

CÁLCULO DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO PARA EVITAR SOBREEXPLOTACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

M. I. Ernesto Aguilar Garduño¹, M. I. María de los Ángeles Suárez Medina¹

Resumen - Es común que en el diseño de sistemas de abastecimiento de agua potable, sea considerado como dato de diseño, solo al volumen de agua que demandan los usuarios, es decir que la demanda siempre es tomada en cuenta como un dato de diseño, pero, ¿Qué pasa con la oferta?, ¿Debemos asumir que el recurso siempre es suficiente y que no hay que preocuparse por las fuentes de abastecimiento?. En este trabajo, se propone aplicar la metodología para el cálculo de la disponibilidad de agua en México, para esto se utilizan la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, *“Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”*, los manuales de *“Estimación de la disponibilidad de agua superficial en cuencas”* y la *“Guía para la evaluación de los términos considerados en la ecuación de balance de agua subterránea”*. Cabe aclarar que no todas las consideraciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, son aceptadas para el análisis propuesto, la NOM 011 establece que el intervalo de tiempo a considerarse para hacer los balances de agua, corresponde a periodos anuales, es claro que tanto la oferta, como la demanda son variables a lo largo de un año y en consecuencia, se propone un balance mensual orientado a obtener la disponibilidad de agua. Por otro lado, en la Norma no se establece una separación de las aguas servidas y las que aun no han sido utilizadas, caso que tendrá que ser considerado en futuras versiones de la misma, sobre todo para satisfacer a los usuarios que demandan agua para consumo humano.

Abstract - Frequently, in the design of systems of potable water supply, it is considered as data of design just the volume of water that the users demand, it means that the supply always is taken into account as a data from design, but, What happens with the demand?. In this paper, We have proposed to apply the availability water methodology in Mexico, for this are used "Official Norm Mexican NOM-011-CNA-2000, *“Conservation of the resource water-That establishes the specifications and the method to determine the annual average availability of national waters”*, manual of *“Estimation of the superficial water availability in river basins”* and *“the Guide for the evaluation of the terms considered in the equation of surface water balance”*. It is possible to clarify that all the considerations of the Official Norm Mexican NOM-011-CNA-2000, are not accepted for the proposed analysis, NOM 011 establishes that the time interval to consider itself to make the balance of water, corresponds to annual periods, is clear that as much the supply, as the demand is variable throughout a year and consequently, a monthly balance oriented sets out to obtain the water availability. On the other hand, in the Norm one does not settle down a separation of served waters and those that have not been used even, case that it will have to be considered in future versions of the same one.

Palabras clave: Disponibilidad de agua, abastecimiento de agua potable, balance de agua, NOM.

Keywords: Water availability, potable water supply, balance of water, ISO

¹ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Especialista en Hidráulica III, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Jiutepec, Mor. C. P. 62550, México, 52 777 3 29 36 00 ext 478 y 257 egaugilar@tlaloc.imta.mx, msuarez@tlaloc.imta.mx

INTRODUCCIÓN

Los principales usos de agua en las ciudades, corresponden al uso público urbano, doméstico, servicios e industrial, las fuentes de abastecimiento deben satisfacer adicionalmente a los demás usos del agua, como son; agrícola, acuícola, conservación ecológica, pecuario, recreativo y para generación de energía eléctrica, todos ellos deben estar sujetos a la disponibilidad del recurso. Si bien no todos los usos tienen la misma prioridad, es necesario hacer una revisión de la disponibilidad del recurso siempre que se desee ampliar el padrón de usuarios, en caso contrario, se corre el riesgo de caer en la sobreexplotación del recurso en todas las fuentes de abastecimiento. El balance de agua, debe considerar la extensión total de la cuenca hidrográfica, hacer una revisión detallada del movimiento del agua a lo largo de la cuenca, con eso se logrará tener cuantificado claramente el volumen de agua que es utilizado por todos los usuarios, y en su caso permite tomar medidas preventivas para evitar la sobreexplotación del recurso hídrico en la cuenca. Con lo anterior se tiene una mejor idea de la magnitud del problema en cuanto al balance de agua, se requiere tener un registro completo de las entradas y salidas, destacando que los usuarios no representan el total de las salidas en una cuenca. Las salidas conjuntamente con las entradas permiten calcular la variación del volumen en los cuerpos de almacenamiento. Con esto se podrá definir la manera de aprovechar el recurso hídrico, cuidando evitar la sobreexplotación del mismo.

DESARROLLO

Los balances hídricos en las cuencas están movidos por el ciclo hidrológico, el cual se activa principalmente en la época de lluvias, de ahí que la primera de las entradas en el balance de agua es precisamente el volumen de lluvia que alcanza a escurrir, denominado escurrimiento virgen ó escurrimiento por cuenca propia, dicho escurrimiento sería aquel que se aforara en la salida de la cuenca en donde no existieran ningún tipo de aprovechamiento, y es la base de las fuentes de abastecimiento de tipo superficial. Otra característica importante en el balance, es que el escurrimiento puede ser estimado con métodos que interpolan mediciones en unos cuantos puntos a lo largo de toda la cuenca y esto generalmente introduce errores que pueden llegar a ser significativos.

Recordando la ecuación de continuidad que es la expresión utilizada para el cálculo del balance hidrológico:

$$\frac{dV}{dt} = I - O \quad (1)$$

donde	V	=	Volumen [L ³]
	t	=	Tiempo [T]
	I	=	Gasto de entrada [L ³ T ⁻¹]
	O	=	Gasto de salida [L ³ T ⁻¹]

Integrando (1) por diferencias finitas:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = I - O$$

Agrupando términos de manera conveniente:

$$\Delta V = \Delta t * I - \Delta t * O$$

Integrando los gastos de entrada y salida en el intervalo de tiempo:

$$\Delta V = \text{Ent} - \text{Sal} \quad (2)$$

Con:

$$\text{Ent} = \Delta t * I$$

$$\text{Sal} = \Delta t * O$$

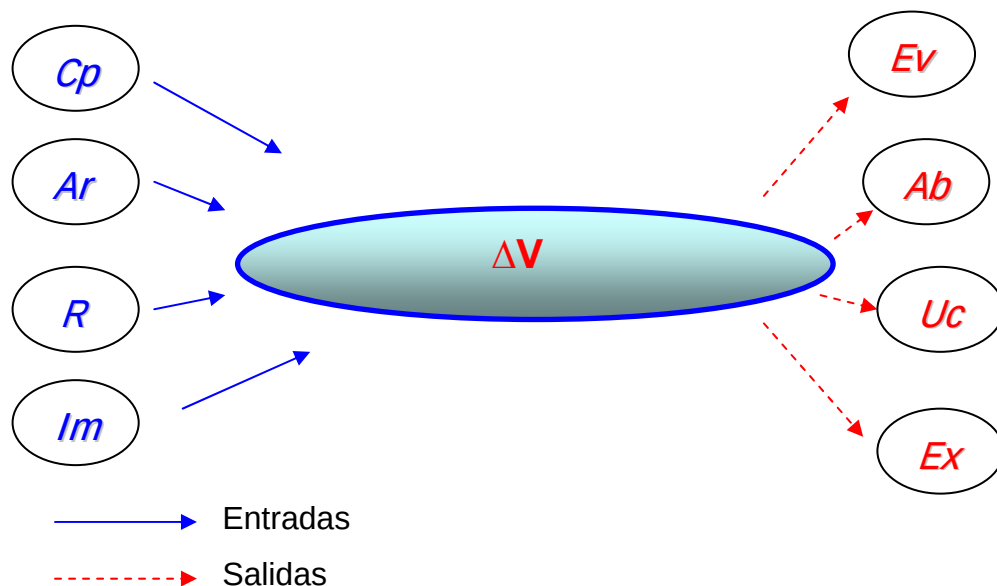
donde: ΔV = Variación de volumen [L^3] en un intervalo de tiempo Δt
 Ent = Entradas en volumen [L^3] en un intervalo de tiempo Δt
 Sal = Salidas en volumen [L^3] en un intervalo de tiempo Δt

A partir de la ecuación (2), se obtiene la ecuación de balance utilizada en la “Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua” haciendo:

$$\text{Ent} = (\text{Cp} + \text{Ar} + \text{R} + \text{Im})$$

$$\text{Sal} = (\text{Ev} + \text{Ab} + \text{Ex} + \text{Uc})$$

$$\Delta V = (\text{Ar} + \text{Cp} + \text{R} + \text{Im}) - (\text{Ev} + \text{Ab} + \text{Ex} + \text{Uc}) \quad (3)$$



La ecuación (3) es representada esquemáticamente en la figura anterior. El significado de cada una de las variables del balance es la siguiente:

ΔV	=	Variación de volumen
C_p	=	Cuenca propia.
A_r	=	Escurrimiento aguas arriba.
R	=	Retornos.
I_m	=	Importaciones de cuencas externas.
E_v	=	Evaporación en cuerpos de agua y en áreas sin vegetación.
A_b	=	Escurrimiento aguas abajo.
E_x	=	Exportaciones a cuencas externas.
U_c	=	Usos de consumo

De acuerdo con los capítulos; 3. *Definiciones* y 4. *Especificaciones* de la NOM-011-CNA-2000:

Cambio de almacenamiento: incremento o decremento del volumen de agua almacenada en la unidad hidrogeológica en un intervalo de tiempo cualquiera.

Cuenca Propia: ó escurrimiento natural; es el volumen medio anual de agua superficial que se capta por la red de drenaje natural de la propia cuenca hidrológica.

El volumen medio anual de escurrimiento natural, se determina aplicando alguno de los métodos descritos en el Apéndice Normativo A de la Norma Oficial Mexicana.; Método Directo o Métodos Indirectos.

Escurrimiento aguas arriba: es el volumen medio anual de agua que en forma natural proviene de una cuenca hidrológica ubicada aguas arriba de la cuenca o subcuenca en análisis.

Retornos: son los volúmenes que se reincorporan a la red de drenaje de la cuenca hidrológica, como remanentes de los volúmenes aprovechados en los diferentes usos del agua.

El volumen anual de retornos, se determina mediante aforo o estimación de las salidas de los volúmenes que se reincorporan a la red de drenaje de una cuenca.

Importaciones de cuencas externas: se determina sumando los volúmenes de agua superficial que se reciben en la cuenca hidrológica en estudio, de otra u otras cuencas hidrológicas o unidades hidrogeológicas que no aportan su caudal por escurrimiento natural.

Evaporación en cuerpos de agua y en áreas sin vegetación: Evaporación: es el proceso por el cual el agua, en la superficie de un cuerpo de agua natural o artificial o en la tierra húmeda, adquiere la suficiente energía cinética de la radiación solar, y pasa del estado líquido al gaseoso.

Escurrimiento aguas abajo: El volumen medio anual de escurrimiento desde la cuenca aguas arriba, se determina con la expresión utilizada para calcular el volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo que corresponde al de la subcuenca en estudio ubicada aguas arriba.

Exportaciones a cuencas externas: El volumen anual de exportaciones, se determina sumando los volúmenes de agua superficial que se transfieren de la cuenca hidrológica en estudio, a otra u otras a las que no drena en forma natural.

Usos de consumo: Diversos usos: se refiere a todos los usos definidos en la Ley de

Aguas Nacionales, como doméstico, agrícola, acuícola, servicios, industrial, conservación ecológica, pecuario, público urbano, recreativo y otros.

El volumen anual concesionado de agua superficial se determina sumando los volúmenes anuales asignados y concesionados por la Comisión Nacional del Agua, mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) para la explotación, uso o aprovechamiento de agua en la cuenca hidrológica, limitaciones que se establezcan en las vedas y si es el caso, los volúmenes correspondientes a reservas, conservación ecológica y reglamentos conforme a la Programación Hidráulica.

Hasta aquí, se ha presentado la metodología para balance de agua superficial, una versión integral tiene que considerar también el balance de agua subterránea con conceptos fundamentales análogos. Es bien sabido que las fuentes de abastecimiento para satisfacer las demandas de agua de las ciudades provienen de estas dos fuentes.

Queda manifiesta la visión integral del movimiento del agua en la naturaleza, en donde la variable denominada *Usos de consumo* es solo una parte de las componentes que integran la ecuación de balance, más aun, los usos público urbano, doméstico, servicios, industrial y recreativo correspondientes a usuarios comunes en las ciudades, todos ellos son solo una parte de las demandas que se tienen que satisfacer.

Al diseñar los sistemas de abastecimiento de agua potable, es frecuente considerar solo la demanda de los usuarios de las poblaciones que se tiene que satisfacer, en función de ella se dimensiona la red que permita conducir los volúmenes necesarios para ese fin. El hecho de dejar de pensar en los demás usuarios, entre ellos a la naturaleza misma, produce los problemas conocidos en la disminución de los volúmenes en las fuentes de abastecimiento.

Es claro que la sobre explotación del recurso produce problemas diversos. Un ejemplo de esos problemas se da en la Cd. de México, en donde se tiene una sobreexplotación del agua subterránea. Es conocido que ahí la extracción es mayor que la recarga natural, hecho que motiva la generación de espacios vacíos en el subsuelo, que al consolidarse, hacen definitivamente imposible regresar a las condiciones naturales.

Desde un punto de vista ecológico, el costo del daño que se le produce a la naturaleza es proporcional al gasto necesario para restablecer las condiciones anteriores a la afectación, en el caso de la Cd. de México, es definitivamente imposible regresar a las condiciones naturales, en virtud de que los hundimientos diferenciales producidos por la sobreexplotación de los acuíferos son irreversibles.

CALCULO DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA

Al continuar con el análisis del balance hídrico propuesto en la NOM 011, para conocer la disponibilidad de agua, es necesario hacer un balance en el sentido de escurrimiento natural, de tal modo se aplica la ecuación de balance en las cuencas altas.

El escurrimiento hacia aguas abajo en cada una de las subcuencas interconectadas se obtiene con dos posibles métodos, el primero se basa en el aforo de dicho escurrimiento, en los casos en que no se pueda o no se tenga el dato, se calcula a partir de la ecuación de continuidad, despejando la variable de interés.

$$Ab = (Ar + Cp + R + Im) - (Ev + Ex + Uc) + \Delta V \quad (4)$$

Con los resultados se va haciendo una aplicación similar en las cuencas intermedias y así sucesivamente hasta llegar a las cuencas bajas.

El siguiente paso para obtener la disponibilidad de agua es el cálculo de los volúmenes

reservados, en términos prácticos, se van guardando los volúmenes comprometidos, que están asociados con las concesiones vigentes.

La idea del cálculo del volumen reservado de una cuenca, puede parecer injusta desde un punto de vista de los posibles usuarios en la cuenca alta, al analizar el problema desde otro ángulo, aparentemente siguen siendo injustos los criterios establecidos.

Aclarando un poco más lo expuesto en el párrafo anterior, se puede ver de la siguiente manera, al dividir una cuenca de estudio en solo dos subcuencas, es posible que la cuenca alta sea la productora del recurso, y la cuenca baja la zona consumidora, algún posible usuario en la cuenca alta podría demandar una concesión de agua, es posible que esa demanda de agua no pueda otorgarse debido al volumen concesionado en la cuenca baja, el cual habría motivado volúmenes reservados que tienen que respetarse, aunque el usuario de la cuenca alta ve el recurso en el río, no puede obtener una concesión, ya que dicho recurso esta comprometido para los usuarios de la cuenca baja.

Para el posible usuario de la cuenca alta, es injusto, por que él considera que en su cuenca es donde se genera el volumen del recurso, ambos usuarios pertenecen a la misma cuenca, el escurrimiento se dio siempre en la zona donde los usuarios de la cuenca baja utilizan el recurso, para ellos sería injusto que les quitaran la concesión, siendo que posiblemente tuvieron una inversión fuerte para aprovechar el recurso y transformarlo en otros beneficios.

Finalmente la disponibilidad de agua es la diferencia entre el volumen del recurso que aun no ha sido utilizado menos los volúmenes reservados. Por ejemplo, si en un sistema de cuencas interconectadas, en la salida hacia el mar se tiene un volumen de escurrimiento aprovechable, ese escurrimiento tendría que repartirse entre todos los usuarios de las cuencas interconectadas desde donde se produce ese escurrimiento. La NOM 011 define claramente como sería una distribución equitativa del recurso entre los usuarios de la cuenca.

Cuando toda la cuenca corresponde a un solo país o una sola entidad federativa, el problema es menos complicado. Para los casos de cuencas internacionales, cada gobierno quiere satisfacer a todos sus usuarios y es presionado por ellos, en este caso la distribución del recurso debe ajustarse a tratados internacionales.

El caso interesante para este trabajo considera sujetarse a un solo tipo de reglas del juego, en particular a las establecidas por la NOM 011, que pueden ser criticadas principalmente en los siguientes dos aspectos:

La NOM 011 establece que el balance del recurso hídrico se debe realizar para periodos anuales, situación que debería cambiar. Para el caso de México, los ciclos hidrológicos están relativamente bien marcados, hay una separación clara entre la época de estiaje y la época de avenidas, en la época de avenidas, hay escurrimientos que producen inundaciones, los cuales en muchos casos no pueden ser aprovechados y que terminan escurriendo irremediamente hacia el mar, de tal manera que de todo el escurrimiento virgen o por cuenca propia producido, una buena proporción no es aprovechable, por otro lado, muchos de los usuarios no demandan del recurso en esa época, principalmente las actividades agrícolas y pecuarias disminuyen su demanda en esa temporada.

Como era de esperarse, las curvas de oferta y demanda tienen una variación importante a lo largo del año, misma que debe ser considerada en el cálculo de la disponibilidad de agua, por lo que es necesario reducir el intervalo de tiempo del balance a periodos mensuales, por lo menos, el intervalo de tiempo debería reducirse a dos periodos en un año, uno para la época de estiaje y otro para la época de avenidas.

En resumen, la misma metodología propuesta en la Norma Oficial Mexicana para conservación del recurso agua, debería aplicarse por lo menos para dos periodos en un año cuando solo hay una época de estiaje y una de avenidas, y sería deseable que se dividiera en periodos de tiempo mas cortos, análisis mensuales serían aceptables para obtener un mejor detalle de la disponibilidad de agua.

El cambiar de intervalo de tiempo en el análisis no es tan sencillo, sobre todo considerando que entre las variables del balance, se tiene a las demandas del recurso, el padrón de usuarios considera concesiones anuales y no especifica la distribución de la concesión a lo largo del año, por lo que el cambio debe facilitarse en todas las variables, incluyendo los usos consuntivos.

Recordando que la disponibilidad en las fuentes de abastecimiento enfocadas a satisfacer la demanda de la población asociada con usuarios dentro de las ciudades, requiere generalmente agua con calidad potable. Ni en la NOM 011, o en los manuales o en las guías para el cálculo de la disponibilidad superficial o subterránea se aborda esta parte tan importante.

Por otro lado, al observar los balances de agua aplicados en las diferentes cuencas del país, se observan problemas que hacen muy difícil cerrar los balances aún sin considerar las características de calidad del agua. Pero el hecho de no tomar esto en cuenta, hace posible considerar que se dispone de agua en los casos en los que la calidad del recurso no permite la utilización del mismo.

Sin el propósito de cambiar la política de re-uso, se plantea la necesidad de hacer una separación de los usuarios que utilizan el recurso en términos de su calidad. En ese sentido, se plantea satisfacer la demanda con un orden establecido, la prioridad sería diferente en cada lugar, sin dejar de pensar que en muchos casos se coincide en satisfacer primero la demanda de usuarios que requieren la calidad potable.

Por otro lado, se debe dejar bien claro que los usuarios que le incluyan a su agua residual una mayor concentración de contaminantes, deberán pagar más por el servicio, esto es por que es mas costoso regresarle al recurso características que permitan usos posteriores.

Aunque dentro de la Ley de Aguas Nacionales, se definen parámetros de calidad a respetarse, en la NOM 011 que orienta los cálculos a la obtención de la disponibilidad no se considera aún las características de calidad. Al hacer balances solo tomando en cuenta la cantidad y no la calidad, se corre el riesgo de asumir que se tiene caudal suficiente para cubrir todos los usos, sobre todo cuando parte de las entradas corresponde a los retornos que contemplan caudales no aptos para todo tipo de usuarios. Lo anterior aunque en nuestros tiempos no representan problemas fuertes, en un futuro quizás no muy lejano pueda representar un serio problema, sobre todo en ciudades grandes en donde actualmente ya se tienen problemas de suministro del vital líquido.

Para aclarar mejor la dificultad en el cálculo de las variables que integran el balance de agua, se puede recurrir a los registros de régimen de almacenamiento que se tiene para todos los cuerpos de agua más importantes del país, son registros en donde se conocen valores por día para diferentes variables hidroclimatológicas y de balance relacionados con los vasos de almacenamiento:

Esos registros describen las variables climatológicas (lluvia y evaporación) en milímetros, los datos relacionados con el vaso (nivel, área, volumen y variación de volumen), las entradas al vaso (lluvia en volumen, escurrimientos superficiales por río), y finalmente las salidas en volumen.

Finalmente se tiene una variable que no es considerada en los balances orientados al cálculo de la disponibilidad, esta variable tiene que ver con los errores cometidos en la estimación o medición de algunas variables, o la omisión de otras variables de entrada o salida, esta variable se denomina ENM – SNM “Entradas no medidas menos salidas no medidas”, como es de suponer, dicha variable permite cerrar los balances en los registros de régimen de almacenamiento en vasos, y además justifica que aunque a veces los registros de las entradas sean mayores que las salidas, se registren descensos en los niveles de almacenamiento.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Recordando el motivo de este trabajo, el cálculo de la disponibilidad de agua en las fuentes de abastecimiento se debe hacer sobre todo en las zonas en donde la dotación del recurso esta causando problemas a la naturaleza.

El intervalo de tiempo a utilizarse para este análisis deberá ser con el mejor detalle, en lo posible un balance mensual permitirá tener mejor monitoreadas las fuentes, en todos los casos cuidando tanto la calidad como la cantidad del recurso.

Las proyecciones de población que son utilizadas comúnmente para calcular la vida útil de los sistemas de abastecimiento de agua que diseñamos, además permiten hacer una prospectiva del problema, hacen evidente que las demandas son monotónicamente crecientes, y si bien la oferta no decrece, si es notable la calidad de la misma, lo cual repercute a final de cuentas en una disminución del recurso aprovechable.

Hay tantos casos sin explicar como variantes de cuencas en diferentes partes del mundo, algunos corresponden a lugares con muy poca agua, otros tienen relación con cuencas que tienen una aparente abundancia, casos sin usos consuntivos y casos con dotaciones mucho mayores a la producción de agua en la propia cuenca, en fin, variedad de casos con todas las combinaciones posibles, cada uno diferente, no podemos asumir criterios similares, para todos los problemas habrá una solución particular, es necesario recordar que una misma cuenca no se comporta igual en condiciones diferentes en el tiempo, la realidad física es cambiante, cada caso que analicemos, deberemos hacerlo paso a paso, sin obviar alguna etapa, con esto de antemano se podrá aspirar a tener balances confiables que permitan un mejor manejo de los recursos.

BIBLIOGRAFÍA

Aparicio, M.F.J. (1997). Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa.

Chow, V.T. (1964). Handbook of applied hydrology, a compendium of water- resources technology”. New York : Mcgraw-Hill.

Comisión Nacional del Agua, CNA (1990). Reunión del Programa Nacional de Agua Potable y Alcantarillado. Los Mochis, Sin., 47 p.

Comisión Nacional del Agua, CNA (1994). Manual para evaluar recursos hidráulicos subterráneos, 244 p.

Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional de Aguas del Valle de México, CNA- GRAVAMEX (1995). Distribución de la calidad del agua subterránea en la Cuenca de México. Contrato EE-402-GAVM-95, elaborado por EFE Asesores.

Comisión Nacional del Agua, CNA (1996). Evaluación y manejo de acuíferos. Documento

interno, 22.p.

Comisión Nacional del Agua (CNA, 1996): Resumen de datos y condiciones geohidrológicas de los acuíferos de la República Mexicana. Gerencia de Aguas Subterráneas, Documento Interno, 38 p.

Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional de Aguas del Valle de México, CNA-GRAVAMEX (1997). Diagnóstico de la Región XIII. Comisión Nacional del Agua. Resumen.

Comisión Nacional del Agua, CNA (1998). Estimación de la disponibilidad de agua superficial en cuencas.

Comisión Nacional del Agua (CNA, 1998): Evaluación y Manejo de Acuíferos. Gerencia de Aguas Subterráneas, Documento Interno, 42 p.

Comisión Nacional del Agua, CNA (1999, 2001 y 2002). Compendios Básicos del Agua en México. Subdirección General de Programación.

NOM-011-CNA-2000 Conservación del recurso Agua.

Comisión Nacional del Agua, CNA (2000a). Programa Hidráulico de Gran Visión 2001-2020 Región XIII Valle de México. Síntesis básica.

