

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

IV.1. Disponibilidad de Agua en el Mundo

Un 70% de la superficie terrestre es agua, estimándose un volumen total de 1.358 millones de km³. La mayor parte de esta agua es oceánica (97.24%) y el resto se encuentra en su mayoría en forma de casquetes de hielo y glaciares (Tabla 1). Por consiguiente, la fuente de agua dulce más accesible para la humanidad, en su mayoría agua subterránea, representa tan sólo un porcentaje muy pequeño de su totalidad (<http://www.gah.usgs.gov/edu/earthwherewater.html>).

La distribución de agua en el mundo es desigual. Los volúmenes más grandes de agua se localizan en Asia y Sudamérica y los menores se encuentran en Europa y Australia - Oceanía (Tabla 2). Sin embargo, su disponibilidad no está representada por valores de volumen, sino que se determina dividiendo el volumen de agua por la población, o por el área. Debido al rápido crecimiento demográfico entre 1970 y 1994, la disponibilidad de agua en el mundo disminuyó de 12,900 a 7,600 m³ por persona y se predice que para el año 2025 (Fig. 1), la mayor parte de la población de la Tierra vivirá bajo condiciones bajas o catastróficamente bajas de disponibilidad de agua (Shiklomanov, 2000).

Los expertos establecieron el nivel de la necesidad básica de agua, igual a 50 litros per cápita y por día; para consumo de agua de beber, saneamiento, higiene personal, cocción de alimentos y necesidades de cocina (Gleick, 1999). En este estándar mínimo no se toman en cuenta otros usos del agua que también son necesarios, para la agricultura, la protección de los ecosistemas y la industria. Un estándar de consumo de 100 litros por persona y por día reflejaría estas necesidades adicionales. En el año 2000, había 80 países con 3,750 millones de personas, por debajo de este nivel.

Tabla 1. Distribución del agua en el mundo

Fuente de Agua	Volumen de Agua (km ³)	Porcentaje
Océanos	1.32×10^9	97.24
Casquetes de hielo, glaciares	2.91×10^7	2.14
Agua subterránea	8.33×10^6	0.61
Lagos de agua dulce	1.24×10^5	0.009
Lagos de agua salada	1.04×10^5	0.008
Humedad del suelo	6.66×10^4	0.005
Atmósfera	1.29×10^4	0.001
Ríos	1.25×10^3	0.0001
Volumen Total de Agua	1358×10^6	100

Fuente: Nace, (1967) citado en <http://www.gah.usgs.gov/edu/earthwherewater.html>

Tabla 2. Disponibilidad de agua por continentes

Continente	Área (x10 ⁶ km ²)	Habitantes (millones) (1994)	Recurso Agua (km ³ /año)			c.v. ¹	Disponibilidad de agua potencial (1000m ³ /año)	
			Promedio	Máx.	Mín.		Por 1 km ²	Por cápita
Europa	10.46	685	2,900	3,410	2,254	0.08	277	4.23
Norte América	24.3	453	7,890	8,917	6,895	0.06	324	17.4
África	30.1	708	4,050	5,082	3,073	0.10	134	5.72
Asia	43.5	3,445	13,510	15,008	11,800	0.06	311	3.92
Sudamérica	17.9	315	12,030	14,350	10,320	0.07	672	38.2
Australia y Oceanía	8.95	28.7	2,400	2,880	1,891	0.10	269	83.7
El mundo	135	5633	42,780	44,750	39,780	0.03	316	7.60

Fuente: Shiklomanov, (2000)

¹ c.v. = coeficiente de variación

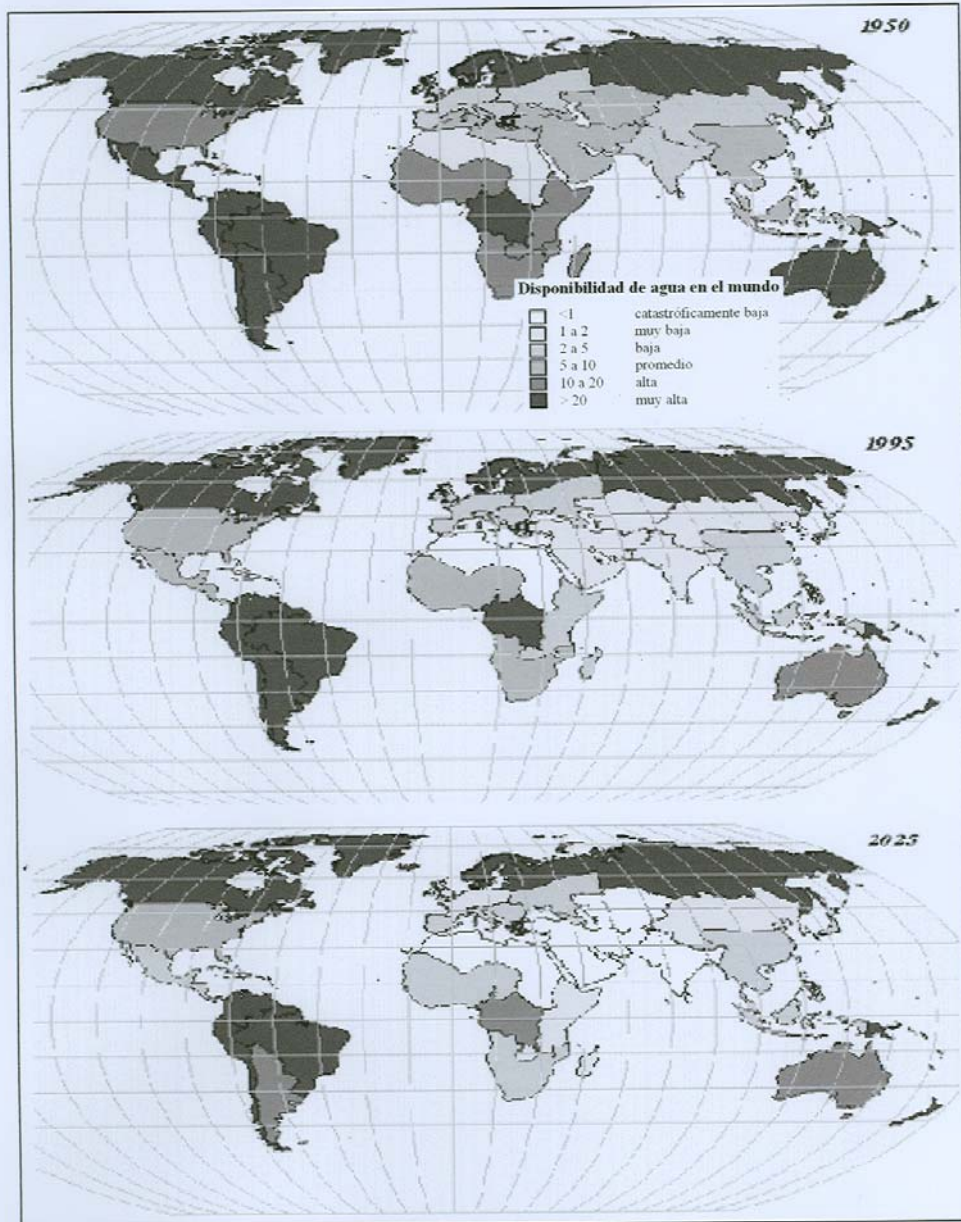


Figura 1. Disponibilidad de agua en el mundo en diferentes años

Fuente: Shiklomanov, (2000)

IV.2. Recursos Hídricos Transfronterizos

La disponibilidad del agua, es entonces una de las mayores preocupaciones a nivel mundial. Así como también es un factor que puede provocar crisis, la cual ya se presenta en algunos países. Tal es el caso de Palestina, país que experimenta una severa crisis de agua causada principalmente por la falta de control sobre el recurso. En general, gran parte de los recursos hídricos en el medio oriente y particularmente en Palestina, son transfronterizos y aún no se han definido arreglos finales en la localización y distribución justa de los recursos de agua entre Palestinos e Israelíes (Abu Zahra, 2001). En la actualidad el consumo de agua per cápita promedio por la población Palestina es aproximadamente 55 litros por día, o 55% del estándar mínimo de la Organización Mundial de la Salud (100 litros por día) y su disponibilidad de agua per cápita promedio es de 105 m³, siendo la menor en el mundo.

El tema de los recursos hidráulicos es difícil de abordar en las zonas fronterizas, como un todo integrado, porque la región está dividida por áreas independientes tanto hidrológica como políticamente.

En la zona fronteriza entre México y Estados Unidos, la escasez de agua es una de las preocupaciones más apremiantes. Esta región es principalmente árida o semiárida, por lo que sufre carencia crónica de agua, a pesar de que varios ríos atraviesan la zona y de la existencia de mantos acuíferos. A menudo, la explotación del recurso supera la capacidad de renovación natural y la mayoría de las fuentes de agua superficial son explotadas al máximo. Por ejemplo, Ciudad Juárez/El Paso, desde un punto de vista sustentable, sólo podría abastecer una décima parte de su población actual. Las dos principales vertientes de la región son el Río Colorado y el Río Bravo/Río Grande, abarcando parte de los dos países.

En 1995, la escasez de agua en el norte de México causada por una sequía cíclica diezmó ganado y cosechas, además de que mató peces y vida marina por el aumento de salinidad del río. Esta sequía fue tan severa que México agotó 95 por ciento de la reserva acuífera que le fue asignada en 1944 a través de un tratado con Estados Unidos relacionado con el uso de aguas internacionales. Por esta razón, en mayo de 1995 el gobierno de México solicitó un préstamo de 2.8 millones de metros cúbicos de agua a Estados Unidos provenientes del Río Bravo.

El pago de esta deuda se ha convertido en una fuente de tensiones entre los gobiernos de los dos países. México necesita toda el agua de la que dispone para librar una de las peores sequías que el país haya experimentado en los últimos 50 años, la cual tuvo efectos devastadores en doce estados, incluyendo los estados fronterizos de Tamaulipas, Coahuila y Chihuahua. Este ejemplo ilustra la importancia política de los asuntos relacionados con el uso de aguas internacionales y la necesidad de acuerdos referentes al manejo y la asignación de fuentes de agua subterránea a lo largo de la frontera con Estados Unidos, ya que actualmente no existe ningún tratado que rija la distribución de agua de los mantos acuíferos binacionales (Treat, 2001).

Además, la falta de un inventario básico y de un monitoreo de información sobre recursos acuíferos de la frontera y de los ambientes que dependen del agua, no permite tener un conocimiento general de los recursos del agua y de los recursos naturales regionales. La carencia de información cuantitativa acerca de la recarga natural y sobre las posibles limitaciones de los recursos hidráulicos terrestres, deja incertidumbre sobre el futuro de dichos recursos.

IV.3. El Agua en México

La autoridad y administración en materia de aguas nacionales y de sus bienes públicos inherentes corresponde al Ejecutivo Federal, la cuál es ejercida directamente por la Comisión Nacional del Agua (CNA), que es un organismo creado el 16 de enero de 1989. Este organismo ha definido 13 regiones hidrológicas administrativas como unidades geográficas para la planeación hidráulica. La información hidrológica y de calidad del agua está agrupada sobre la base de 37 regiones hidrológicas. La regionalización fue elaborada en los años 60 por la entonces Dirección de Hidrología de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (CNA, 2002).

IV.3.1. Disponibilidad anual por habitante

Basándose en los datos del balance hidrológico nacional (Tabla 3), se estimó la disponibilidad natural media por habitante (suma del escurrimiento superficial más la recarga de aguas subterráneas dividido por 97.5 millones de habitantes en el 2000), dando un resultado de $4,841 \text{ m}^3/\text{año}$ (CNA, 2002). El escurrimiento superficial virgen medio se calculó considerando una importación de 48 km^3 provenientes de Guatemala y 1.8 km^3 del Río Colorado, además de una deducción de 0.44 km^3 por exportaciones hacia Estados Unidos de Norte América, entregados en el Río Bravo.

IV.3.2. Usos del agua

La Tabla 4 proporciona datos estimados de extracción de agua en el año 2000, destinada para usos consuntivos en México. Además se evaporan $9 \text{ km}^3/\text{año}$ en las principales presas y lagos del país. En el año 2000, el volumen de concesión utilizado en hidroeléctricas, fue de 143.3 km^3 . Este uso es considerado no consuntivo (CNA, 2002).

Tabla 3. Balance hidrológico en México

Componente del Ciclo Hidrológico	Caudal (km ³ /año)
Precipitación media histórica 1941-2000 (772 mm)	1 528
Evapotranspiración media	1 106
Escurrimiento superficial virgen medio	397
Recarga media de acuíferos	75

Fuente: CNA, (2002)

Tabla 4. Usos consuntivos del agua

Uso	Origen		Volumen Total (km ³)	Porcentaje de la extracción
	Superficial (km ³)	Subterráneo (km ³)		
Agrícola ¹	37.0	19.2	56.2	77.8
Público urbano	2.6	5.7	8.3	11.5
Industrial ²	2.5	3.6	6.1	8.5
Pecuario	1.6	0.0	1.6	2.2
Total	43.7	28.5	72.2	100.0

Fuente: CNA, (2002)

¹ El volumen de extracción de agua para Distritos de Riego en el ciclo 1999-2000 fue de 27829 Mm³.² Incluye industria autoabastecida, industria conectada a la red y termoeléctricas, excepto las de Petacalco y Dos Bocas.

IV.3.3. Agua subterránea

Del total de agua subterránea extraída anualmente, la mayor parte está destinada para uso agrícola (Tabla 4). Ésta es utilizada para el riego de una tercera parte de la superficie total regada, debido a su seguridad y flexibilidad de uso (CNA, 2002). Asimismo, aproximadamente el 70% del volumen de agua que se suministra a las ciudades proviene del subsuelo, con lo que se abastecen aproximadamente 75 millones de personas (55 millones de los mayores centros urbanos y 20 millones del medio rural).

IV.3.4. Acuíferos sobreexplotados

El problema de sobreexplotación en México es cada vez más grave. De un total de 653 acuíferos, en 1975 eran 32 los que se encontraban sobreexplotados, el número se elevó a 36 en 1981, a 80 en 1985 y a 96 en el 2000 (Fig. 2). Estos acuíferos suministran cerca del 50% de la extracción anual para todos los usos. Aunque de acuerdo al balance nacional de agua subterránea, la extracción equivale apenas a un 38% de la recarga, en regiones áridas del país el balance es negativo, minando el recurso a un ritmo de 8 km³/año. En cambio, en las porciones más lluviosas del país, de menor desarrollo, fluyen importantes cantidades de agua del subsuelo sin aprovechamiento (CNA, 2002).

Por otra parte, el desarrollo futuro de las regiones afectadas por la sobreexplotación de acuíferos es limitado y será más grave si persiste la tendencia climática de los últimos años, caracterizada por condiciones extremas que incluyen sequías severas, prolongadas y frecuentes, que tienen un impacto negativo sobre la disponibilidad de agua superficial y la recarga de los acuíferos.

Asimismo, el rápido aumento de demanda de agua en las ciudades ha generado serios problemas de sobreexplotación. En ocasiones, esta situación se agrava por la ocurrencia de asentamientos diferenciales y agrietamiento del terreno, que a su vez provocan daños en la infraestructura urbana.

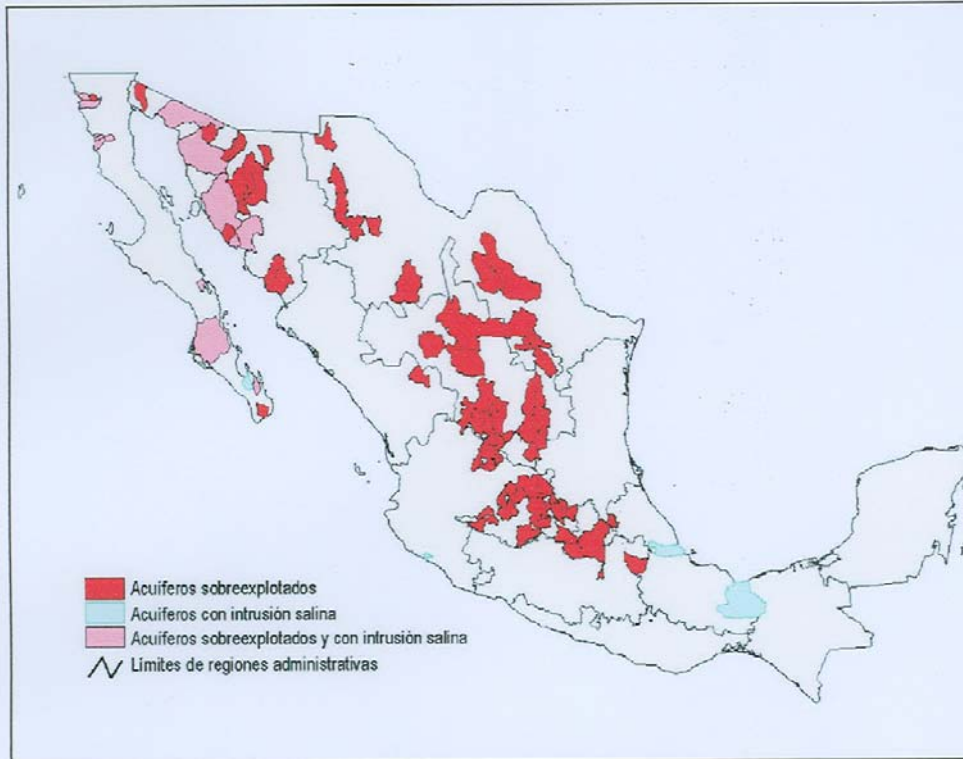


Figura 2. Acuíferos sobreexplotados en México

Fuente: CNA, (2002)

Entre los efectos perjudiciales causados por la sobreexplotación de acuíferos está el grave impacto ecológico irreversible (agotamiento de manantiales, desaparición de lagos y humedales, reducción de los caudales base de los ríos, eliminación de la vegetación nativa y pérdida de ecosistemas). Además, se reducen los volúmenes de infiltración por la pérdida de zonas de recarga a causa de la deforestación y los cambios de uso de suelo, provocando junto con la extracción excesiva el aumento de presión sobre los acuíferos.

Otro efecto perjudicial es el deterioro de la calidad del agua, principalmente por intrusión salina en los acuíferos costeros y la migración de agua fósil de mala calidad en las ciudades y zonas agrícolas que generan contaminación. En México, la intrusión salina se encuentra presente en 18 acuíferos ubicados en los estados de Baja California, Baja California Sur, Colima, Sonora y Veracruz.

Por otra parte, la sobreexplotación encarece la producción de muchos cultivos tradicionales, debido a que en varias zonas de riego los niveles del agua subterránea se han abatido decenas de metros, elevando el costo de extracción, ya que se requieren equipos más potentes con un mayor consumo de energía (CNA, 2002).

Otro efecto negativo es el de subsidencia o colapso de terrenos, como consecuencia de los cambios en el estado tensional del terreno, originados por la extracción del agua, tal como está sucediendo en la Cuenca del Valle de México (<http://lanic.utexas.edu/la/Mexico/water/libro.html>). Así como también impactos ecológicos en los ecosistemas fluviales, ya que el descenso de niveles piezométricos puede implicar la reducción o anulación del flujo superficial, disminuyendo la humedad del suelo, lo que causará afecciones a la vegetación freatofítica, que puede desaparecer, y con ella todo el ecosistema asociado, pudiendo incluso producirse cambios microclimáticos al variar la evapotranspiración (www.citop.es/cimbra/337/art337_3.htm).

Sin embargo, la sobreexplotación de acuíferos también puede ser un hecho planificado. Frecuentemente, se realiza por motivos socioeconómicos, como una fuente alternativa de suministro de agua en espera de la llegada del abastecimiento definitivo, en épocas de sequía, en el desarrollo de zonas deprimidas, entre otros. En este caso, también se planea la recuperación del acuífero dentro de un esquema de optimización de recursos.

La sobreexplotación de acuíferos no debe ser siempre dramatizada pues está aceptado universalmente que cierto nivel de sobreexplotación es económicamente lógico y es totalmente factible desde un punto de vista técnico. Puede mencionarse un caso reciente, como el de la isla de Mallorca, España, donde las explotaciones de agua subterránea desde 1980 produjeron un descenso anual considerable de los niveles de los acuíferos más utilizados. Sin embargo, las lluvias extraordinarias de 1986, un año especialmente húmedo, compensaron de una vez el déficit acumulado en los pasados cinco años y los niveles se recuperaron en el plazo de meses, volviendo a un estado similar al de 1980 (Navarro-Alvargonzález y col. 1993).

IV.4. Región Administrativa II Noroeste

La Región II Noroeste tiene una superficie de 216 000 km² (10.8 % del territorio nacional), correspondientes a 72 municipios en el estado de Sonora y 7 en el estado de Chihuahua. Los climas predominantes en la región son de carácter seco y semiseco. La población ascendió a 2.3 millones de habitantes en el año 2000, siendo urbana el 81% del total. Se estima que para el año 2025 la población alcanzará los 2.9 millones de habitantes, ubicándose el 84% en zonas urbanas (CNA, 2001).

En esta región ocurre una precipitación media anual de 476 mm, con una clara zonificación: en las subregiones Sonoíta y Concepción la media es de sólo 200 mm, mientras que en las subregiones Sonora, Yaqui y Mayo se eleva a 500 mm.

Se estima que el escurrimiento natural medio en la región es de 5500 Mm³/año, provenientes en su mayoría de los Ríos Yaqui y Mayo. En esta región se han construido 27 presas de almacenamiento, contando con una capacidad de regulación de 9 300 Mm³. La recarga media regional es de 2 500 Mm³ /año. Los datos estimados de extracción de agua para 1999 se muestran en la Tabla 5. Basándose en los datos de extracción, resulta evidente que el mayor volumen de agua es utilizado en la agricultura, siendo el 69% de origen superficial y el resto de origen subterráneo.

En la región existen 47 sistemas acuíferos, de los cuales 19 se encuentran en estado de equilibrio, 13 están subexplotados y 15 se encuentran en condiciones de sobreexplotación. De los acuíferos sobreexplotados, los que registran el mayor grado de afectación son los de Guaymas, Costa de Hermosillo, Sahuaral y Caborca; en los dos primeros existe también el problema de intrusión salina (CNA, 2001).

IV.5. Acuífero de la Cuenca del Río Santa Cruz

El valle del Río Santa Cruz está dentro de la región hidrológica 7, Río Colorado y se encuentra limitado hacia el oriente por la sierra El Chivato y hacia el occidente por la sierra El Pinito. Presenta en su parte central una unidad impermeable constituida por la sierra San Antonio, la cual permite que el valle tenga continuidad, únicamente por el extremo sur (INEGI, 1993).

El acuífero se considera del tipo libre y localmente semiconfinado. El acuífero en explotación está representado por depósitos aluviales recientes (gravas y arenas, principalmente) localizados en los cauces y zonas de inundación de los ríos y arroyos. Estos materiales sobreyacen a sedimentos terciarios, constituidos por la estratificación de gravas, arenas y arcillas, que por su alta permeabilidad presentan buenas posibilidades acuíferas, y los cuales se encuentran aflorando en todo el valle del Río Santa Cruz.

Tabla 5. Extracciones en la región noroeste de México

Uso	Extracción (km ³)	Porcentaje de extracción
Uso agrícola	6 956	94.17
Uso industrial	377	5.10
Uso público	54	0.73
Extracción bruta total	7 387	100.00

Fuente: CNA, (2001)

El Río Santa Cruz nace en el Valle de San Rafael situado al sureste de Arizona, fluye hacia el sur, haciendo un recorrido de aproximadamente 60 km en el estado de Sonora, México, para después regresar a territorio estadounidense al este de Nogales. El río es de régimen intermitente hasta los límites del condado Santa Cruz, fluyendo hacia el norte de Tucson, Arizona, hasta juntarse con el Río Gila al suroeste de Phoenix, Arizona. La altitud máxima corresponde a la Sierra San Antonio, con 2100 msnm hasta la cota de 1300 msnm en el límite sur de la cuenca. El cauce del río tiene una altura de 1400 msnm en su entrada a México y una altura mínima de 1140 msnm a la salida hacia Estados Unidos, con una pendiente del terreno aproximadamente igual a 0.485% (Cervera-Gómez, 1995).

De acuerdo a INEGI (1993), se considera que la extracción media anual en el área (26 millones de m³) es prácticamente de igual magnitud que la recarga (25.6 Mm³), por lo que se supone que su condición hidrológica está equilibrada, sin embargo no se muestra un sustento técnico para tales consideraciones.

El incremento de la población y de las actividades económicas en Nogales, Arizona y Nogales, Sonora, traerá como consecuencia una mayor demanda de agua y una mayor explotación del manto acuífero del Río Santa Cruz, que es la principal fuente de abastecimiento de la zona, acelerando el deterioro de las condiciones ambientales de los ecosistemas ribereños.

En la actualidad, existen problemas de suministro de agua y de aguas residuales en la zona. Por esta razón, la legislatura de Estados Unidos de Norte América definió un Área de Manejo Activo en Santa Cruz (Santa Cruz AMA o SCAMA por sus siglas en inglés), en el año 1994. Las metas de dirección establecidas para esta área consistieron en la conservación de las condiciones de seguridad y rendimiento del AMA, y la prevención de la ocurrencia de descensos en los niveles freáticos locales, a largo plazo. Además, notó la naturaleza internacional de los problemas del manejo del agua y vio la necesidad de una dirección coordinada entre el agua superficial y subterránea (Nelson y Erwin, 2001).

En el año 1996, el Departamento del Recurso Agua en Arizona (ADWR), desarrolló un programa de monitoreo de agua subterránea y superficial para SCAMA, con el propósito de proporcionar los datos hidrológicos necesarios para determinar si se estaba manteniendo a largo plazo la meta de dirección referida a seguridad y rendimiento del AMA. El análisis de los datos incluyó la caracterización de la interacción agua superficial-agua subterránea y la naturaleza estacional del proceso hidrológico de la cuenca. Este programa de monitoreo consistió originalmente en la medición trimestral de flujo de agua superficial y mediciones de agua subterránea anuales, así como la colección de otros datos hidrológicos relacionados. A partir del otoño de 1997, se incluyeron medidas mensuales de los niveles del agua subterránea y del flujo de agua superficial.

IV.5.1. Mediciones de nivel de agua subterránea

La profundidad del nivel estático en la parte americana de la cuenca se mide mensualmente en 12 pozos, localizados dentro de la porción denominada por ADWR como Joven Aluvión (YA1) del Río Santa Cruz, y en pozos que producen el agua del Viejo Aluvión (OA1), aunque con menos frecuencia ya que la velocidad de cambio en los niveles de agua de estos pozos es menor.

En la actualidad, también se mide el nivel de agua en seis pozos localizados corriente arriba de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Nogales Internacional (NIWTP por sus siglas en inglés) y 6 pozos localizados corriente abajo del NIWTP, que es la porción dominada por el efluente del Río Santa Cruz.

Además para registrar cambios continuos, se instalaron 7 transductores de presión (Tabla 6) en áreas críticas donde los niveles del agua subterránea cambian rápidamente en respuesta al bombeo, flujos de agua superficial y demandas riparianas. Todas estas mediciones están disponibles en la base de datos de ADWR (2001).

Por otra parte, a partir de febrero de 2000, la Universidad de Sonora por conducto del Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, ha realizado trimestralmente mediciones del nivel de agua en 11 pozos ubicados en el YAI en Sonora, México, desde San Lázaro, hacia la Frontera Internacional. De tal manera, que en el periodo de octubre de 1997 a junio de 2001, se colectaron más de 1000 niveles de agua subterránea en el AMA y en la subcuenca superior del Río Santa Cruz, en el estado de Sonora, México. La Tabla 7 lista los sitios de monitoreo de agua subterránea, mostrados en las Figs. 3 y 4.

IV.5.2. Mediciones de flujo de agua superficial

El ADWR mide cada mes, la velocidad de flujo de agua superficial, en 7 sitios a lo largo de la porción dominada por el efluente del Río Santa Cruz, y en 4 sitios en el área de la subcuenca cuando el flujo existe. Además, la Universidad de Sonora lleva a cabo mediciones trimestrales en 6 sitios de México cerca de San Lázaro hacia la Frontera Internacional. También se registraron cientos de medidas de flujo a lo largo de algunas secciones del Río Santa Cruz, sobre y debajo de los puntos de descarga del efluente de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Nogales Internacional, la cual comenzó a operar desde su ubicación actual en diciembre de 1971.

Las medidas del flujo concordaron con los registros continuos del United States Geological Survey (USGS), que se realizan a través de dos aparatos de medición, uno cerca de Nogales y otro en Tubac. Los datos de descarga del USGS son reunidos y transmitidos vía satélite, permitiendo el cálculo de la descarga media diaria. Los datos en tiempo real también se pueden acceder vía internet en el sitio del USGS. La Tabla 8 lista los sitios de medición de flujo superficial, mostrados en las Figs. 3 y 4.

Tabla 6. Localización de los transductores de presión en el Área de Manejo Activo Santa Cruz

Localización	Identificación local	Dueño del Pozo	Rango de profundidad del agua aproximado (pies)	Periodo de Registro
Potrero Canyon (G12)	(D-24-13)01bbb	Ciudad de Nogales	175-190	02/04/98 - 27/05/98
Meadow Hills (G8)	(D-23-13)36bdd	Ciudad de Nogales	145-160	16/06/98 - presente (registro intermitente)
Potrero South (G10)	(D-24-13)01dbd	ADWR/SCAMA	240-245	14/07/99 - presente
Kino Springs (G9)	(D-23-15)31cac	Ciudad de Nogales	10-40	18/07/00 - presente
Río Rico (G4)	(D-23-13)01bbd	Propiedades de Río Rico	10-30	18/07/00 - presente
Highway 82 Bridge (G7)	(D-23-14)36bcb1	Ciudad de Nogales	10-65	19/07/00 - presente
Elephant Head Bridge (G1)	(D-19-13)29bcc	Green Valley Water Co.	35-50	26/07/00 - presente

Fuente: Nelson y Erwin, (2001)

Tabla 7. Sitios de medición de nivel de agua subterránea

Sitio en el Mapa	Descripción de la Localización del Pozo	País de ubicación	Número de Registro ADWR ¹	Localización Catastral	UTM ² m Este	UTM ² m Norte
G1	Elephant Head	E.U.A.	55-623122	(D-19-13)29bbc	495869	3512355
G2	Amado	E.U.A.	55-617275	(D-20-13)07acd	495367	3507429
G3	Santa Gertrudis cerca de Tumacacori	E.U.A.		(D-21-13)30dca	495361	3492467
G4	Rio Rico	E.U.A.		(D-23-13)bbd no estudiado	205824	3480521
G5	Santa Fe	E.U.A.	55-619646	(D-23-14)27add	510325	347353
G6	Adrians Well	E.U.A.		(D-23-14)25cdb	512412	3473263
G7	Gallery	E.U.A.	55-603439	(D-23-14)36bcb1	511964	3472400
G8	Meadow Hills	E.U.A.	55-506340	(D-23-13)36bdd	503011	3472147
G9	CIT	E.U.A.	55-625359	(D-23-15)31cac	514025	3471849
G10	Potrero Well	E.U.A.	55-619171	(D-24-13)01bbb	502245	2471223
G11	Kino Springs	E.U.A.		(D-24-13)06aad	514977	3470988
G12	Potrero South	E.U.A.	55-571751	(D-24-13)01dbd	503276	3470177
G13	Buena Vista	E.U.A.		(D-24-15)18bad no estudiado	514295	3467662
G14	Helicopter Well	México			514655	3465517
G15	Mascareñas	México			515655	3464450
G16	La Laguna	México			519146	3460352
G17	Santa Bárbara	México			521205	3456973
G18	Los Picos	México			523539	3451889
G19	Paredes Solar	México			526538	3448301
G20	River Bend AG	México			528940	3446050
G21	River Bend WM	México			528914	3445927
G22	El Silo	México			531297	3445786
G23	San Lázaro	México			534582	3445174
G24	OAI Well	México			528154	3444013

Fuente: Nelson y Erwin, (2001)

¹ADWR=Arizona Department of Water Resources; ²UTM=Sistema de coordenadas "Universal Transverse Mercator"

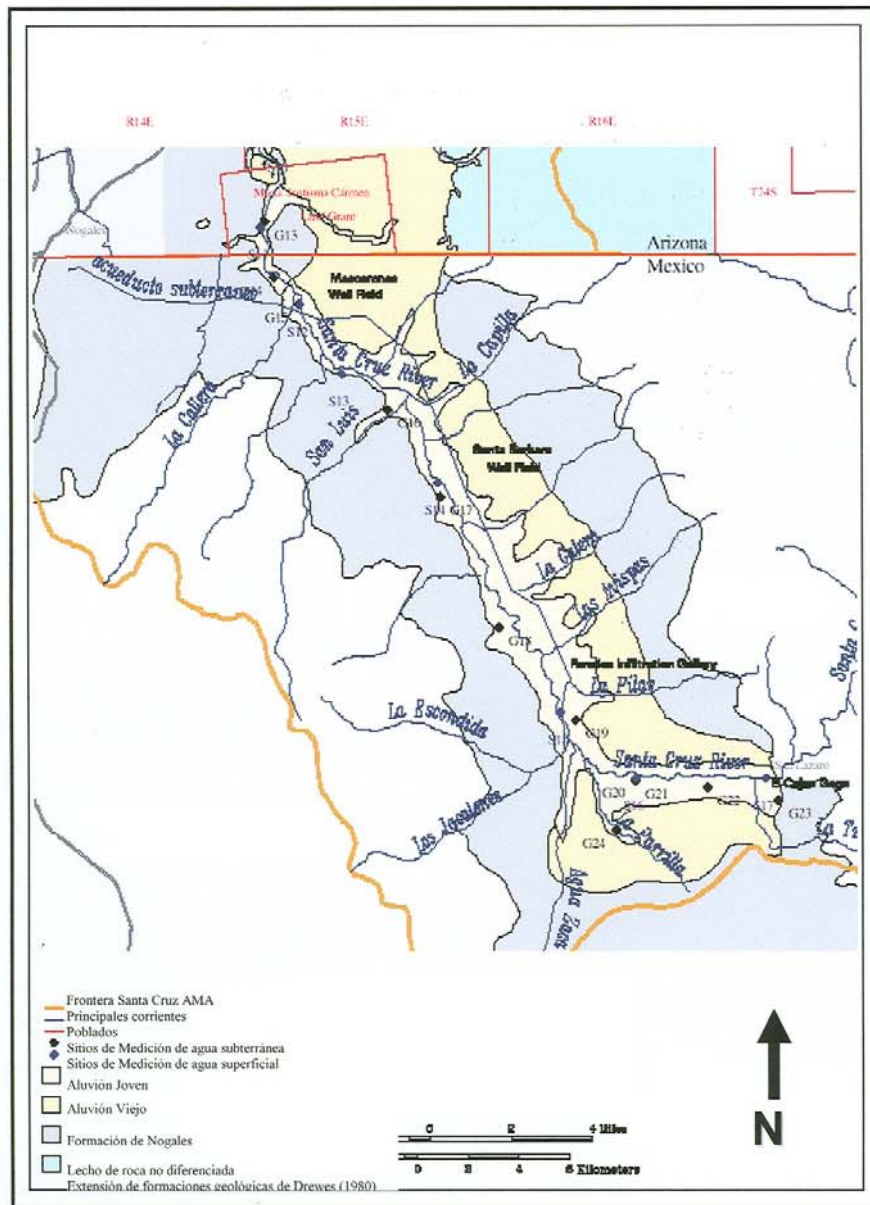


Figura 3. Sitios de medición de agua superficial y subterránea en la Cuenca del Río Santa Cruz, Sonora, México
 Fuente: Nelson y Erwin, (2001)

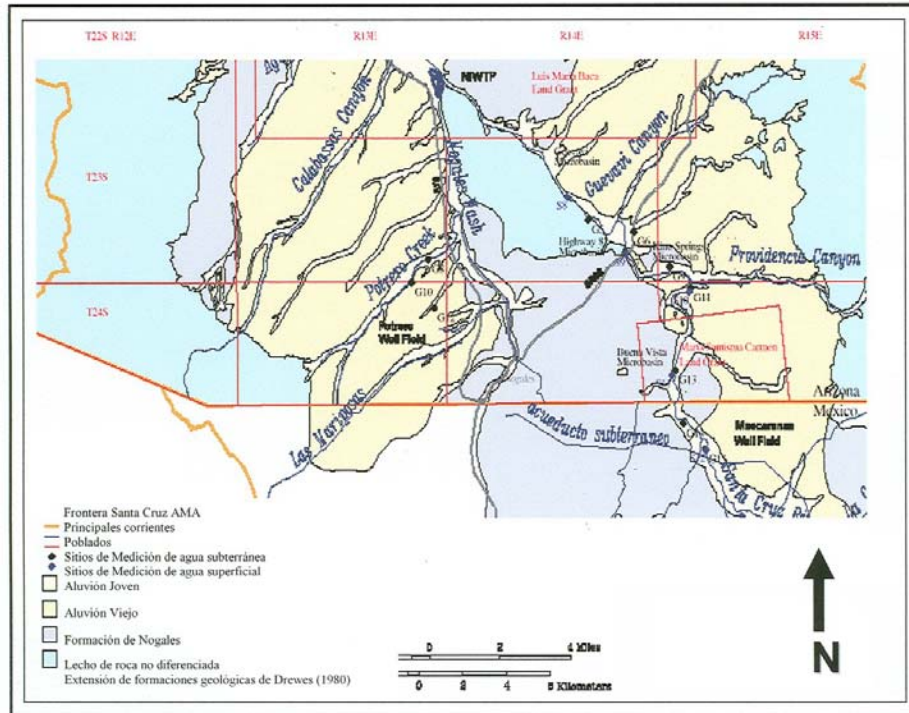


Figura 4. Sitios de medición de agua superficial y subterránea en la Cuenca del Río Santa Cruz, Estados Unidos de Norte América

Fuente: Nelson y Erwin, (2001)

Tabla 8. Sitios de medición de flujo de agua superficial

Sitio en el Mapa	Nombre de la Localización	Latitud			Longitud		
		G ¹	M ²	S ³	G ¹	M ²	S ³
S1	Elephant Head (USA)	31	44	45	111	02	07
S2	Amado (USA)	31	42	30	111	03	17
S3	Chavez Siding (USA)	31	38	45	111	02	50
S4	Tubac (USA)	31	36	45	111	02	25
S5	Santa Gertrudis cerca de Tumacacori (USA)	31	33	43	111	03	42
S6	Palo Parado (USA)	31	31	50	111	01	05
S7	Rio Rico (USA)	31	28	10	110	59	30
S8	Guevavi Narrows (USA)	31	24	30	110	54	05
S9	Highway 82 (USA)	31	23	15	110	52	25
S10	Kino Springs Bridge (USA)	31	22	25	110	50	35
S11	Buena Vista (USA)	31	20	40	110	51	05
S12	Mascarenas (MEX)	31	18	57.6	110	50	07.7
S13	River Park (MEX)	31	17	30	110	49	05
S14	Santa Barbara (MEX)	31	15	13	110	46	22.5
S15	Infiltration Galeria (MEX)	31	08	50.2	110	40	18
S16	River Bend (MEX)	31	08	59.1	110	41	47
S17	San Lazaro (MEX)	31	08	30	110	38	14

Fuente: Nelson y Erwin, (2001)

¹G = Grados; ²M = Minutos; ³S = Segundos.

IV.5.3. Precipitación mensual

En el AMA hay dos estaciones climatológicas, una en Nogales y otra en Tumacacori, así como otras dos estaciones que ya no están en operación, ubicadas en Bear Valley y Amado. Estos datos son utilizados para estimar variaciones en las condiciones climáticas, así como también para la evaluación y cuantificación de flujos de los afluentes no medidos y velocidades de evapotranspiración.

IV.5.4. Uso del agua

En el AMA, estos datos son clasificados por sector de uso (municipal, agricultura e industrial) y son usados para estimar la demanda siempre creciente en el sistema acuífero. Para calcular los balances hidrológicos, se usan datos de extracción de agua subterránea, por ello en el AMA se mide el bombeo total anual para cada pozo no extento. Los dueños de los pozos informan el bombeo al ADWR como requisito para el Código de Agua Subterránea (Nelson y Erwin, 2001).

IV.5.5. Calidad del agua

En el AMA, cada año el ADWR toma muestras de agua de los pozos para su análisis químico. Algunos parámetros son determinados en el campo, sin embargo la mayoría de los parámetros se cuantifican a través de análisis de laboratorio. Los resultados del análisis de muestras de tres pozos indicaron que la calidad química del agua es conveniente para la mayoría de los propósitos. Los datos medidos fueron conductividad específica ($\mu\text{siemens/cm}$), sólidos disueltos totales (mg/L), potencial de hidrógeno (adimensional), nitrato disuelto como N (mg/L), flúor (mg/L), sodio (mg/L), calcio (mg/L), magnesio (mg/L), cloro (mg/L), alcalinidad (mg/L) y sulfato (mg/L). Vía internet se pueden acceder los análisis de laboratorio históricos en la página del USGS (<http://water.usgs.gov/nwis/qwdata>). Además de los datos colectados anualmente por ADWR, también la cuenca es parte del programa "National Water-Quality Assessment", conducido por el USGS y el Departamento de Calidad del Medio Ambiente de Arizona.

En Sonora, se realizaron análisis físico-químicos, de plaguicidas y microbiológicos en el Río Santa Cruz, en los años 1997 y 2000. Como resultado del análisis físico-químico, se obtuvieron valores de pH entre 6.6 a 8.02, que son óptimos para la mayor parte de los organismos acuáticos. El rango de variación de conductividad eléctrica en las muestras fue de 219 $\mu\text{mhos/cm}$ a 526 $\mu\text{mhos/cm}$ (considerados como normales). Los niveles de oxígeno disuelto fluctuaron entre 5.8 y 12.2 (considerados normales siendo lugares receptores de aguas residuales, ya sea de origen doméstico o industrial). Se obtuvieron valores de sólidos suspendidos totales en el rango de no detectable a 18 mg/L, mientras que los sólidos disueltos totales fluctuaron entre 146 mg/L a 316 mg/L, valores que están por debajo del valor límite permisible establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994 (1000 mg/L). Además se analizaron cloruros, sulfatos, bicarbonatos, nutrientes (nitratos, nitritos, amonio) y fósforo total, y se observó que las muestras no excedían los límites permisibles correspondientes. Respecto a los metales, no se detectó cadmio, cromo total, cobre, mercurio y plomo, tanto en el agua superficial como en la subterránea, a excepción de 2 estaciones en Mascareñas. Las concentraciones de zinc estuvieron por debajo de la norma. Se determinaron concentraciones de calcio, potasio, magnesio y sodio, aunque no se encuentra definido un límite de contenido en las Normas Oficiales Mexicanas. No se reportó la presencia de plaguicidas en ninguna de las muestras analizadas. Para el análisis microbiológico se utilizó la técnica del número más probable (NMP) y la metodología de la Norma Oficial Mexicana NOM-AA-42-1989. Al comparar los resultados con los límites permisibles de calidad establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 para coliformes totales y coliformes fecales se observó que algunas muestras sobrepasaron estos límites. Asimismo, se obtuvieron resultados que sobrepasaban el límite máximo permisible de coliformes fecales tanto para fuentes de abastecimiento de agua potable como para riego agrícola, establecidos en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua publicados en el Diario Oficial de la Federación (1000 como NMP/100-ml). Además, durante el recorrido por el cauce del río en el año 2000, se observó la presencia de contaminantes, como la descarga de aguas residuales domésticas, el desalojo de basura orgánica e inorgánica y la instalación de fosas sépticas cercanas al cauce (Solís y col., 2001).

IV.6. Modelos Matemáticos

Un modelo es representativo del sistema real, cuando es capaz de reproducir más fielmente su comportamiento, o lo que es lo mismo, reproducir los estados del sistema, las acciones sobre él y las leyes que los relacionan. Los modelos matemáticos aplicados al estudio de las aguas subterráneas son una buena herramienta que permiten conocer la respuesta de un acuífero ante distintas situaciones de explotación, además identifica aquella que optimice las condiciones que se presentan en el área de influencia del acuífero.

IV.7. Modelación Integral de Agua Superficial / Agua Subterránea

La modelación integral de agua superficial / agua subterránea se refiere a la simulación de las interacciones hidrológicas entre características del agua superficial y el subyacente sistema de agua subterránea y es prioritaria para la planeación y manejo integral del recurso. La modelación integral puede abarcar tanto la cantidad (flujo base o recarga) como la calidad del interflujo para y proveniente de cuerpos de agua. El enfoque de modelación está basado en las técnicas de solución numérica más comunes en el mercado actual (elemento finito y diferencias finitas). Este tipo de modelos pueden ser aplicados a problemas en los que un cambio en un sistema tiene una influencia significativa en el otro. Algunos de estos problemas están relacionados al cambio de la carga hidráulica en el sistema de agua subterránea con la velocidad de filtración proveniente de (o hacia) lagos o flujo superficial en humedales. Otro ejemplo, son situaciones donde los cambios en el río o canal de descargas afectan el sistema de agua subterránea cerca de pozos de abastecimiento público o áreas medioambientalmente sensitivas. Estos modelos también son utilizados para simular la contribución de agua subterránea al flujo base durante condiciones de sequedad o infiltración de agua subterránea durante un evento de tormenta.

El uso de un modelo integral requiere una gran cantidad de datos para modelar ambos componentes del ciclo hidrológico, agua superficial y agua subterránea. Además, las interacciones entre aguas subterráneas y superficiales son complejas y para entenderlas se requiere de un marco hidrológico robusto tomando en cuenta factores climáticos, de relieve de terreno, geológicos y bióticos. Un resumen de estos aspectos es descrito por Sophocleous (2002). Por lo tanto, un modelo integral requiere más tiempo de desarrollo, calibración, y ejecución de simulación relativo al modelo de agua superficial o al modelo de agua subterránea. Estos requisitos aumentarán similarmente el costo de un proyecto en relación a utilizar un solo modelo de agua superficial o de agua subterránea.

Aunque una gran variedad de modelos de agua superficial y de agua subterránea han sido desarrollados y extensivamente utilizados a través de años de investigación y aplicaciones de campo, es poco el software de modelación que ha sido desarrollado con el objetivo de integrar completamente ambos componentes del ciclo hidrológico. Dentro de estos modelos integrales de simulación que han sido aplicados exitosamente se encuentran los siguientes (Camp Dresser & McKee Inc., 2001):

1. MIKE SHE y HMS. En estos modelos los vínculos de los componentes agua subterránea y superficial fueron creados como parte de un proceso de desarrollo del modelo unificado. Ambos modelos son relativamente productos recientes.
2. FHM-FIPR, SWATMOD y MODBRANCH. Estos modelos fueron creados al vincular modelos de agua superficial y modelos de agua subterránea previamente desarrollados.
3. MODFLOW y DYNFLOW. Son modelos de agua subterránea que han sido reforzados con la adición de paquetes interactivos de agua superficial.
4. SWMM y HSPF. Son modelos de agua superficial que han sido reforzados con capacidades que representan agua subterránea.

IV.8. El Modelo MODFLOW

IV.8.1. Descripción

MODFLOW es un programa que se usa para resolver numéricamente la ecuación de continuidad que gobierna el flujo tridimensional a través de un medio saturado, poroso y continuo. El programa puede ser usado para aplicaciones de dos o tres dimensiones. Se simula el flujo de agua subterránea dentro del acuífero, utilizando el enfoque de diferencias finitas centradas en el bloque. Los algoritmos de solución utilizados por este modelo para resolver las ecuaciones de diferencias finitas incluyen dos técnicas iterativas, el procedimiento fuertemente implícito (por sus siglas en inglés SIP, Strongly Implicit Procedure) y el método de sobre relajación sucesiva (por sus siglas en inglés SSOR, Slice-Successive Overrelaxation). Las capas del acuífero pueden ser simuladas como confinadas, no confinadas, o una combinación de ellas. También se puede simular el flujo asociado a presiones externas, tales como pozos, recarga en el área, evapotranspiración, drenes y corrientes. El programa original fue escrito en el año 1983, utilizando el lenguaje de programación FORTRAN 66. Luego fue modificado para utilizar FORTRAN 77 (McDonald and Harbaugh, 1988). Después, el modelo fue retomado por compañías comerciales y agencias gubernamentales de administración hidráulica que le añadieron nuevas herramientas, incluyendo diseño gráfico y calibración a través de pre y post procesadores textuales y gráficos.

IV.8.2. Estructura del programa

La estructura modular consiste en un programa principal y una serie de subrutinas altamente independientes llamadas "módulos". Los módulos están agrupados en "paquetes". Cada paquete trata con una característica específica del sistema hidrológico a ser simulado, por lo que el usuario puede examinar cada una de éstas de manera independiente. Es decir, cada paquete representa una opción que puede ser, o no ser utilizada.

Esta división del programa también facilita el desarrollo de capacidades adicionales, debido a que se pueden agregar paquetes al programa sin modificar los existentes. Los sistemas de entrada y de salida al programa de computadora también están diseñados para permitir una flexibilidad máxima. Cada tipo de datos de entrada al modelo puede ser almacenado y leído desde archivos externos separados. Los arreglos de datos de entrada pueden ser leídos en cualquier formato sin que sea necesario modificar el programa. El tipo de salida también ha sido generalizado, para que el usuario pueda seleccionar varias opciones de salida del modelo de acuerdo a una necesidad particular. En consecuencia, en cada simulación, el usuario debe designar cuales opciones del programa serán utilizadas y debe indicar el archivo del cual será leída la entrada para cada opción.

IV.8.2.1. Paquetes del programa. Dentro de los principales paquetes disponibles se incluyen los procedimientos para simular los efectos de los pozos, recarga, ríos, drenes, evapotranspiración, fronteras de carga hidráulica general, además de los algoritmos disponibles para resolver las ecuaciones lineales que describen el sistema de flujo. Además, se han desarrollado varios paquetes para dirigir algunos conceptos específicos de la interacción de agua superficial / agua subterránea. MODFLOW también tiene paquetes para la simulación de transporte de soluto (MOC3D) y el rastreo de partículas (MODPATH).

Asimismo, han sido desarrollados muchos pre- y postprocesadores para el uso con MODFLOW. Dentro de los más conocidos se encuentran Groundwater Vistas por Environmental Simulations Inc., Visual MODFLOW por Waterloo Hydrologic, y Groundwater Modeling System (GMS) por el Departamento de Defensa. La mayoría de estos programas también incorporan el uso de Sistema de Información Geográfica (GIS) en el manejo y manipulación de datos para la entrada a MODFLOW.

IV.8.3. Modelo matemático

Una representación matemática de un sistema de flujo de agua subterránea puede estar constituida por la ecuación diferencial parcial que describe el movimiento en tres dimensiones del agua subterránea de densidad constante a través de un material poroso (ecuación 1), junto con la especificación de flujo y/o las condiciones de las cargas hidráulicas en las fronteras de un sistema de acuífero y la especificación de condiciones de carga hidráulica inicial (McDonald y Harbaugh, 1988).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Donde:

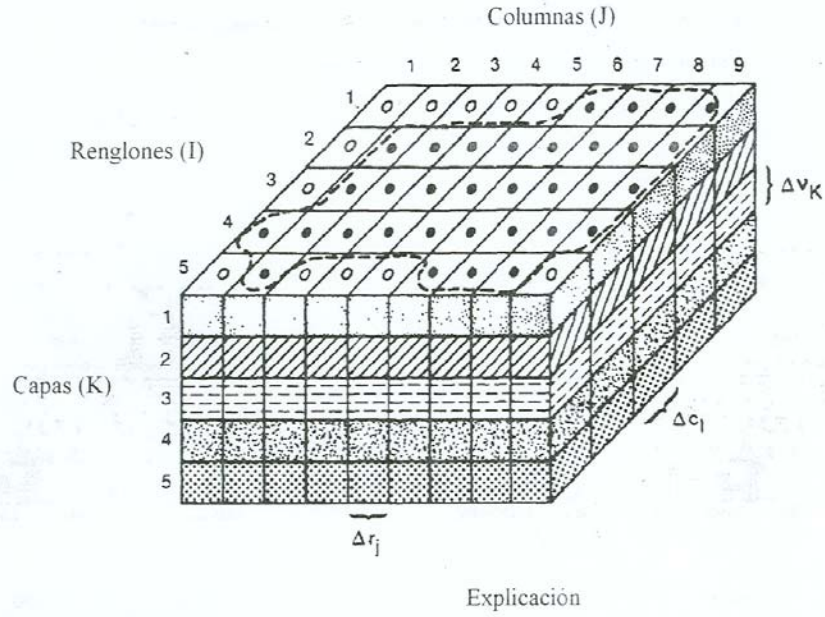
- K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} son los valores de la conductividad hidráulica a través de los ejes de coordenadas x, y, z , los cuales se supone son paralelos a los ejes principales de la conductividad hidráulica ($L t^{-1}$)
- h es la carga hidráulica (L)
- W es un flujo volumétrico por unidad de volumen y representa fuentes o sumideros de agua (t^{-1})
- S_s es el almacenamiento específico del material poroso (L^{-1}) y
- t es el tiempo (t)

En general, $S_s, K_{xx}, K_{yy},$ y K_{zz} pueden estar en función del espacio y W en función del espacio y tiempo. La ecuación (1) describe el flujo de agua subterránea bajo condiciones de no equilibrio en un medio heterogéneo y anisótropo, a condición de que se encuentren alineados los ejes principales de la conductividad hidráulica con las direcciones coordenadas. En condiciones de estado estacionario el cambio de carga hidráulica con respecto al tiempo es igual a cero ($\partial h / \partial t = 0$). Por lo tanto, el último término de la ecuación (1) es igual a cero.

Una solución analítica de la ecuación (1) sería una expresión algebraica dada por $h(x, y, z, t)$ tal que, cuando las derivadas de h con respecto a espacio y tiempo son sustituidas en la ecuación (1), se satisfacen tanto la ecuación como sus condiciones inicial y de frontera. Estas soluciones analíticas raramente son posibles, excepto en sistemas muy simples, así que se tienen que utilizar varios métodos numéricos para la obtención de soluciones aproximadas. Uno de estos métodos es el de diferencias finitas, en el que el sistema continuo descrito por la ecuación (1) se reemplaza por un conjunto finito de puntos discretos en espacio y tiempo, y las derivadas parciales se reemplazan por términos calculados de las diferencias en los valores de carga hidráulica en esos puntos. El proceso conduce a sistemas de ecuaciones diferenciales lineales algebraicas simultáneas; su solución producirá valores de carga hidráulica en puntos y tiempos específicos.

IV.8.4. Discretización espacial

En el método de diferencias finitas, la variación de la carga hidráulica, en un punto dado, se determina con el valor de la carga en los alrededores, usando el desarrollo de Taylor. Esto lleva a discretizar el dominio o el espacio de interés. Cuando discretizamos, el dominio se divide en un conjunto de unidades volumétricas o bloques llamados celdas (Fig. 5). Dentro de cada celda hay un punto en el centro, llamado nodo y en ellos se calcula la carga hidráulica. El espacio del nodo debe escogerse de tal manera que las propiedades hidráulicas del sistema sean generalmente uniformes sobre la extensión de la celda. La convención de localización que se siguió para la construcción de la Fig. 5 está descrita en términos de renglones, columnas y capas, utilizando un sistema de índices i, j, k . En términos de coordenadas cartesianas, los índices k denotan cambios a lo largo de la vertical z , numerando las capas desde arriba hacia abajo. Un aumento en el índice de renglones i , representa un descenso a lo largo del eje y . Por el contrario, un aumento en el índice de columnas j , denotará un aumento en el eje x . Sin embargo, las aplicaciones del modelo sólo requieren que los renglones y las columnas caigan a lo largo de direcciones ortogonales consistentes dentro de capas, y no requiere la designación de los ejes de coordenadas $x, y, o z$.



--- Frontera del acuífero

● Celda activa

○ Celda inactiva

Δr_j Dimensión de la celda a lo largo de la dirección de renglones. (J) indica el número de columna.

Δc_I Dimensión de la celda a lo largo de la dirección de columnas. (I) indica el número de renglón.

Δv_K Dimensión de la celda a lo largo de la dirección vertical. (K) indica el número de capa.

Figura 5. Discretización espacial

Fuente: McDonald y Harbaugh (1988)

IV.8.5. Ecuación de diferencias finitas

Siguiendo la aplicación de la ecuación de continuidad, se desarrolló la ecuación del flujo de agua subterránea en la forma de diferencias finitas (McDonald y Harbaugh, 1988). Esta ecuación se refiere al problema más general que se plantea en acuíferos, la determinación de las cargas hidráulicas. A través de éstas y la ley de Darcy se calculan los caudales. Pero si lo que se pretende es resolver el de movimiento de la concentración de cuerpos disueltos, habría que considerar la ecuación del transporte de masa o de la de dispersión hidrodinámica y resolverla conjuntamente con la ecuación de flujo (Custodio-Gimena y Llamas-Madurga, 1996).

IV.8.5.1. Ecuación de continuidad. La suma de todos los flujos dentro y fuera de la celda debe ser igual a la velocidad de cambio en almacenamiento dentro de la celda. Bajo la suposición de que la densidad del agua subterránea es constante, la ecuación de continuidad expresando el balance de flujo para una celda es:

$$\sum Q_i = SS \frac{\Delta h}{\Delta V} \quad (2)$$

Donde:

- Q_i es una velocidad de flujo dentro de la celda ($L^3 t^{-1}$)
- SS ha sido introducida como la notación para almacenamiento específico en la formulación de diferencias finitas, su definición es equivalente a la de S , en la ecuación (1), es decir es el volumen de agua el cual puede ser inyectado por unidad de volumen de material del acuífero por unidad de cambio en la carga hidráulica (L^{-1})
- ΔV es el volumen de la celda (L^3) y
- Δh es el cambio de carga hidráulica en un intervalo de tiempo de longitud Δt .

El término del lado derecho de la ecuación es equivalente al volumen de agua que es almacenado en un intervalo de tiempo Δt dando un cambio en la carga hidráulica de Δh .

La ecuación (2) está establecida en términos de flujo de entrada y ganancia en almacenamiento. Flujos de salida y pérdidas en almacenamiento están representados definiendo el flujo de salida como un flujo de entrada negativo y la pérdida como una ganancia negativa.

IV.8.5.2. Ley de Darcy. Bajo las mismas condiciones de la ecuación (1), queda escrita como:

$$q_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3)$$

$$q_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \quad (4)$$

$$q_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (5)$$

Donde q es la descarga específica ($L t^{-1}$).

IV.8.6. Iteración

El programa descrito utiliza métodos iterativos para obtener la solución al sistema de ecuaciones diferenciales finitas para cada paso de tiempo. En el proceso de iteración se divide un intervalo de tiempo en varias partes de distinta anchura o longitud. En estos métodos, el cálculo de los valores de carga hidráulica para el final de un paso de tiempo dado comienza asignando arbitrariamente un valor de prueba, o estimado, para la carga hidráulica en cada nodo al final de ese paso. Entonces se inicia un procedimiento de cálculo el cual altera estos valores estimados, produciendo un nuevo conjunto de valores de carga hidráulica que están más de acuerdo con el sistema de ecuaciones. Es decir se calculan cargas para un instante posterior t , para el nodo i,j,k ($h_{i,j,k}^t$).

Entonces, estos valores de carga hidráulica nuevos o interinos toman el lugar de las cargas hidráulicas supuestas inicialmente, y el procedimiento de cálculo se repite, produciendo un tercer conjunto de valores de carga hidráulica ($h_{i,j,k}^{t+\Delta t}$), para un instante posterior Δt . Este procedimiento se repite sucesivamente, en cada etapa produciendo un nuevo conjunto de cargas hidráulicas interinas, las cuales satisfacen más cercanamente el sistema de ecuaciones. Cada repetición de los cálculos es denominada "iteración".

Idealmente, la iteración terminaría cuando las cargas hidráulicas calculadas sean lo suficientemente cercanas a la solución exacta. Pero debido a que la solución exacta no se conoce, se debe utilizar un método indirecto para finalizar la iteración. El método más comúnmente utilizado es especificar que los cambios en las cargas hidráulicas calculadas en un nivel de iteración al siguiente $|h_{i,j,k}^{t+\Delta t} - h_{i,j,k}^t|$, debe ser menor a cierta cantidad especificada por el usuario, la cual es denominada criterio de convergencia (McDonald y Harbaugh, 1988).

IV.8.7. Datos de entrada al modelo

Para la ejecución de corridas del modelo de flujo se requiere la determinación de la geometría del acuífero, parámetros geohidrológicos, entre otros datos de entrada al modelo. Estos datos son descritos a continuación y además se menciona el método utilizado para su determinación.

IV.8.7.1. Elevaciones superficiales. Este valor se refiere a la elevación a la que se encuentra la superficie terrestre con respecto al nivel del mar. Este valor puede ser obtenido a través de la utilización de un posicionador geográfico satelital (GPS) de alta precisión.

IV.8.7.2. Elevaciones del basamento del acuífero. Este valor es considerado como la distancia con respecto al nivel del mar, a la cual se encuentra el fondo del acuífero. Estos valores son estimados a través de un método indirecto, que es la geofísica (electromagnetismo, resistividades eléctricas, reflexiones sísmicas), o por gravimetría. El acuífero costero de Acapetahua, Chiapas es un ejemplo de dónde se realizaron sondeos de resistividad para determinar la topografía del basamento (Steinich y col., 1999).

IV.8.7.3. Divisores de agua subterránea. Se utiliza el concepto de cuencas de aguas subterráneas, definida como un área bajo la superficie donde el agua se mueve a un punto de descarga particular y está limitada por divisores de agua subterránea.

IV.8.7.4. Ubicación de fronteras naturales o geológicas. Como por ejemplo la ubicación de zonas montañosas o de no flujo, barreras de flujo, carga hidráulica constante, entre otras.

IV.8.7.5. Cursos de agua superficial. Se requieren datos de caudal, ancho del curso de agua superficial, profundidad, conductividad hidráulica en la dirección z para el cálculo de la infiltración proveniente del curso de agua superficial hacia el acuífero.

IV.8.7.6. Evapotranspiración. La evapotranspiración es el resultado del proceso por el cual, el agua cambia de estado líquido a gaseoso, y directamente, o a través de las plantas, vuelve a la atmósfera en forma de vapor. Se obtienen estimaciones de evapotranspiración a través de mediciones climatológicas, que consideran la temperatura, radiación solar, humedad relativa, dirección y velocidad del viento. Formulas de Turc y Coutagne (Custodio-Gimena y Llamas-Madurga, 1996).

IV.8.7.7. Recarga y descarga. La recarga o descarga pueden ser estimadas a través de redes de flujo. Este método considera las líneas equipotenciales, líneas de flujo, gradiente hidráulico y valores de transmisividad (Custodio-Gimena y Llamas-Madurga, 1996). También puede ser estimada por el método de balance de cloruros de lluvia y del agua subterránea, y el método que considera el cambio de almacenamiento y la evolución de la piezometría. La revista *Hydrogeology Journal* 10(1), fue dedicada al estudio de la recarga, incluyendo descripciones del proceso (De Vries y Simmers, 2002), técnicas de estimación (Scanlon y col., 2002), su relación con modelos de agua subterránea (Sanford, 2002), entre otros.

IV.8.7.8. Localización geográfica de pozos. Anteriormente, la ubicación de los pozos se definía haciendo una nivelación diferencial a partir de los bancos de nivel del INEGI, el cual da la longitud, latitud y altitud del lugar en que se encuentra el pozo, referenciado geográficamente. Actualmente se utiliza un posicionador geográfico satelital (GPS), pero para fijar la altitud es necesario utilizar aparatos GPS de bastante precisión y por lo tanto más costosos, aunque para puntos difíciles de localizar es más barato.

IV.8.7.9. Caudal de extracción o inyección. Los caudales o gastos de las extracciones por bombeo se miden con aparatos instalados en la descarga del pozo. A falta de ellos, se puede estimar con los volúmenes aplicados a los cultivos o con el consumo de energía eléctrica. Además del caudal, es necesaria información acerca de los periodos de extracción, espacio ranurado y diámetro del pozo.

IV.8.7.10. Elevación de los niveles de agua subterránea. Se requiere una distribución piezométrica inicial y si realizan corridas en estado transitorio, también se requieren datos de nivel de agua para otros periodos de tiempo para comparar lo calculado con lo observado en campo y si es necesario efectuar la calibración del modelo.

IV.8.7.11. Permeabilidad o conductividad hidráulica. La permeabilidad (k) es un coeficiente de proporcionalidad entre el flujo específico o velocidad de flujo y el gradiente hidráulico; definido por la ley de Darcy (Ecuaciones 3, 4 y 5, las cuales quedan representadas por la Ecuación 6), la cual es válida para número de Reynold (Re) <1 a 10 .

$$q = k i \quad (6)$$

Donde:

- q es la velocidad de flujo ($L t^{-1}$)
 i es el gradiente hidráulico (adimensional)
 k es la permeabilidad o conductividad hidráulica ($L t^{-1}$)

Además de la naturaleza del terreno, en k influyen la densidad y la viscosidad del fluido, las cuales a su vez son función de la temperatura y de la presión. Por lo que k puede quedar representada por medio de la ecuación 7.

$$k = k_o \gamma/\mu \quad (7)$$

Donde:

- k_o es la permeabilidad intrínseca, específica o geométrica, también llamado coeficiente de permeabilidad (L^2)
 γ es el peso específico del fluido ($M L^{-2} t^{-2}$)
 μ es la viscosidad del fluido ($M L^{-1} t^{-1}$)

El valor de k se calcula dividiendo el valor del parámetro transmisividad (T) por el espesor del acuífero (b), considerado como la diferencia entre el valor de la elevación superficial y la elevación del basamento. El valor de transmisividad se obtiene realizando pruebas de bombeo, que consisten en extraer agua a través de un pozo y observar, en pozos cercanos a dicho pozo de bombeo, el comportamiento de los niveles piezométricos en el tiempo. También es posible obtener un estimado a través de la geología y geofísica.

IV.8.7.12. Porosidad. La porosidad total (p) se define como la fracción de espacios vacíos que contiene un material sólido respecto al volumen total. La porosidad efectiva (p_e) se utiliza en estudios de movimiento de agua subterránea y se define como la relación entre el volumen del agua que obedece a la gravedad y el volumen total de la roca; excluyendo de tal manera el agua adsorptiva, debido a que no participa en el flujo del agua subterránea por el acuífero. Por su definición, la porosidad es adimensional y se suele expresar por un valor absoluto o en tanto por ciento. Este parámetro puede ser medido en laboratorio, haciendo un experimento de drenaje del agua o estimado en el campo por el tipo de roca y el arreglo de los granos (Werner, 1996). En un estudio realizado en el acuífero del Valle de Hermosillo, Sonora, la porosidad se estimó a través de la Ley de Archie (Steinich y col., 1997).

IV.8.7.13. Coeficiente de almacenamiento. El coeficiente de almacenamiento (S) se define como el volumen de agua por unidad de superficie del acuífero, que se extrae o almacena en éste, bajo un cambio de potencial. Este parámetro es representativo de los acuíferos confinados y sus valores varían en el rango de 0.00001 a 0.01 (Chávez-Guillén, 1987). Para acuíferos libres se utiliza el término de rendimiento específico (S_y) definido como la relación del volumen de agua extraído por gravedad entre el volumen total del acuífero. S_y toma valores entre 0.05 y 0.3 (Chávez-Guillén, 1987). El agua adsorbida no se drena por gravedad. Por eso el volumen de agua drenado por gravedad es más pequeño que el volumen de poros: $S > p$ y cuando la cantidad del agua adsorbida y capilar es relativamente pequeña, entonces $S \approx p$ (Werner, 1996). Este parámetro se estima a través de pruebas de bombeo.

IV.8.8. Estudios de aplicación

En la actualidad, MODFLOW probablemente sea el software de modelación más ampliamente utilizado. Este software se usó en la construcción de un modelo de flujo de agua subterránea en la planicie costera de Virginia, el cual fue incorporado como medio para evaluar los efectos de extracciones de agua subterránea, al Departamento de Calidad del Medio Ambiente de Virginia (http://va.water.usgs.gov/online_pubs/WRIR/98-4085/gwfmcpasys_va.html). Asimismo, la aplicación del programa Visual MODFLOW en el acuífero del Soconusco, Chiapas, México, sirvió para identificar los problemas que se pueden derivar a partir de una sobreexplotación del agua almacenada en un acuífero costero. En este caso, se realizaron simulaciones en régimen permanente y transitorio para un período de 15 años, tomando como condición inicial la información recopilada para el año de 1977. Los resultados mostraron abatimientos del orden de 10 metros (Díaz-Nigenda y col., 2000). En otro caso, en la zona de Sint-Jansteen, Holanda, MODFLOW se usó para estimar los efectos de las extracciones sobre el flujo natural subterráneo, que conducen a la contaminación por pesticidas en este acuífero freático vulnerable (Gaus, 2000). Además con el uso de MODFLOW acoplado al paquete computacional comercial GMS, se obtuvo un modelo de flujo en Aarbeg, Suiza, para luego realizar el estudio de transporte del contaminante generado por una industria de azúcar en la región (Wersin, y col., 2001). Otro ejemplo de aplicación del modelo se realizó en Hong Kong, como parte de una investigación que tenía el objetivo de determinar el efecto de eventos de lluvia en la estabilidad de la pendiente sobre el área de Shum Wan Road (Nandy y Jiao, 2001). Asimismo se ha aplicado en varias regiones de Arizona, en la que sus acuíferos tienen características similares al Acuífero del Río Santa Cruz, además de también ser cuencas hidrográficas fronterizas. Estos estudios sirvieron de apoyo en la realización de este trabajo y entre ellos se puede mencionar un modelo de flujo para la subcuenca de Sierra Vista en la Cuenca Superior del Río San Pedro (Corell y col., 1996) y un modelo de flujo para el Valle Salt River en el área de manejo activo de Phoenix (Corkhill y col., 1993).