez Monter (1989), así como la de Penélope Díaz Cabrera (2001). Los valores reportados por ésta en la Tabla II fluctúan entre 0.10 y 0.20. En éste trabajo se considera el valor de 0.15.

V.1.2.4. Espesor del acuífero

Respecto a la profundidad del acuífero se utilizaron las columnas litológicas que describe Díaz, observándose que las columnas que corresponden al área de estudio no muestran la presencia del basamento hidrológico, lo cual considerando las profundidades de los pozos bien se puede decir que el espesor supera los 150 m. En el anexo 1 se muestran los datos de la columna litológica de los pozos que se localizan en el área de estudio, observándose que predominan los materiales gruesos (arenas, limos, y gravas).

V.1.2.5. Gastos de extracción, Q

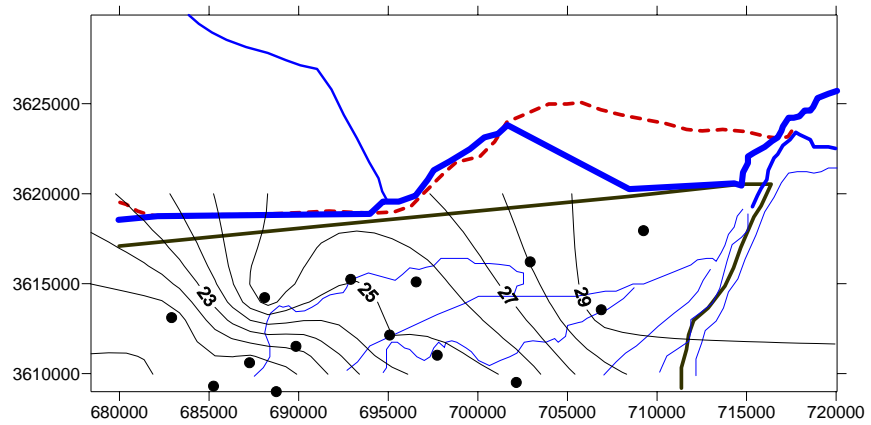
Los gastos de extracción que se ubican en la zona de estudio se determinan a través de los registros que proporciona la Comisión Nacional del Agua citados en Díaz Cabrera (2001) en la Tabla XVIII.

V.1.2.6. Series piezométricas

Se cuenta con las siguientes series: 1957, 1979, 1980 – 1982, 1984 – 1994, 1998 – 2006. Cada serie se compone por un número variable (entre 27 y 6) de valores de altura de nivel freático.

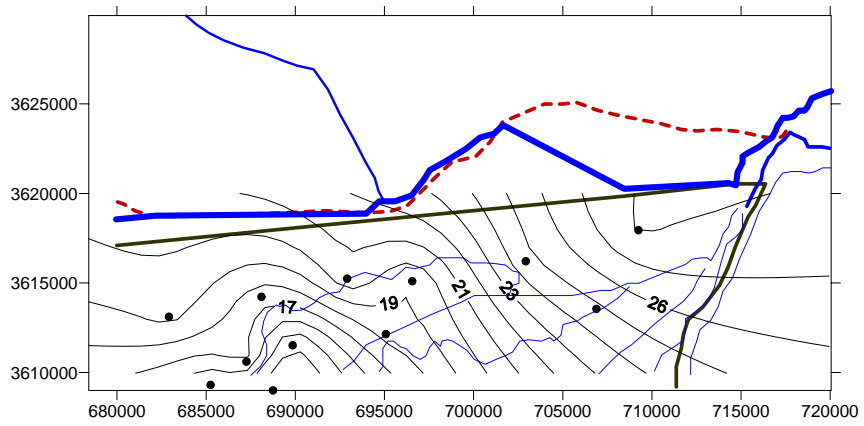
Las figuras de la V.1. a la V.26. (piezometrías) muestran la altura del nivel freático y la ubicación de los pozos de bombeo. En las series de 1957 a 1994 se observa la dirección de un gradiente hidráulico en dirección noreste – suroeste. En la serie 1995 se aprecia un notable cono de abatimiento a la altura del CTA donde hace la forma triangular. Para las series 1998 a la 2006, el gradiente vuelve a distinguirse por su dirección noreste – suroeste, llamando la atención la serie 2001 la cual presenta un cono de abatimiento.

Fig. V.1. Piezometría de 1957



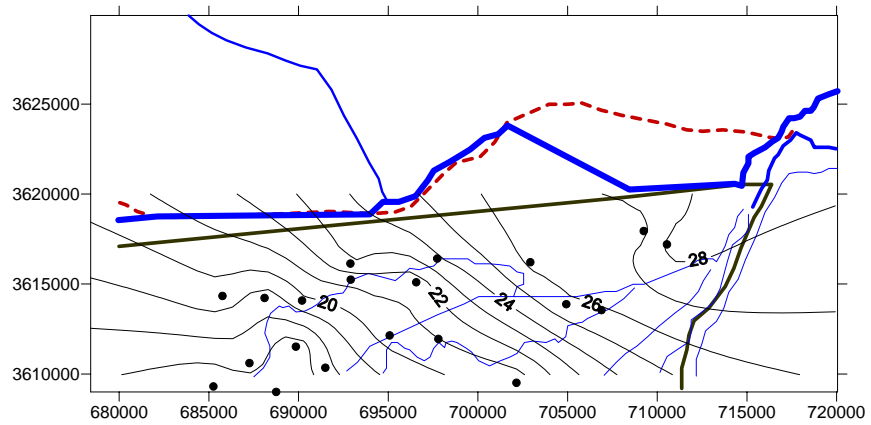
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Fig. v.2. Piezometría de 1979



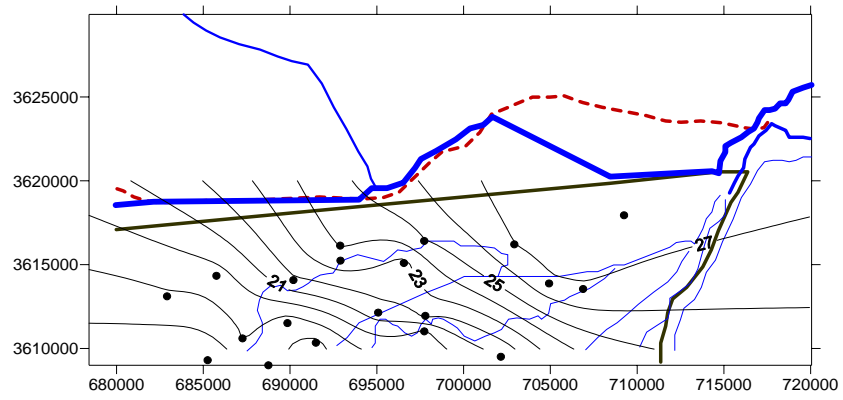
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Fig. V.3. Piezometría de 1980



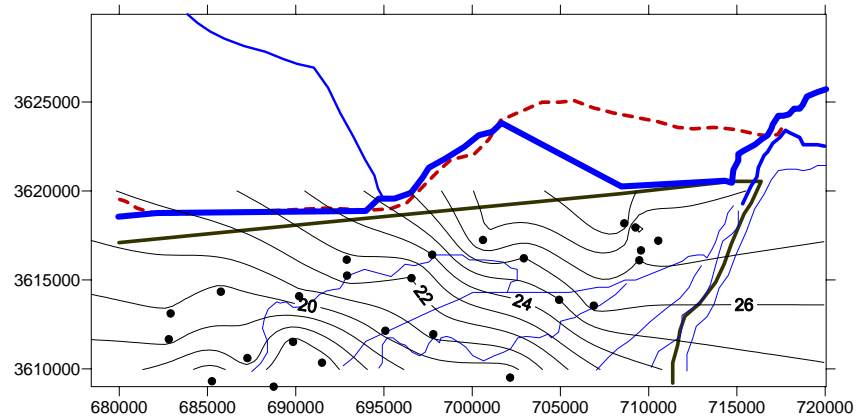
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Fig. V.4. Piezometría de 1981



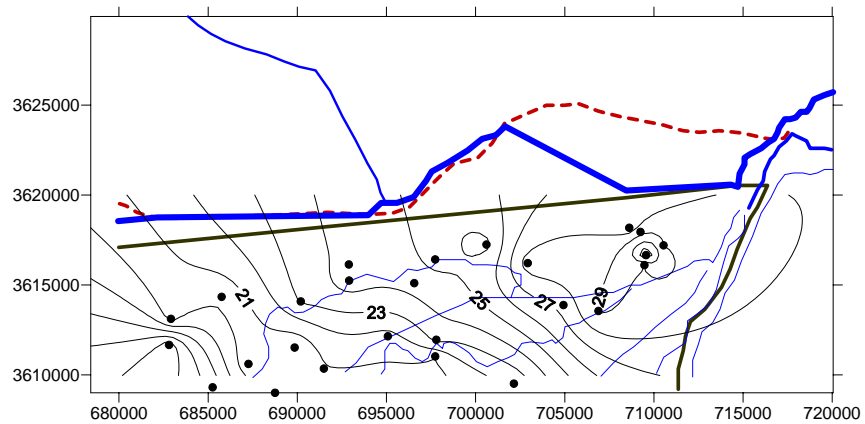
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la COAGUA.

Fig. V.5. Piezometría de 1982



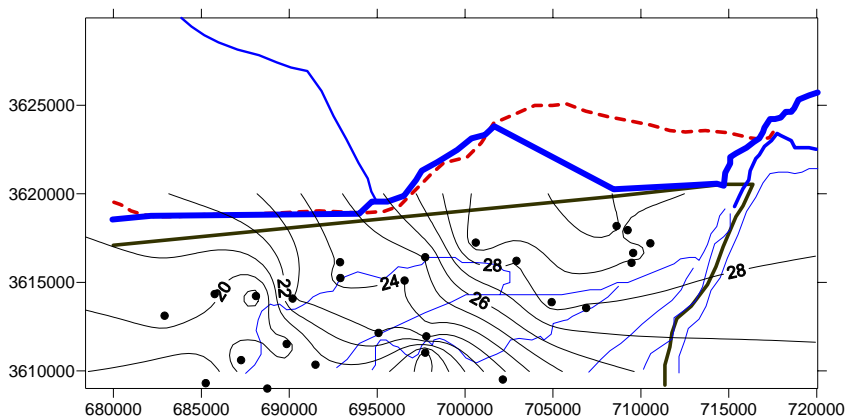
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Fig. V.6. Piezometría de 1984



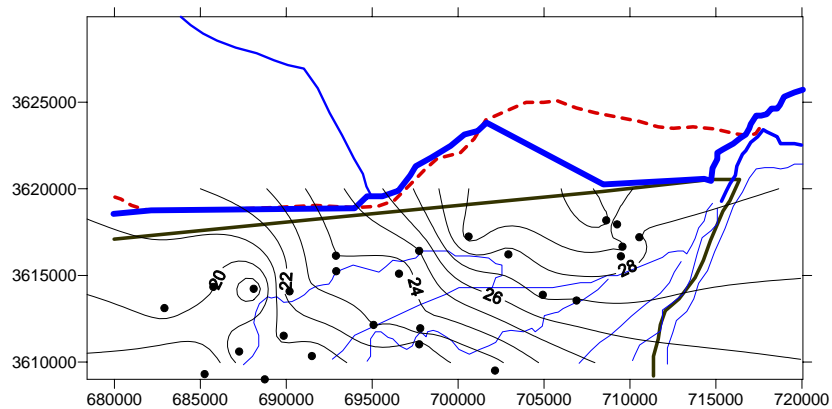
Fuente: Elaboración propia. a partir de datos de la CONAGUA

Fig. V.7. Piezometría de 1985



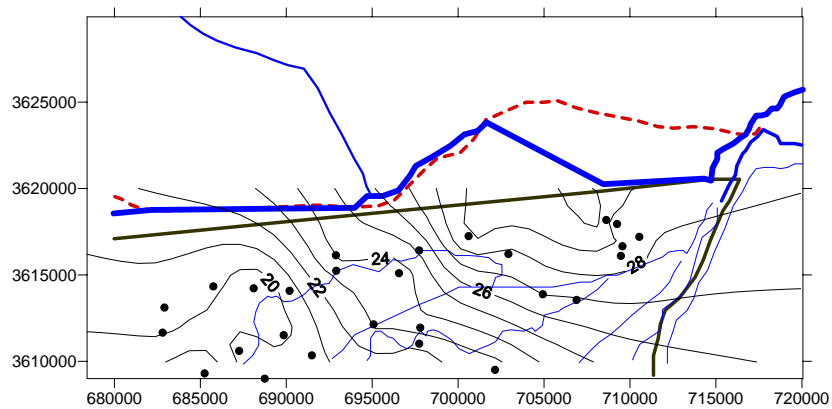
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Fig. V.8. Piezometría de 1986



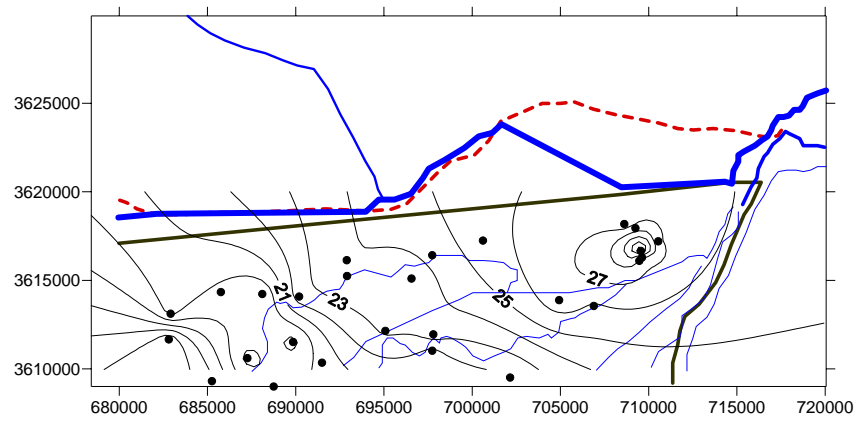
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Fig. V.9. Piezometría de 1987



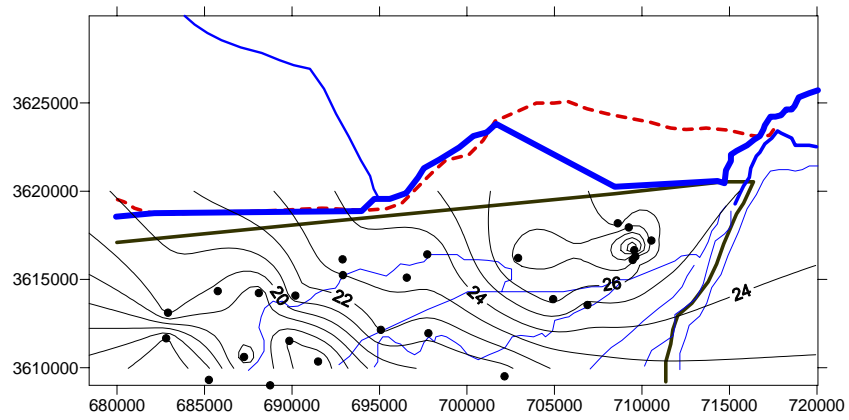
Fuente: Elaboración propia. a partir de datos de la CONAGUA

Fig. V.10. Piezometría de 1988



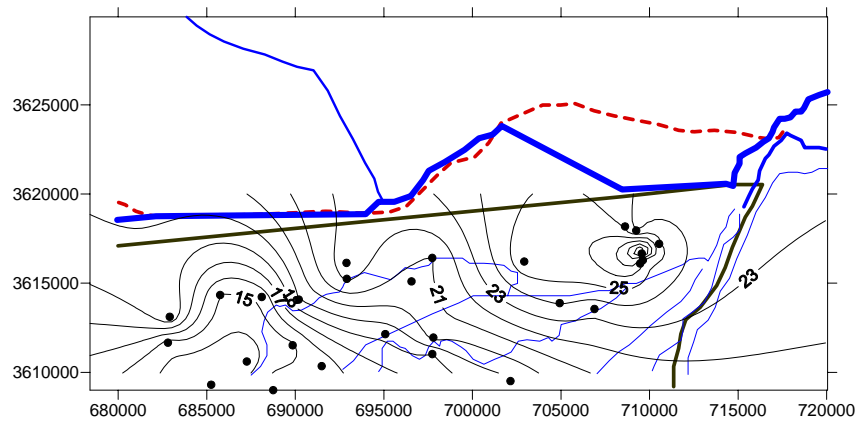
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Fig. V.11. Piezometría de 1989



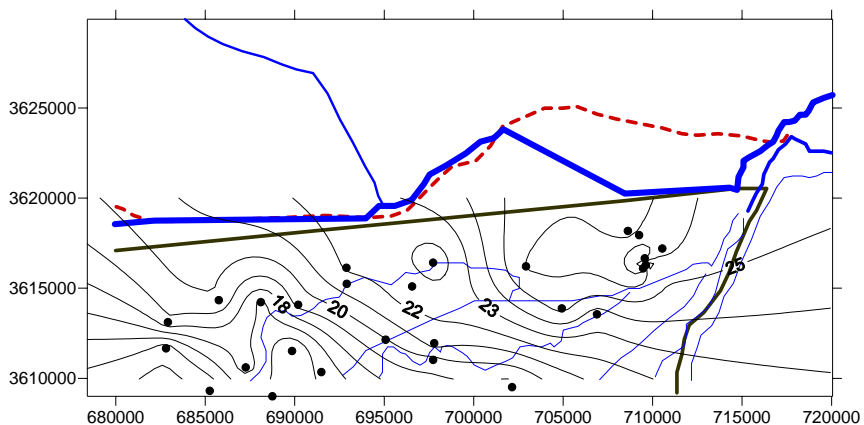
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Fig. V.12. Piezometría de 1990



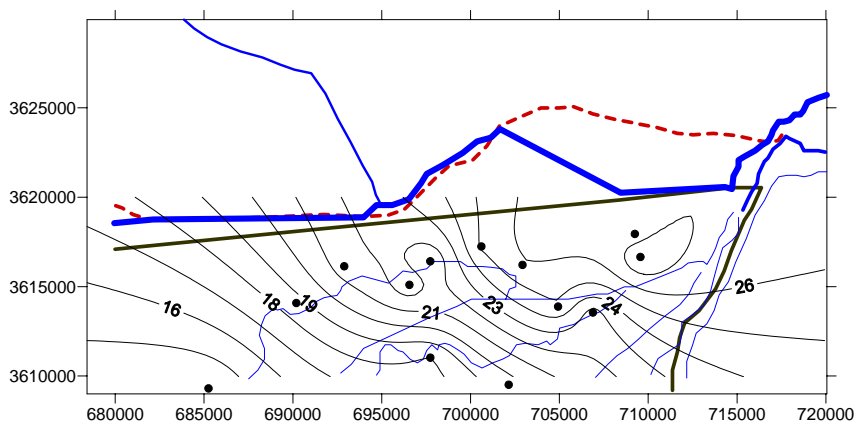
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Fig. V.13. Piezometría de 1991



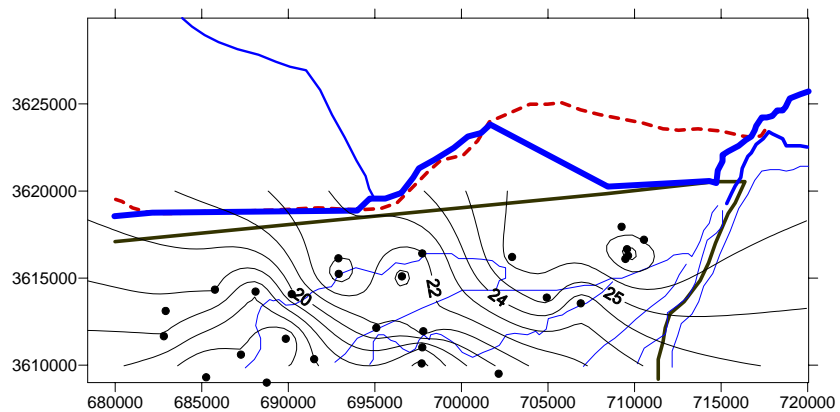
Fuente: Elaboración propia. a partir de datos de la CONAGUA

Fig. V.14. Piezometría de 1992



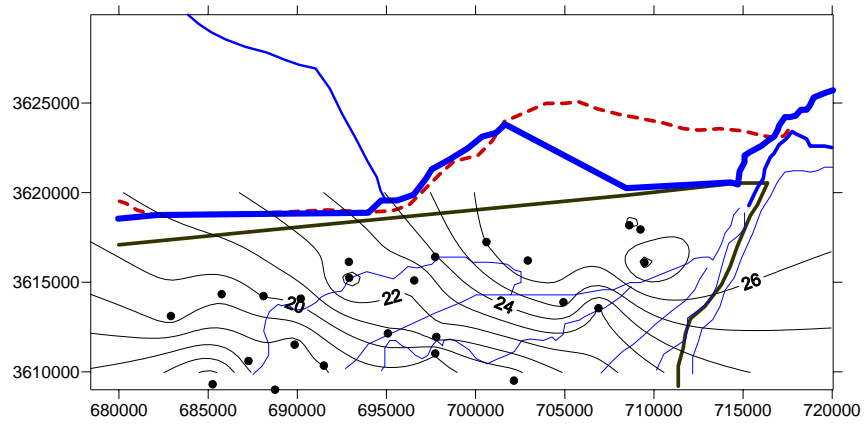
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Fig. V.15. Piezometría de 1993



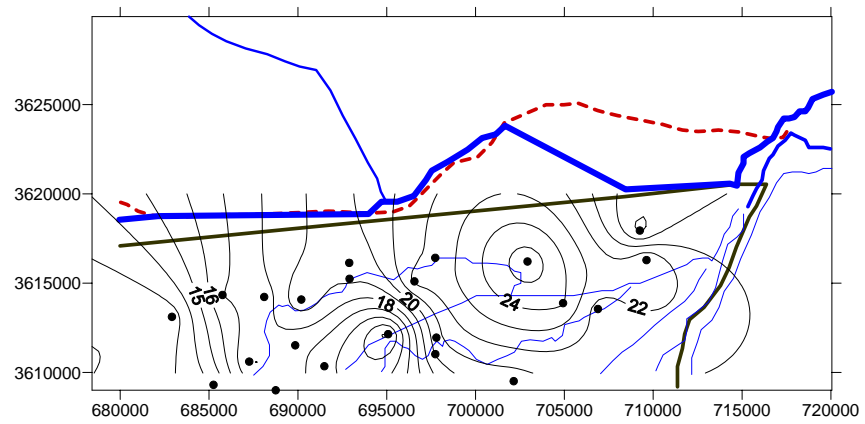
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA

Fig. V.16. Piezometría de 1994



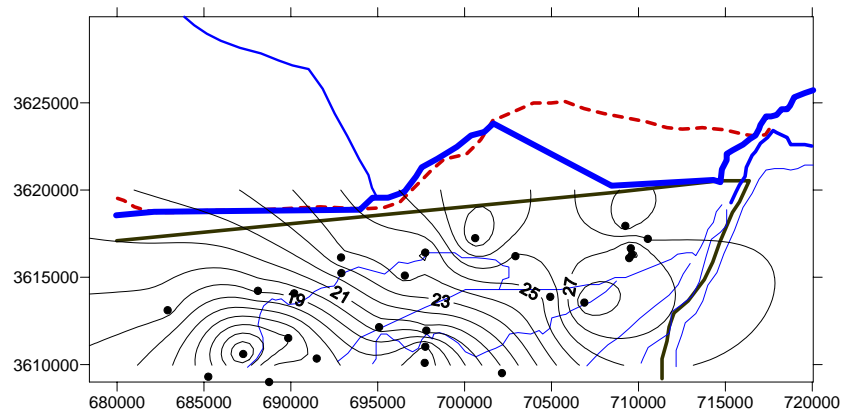
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Fig. V.17. Piezometría de 1995



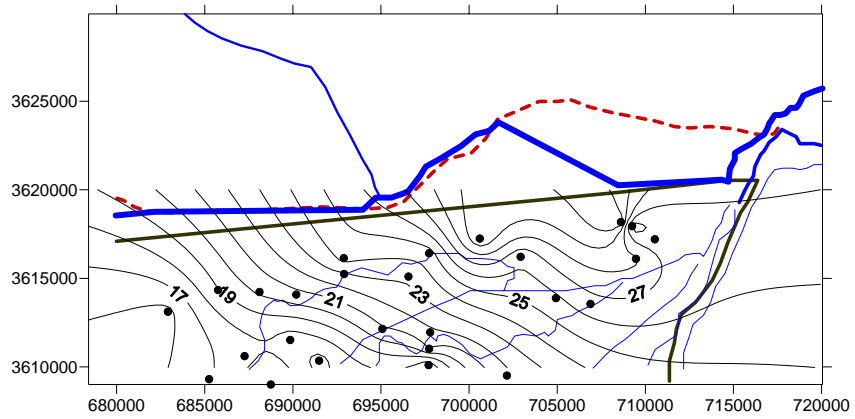
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Fig. V.18. Piezometría de 1998



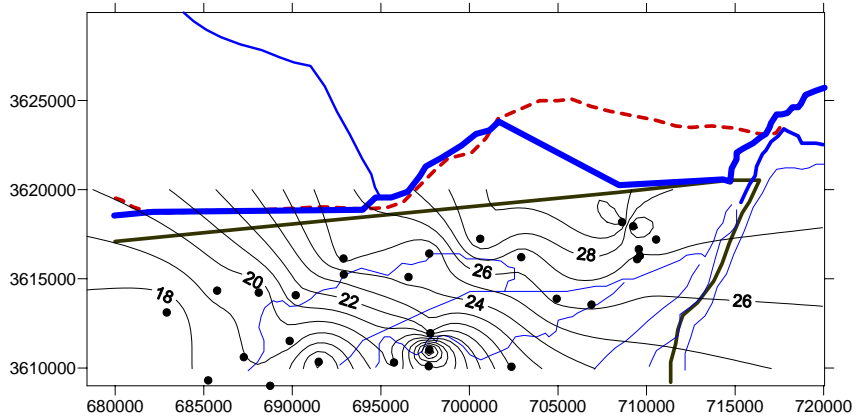
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Fig. V.19. Piezometría de 1999



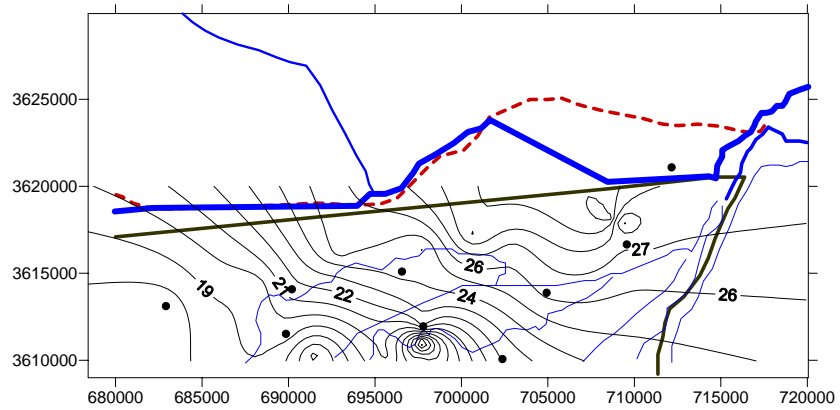
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Fig. V.20. Piezometría de 2000



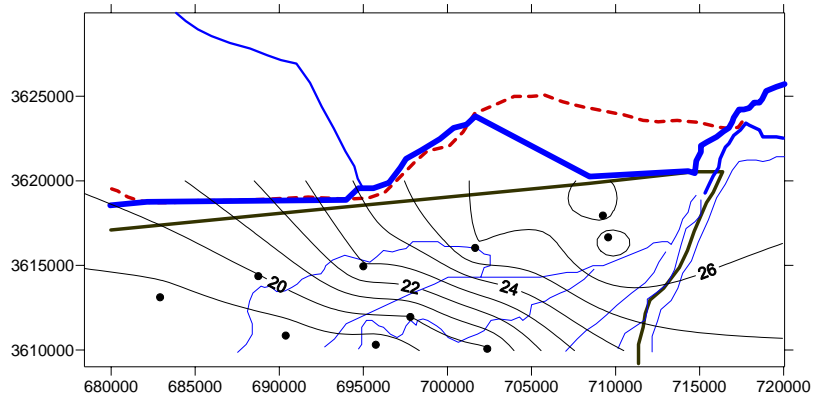
Fuente: Elaboración propia. a partir de datos de la CONAGUA

Fig. V.21 Piezometría de 2001



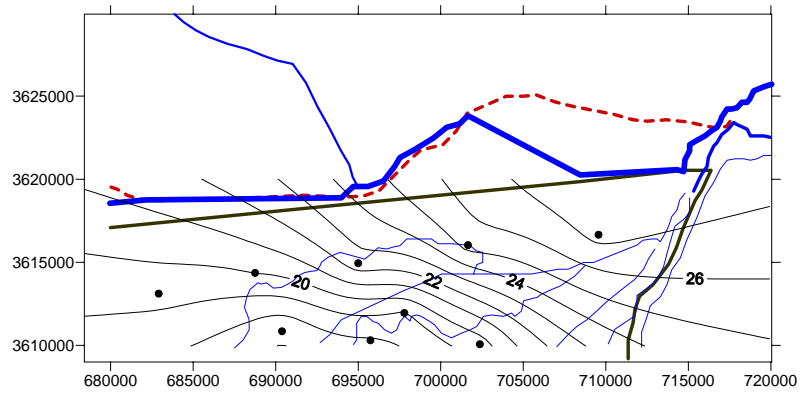
Fuente: Elaboración propia.a partir de datos de la CONAGUA

Fig. V.22. Piezometría de 2002



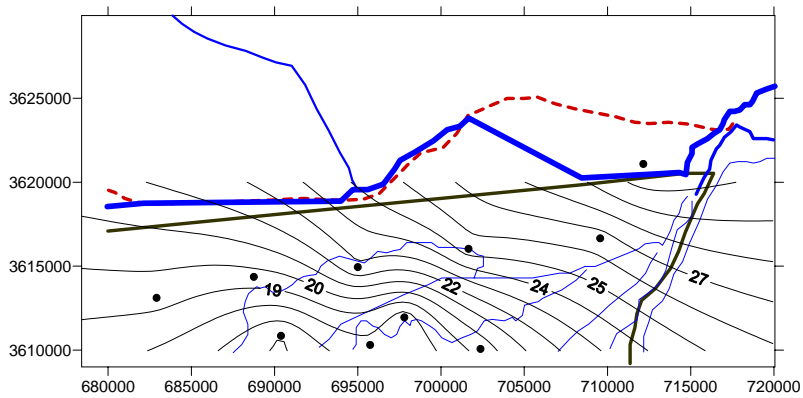
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Fig. V.23. Piezometría de 2003



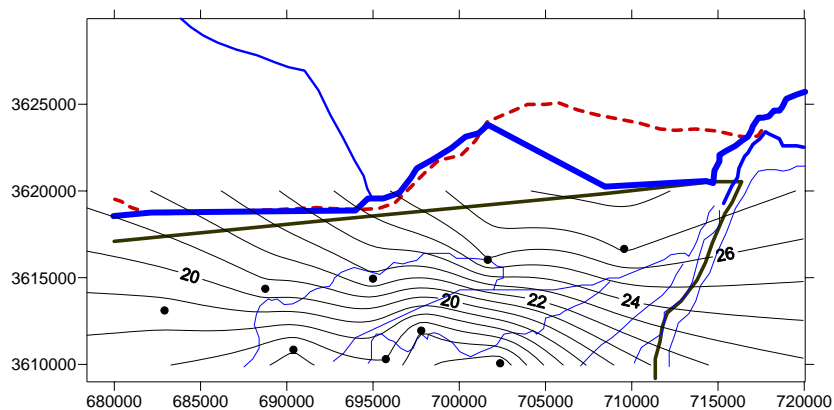
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Fig. V.24. Piezometría de 2004



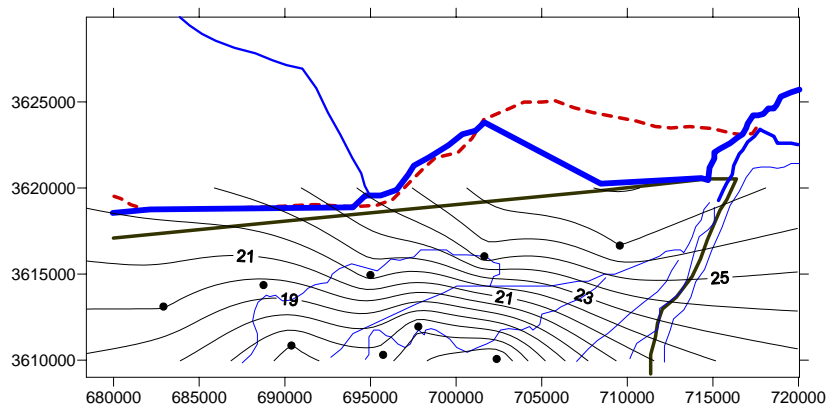
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Fig. V.25 Piezometría de 2005









Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Fig. V.26. Piezometría de 2006



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA.

Tabla V.1. Simbología de las piezometrías

	Canal Todo Americano
	carretera
	frontera internacional
	cuerpos de agua superficial: ríos, arroyos, canales
	pozo de bombeo
	isocontornos

V.1.3 Condiciones iniciales y de contorno

V.1.3.1. Condiciones de contorno

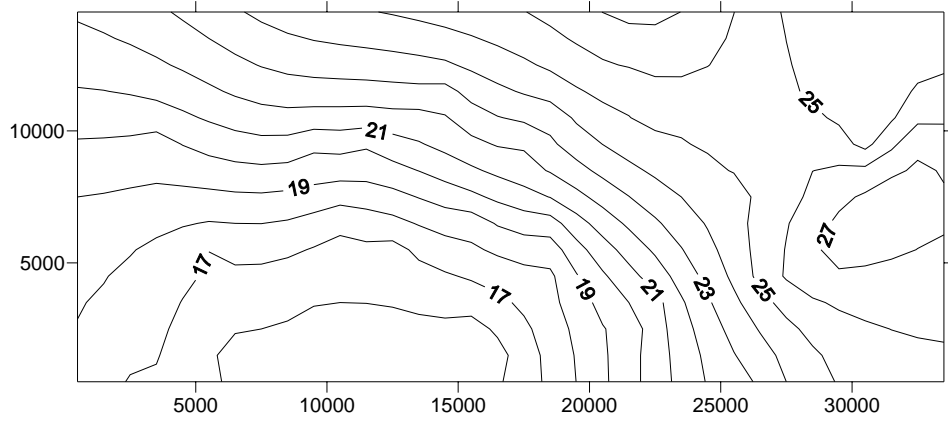
La presencia del CTA y el río Colorado se consideran cargas hidráulicas constantes, de condición tipo Dirichlet. Los límites este y oeste se consideran fronteras de flujo constante, condición tipo Newman.

V.1.3.2. Condiciones iniciales

Al considerar la homogeneidad de las series así como su continuidad se manejó como condición inicial las series 1998 y 2006. En el caso de la primera se determina la variación de h al considerar la presencia y no presencia del CTA y el río Colorado. Respecto a la serie de 2006 se plantea que no existe el CTA o está revestido.

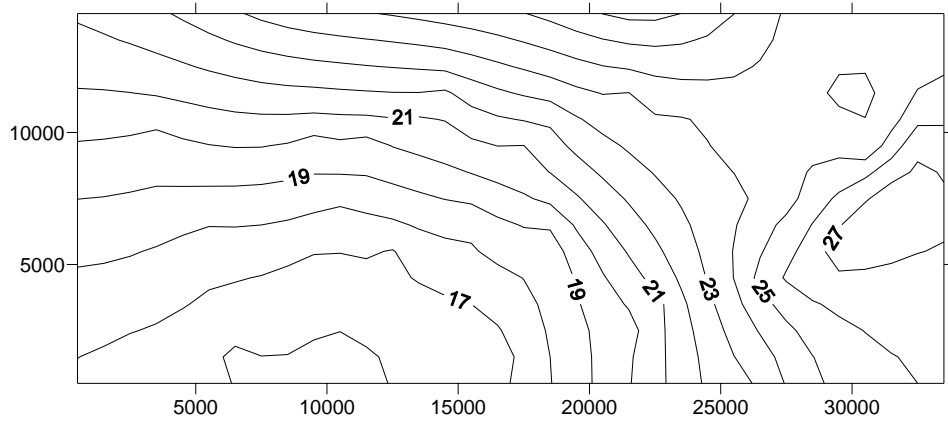
En el anexo 1 se presenta el archivo de lectura para el caso *a*) con la presencia del CTA y del río Colorado. Los resultados del modelo se presentan en las figuras V.27. y V.28. La primera figura muestra la distribución del nivel freático transcurridos del orden de tres meses, observándose un gradiente en dirección noreste en forma análoga a las observaciones, serie 1998 (figura V.29). La figura V.28 muestra la distribución del nivel freático transcurrido un año, obsérvese la similitud de ésta con la piezometría de 1999 (figura V.30), destacándose el gradiente en la dirección noreste y una distribución regular de las curvas de igual altura del nivel freático. Las figuras V.31 y V.32 muestran la distribución del nivel piezométrico para tres años y seis años respectivamente. Obsérvese la semejanza con las observaciones del nivel freático para el año 2006, ver figura V.33 en relación con la figura V.32. En ésta última, que es la modelada existen distorsiones en la porción este, formándose un cierre, debiéndose este al efecto de la frontera.

Fig. V.27. Piezometría de 1998 a 109.2 días (3 meses aproximadamente)



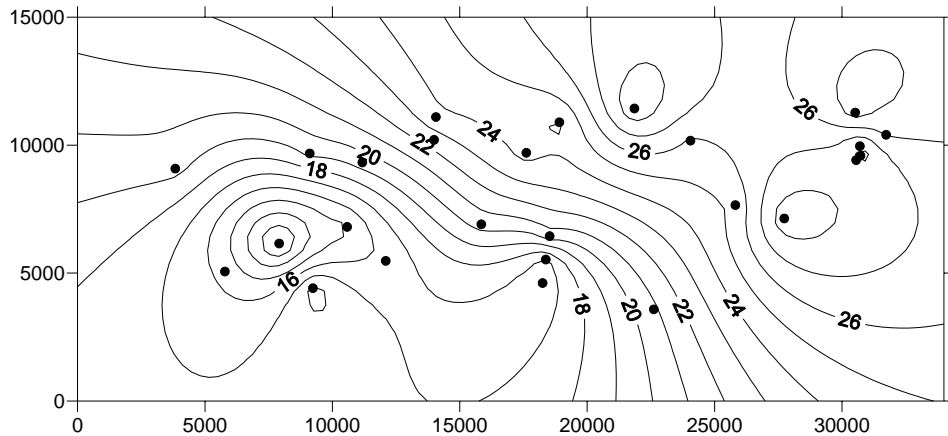
Fuente: Elaboración propia.

Fig. V.28. Piezometría de 1998 a 387.5 días



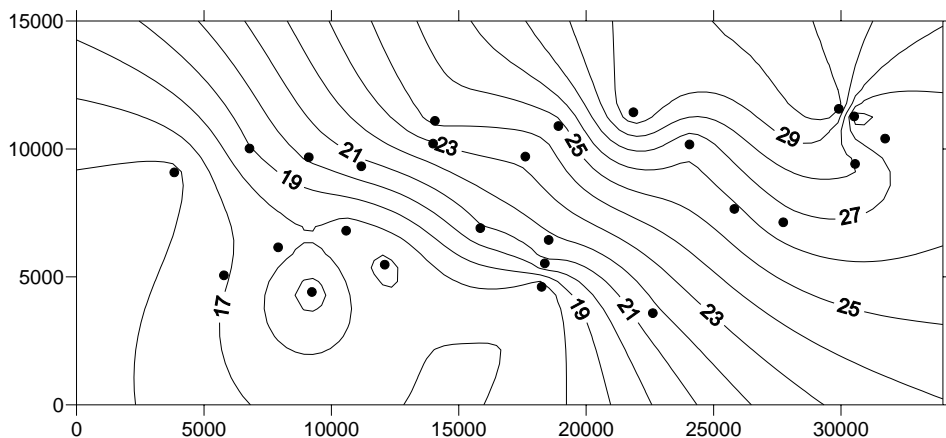
Fuente: Elaboración propia.

Fig. V.29. Piezometría de 1998



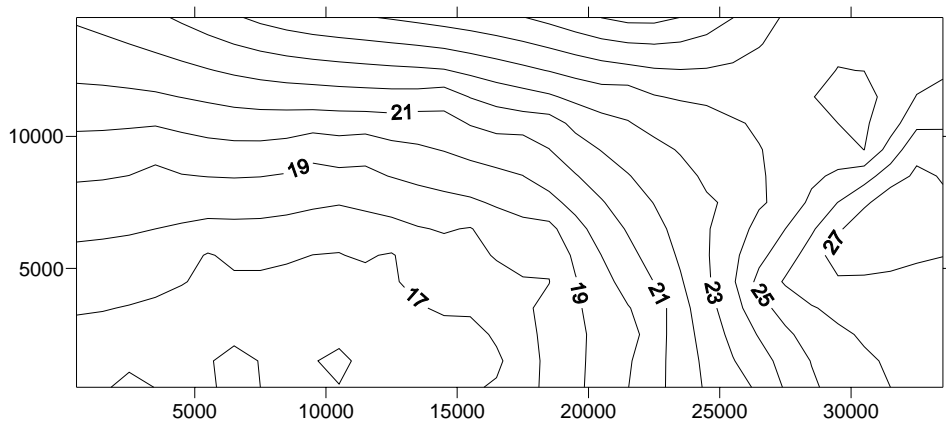
Fuente: Elaboración propia.

Fig. V.30. Piezometría de 1999.



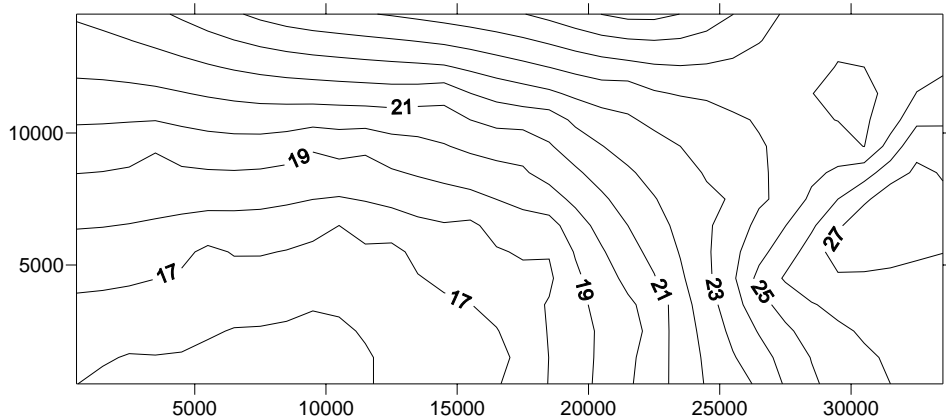
Fuente: Elaboración propia.

Fig. V.31. Piezometría de 1998 a 1187.4 días (3 años aproximadamente)



Fuente: Elaboración propia.

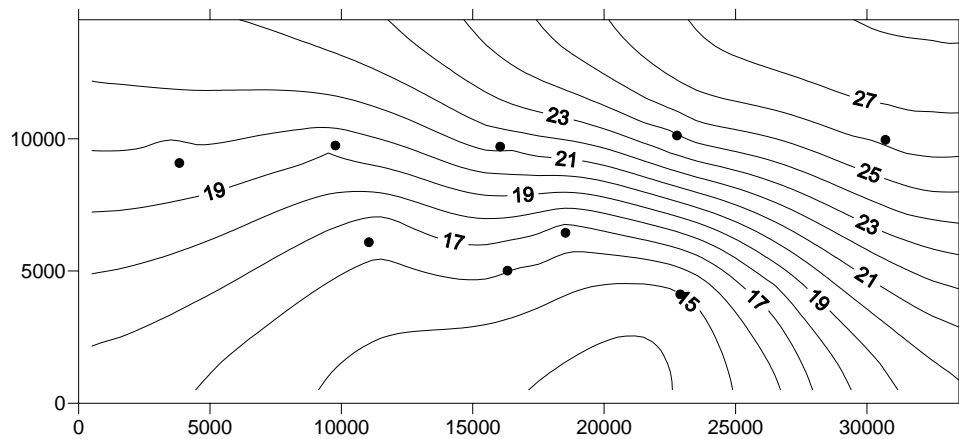
Fig. V.32. Piezometría de 1998 a 2161.1 días (6 años aproximadamente)



Fuente: Elaboración propia.

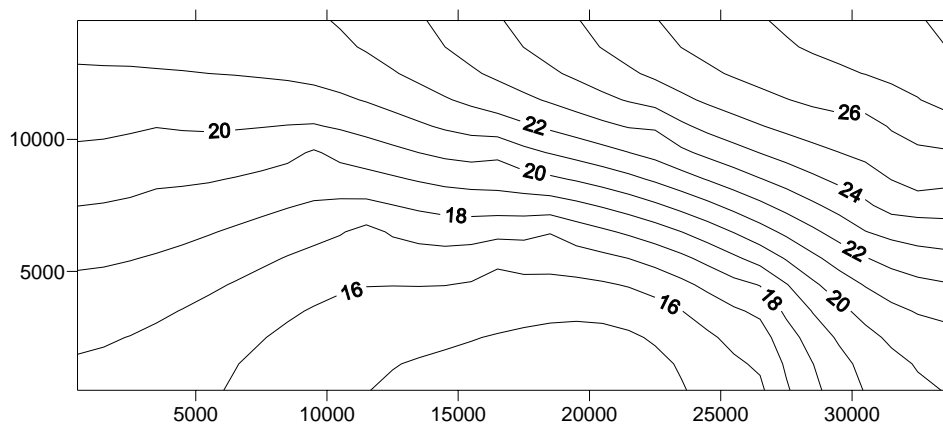
En el caso *b*), de escenario sin el CTA pero con aporte del río Colorado, que es la situación que se espera prevalecerá una vez que sea revestido el CTA, en su modelado se considera la serie del 2006 (V.33). Las figuras V.34, V.35, V.36 y V.37 muestran la distribución de la altura del nivel freático, observándose de éstas un cambio en el gradiente de forma que los isocontornos se vuelven semiparalelos a la porción este, manifestándose la aportación del Río Colorado en dichos niveles.

Fig. V.33. Piezometría de 2006



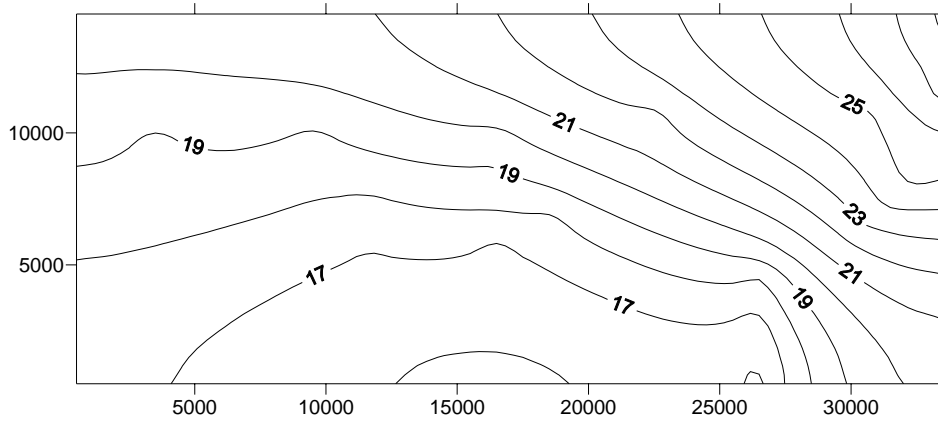
Fuente: Elaboración propia.

Fig. V.34. Piezometría de 2006 a 109.2 días (3 meses aproximadamente)



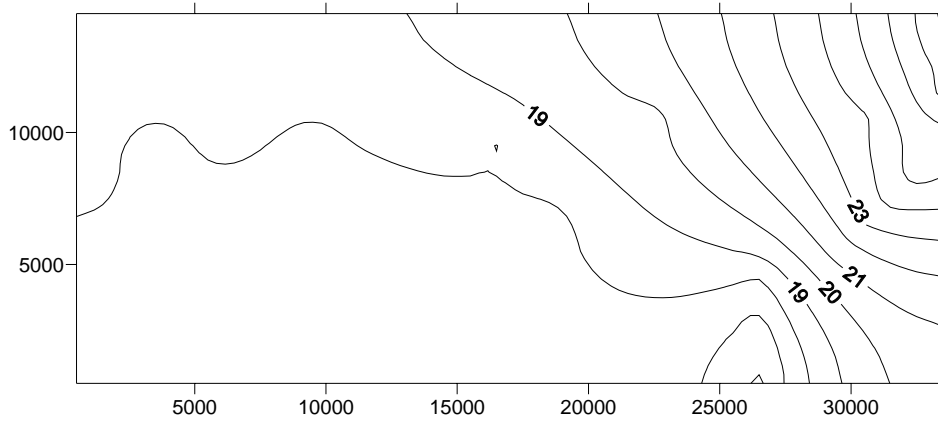
Fuente: Elaboración propia.

Fig. V.35. Piezometría de 2006 a 387.4 días



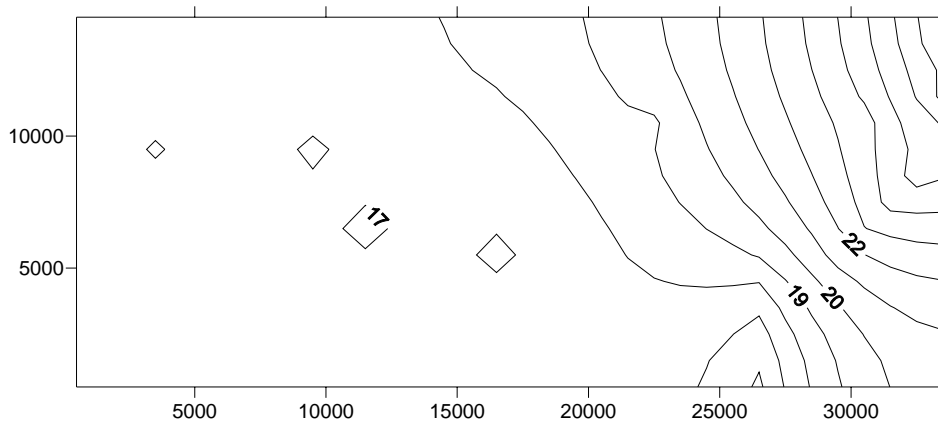
Fuente: Elaboración propia

Fig. V.36. Piezometría de 2006 a 1187.4 días (3 años aproximadamente)



Fuente: Elaboración propia.

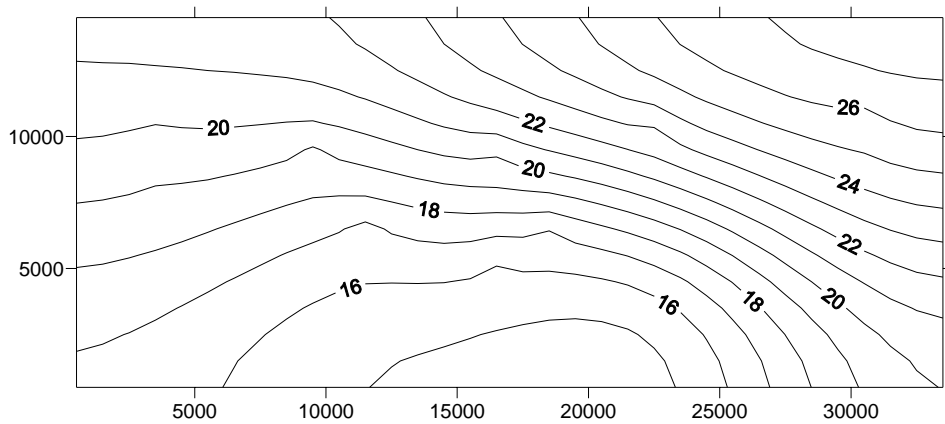
Fig. V.37. Piezometría de 2006 a 2161.1 días (6 años aproximadamente)



Fuente: Elaboración propia.

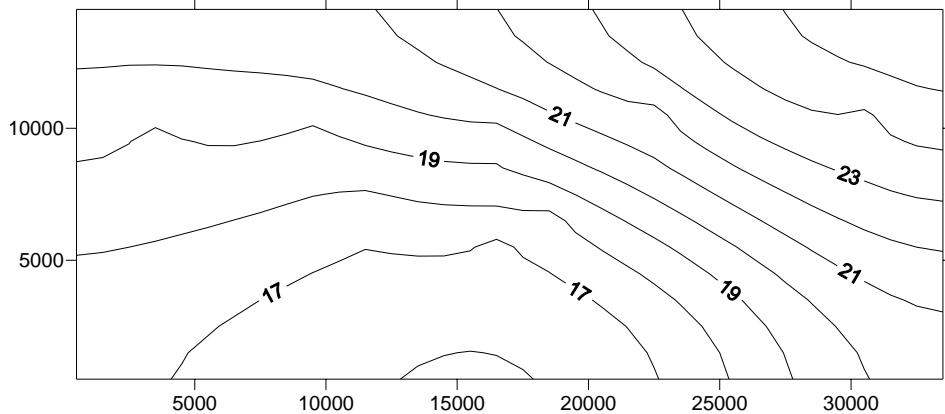
Caso *c*). Como el río Colorado está regulado y su gasto en la porción mexicana es exiguo se considera que no aporta agua al acuífero obteniéndose las distribuciones del nivel freático que se muestran en las figuras V.38, V.39, V.40 y V.41 para tres meses, un año, tres años y seis años respectivamente. La influencia de las fronteras, sin canal y sin río modifica la dirección del gradiente hidráulico para quedar de este a oeste. Como condición inicial se tomó la serie de 2006.

Fig. V.38. Piezometría de 2006 a 109.2 días (3 meses aproximadamente)



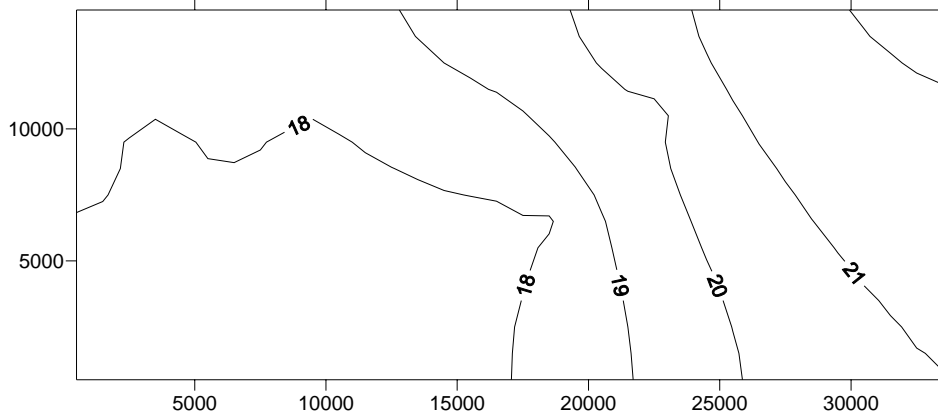
Fuente: Elaboración propia.

Fig. V.39. Piezometría de 2006 a 387.5 días (1 año aproximadamente)



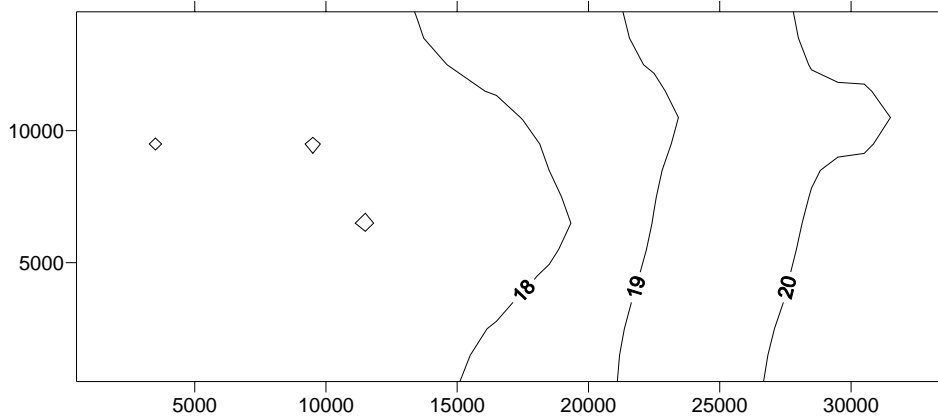
Fuente: Elaboración propia.

Fig. V.40. Piezometría de 2006 a 1187.4 días (3 años aproximadamente)



Fuente: Elaboración propia.

Fig. V.41. Piezometría de 2006 a 2161.1 días (6 años aproximadamente)



Fuente: Elaboración propia.

V.2. Descripción del anexo 1

Este contiene la serie 1998 producto de la discretización de las observaciones irregulares de campo. En el primer renglón las tres variables de lectura son: número de pasos de discretización, intervalo de muestreo, y error promedio para el proceso iterativo de cálculo.

En el siguiente renglón las variables son: número de columnas, número de renglones, transmisibilidad hidráulica, altura del nivel freático, gasto, coeficiente de almacenamiento multiplicado por el área de cada celda, bombeo, y profundidad de la base acuífera. Las seis

últimas variables toman valores de fondo del acuífero; es decir, valores comunes al acuífero. Esto con propósito de facilitar la captura en situaciones donde se tengan pocas celdas especiales.

En el tercer renglón se indican el número de nodos o celdas especiales. En los renglones subsecuentes se presentan los datos particulares de cada malla en el siguiente orden: número de columna, número de renglón, transmisibilidad de paso en dirección y , altura de la carga hidráulica, gasto de bombeo o inyección, coeficiente de almacenamiento multiplicado por el área de la celda, permeabilidad de paso en la dirección x , permeabilidad de paso en la dirección y , y profundidad de la base del acuífero.

V.3. Método de Hantush.

Para estimar el proceso de formación del domo subterráneo debido a la infiltración del agua del CTA se consideraron los siguientes parámetros:

- $K = 128$ m/día (Díaz, 2001);
- $L = 37$ km (23 millas), tomado del All-American Canal Lining Project (USDI, 1994);
- $W = 53.5$ m, éste representa el ancho promedio del canal considerando el reporte del Imperial Irrigation Distric, 2008;
- $h_0 = 12$ m considerando las series piezométricas de 1958, 1972 y 1998 reportadas por Herrera, *et al*, (2004).
- $z_0 = 16$ m considerando que la altura del agua en las proximidades al Canal Todo Americano alcanza los 28 m.
- $S = 0.15$ obtenido de Díaz (2001)
- $I = 0.6$ m/día considerando materiales arenosos según tabla de infiltraciones consultada en De la Peña y Llerena (2001).

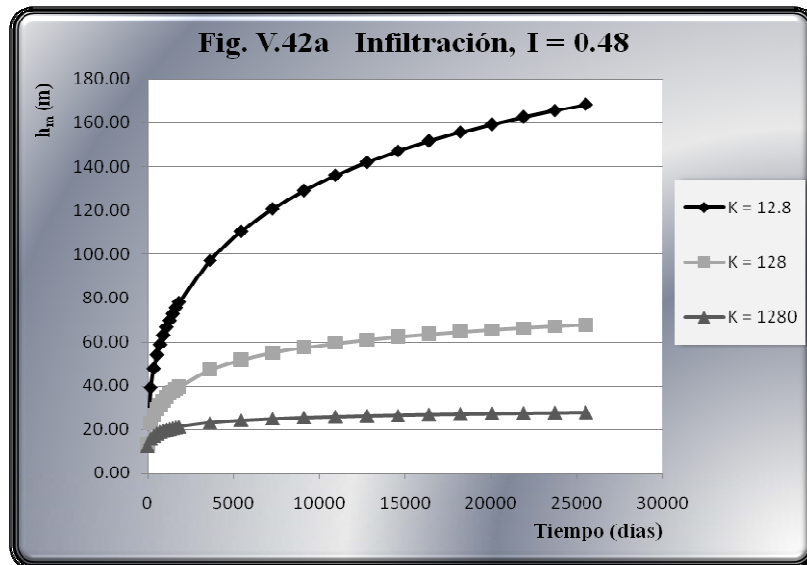
V.3.1. Prueba de sensibilidad.

Se obtienen curvas $t - h_m$ para diversos valores de K , I , S . De esta forma se pretende determinar la sensibilidad de h_m a éstos, así como estimar las variaciones en el volumen subterráneo asociado a los cambios en h_m .

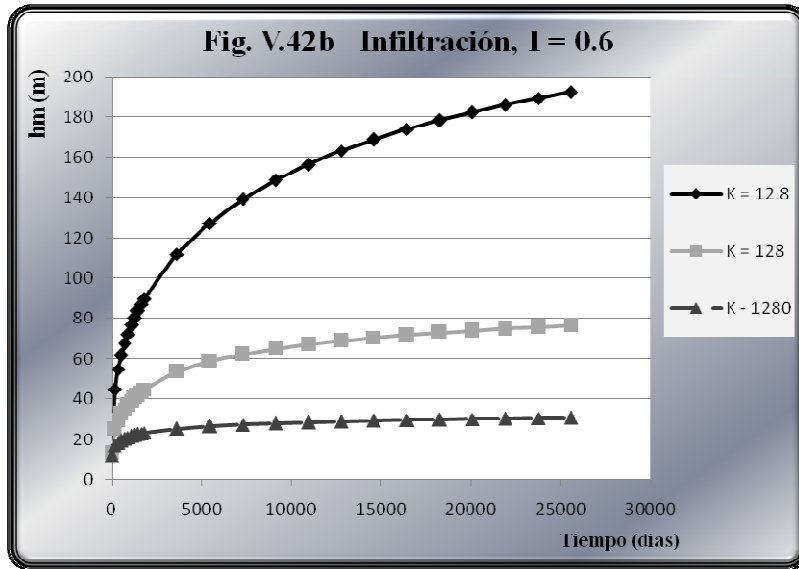
Considerando que el Canal Todo Americano empezó a operar en el año 1942 y con ello inició el proceso de infiltración y formación del domo subterráneo, se considera un período de tiempo y cálculo de 70 años para así visualizar la curva $t - h_m$ en función de I, K, y S. A continuación se describen los resultados:

a) h_m en función de I y K

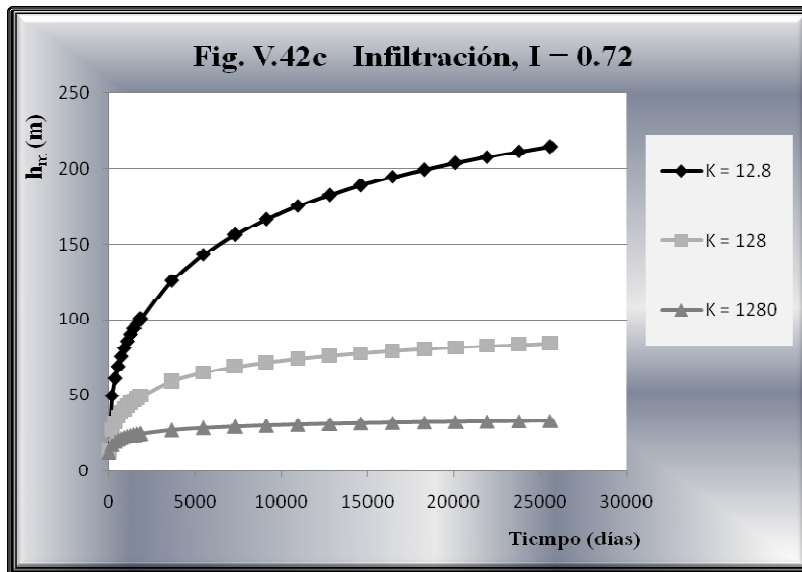
Al contemplar que la conductividad hidráulica puede tener hasta 12 órdenes de variación, por considerar que los materiales de esta zona acuífera son homogéneos se consideró que K pudiera tener tres órdenes de variación, es decir, 12.8, 128 y 1280 m/d. Por otra parte la infiltración depende de los materiales y propiedades hidráulicas por los cuales el agua del canal viaja para llegar a la zona saturada. La literatura indica que puede variar entre 0.48 y 0.72 m/d para materiales como el de la zona de estudio. La Tabla V.2 muestra un concentrado de la elevación máxima del domo para distintos tiempos que varían de un día a 70 años considerando distintos valores de I y K. De esta tabla se generaron las figuras V.42a, V.42b y V.42c. De cada una de estas figuras se puede observar que valores grandes de K influyen menos en h_m a diferencia de los pequeños. Así mismo, considerando un mismo valor de K valores de infiltración mayores producen mayores valores de h_m .



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.



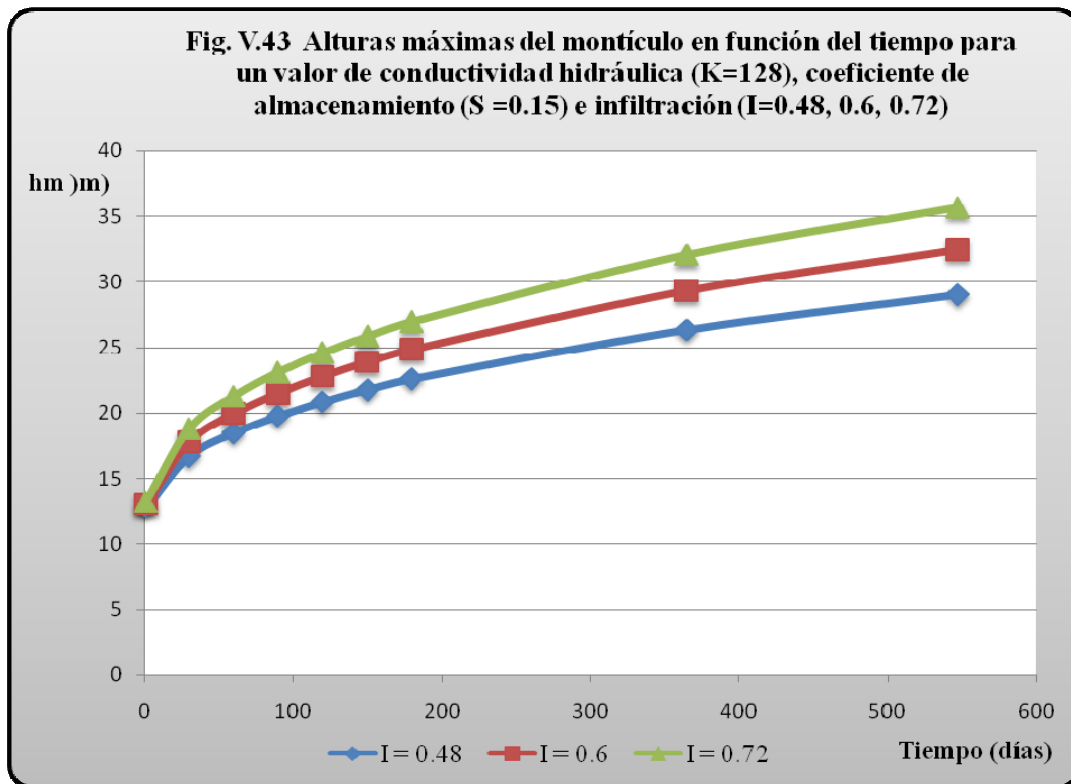
Fuente: Elaboración propia.

Tabla V.2. Alturas máximas (hm) del montículo en función del tiempo para un valor de coeficiente de almacenamiento ($S = 0.15$), conductividad hidráulica, (K) e infiltración, (I) dados.

T (días)	I=0.48			I=0.6			I=0.72		
	K=12.8	K=128	K=1280	K=12.8	K=128	K=1280	K=12.8	K=128	K=1280
1	14.02	12.83	12.28	14.51	13.04	12.36	14.99	13.24	12.43
182.5	39.35	22.65	15.77	44.6	24.90	16.65	49.54	27.05	17.5
365	48.02	26.35	17.18	54.72	29.29	18.34	61.03	32.09	19.46
547.5	54.14	29.01	18.14	61.86	32.44	19.5	69.12	35.68	20.8
730	59.02	31.16	18.88	67.56	34.97	20.37	75.57	38.56	21.8
912.5	63.16	32.99	19.47	72.38	37.11	21.06	81.03	41.01	22.59
1095	66.78	34.59	19.96	76.6	38.99	21.64	85.8	43.15	23.24
1277.5	70.02	36.03	20.37	80.37	40.67	22.12	90.07	45.04	23.79
1460	72.97	37.33	20.73	83.8	42.18	22.54	93.95	46.75	24.26
1642.5	75.69	38.51	21.05	86.96	43.56	22.92	97.52	48.3	24.68
1825	78.21	39.60	21.33	89.89	44.82	23.25	100.84	49.72	25.05
3650	97.22	47.24	23.17	111.99	53.57	25.37	125.81	59.45	27.44
5475	110.49	51.83	24.21	127.33	58.74	26.57	143.05	65.13	28.77
7300	120.79	55.02	24.93	139.14	62.32	27.39	156.21	69.06	29.69
9125	129.16	57.45	25.48	148.65	65.02	28.01	166.73	72.01	30.38
10950	136.15	59.38	25.91	156.53	67.18	28.51	175.4	74.37	30.94
12775	142.10	60.99	26.28	163.21	68.97	28.93	182.72	76.32	31.4
14600	147.26	62.35	26.59	168.97	70.49	29.29	189.02	77.97	31.79
16425	151.79	63.54	26.86	174.02	71.81	29.6	194.53	79.41	32.14
18250	155.81	64.58	27.11	178.5	72.97	29.87	199.41	80.67	32.44
20075	159.43	65.51	27.32	182.51	74.00	30.12	203.77	81.8	32.72
21900	162.70	66.36	27.52	186.14	74.94	30.34	207.71	82.82	32.97
23725	165.69	67.12	27.70	189.45	75.79	30.55	211.3	83.75	33.19
25550	168.43	67.82	27.86	192.48	76.57	30.74	214.6	84.6	33.4

Fuente: Elaboración propia.

La figura V.43 muestra el ascenso de la altura máxima del domo subterráneo en forma gráfica y tabulada para distintos valores de infiltración observándose que, para un mismo tiempo de observación los ascensos son mayores conforme aumenta la infiltración, incrementándose las diferencias conforme aumenta el tiempo, de tal forma que para un tiempo de 30 días son del orden de un metro para $I = 0.48$ e $I = 0.6$; así mismo, son del orden de un metro para $I = 0.72$ e $I = 0.6$. Diferencias de un metro significan en términos energéticos para un mismo gasto de extracción un aumento en la potencia eléctrica de Q/50 caballos de vapor (cv), medido el gasto (Q) en litros por segundo y la potencia en cv el cual equivale a 0.7355 kW (Villanueva, 1984).



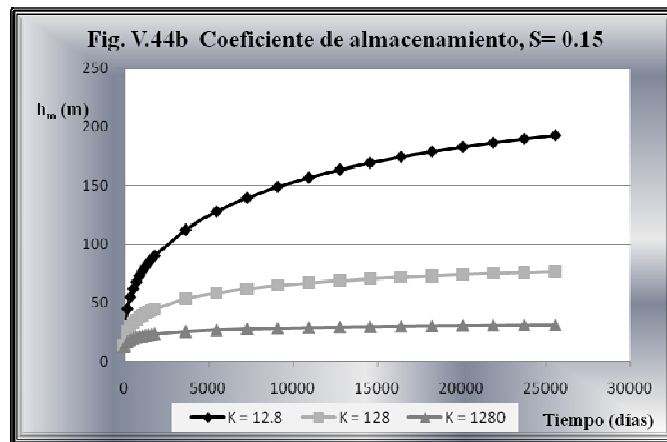
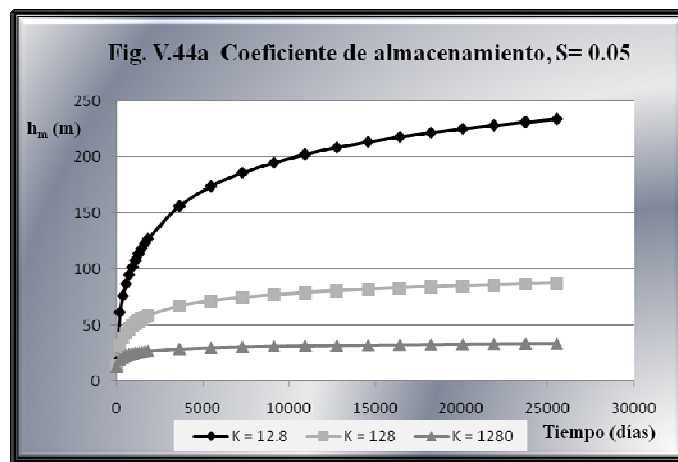
Fuente: Elaboración propia.

T (días)	h_m (m)		
	I= 0.48	I= 0.6	I= 0.72
1	12.83	13.04	13.24
30	16.68	17.75	18.79
60	18.47	19.91	21.29
90	19.78	21.48	23.11
120	20.85	22.76	24.59
150	21.77	23.86	25.85
180	22.59	24.83	26.97
365	26.35	29.29	32.09
547.5	29.01	32.44	35.68

Ahora bien, para un tiempo de un año las diferencias son del orden de tres metros; por lo que, el consumo aumentaría en $3Q/50$ cv. Basta conocer las tarifas eléctricas y se estará en posibilidades de traducir los aumentos energéticos en costos para los usuarios del agua.

b) h_m en función de S

Si consideramos que el coeficiente de almacenamiento para un acuífero libre con materiales permeables, como es el caso, pueden variar entre 0.05 y 0.15, por lo que considerando una infiltración de 0.6 m/d y para distintos valores de K y S, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla V.3. Las figuras V.44a y V.44b, muestran las variaciones de h_m con el tiempo para distintos valores de S observándose que cuando S aumenta contribuye en menor medida en el valor de h_m que cuando S disminuye.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla V.3. Alturas máximas (hm) del montículo en función del tiempo para un valor de coeficiente de almacenamiento ($S = 0.05, 0.15$), conductividad hidráulica, (K) e infiltración, ($I=0.6$)

T (días)	S=0.05			S=0.15		
	K=12.8	K=128	K=1280	K=12.8	K=128	K=1280
1	16.89	13.86	12.63	14.51	13.04	12.36
182.5	61.86	32.44	19.5	44.6	24.90	16.65
365	76.6	38.99	21.64	54.72	29.29	18.34
547.5	86.96	43.56	22.92	61.86	32.44	19.5
730	95.22	47.06	23.81	67.56	34.97	20.37
912.5	102.2	49.88	24.5	72.38	37.11	21.06
1095	108.3	52.21	25.06	76.6	38.99	21.64
1277.5	113.74	54.19	25.52	80.37	40.67	22.12
1460	118.67	55.9	25.92	83.8	42.18	22.54
1642.5	123.18	57.4	26.26	86.96	43.56	22.92
1825	127.33	58.74	26.57	89.89	44.82	23.25
3650	156.53	67.18	28.51	111.99	53.57	25.37
5475	174.02	71.81	29.6	127.33	58.74	26.57
7300	186.14	74.94	30.34	139.14	62.32	27.39
9125	195.28	77.29	30.91	148.65	65.02	28.01
10950	202.55	79.16	31.37	156.53	67.18	28.51
12775	208.56	80.71	31.74	163.21	68.97	28.93
14600	213.65	82.02	32.07	168.97	70.49	29.29
16425	218.06	83.17	32.35	174.02	71.81	29.6
18250	221.94	84.18	32.6	178.5	72.97	29.87
20075	225.4	85.08	32.83	182.51	74.00	30.12
21900	228.52	85.89	33.04	186.14	74.94	30.34
23725	231.35	86.64	33.22	189.45	75.79	30.55
25550	233.94	87.32	33.4	192.48	76.57	30.74

Fuente: Elaboración propia.

c) h_m para el área de estudio

Considerando como valores óptimos $I= 0.6$ m/d, $K= 128$ m/d, $S= 0.15$, y $z_0= 12$. En la Tabla V.3 se observa que para el primer día el nivel freático se abulta en 1.04 m, alcanzando el montículo de altura máxima 13.04 m; al transcurrir seis meses (182.5 días) el abultamiento es de 12.9 m, alcanzando una altura máxima de 24.9; al año la altura es de 29.29 m. Esta altura coincide con el nivel del agua superficial que reporta Díaz (2001) en su Tabla VIII para el CTA, por lo que la formación del domo considerando los datos anteriores, llevó un año su formación, asimismo al extinguirse la infiltración del CTA es de esperarse que en un año se extinga el domo por acción natural de la gravedad sin que exista bombeo.

d) Iteraciones.

El cálculo de h_m para los distintos escenarios indicados no superó las 6 iteraciones, esto debido a que el método mediante el cálculo de raíces por Newton – Raphson converge rápidamente.

El proceso de formación del domo subterráneo y de extinción del mismo son procesos naturales debido a la presencia de un cuerpo de agua superficial regulado por las características hidráulicas del acuífero. De forma que, al suspenderse el cuerpo de agua superficial el domo empezará a extinguirse en forma natural por acción de la aceleración de la gravedad terrestre, buscando fundirse y formar una superficie de equilibrio con el nivel freático.

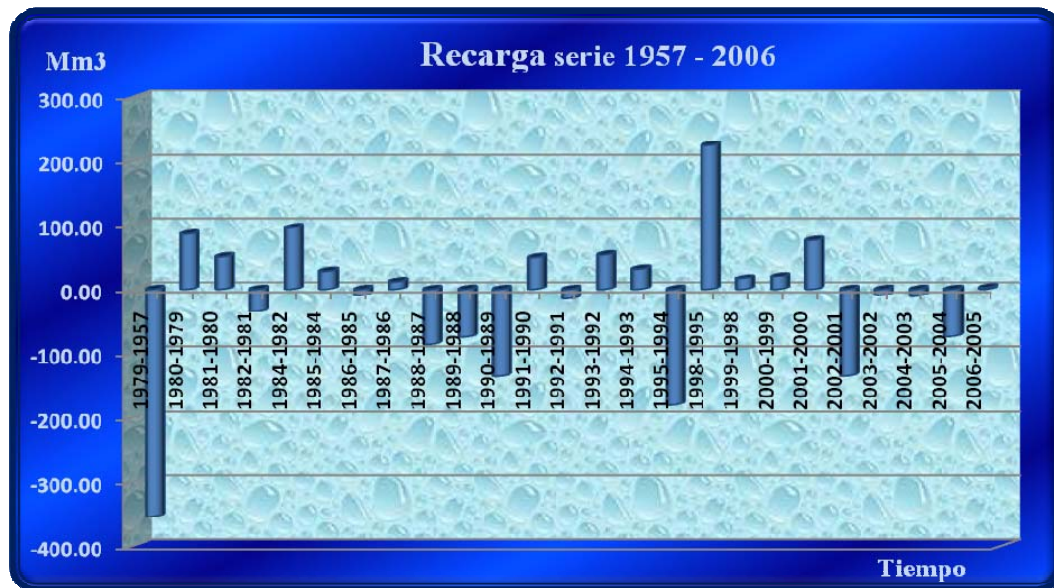
V.4. Recarga al acuífero

Para calcular la recarga se siguió el procedimiento siguiente:

Las series de altura de nivel freático para los años, 1957, 1979, 1980, 1981, 1982, 1984 – 1995, 1998 – 2006 contienen datos irregularmente distribuidos; asimismo, la longitud de las series es irregular, unas más largas que otras. Para aplicar el método de recarga descrito en el capítulo IV referente a la metodología, se procede a obtener valores de h en puntos regulares distantes un km entre si en el área ($34 \times 15 \text{ km}^2$) de estudio, para ello se realizó una interpolación por el método Kriging dispuesto en el programa SURFER 8. Una vez determinada h en cada celda regular para cada uno de los años antes descritos, se procedió a calcular las diferencias entre series contiguas para determinar la razón de cambio de h y, de ésta forma, conocido S_y y el área de discretización de cada celda, se obtiene la recarga en unidades de volumen para cada intervalo o lapso de tiempo. La figura V.45 muestra la recarga para la serie 1957 – 2006 en unidades de Mm^3 . Obsérvese que existe una alternancia irregular en descargas y recargas al acuífero. La mayor diferencia es para los períodos 1979 – 1957 y para la de 1998 – 1995. Los intervalos de tiempo de 22 y 3 años en estas series respectivamente, restan confianza en los resultados obtenidos ya que, la precisión depende en la longitud en el intervalo de tiempo. Para el resto de la serie las diferencias alcanzan valores del orden de 200 Mm^3 . Considerando la suma aritmética de las descargas y recargas el resultado neto es de 356.8 Mm^3 de descarga; es decir, que no obstante la

presencia del aporte del CTA al flujo subterráneo y del Río Colorado existe un abatimiento promedio de 5.19 m para el área estudiada de 34 x 15 km².

Fig. V.45 Recarga serie 1957 – 2006



Fuente: Elaboración propia.

Cabe comentar que el abatimiento promedio de 5.19 m es la suma aritmética de los abatimientos o acrecentamientos promedio de toda la serie histórica. El abatimiento o acrecentamiento promedio entre dos series de nivel freático contiguas es la media aritmética de las diferencias en el nivel freático para los tiempos t y $t + \Delta t$.

La figura V.46 muestra las alturas promedio equivalentes y los gastos asociados a estas. Esta es una forma de traducir el significado de los gastos en columna equivalente de agua y, para mayor claridad la figura V.47 los abatimientos en función de las cargas o descargas correspondientes a estos. Por ejemplo, para un abatimiento de un metro como en el señalado para el domo subterráneo formado por infiltración del CTA, se tiene del orden de 40 Mm³ de agua. Esto suponiendo que dicha altura corresponde a una loza de espesor un metro, ahora bien, se considera que la forma de la curva de abatimiento del domo fuese triangular, el volumen sería la mitad del antes indicado, es decir, 20 Mm³. Las relaciones mostradas en la figura V.47 permiten relacionar alturas de ascenso o descenso del nivel freático con gastos.

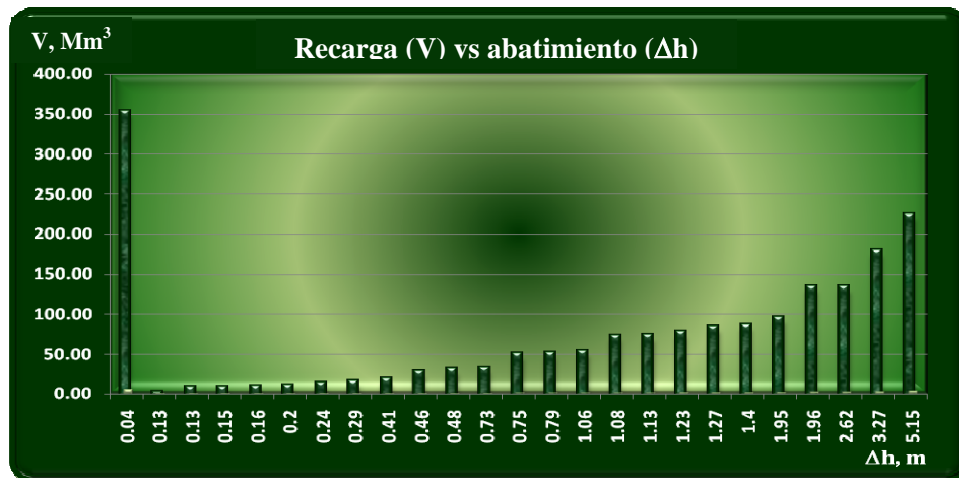
Estos dimensionan el sentido social que pueden tener los volúmenes asociados, ya que la ciudad de Ensenada requiere del orden de 20 Mm³ anuales, por lo que un descenso de un metro del domo de infiltración equivale al agua de la ciudad de Ensenada para un año. Esquemas de ese tipo se pueden plantear para la ciudad de Mexicali, la cual tiene un uso consuntivo del orden de los 80 Mm³ anuales.

Fig. V.46 Abatimiento equivalente (h_m promedio)



Fuente: Elaboración propia.

Fig.V.47 Recarga vs abatimiento



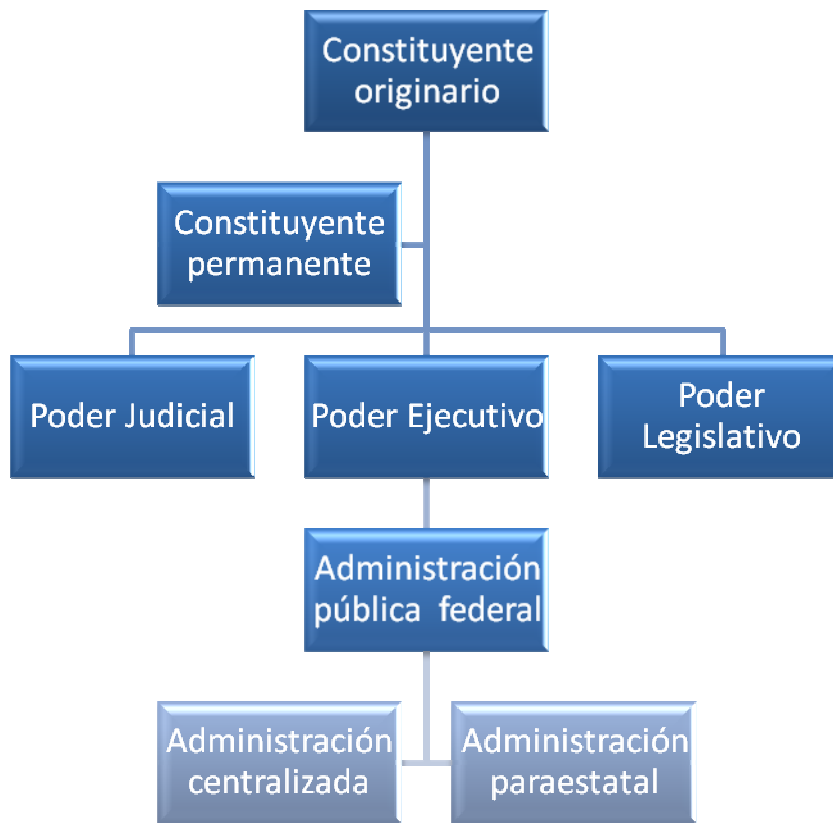
Fuente: Elaboración propia.

V.5. Gestión del agua subterránea en el Valle de Mexicali

La frontera entre México y Estados Unidos constituye una zona de problemas compartidos por ambos países. Uno de ellos es el que se origina en la cuenca del río Colorado que hoy toma una faceta más: el revestimiento del Canal Todo Americano. Este aporta, mediante infiltraciones, a la recarga del acuífero del Valle de Mexicali. Por su ubicación geográfica, el Valle de Mexicali es considerado como una región árida, lo que propicia la competencia por el agua.

Al conocer el carácter binacional del acuífero de Mexicali, sabemos que es competencia del Ejecutivo Federal el velar por estas aguas. La manera en que él cumple con sus funciones puede representarse con el siguiente esquema:

Fig. V.48 Origen de la administración pública federal

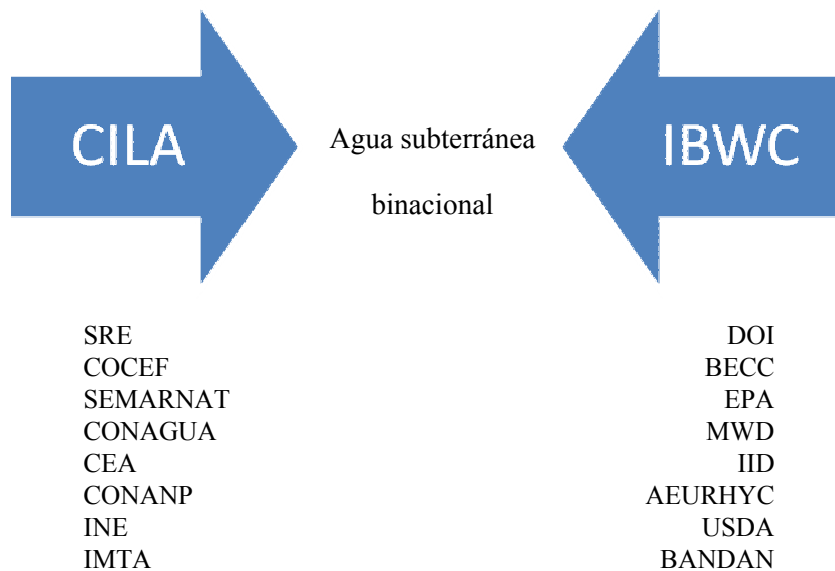


Fuente: Elaboración propia.

La administración centralizada comprende las diversas secretarías, de las cuales es de interés para nuestro estudio el conocer a la Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE), ya que se interrelaciona con la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA).

A partir de la matriz de actores (tabla VI.1) en la cual se muestran los objetivos institucionales de estos, se puede construir en forma esquemática la interrelación entre los actores nacionales y los de Estados Unidos. La figura V.49 muestra el diagrama que señala a la CILA/IBWC, creados por acuerdo de los Ejecutivos de ambos países. Obsérvese como los actores coadyuvantes en el desempeño de las funciones institucionales de la CILA y el IBWC se señalan sin mostrar preeminencias entre estos. Así mismo, la línea bidireccional entre ambas instituciones muestra el carácter de retroalimentación e integración orgánica que debe existir en el marco del convenio que los generó y la normativa interna de cada país que deben observar estos en respectivos ámbitos.

Fig. V.49 Interrelación de la CILA / IBWC con otros actores



Fuente: Elaboración propia.

Los actores coadyuvantes mostrados por su interacción externa a los círculos de la CILA/IBWC deben contribuir coordinadamente y lograr unidad orgánica de propósitos que

son: vigilar el cumplimiento de los tratados internacionales en materia de límites y aguas; así como asistir al gobierno mexicano en las negociaciones diplomáticas de acuerdos internacionales sobre la materia. Este último objetivo es fundamental ya que, ante la ausencia de un convenio o tratado en materia de agua subterránea, es la CILA quien habrá de asesorar al Ejecutivo para su consecución y firma. Considerando que los abatimientos se asocian a volúmenes y el domo subterráneo en su extinción descenderá los niveles freáticos, sin considerar el aumento de la concentración de sales en el agua. Estos supuestos son insumos para alentar la firma de un convenio en materia de aguas subterráneas entre México y los Estados Unidos.

V.5.1. Acciones realizadas por los actores.

El gobierno de México ha realizado diversas gestiones diplomáticas, contactos técnicos y políticos con autoridades estadounidenses, en las que ha expresado su rechazo al proyecto si éste presenta efectos no deseables en nuestro territorio, en tanto no se identifique una solución satisfactoria para ambas partes.

Considerando lo anterior, en 2004 se integró un grupo de trabajo interinstitucional, en el que participan activamente representantes de la Cancillería, de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), la CONAGUA, la SEMARNAT, el INE, el gobierno de Baja California y el municipio de Mexicali, con el propósito de documentar los efectos transfronterizos del proyecto, a través de estudios técnicos y ambientales, con la finalidad de establecer la estrategia de negociación bilateral. De esta forma, las dependencias han coordinado sus acciones en el marco del grupo logrando realizar las siguientes acciones:

Secretaría de Relaciones Exteriores

Desde que el gobierno de México fue notificado sobre el proyecto de revestimiento del CTA, la Secretaría de Relaciones Exteriores ha emitido diversas comunicaciones diplomáticas, en las que se han reiterado los siguientes elementos:

- Oposición a la realización del proyecto y preocupación por los impactos adversos que el revestimiento podría generar en territorio mexicano en perjuicio de los agricultores mexicanos del Valle de Mexicali.

- Suspensión del proyecto hasta que la CILA México-Estados Unidos identifique esquemas de cooperación y consulta que permitan evitar la realización del revestimiento del CTA, así como las acciones tendentes a eliminar o mitigar los efectos negativos en territorio mexicano.
- Búsqueda de esquemas de cooperación y consultas que permitan evitar la realización del revestimiento del CTA en tanto se identifican las acciones tendentes a eliminar o mitigar los efectos negativos en territorio mexicano.
- Incumplimiento de las consultas recíprocas, de conformidad con los términos del Acta 242, que establece el mecanismo de las consultas entre ambos países ante cualquier desarrollo de infraestructura de aguas superficiales o subterráneas o de emprender modificaciones substanciales de sus desarrollos actuales, que pudieran afectar adversa mente al otro país.

Asimismo, el tema ha sido abordado en diversos foros bilaterales y encuentros presidenciales en los que el gobierno de México ha reiterado su oposición a la realización del proyecto y la preocupación por los impactos adversos que el revestimiento podría generar en territorio mexicano, en perjuicio de los agricultores mexicanos del Valle de Mexicali y del ecosistema que compartimos.

De esta forma, de 2004 a marzo de 2007 se celebraron 12 encuentros bilaterales de alto nivel, siendo el último en agosto de 2006. De igual forma, la cancillería ha trabajado estrechamente con el estado de Baja California, motivo por el cual a partir de 2005 se realizaron cinco visitas a Mexicali del entonces secretario de Relaciones Exteriores, doctor Luis Ernesto Derbez.

La canciller Patricia Espinosa se reunió en dos ocasiones con el gobernador de Baja California (diciembre de 2006 y enero de 2007) con el propósito de evaluar el status del tema y definir las acciones que pudieran coadyuvar a una solución conjunta entre México y EUA. En lo que respecta al proceso legal interpuesto por el CDEM, la SRE participó como Amigo de la Corte (*Amicus Curiae*) en septiembre de 2006, lo que representa una manifestación de

apoyo y no implica una participación directa en el proceso legal. Con esta participación se buscó reiterar la postura de México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Entre las acciones realizadas, la SEMARNAT ha enviado cartas al secretario del Departamento del Interior (DOI) de EUA, firmadas por el titular argumentando daños a la ecología y especies protegidas en peligro de extinción, aspecto que ha permitido reconocer la importancia del manejo eficiente del agua en la región, a la vez que se ha enfatizado la necesidad de que los análisis y decisiones se realicen de manera conjunta, toda vez que se trata de un recurso compartido.

En marzo de 2006, durante la reunión del Grupo de Recursos Naturales de la XXII reunión de la Comisión Binacional México-Estados Unidos, se abordó el tema, logrando reactivar el Grupo IV de Trabajo sobre el delta del río Colorado, el cual ha sostenido desde la fecha tres reuniones binacionales de alto nivel, siendo la última en febrero de 2007, y en las que se han identificado proyectos específicos de protección del delta de manera conjunta entre autoridades gubernamentales de ambos países y organización no gubernamentales.

En junio 2006 se llevó a cabo una reunión bilateral entre los titulares de la SEMARNAT y el DOI en la que se acordó un sobrevuelo por la zona donde se tiene proyectado realizar el revestimiento. Dicha actividad se llevó a cabo en agosto de 2006, en la que estuvieron presentes el subsecretario del Agua del DOI y el subsecretario de Gestión de la SEMARNAT.

De manera integral, se ha trabajado estrechamente con el Instituto Nacional de Ecología y la CONAGUA en la realización de estudios para evaluar los impactos en los humedales de la Mesa de Andrade, el acuífero y las afectaciones al área agrícola del Valle de Mexicali, que fueron entregados en su momento a las autoridades correspondientes en Estados Unidos.

Comisión Nacional del Agua

La CONAGUA ha sostenido diversas reuniones de trabajo con la parte mexicana del Comité Técnico Binacional, conformada por el gobierno de Baja California y la CILA. Como resultado, se han definido con mayor detalle las obras necesarias para modernizar y tecnificar los módulos 4 y 5 del distrito de riego 014, río Colorado, así como acciones de mitigación para compensar los impactos que se tendrían al dejar de recibir el volumen infiltrado.

De esta manera, y con base en estudios técnicos elaborados en 1991 por la CONAGUA, actualizados en 2005, se planteó a los Estados Unidos que el nuevo canal revestido paralelo al CTA producirá importantes efectos adversos en territorio mexicano, originados todos ellos por una reducción en la recarga del acuífero del Valle Mexicali, que corresponde al 10 por ciento de la recarga total de este cuerpo de agua subterránea.

Asimismo, se han identificado acciones que permitan la recuperación de volúmenes y compensación de las aportaciones superficiales y subterráneas que fluyen hacia el acuífero del distrito de riego 014.

Actualmente, la CONAGUA está desarrollando estudios que permitan analizar opciones en nuestro país para reducir los daños que se esperan al medio ambiente y al sector agrícola.

Recurso legal interpuesto por la sociedad civil

En julio de 2005, el Consejo de Desarrollo Económico de Mexicali (CDEM) y otras asociaciones civiles estadounidenses entablaron una demanda en contra del Departamento del Interior y el Buró de Reclamaciones de EUA ante una corte federal en Nevada, con el propósito de evitar la construcción del canal revestido.

El reclamo fue desechado, por lo que en agosto de 2006 el CDEM interpuso un recurso de apelación ante la Corte Federal de Apelaciones de San Francisco, CA. Dicho tribunal no sólo aceptó considerar el recurso, sino que decretó la suspensión temporal del proyecto hasta en tanto no se emita su fallo. En virtud de lo anterior, el gobierno

estadounidense por conducto de la sección estadounidense de la CILA notificó su decisión de suspender el diálogo para tratar el tema hasta conocer el fallo de la Corte.

En septiembre de 2006 la SRE participó como Amigo de la Corte, a través de una manifestación de apoyo, que no implica una participación directa en el proceso legal. El 4 de diciembre de 2006 se llevó a cabo la primera audiencia en la que las Partes expusieron sus argumentos de defensa. En esta sesión, el tribunal decidió posponer su fallo hasta nueva fecha. Por su parte, el Congreso de Estados Unidos aprobó la iniciativa HR 6111, denominada To Amend the Internal Revenue Code of 1986, en la cual se solicita al secretario del Interior que proceda sin dilación alguna a la construcción del proyecto de revestimiento. Esta iniciativa fue aprobada por el Senado estadounidense y firmada el 20 de diciembre de 2006 por el Presidente George W. Bush. Como resultado de la aprobación de dicha iniciativa, el 21 de febrero se llevó a cabo una segunda audiencia en la Corte, en la que se decidió continuar con el análisis del caso, manteniendo la suspensión del proyecto de revestimiento.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VI.1. Conclusiones

La porción noreste del acuífero del Valle de Mexicali atendiendo a sus parámetros hidrológicos señala que, al revestirse el CTA se extinguirá con suma rapidez (un año) el domo subterráneo. Esto al considerar valores de $I = 0.48$ m/día; $K = 128$ m/día; $S = 0.15$; $L = 18.5$ m; $W = 26.75$ m. Las variables anteriores son los factores que intervienen en la formación o extinción del domo subterráneo. En este trabajo se han presentado diversas combinaciones entre los parámetros para mostrar diversas posibilidades de la altura máxima del domo (h_m).

En los últimos 49 años, no obstante el aporte subterráneo del CTA, el nivel freático a descendido 5.19 m, equivalentes a una extracción de 356.84 Mm^3 . Estos resultados indican que, al no aportarse agua por infiltraciones del CTA, los niveles descenderán a una tasa superior a la antes indicada, la cual es de 10.6 cm por año.

La presencia del CTA y el Río Colorado permiten mantener la altura del nivel freático sin modificación en zona próxima a dichas fronteras.

El Río Colorado contribuye generando gradientes hidráulicos subparalelos a este. El valor de la carga hidráulica considerada para el río fue la correspondiente a la altura del nivel freático en las proximidades a este.

En ausencia de aportación del CTA al acuífero y al considerar la presencia del Río Colorado, el gradiente hidráulico toma la dirección este – oeste.

Los actores nacionales que se coordinan con la CILA son diversos, sin manifestarse preeminencia de unos sobre otros, hay una complementariedad acorde a las especialidades de cada actor.

Al considerar los términos del Tratado de Aguas de 1944, en el cual en caso de sequía extrema o problemas en la red de distribución hidráulica de los Estados Unidos, México sufrirá reducciones en la parte proporcional en que los Estados Unidos reduzcan su consumo. Esta situación indica que existe la posibilidad ante un fenómeno meteorológico o de seguridad nacional de los Estados Unidos en que México podría ver reducidos sus volúmenes a cantidades impredecibles. Esto obligaría al país a explotar las aguas subterráneas que, de no haber convenio sobre su uso con los Estados Unidos se podría generar un conflicto con éste por afectaciones entre vecinos conforme a los principios del derecho ambiental.

Otra fuente de acuerdo con los Estados Unidos sobre el agua subterránea es el Tratado de Libre Comercio de América del Norte, el cual al momento no ha sido revisado por ninguna de las partes y, declaraciones recientes indican que México no lo hará, por lo que el asunto del agua en el Valle de Mexicali aún no está resuelto, y demanda la interlocución de agentes sociales que persuadan al Ejecutivo Federal. Entre estos actores se encuentran los usuarios directos del recurso agua en el Distrito de Riego 014.

De las entrevistas realizadas a diferentes actores se desprende lo siguiente (ver anexo 2):

- Opinan que el revestimiento del CTA es un asunto de competencia de los Estados Unidos por encontrarse éste en su territorio. Situación similar sucede en el Valle de Mexicali al estar revestidos los canales derivadores y no quejarse de ello los Estados Unidos.
- No obstante que consideran que el revestimiento del CTA es un asunto de soberanía de los Estados Unidos, el agua que deje de infiltrarse debe ser entregada a México y dispuesta al acueducto Tijuana – San Luis Río Colorado, ya que el agua es de buena calidad en comparación a la del Valle de Mexicali.
- Creen que el gobierno mexicano no ha intervenido en la reclamación de las posibles pérdidas de agua ante el revestimiento del CTA, ya que un grupo de particulares, la Organización de Desarrollo Económico de Mexicali (ODEM), judicializó el problema, poniendo en riesgo las relaciones diplomáticas entre ambos países sobre

este asunto, por lo que consideran prudente que el gobierno mexicano no intervenga de momento.

En México el Ejecutivo Federal ha formulado la política ambiental en relación a las aguas internacionales por la vía administrativa suscribiendo un tratado en la materia con los Estados Unidos que adquiere plena validez al ser ratificado por el Senado. La administración del tratado al haberse formulado por la vía administrativa recae la responsabilidad plena en el Presidente de la República quien es representado por los entes de la administración pública centralizada y paraestatal en la forma que él disponga como la figura de la Comisión Intersecretarial como cabeza se encuentra la CILA. La intervención de los representantes populares: diputados federales o locales, no tienen intervención legal por ser facultad exclusiva del Ejecutivo y, cualquier modificación al tratado será vía el Ejecutivo.

VI.2. Recomendaciones

Profundizar en las funciones de cada actor y su eficacia, eficiencia y efectividad en el logro de los objetivos de la CILA.

Contemplar resultados observacionales y experimentales que se generen sobre los parámetros hidrológicos y series de altura del nivel freático en el código numérico utilizado. Ahora bien, de llegar al conocimiento tridimensional de estos, utilizar esquemas numéricos que contemplen a estos, por ejemplo, el MODFLOW.

Instalar red de pozos de observación de nivel freático en las proximidades a la frontera con los Estados Unidos, ya que es notoria la ausencia de los mismos. Cabe mencionar que en algunas series únicamente se dispuso de nueve datos y, en el mejor de los casos de 27 datos.

De no lograrse un acuerdo en materia de agua subterránea deberán considerarse esquemas de uso consuntivo del agua eficientes.

En Mexicali una de las limitantes que dificultan la gestión del agua subterránea es que la actividad hidroagrícola carece de un sistema de financiamiento que le permita contar con capacitación, asistencia técnica, mantenimiento y conservación de la infraestructura de riego.

Existen también fuertes conflictos entre usuarios agrícolas y urbanos por el uso de los acuíferos. La falta de planificación y de visión a largo plazo ha hecho que la competencia por el agua entre campo y ciudad se incremente.

Otra limitante para la gestión de estas aguas es la falta de conocimiento práctico en la toma de decisiones. El conocimiento actual sobre las aguas subterráneas, sus procesos de extracción y utilización, y su inserción en el ciclo hidrológico es incipiente y se encuentra todavía en proceso de desarrollo. Existe una brecha entre el desarrollo tecnológico y científico y la toma de decisiones. No se utiliza el conocimiento científico alcanzado por las ciencias de la tierra para proponer medidas de cuidado y manejo de las aguas subterráneas. Esta falta de articulación ha ocasionado diversos problemas que requieren una atención especial dado su gran impacto social en el futuro.

De igual forma se tiene la falta de recursos humanos profesionales, lo que origina que las investigaciones en materia de agua subterránea todavía sean insuficientes. Aunado a ello se tiene la falta de recursos económicos para el mantenimiento de monitoreo, la gran dependencia tecnológica y de capacitación en el manejo de los instrumentos de medición, y por ende, la falta de un acuífero instrumentado.

Una limitante más para la gestión de estas aguas subterráneas es que existen contradicciones entre las prácticas que se fomentan por la reglamentación de los derechos de concesión¹⁰ y la necesidad de conservar el recurso. Los productores agrícolas no tienen incentivos para extraer menores volúmenes de agua subterránea, ya que están obligados por ley, a utilizar todo el volumen concesionado; de no hacerlo podrían perder la concesión. Este

¹⁰ Concesión: Título que otorga el Ejecutivo Federal a través de “la Comisión” o del Organismos de Cuenca que corresponda, conforme a sus respectivas competencias, para la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales y de sus bienes públicos inherentes, a las personas físicas o morales de carácter público y privado, excepto los títulos de asignación. Título Primero, artículo 3 de la LAN, (DOF, 29 de abril de 2004).

mecanismo regulatorio no favorece el ahorro: si se economizan ciertos volúmenes pertenecientes a una concesión, la disponibilidad jurídica aumentaría y el dueño original de la concesión la perdería y se volvería a concesionar a otros usuarios. Como resultado se tiene un acuífero sobreexplotado o bien concesionado que exceden la disponibilidad natural.

Para resolver estas limitantes de la gestión se recomienda la realización de un estudio integral sobre el acuífero de Mexicali para el cual se requiere la participación de grupos interdisciplinarios de expertos; el diseño de un plan de ordenamiento del acuífero que determine la temporalidad del uso del agua subterránea; el fortalecimiento de mecanismos que premien el ahorro de agua y el rescate de agua de riego, para extraer menos y no para sembrar cultivos más demandantes de agua; y el desarrollar instrumentos económicos que apoyen la conservación del agua en el uso agrícola.

LITERATURA CITADA

- Anderson, Daniel W., “Saving more than the Salton Sea”, *UC MEXUS News*, number 37, summer 1999.
- Anderson, Mary P. y William W. Woessner, *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*, California, Academic Press, Inc., 1992, pp. 381.
- Barberis, Julio, “The development of international law of transboundary groundwater”, *Natural Resources Journal*, No. 31, 1991, pp. 167 – 186.
- Bernal Rodríguez, Francisco, “El Río Colorado: hacia un desarrollo sustentable?”, *Revista de El Colegio de Sonora*, Hermosillo, Sonora, núm.10, 1995, pp.29 – 70.
- _____, “Retos internacionales para el manejo del agua del bajo río Colorado”, en Cortés Lara, Alfonso, *et. al.* (coord.), *Seguridad, Agua y Desarrollo: el futuro de la frontera México – Estados Unidos*, Tijuana, México, El Colegio de la Frontera Norte, 2005, pp. 365 – 415.
- Boime, Eric, “Water and nation building in the Colorado River Delta”, *ENFOQUE*, Center for U.S.-Mexican Studies, San Diego, University of California, spring/summer 2000.
- Bradley M. Hill, “Use of a numerical model for management of shallow ground-water levels in the Yuma, Arizona area”, *Ground Water*, vol. 34, No. 3, May-June 1996, pp. 397-404.
- Carabias, Julia y Rosalva Landa, “*Agua, medio ambiente y sociedad: hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México*”, 1ra. edición, México, D. F., Universidad Autónoma de México, El Colegio de México, Fundación Gonzalo Río Arronte, 2005, pp. 221.
- Carle, David, *Water and the California dream: choices for the new millennium*, San Francisco, Sierra Club Books, 2000.
- Carslaw H. S. and J. C. Jaeger, *Conduction of heat solids*, first edition 1947, reprinted 1948, Great Britain, Oxford at the Clarendon Press, pp. 386.
- Castany, *Prospección y explotación de las aguas subterráneas*, Barcelona, Ediciones Omega, S. A., 1975.
- Cohen, Michael, “Managing across boundaries: the case of the Colorado River Delta” in Gliick, Peter *et al.*, ed., *The World’s Water*, Washington, Island Press, 2002.
- Colección del Archivo Histórico Diplomático Mexicano, “La salinidad del Río Colorado: Una diferencia internacional”, México, 1975.

Comisión Nacional del Agua (CNA), *Efectos del revestimiento del “Canal Todo Americano” sobre territorio mexicano*, 1991.

_____, *Estadísticas del agua en México*, 2004.

Davis, Martha, “Stepping outside the box: water in southern California”, en Mono Lake Committee, marzo 3, 1998, en <http://www.monolake.org/waterpolicy/outsidebox.htm>, revisado el 4 de marzo de 2008.

De la Peña, A., Comisión Federal de Electricidad, “Resultados de los estudios de nivelación de primer orden realizados en el Valle de Mexicali y en el campo de Cerro Prieto, Baja California”, in United States Department of Energy, sponsor, *Third Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field*, San Francisco, California, Marzo 24-26, 1981, pp. 281-289.

De la Peña I. y F. Llerena, *Manual del uso y manejo del agua de riego*, 3ra. edición, México, Editorial Futura, 2001, pp. 216.

DOF (Diario Oficial de la Federación – México), *Ley de Aguas Nacionales*, Secretaría de Gobernación, 29 de abril de 2004.

Díaz Cabrera, Penélope, “Simulación numérica del acuífero superior del Valle de Mexicali, Baja California, México”, Tesis de grado, México, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, 2001.

Domenico, Patrick and Franklin Schwartz, *Physical and Chemical Hydrogeology*, second edition, New York, John Wiley & Sons, Inc, 1998.

Dutcher, C. L., Hardt, W. F. y W. R. Moyle, “Preliminary appraisal of ground water in storage with reference to geothermal resources in the Imperial Valley area”, *United States Geological Survey circular*, 1972, pp. 57 – 59, 649.

Environmental Protection Agency (EPA) and Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), “US-México Border 2012 Program”, en http://www.epa.gov/border2012/index_esp.htm, consultado el 21 de febrero de 2008.

_____, (EPA), <http://www.epa.gov/>, 2002, consultado en abril de 2008.

Fernández Ruíz, Jorge, *Derecho administrativo y administración pública*, Editorial Porrúa, México, Universidad Autónoma de México, 2006, pp. 660.

Fetter, C. W., *Applied hydrogeology*, third edition, New York, MacMillan College Publishing Company, 1980.

- Finnemore, E. John, "Estimation of ground-water mounding beneath septic drain fields", *Ground Water*, vol. 31, No. 6, november-december 1993.
- _____, "A program to calculate groundwater mound heights", *Ground Water*, vol. 33, No.1, january – february 1995, pp. 139-143.
- Frontera 2012, Programa Ambiental México-EE.UU, consultado en octubre de 2007, http://www.epa.gov/usmexicoborder/index_esp.htm,
- García Acevedo, María Rosa y Helen Ingram, "Conflict in the borderlands" en North American Congress on Latin America (NACLA), *Report on the Americas*, vol. 38. No.1, july-august 2004, en <http://www.nacla.org/>, consultado el 16 de junio de 2008.
- Gradsteyn, I. S. y I. M. Ryzhik, "Table of integrals, series and products, corrected and enlarged edition, Academic Press, Inc., 1980, pp. 299.
- Hantush, Mahdi S., "Growth and decay of groundwater-mounds in response to uniform percolation", *Water Resources Research*, first quarter 1967a, vol. 3. No. 1, pp. 227-234.
- _____, "Depletion of flow in right-angle stream bends by steady wells", *Water Resources Research*, first quarter 1967b, vol. 3, No. 1, pp. 235-240.
- Healy, Richard W. y Cook, Peter G., "Using groundwater levels to estimate recharge", US Geological Survey, Colorado, USA, *Hydrogeology Journal*, 2002, 10:91-109.
- Herrera Barrientos, Jaime, Norzagaray Campos, M., García Saillé, Gerardo, Cortés Lara, Alfonso y Doris Jorquera Flores, "Fluctuaciones en la calidad y nivel freático del agua subterránea en las proximidades al Canal Todo Americano, porción mexicana", en Sánchez Munguía, Vicente, coord., *El revestimiento del Canal Todo Americano: ¿competencia o cooperación por el agua en la frontera México - Estados Unidos?*, Tijuana, El Colegio de la Frontera Norte, Plaza y Valdés Editores, 2004, pp. 57-76.
- Hornbeck, Robert W., *Numerical Methods*, New York, Quantum Publishers, Inc., 1975, pp.310.
- Hundley, Norris Jr., *The Great Thirst: californians and water - a history*, revised edition, Berkeley, University of California Press, 2001.
- Imperial Irrigation Distric (IID), <http://www.iid.com/>, consultado en enero de 2008.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), "Estudio hidrológico del estado de Baja California", reporte, México, 1995, pp. 180.

- López Sela, Pedro Luis y Alejandro Ferro Negrete, *Derecho ambiental*, Colección textos jurídicos, México, IURE Editores, 2006.
- Luecke, Daniel F. *et al.*, *A Delta Once More: Restoring riparian and wetland habitat in the Colorado River Delta*, Washington, Environmental Defense Fund Publications, 1999.
- Morineau, Marta, *Una Introducción al Common Law*, serie estudios jurídicos, núm. 4, México, Universidad Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Jurídicas, 2001.
- Mumme, Stephen Paul, *Apportioning groundwater beneath the US-Mexico Border*, La Jolla, California, Center for US-Mexican Studies, University of California, 1988, pp. 54.
- _____ y Christopher Brown, “Decentralizing water policy on the U.S.-Mexico Border”, in *Protecting a Sacred Gift: Water and social change in México*, in Whiteford, Scott and Roberto Melville, editors, San Diego, Center for US-Mexican Studies at the University of California, 2002.
- _____ y Donna Lybecker, “El Canal Todo Americano: Perspectivas de la posibilidad de alcanzar un acuerdo bilateral”, en Sánchez Munguía, Vicente, coord., *El revestimiento del Canal Todo Americano: ¿competencia o cooperación por el agua en la frontera México-Estados Unidos?*, Tijuana, El Colegio de la Frontera Norte, Plaza y Valdés Editores, 2004, pp. 217-245.
- _____ , “La Comisión Internacional de Límites y Aguas, los Estados Unidos y México, La protección del ambiente en la frontera entre los Estados Unidos y México”, en Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM, *Revista de la Facultad de Derecho de México*, núm. 142-144, julio – diciembre, 1985, pp. 627-646, en <http://www.juridicas.unam.mx/publica/librev/rev/facdermx/cont/142/dtr/dtr9.pdf>, revisado el 20 de julio de 2008.
- Nitze, William, “Meeting the water needs of the border region: A growing challenge for the United States and México”, at *The US-Mexican Border Environment, Binational Water Management Planning*, monograph series, No.8, San Diego, Southwest Center for Environmental Research and Policy (SCERP), 2003.
- Papadopoulos, Istavros S. and Hilton H. Cooper, Jr., “Drawdown in a well of large diameter”, *Water Resources Research*, first quarter 1967, vol. 3, No. 1, pp. 241-244.
- Porrúa Pérez, Francisco, *Teoría del Estado*, cuadragésima edición, México, Editorial Porrúa, 2006.
- Prickett and Lonquist, *Selected digital computer techniques for groundwater resource evaluation*, bulletin 55, Urbana, Illinois State Water Survey, 1971.

- Programa Estatal Hidráulico 2003-2007, (P.E.H.), Comisión Estatal del Agua, Secretaría de Infraestructura y Desarrollo Urbano, Baja California, Septiembre de 2003, pp.126.
- San Diego County Water Authority www.sdcwa.org, consultado en junio de 2008
- Sánchez Munguía, Vicente, coord., *El revestimiento del Canal Todo Americano, ¿competencia o cooperación por el agua en la frontera México-Estados Unidos?*, Tijuana, El Colegio de la Frontera Norte, Plaza y Valdés Editores, 2004, pp. 296.
- Sánchez R., J. y A. de la Peña L., *Geohidrología del acuífero geotérmico de Cerro Prieto*, Comisión Federal de Electricidad, Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto, Mexicali, Baja California, 1981, pp. 309-323.
- Sánchez Rodríguez, Lauro y Alejandro Velázquez Monter, “Actualización del estudio geohidrológico del Valle de Mexicali, Baja California”, Tesis profesional, Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Irrigación, México, 1989, pp. 125.
- Secretaría de Gobernación (SEGOB), Respuesta al oficio SEL/300/505/07 en relación al Canal Todo Americano, México, D. F., marzo 06 de 2007. Consultado en <http://sil.gobernacion.gob.mx>, en mayo de 2008.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), *La Gestión Ambiental en México*, México, 2006.
- Servicio Geológico, *Teoría básica de modelos análogos y digitales de acuíferos: para la explotación y administración de recursos hidráulicos subterráneos*, boletín núm. 37, Octubre de 1972.
- Tena Ramírez, Felipe, *Derecho Constitucional Mexicano*, trigésima octava edición, México, Editorial Porrúa, 2006.
- Towmey, S., *Introduction to the mathematics of inversion in remote sensings and indirect measurements*, New York, Elsevier Scientific Publishing Company, 1977, pp. 243.
- U.S. Geological Survey (USGS, internet), <http://www.usgs.gov/>, consultado desde enero de 2008.
- United States Department of the Interior (USDI), Bureau of Reclamation, Imperial Irrigation District, “Final Environmental Impacts Statement / Final environmental impact report”, *All-American Canal lining project*, Imperial County, California, March 1994.
- Van Schoick, Rick, Executive Summary: “Opportunities, costs, benefits and unintended consequences: Secure and sustainable water by 2020”, at *The US-Mexican Border Environment, Binational Water Management Planning*, monograph series, No.8, San Diego, Southwest Center for Environmental Research and Policy (SCERP), 2003.

Venegas Cardoso, Francisco Raúl, “El Río Colorado: características físicas y biológicas”, en Sánchez Munguía, Vicente, coord., *El revestimiento del Canal Todo Americano, ¿competencia o cooperación por el agua en la frontera México-Estados Unidos?* Tijuana, El Colegio de la Frontera Norte, Plaza y Valdés Editores, 2004, pp. 27-55.

Villanueva Martínez, Manuel y Alfredo Iglesias López, “Pozos y acuíferos: técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo”, Madrid, Instituto Geológico y Minero de España, 1984, pp. 426.