

Balance hídrico del valle de México

J. Lafragua, A. Gutiérrez, E. Aguilar, J. Aparicio, R. Mejía,
O. Santillán, M.A. Suárez y M. Preciado

Resumen

La cuenca hidrológica del valle de México es una cuenca cerrada que se localiza en el centro de la República Mexicana, con un área drenada de 9,611 km² y una población de 18,800,000 habitantes; esta cuenca es una de las más importantes pero más conflictivas del país. La información de 102 estaciones climatológicas y nueve estaciones hidrométricas fue utilizada para obtener la precipitación, escurrimiento, infiltración y evapotranspiración de la zona. La cuenca se dividió en cuatro subcuencas hidrológicas y además se consideraron siete acuíferos, 12 cuerpos de agua y 85 municipios. Asimismo, los volúmenes de consumo de agua requeridos por la población se estimaron a nivel municipal. La ecuación de balance se presenta con un intervalo de tiempo mensual, admite una mejor desagregación espacial y temporal de los componentes que intervienen en la dicha ecuación. Uno de los componentes más importantes en el balance fueron los volúmenes perdidos en las redes de agua potable; sin embargo, como la información de estas fugas sólo está disponible en la zona urbana más importante de la cuenca: el Distrito Federal, fue necesario emplear procedimientos regionales para estimar las pérdidas de agua en todos los municipios que integran la cuenca del valle de México. Dicha regionalización considera la población del municipio, número de viviendas que disponen de agua potable y alcantarillado, grado de marginación y pendiente media del terreno. Los resultados del balance permiten llevar a cabo una planeación de la futura disponibilidad del recurso en esta cuenca.

Introducción

Dentro de la actividad de planeación y manejo del recurso agua, el balance hídrico es una herramienta útil para estimar la disponibilidad de agua en las cuencas hidrológicas. La ecuación fundamental para llevar a cabo este balance es la ecuación de continuidad. El principio de continuidad consiste básicamente en cuantificar las entradas y salidas a la cuenca, así como su cambio de almacenamiento. Como el agua subterránea y la superficial se encuentran fundamentalmente interconectadas -el agua subterránea alimenta al agua superficial principalmente a través del llamado escurrimiento base y de los manantiales,

y el agua superficial alimenta al acuífero a través de la infiltración o percolación hacia el suelo- es necesario determinar un balance hídrico que considere el agua superficial y la subterránea como un solo sistema hidrológico. Tradicionalmente se presenta un balance hídrico subterráneo y otro superficial. Sin embargo, en este trabajo se presenta en forma conjunta los componentes del balance superficial y del balance subterráneo; a este balance en lo sucesivo se le denomina balance hídrico integrado. Por otro lado, se utiliza en general la ecuación de balance en un intervalo de tiempo anual; sin embargo, para efectos de planeación, es recomendable utilizar un intervalo de tiempo más pequeño. En este estudio se presentan los componentes de la ecuación de continuidad desagregados en meses.

El valle de México es, sin duda, un reto importante para estimar un balance hídrico integrado. Con un fuerte desequilibrio entre su recarga y explotación subterránea (Birkle *et al.*, 1998) el valle de México es una de las cuencas más importantes pero más conflictivas del país: ocupa menos del 1% del territorio nacional, en ella vive 20% de la población total del país y se genera en ella el 33% del PIB nacional (CNA, 2000). De esta forma, el objetivo principal de este estudio consiste en obtener el balance hídrico integrado, el cual considere componentes tanto superficiales como subterráneos, así como los diversos usos del recurso utilizando un intervalo de tiempo mensual.

Para determinar de manera precisa cada uno de los componentes de la ecuación de balance, la zona de estudio se dividió en cuatro subcuencas hidrológicas y en siete acuíferos. Las subcuencas, a su vez, se dividen en municipios que constituyen, en este estudio, la unidad básica de cálculo.

Localización del valle de México

Se ubica en el centro de la República Mexicana, entre los paralelos 19°03'36" y 20°11'24" de latitud

norte y entre los meridianos 98°12'00" y 99°31'12" de longitud oeste. Limita al norte con la sierra de Pachuca y la Mesa Grande, al este con las sierras de Calpulalpan y de Río Frío, al sur con las sierras Nevada, del Chichinautzin y la del Ajusco, y al oeste con la sierra de Las Cruces y de Monte Bajo (ilustración 1).

Respecto a su localización administrativa dentro de la República Mexicana, la superficie de la cuenca (9611.4 km²) abarca parte de los estados de: México, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y casi la totalidad del Distrito Federal. Comprende 96 municipios y 16 delegaciones del Distrito Federal. En la tabla 1 se muestran las superficies por entidad federativa, así como el número de municipios que tienen una superficie dentro de la cuenca mayor al 40%, por lo tanto se excluyeron 17 municipios, así como el municipio de Hueyotlipa, Tlax. (29014) debido a que la cabecera municipal se localiza fuera del límite de la cuenca. De los 18'768,463 habitantes en el valle de México en el año 2000, el 46% radican en el Distrito Federal, con una densidad de población mayor de 5,800 habitantes por kilómetro cuadrado.

Los sistemas meteorológicos predominantes marcan claramente dos épocas climáticas con

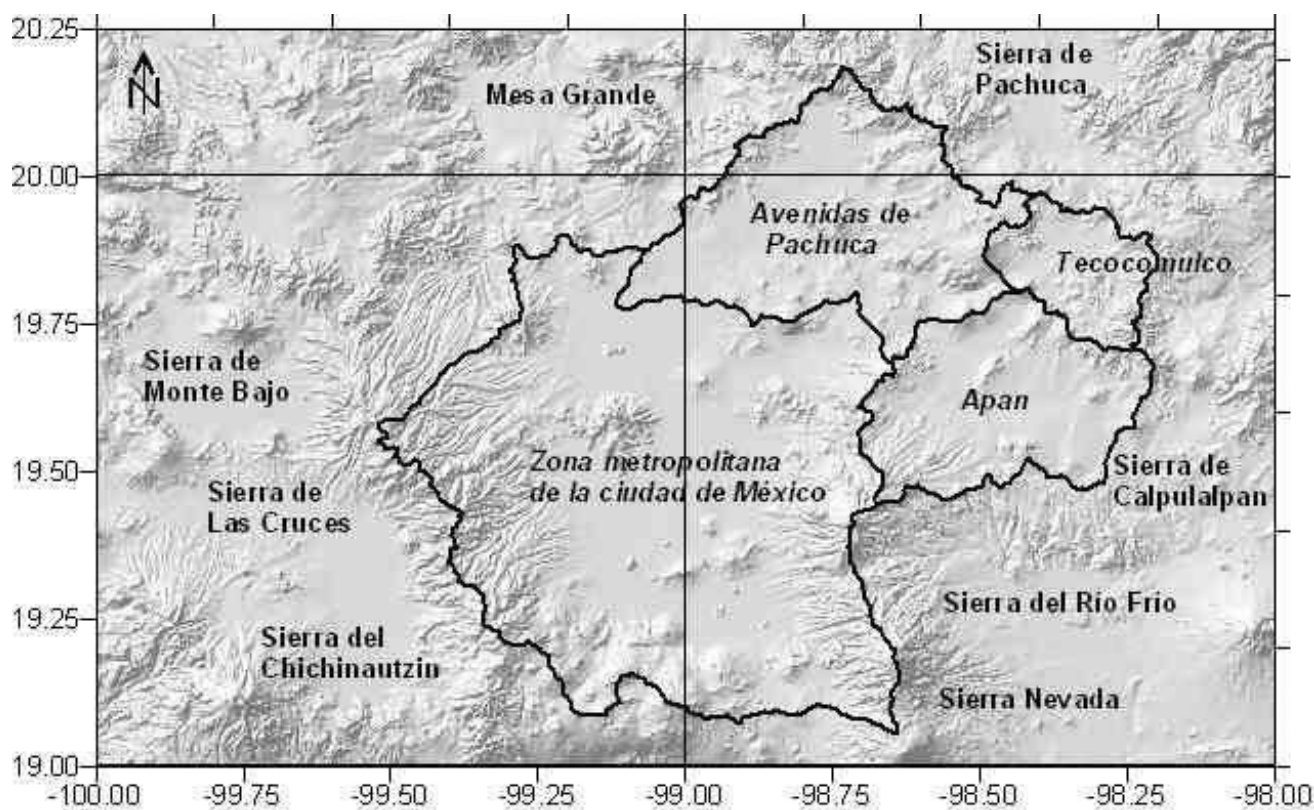


Ilustración 1. Principales formaciones tipográficas circundantes al valle de México y subcuencas de estudio.

particularidades bien definidas: la época de lluvias, que se extiende de junio a octubre, caracterizada por aire marítimo tropical con alto contenido de humedad; y la época de secas que se identifica con humedad relativa baja (masa de aire de tipo polar). Esta época se subdivide en dos: la seca-caliente, de marzo a mayo, en la cual predomina aire con características tropicales pero seco; y la época seca-fría, de noviembre a febrero cuyas características meteorológicas la definen como aire de tipo polar con bajo contenido de humedad.

La temperatura media anual, considerando el periodo de 1960 a 2001, es de 14.5°C y oscila entre los 12 y 17°C. En los meses de abril y mayo se presentan los valores más altos y en noviembre, diciembre, enero y febrero las temperaturas más frías. En las partes planas se presentan las temperaturas más altas, como es el caso del norte del Distrito Federal y parte central del Estado de México, y las temperaturas bajas en las zonas montañosas, como la sierra del Ajusco y sierra Nevada. La precipitación media anual (1960-2001) es de 671 mm con valores altos en la sierra del Ajusco y en la sierra Nevada, con valores mayores de 1,000 mm, y valores bajos en la parte central, entre 500 y 600 mm. La evaporación media anual es de 1,640 mm, en los meses de marzo a mayo es más intensa, y en el mes de diciembre se presenta el valor mínimo.

Tabla 1. Superficie de la cuenca por entidad federativa.

Entidad federativa	Área, km ²	Núm. municipios	Núm. municipios con % de superficie dentro de la cuenca	
			< 5%	5 a 40%
Distrito Federal	1,302.12	16		
Edo. de México	4,915.39	61	7	4
Hidalgo	2,494.22	20	3	2
Morelos	1.14	1	1	
Puebla	102.95	4	3	1
Tlaxcala	795.57	10	3	2
Total	9,611.39	112	17	9

La zona de estudio se dividió en las siguientes subcuencas: Tecocomulco, Apan, Avenidas de Pachuca y Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) (ilustración 1). Las estaciones hidrométricas que son utilizadas en este estudio se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Estaciones hidrométricas utilizadas.

Subcuenca	Estaciones hidrométricas	Clave	Periodo de registro
Apan	Irolo	26361	1968-2001
Tecocomulco	San Jerónimo	26437	1968-2001
Av. Pachuca	Manantial	26312	1968-1995
	Manantial margen derecha	26316	1968-1995
	Manantial margen izquierda	26323	1968-1995
ZMCM	Túnel Viejo de Tequixquiac	26007	1960-2001
	Túnel Nuevo de Tequixquiac	26216	1960-2001
	El Salto	26030	1991-2001 2001
	Portal de salida	26454	
	Conejos	26437	1978-1996
	Emisor Requena	26500	1991-2001

El estudio de los siete acuíferos existentes en el valle de México está vinculado a dos superficies: primeramente, a la cuenca hidrológica y/o subcuenca geológica, misma que considera los límites de la cuenca, como una unidad morfoestructural de carácter endorreico, y a los parteaguas establecidos a través de las condiciones topográficas e hidrográficas que se suscitan en ésta. La segunda, a la superficie de control piezométrico obtenida durante el año de 2001, fecha del balance (tabla 3).

Ecuación de balance hídrico integrado

La ecuación de continuidad es la base para realizar un balance hídrico; dicho balance se emplea generalmente para estimar la disponibilidad de agua en cuencas hidrológicas. En este estudio, se plantea la ecuación tomando en cuenta los componentes, tanto superficiales como subterráneos y utilizando como referencia la cuenca superficial; ya que es en donde se tienen las mediciones de los volúmenes de salida de la cuenca, lo que permitirá una comparación cuantitativa de los resultados obtenidos. A este balance en lo sucesivo se le denomina balance hídrico integrado.

Tabla 3. Superficies relacionadas con los acuíferos en estudio.

Acuífero	Superficie (km ²)	
	Subcuenca geológica	De control piezométrico
	3,236	1,332
	640	110
Soltepec	588	245
Apan	816	380
Texcoco	1,632	420
Chalco - Amecameca	1,124	350
Zona Metropolitana de la Cd. de México	1,564	550

La ecuación de balance utilizada en este trabajo, tomando como plano de referencia la superficie, es la siguiente:

$$\Delta V = (VII + Ar + Im + Re + B) - (Ev + Et + Ab + Ex + Uc + f + In) \quad (1)$$

donde ΔV es el cambio de almacenamiento en la superficie, VII volumen de lluvia, Ar escurrimiento aguas arriba, Im importaciones de cuencas externas, Re retornos, B extracciones por bombeo dentro de la cuenca, Ev evaporación en cuerpos de agua y en áreas sin vegetación, ET evapotranspiración, Ab escurrimiento aguas abajo, Ex exportaciones a cuencas externas, Uc usos de consumo (superficial y subterráneo), f la infiltración profunda de las pérdidas en redes de agua potable, e In infiltración de lluvia. Todas las variables expresadas en hectómetros cúbicos (hm³).

Componentes superficiales

La evaporación Ev en 12 cuerpos de agua principales, Ev (1), se obtuvo utilizando la lámina de agua evaporada registrada en estaciones climatológicas cercanas a los cuerpos de agua y su área correspondiente. A este volumen se le agregó la evaporación en zonas sin vegetación y urbanas, Ev (2), estimada con el método de Turc.

En el cálculo de la evapotranspiración ET , se separaron áreas agrícolas (58% del área total) y vegetación arbórea (bosques u otras vegetaciones). Se utilizó la fórmula de Blanney-Criddle (Aparicio, 1997) para las áreas agrícolas y la de Turc (Sánchez, 2001) para bosques u otras vegetaciones.

El valle de México recibe volúmenes de agua (Im) del sistema Cutzamala y del acuífero Alto Lerma. Los retornos Re se calcularon en función de

los usos de consumo utilizando un porcentaje de retorno asignado de acuerdo al uso del agua.

El escurrimiento aguas abajo de la cuenca Ab se evaluó utilizando el escurrimiento medio anual aforado a la salida de la cuenca. Los términos Ar y Ex para el valle de México no aplican, por lo tanto su valor es cero.

El componente f , es una parte poco estudiada ya que normalmente no se cuenta con mediciones confiables al respecto. Sin embargo, se aprovecharon las mediciones de fugas que proporcionó el Sistema de Agua de la Ciudad de México (antes Dirección General y Construcción de Obras Hidráulicas) para proponer un procedimiento de regionalización que permite estimar los volúmenes de fugas en sitios en donde no se tienen registros y, con la misma metodología del cálculo de la infiltración por lluvia, se estimó el valor de la infiltración profunda que proviene de las fugas de las redes de agua potable.

Componentes subterráneos

Para la estimación de la infiltración por lluvia In se tomó en cuenta el tipo de suelo en cada acuífero y el porcentaje de lluvia susceptible de infiltrarse de acuerdo con el primero. Las extracciones por bombeo B se calcularon tomando en cuenta el cambio de almacenamiento subterráneo, mediciones piezométricas, flujo lateral, recarga y aporte de manantiales.

Resultados

Aplicar una ecuación de balance integrada mes a mes permitió tomar en cuenta, de una manera más precisa, las variaciones temporales de los componentes de la ecuación de balance. En la tabla 4 se muestran los resultados integrados por mes, de acuerdo con la ecuación 1. La integración de estos valores a resultados anuales permite comparar, de manera clara, los resultados de este balance integral con los resultados obtenidos con los procedimientos tradicionales. Los resultados mostraron una congruencia a nivel anual, lo que permite validar la metodología propuesta en este trabajo. Con estos valores anuales se elaboró un esquema para explicar claramente los valores de cada componente (ilustración 2).

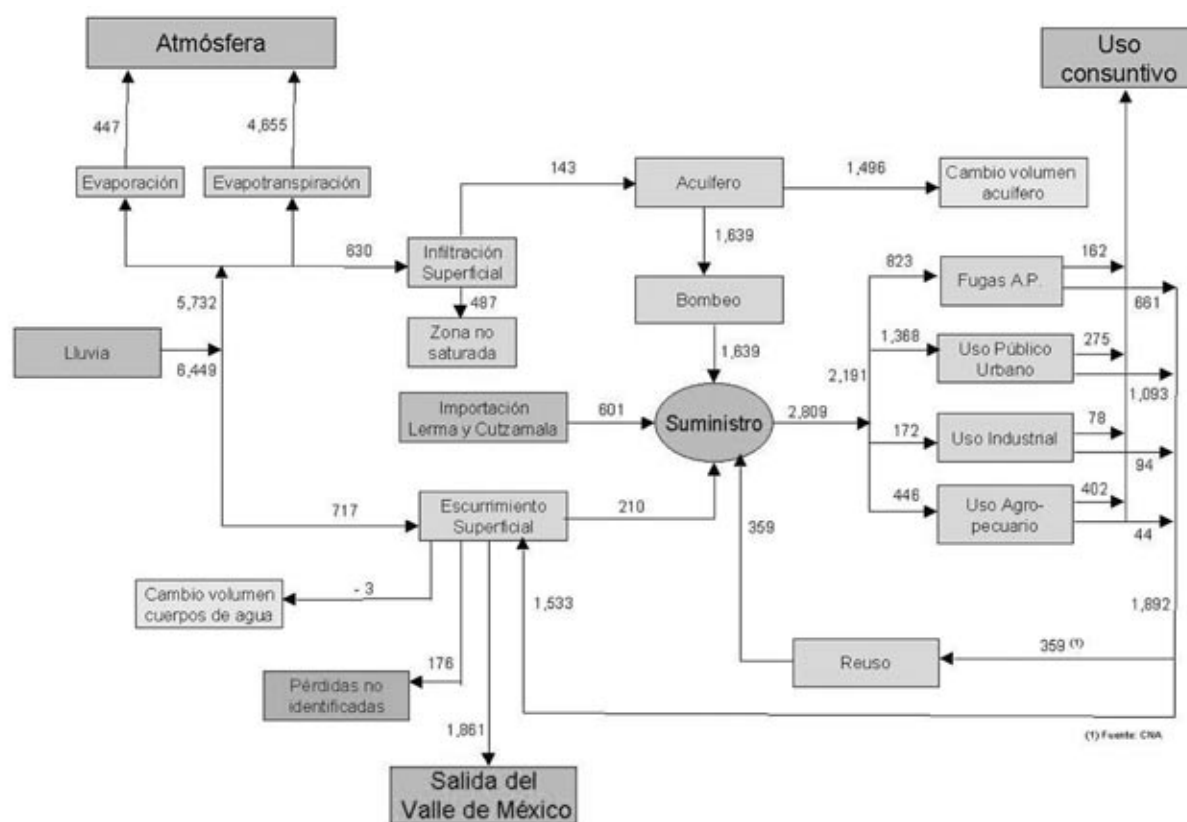


Ilustración 2. Balance hídrico integrado del valle de México en hm³.

Conclusiones

La ecuación de balance presenta una mejora, ya que no utiliza el concepto de escurrimiento virgen o escurrimiento por cuenca propia; en su lugar se deja como entrada el volumen de lluvia. En consecuencia, en los componentes de salida se incluyen los volúmenes de evapotranspiración, evaporación en áreas sin vegetación y urbanas, así como el volumen de infiltración.

Se asume que el escurrimiento virgen es igual a la diferencia del volumen de lluvia menos el volumen de la evapotranspiración, volumen de evaporación, tanto en cuerpos de agua como en las áreas sin vegetación y urbanas, y el volumen de infiltración. Resultando un valor de 717 millones de m³ al año, lo que representa un coeficiente de escurrimiento de 0.11.

Cuando se desagrega el escurrimiento virgen de la manera anterior, también se tiene la ventaja

de que se puede ligar mejor el resultado del balance superficial con el balance subterráneo, ya que las pérdidas por infiltración es precisamente una liga entre el balance superficial y el subterráneo.

Para estimar la evapotranspiración, se propone separar en dos grupos el área de cobertura vegetal: en agrícola y en estratos arbóreos (bosques, pastizales, matorrales, etc.) y para lograr una mejor estimación realizar el cálculo por municipio. En el primer grupo se aplica la fórmula de Blanney-Cridle que es ampliamente utilizada en el área agronómica; y al segundo grupo la fórmula de Turc, la cual considera valores promedio de temperatura y precipitación. Esta variable de salida, de gran importancia, representa el 70% del volumen llovido.

Otros valores anuales obtenidos fueron: el volumen de lluvia de 6,449 millones de m³, lo que representa una precipitación media anual de 671 mm. Los retornos de agua, difíciles de obtener con precisión, resultaron de 1,892 millones de m³, representando el 19% de los volúmenes de entrada.

Tabla 4. Balance hídrico integrado del valle de México.

Variable	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
ENTRADAS													
	96.16	81.20	148.57	319.13	593.29	1,138.09	1,255.9	1,180.68	964.85	489.03	115.06	66.95	6,448.91
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	51.00	45.13	50.08	49.40	52.10	49.25	50.97	50.55	49.79	51.87	49.08	51.72	600.94
	134.20	136.40	137.80	139.20	141.00	138.70	135.90	136.40	138.50	134.70	132.40	133.90	1,639.10
	153.90	155.20	157.05	160.17	163.25	159.83	158.63	160.50	161.93	154.77	152.55	154.25	1,892.03
Total 1	435.26	417.93	493.5	667.9	949.64	1,485.87	1,601.4	1,528.13	1315.07	830.37	449.09	406.82	10,580.98
SALIDAS													
(1)	7.30	8.35	12.19	12.03	10.39	8.75	8.39	8.13	6.98	7.92	6.32	5.87	102.62
(2)	4.96	5.01	9.66	20.86	35.12	60.99	63.47	60.85	46.97	25.39	7.12	3.47	343.87
	51.43	38.97	65.75	241.13	518.41	884.32	959.48	889.22	699.48	203.14	58.88	44.39	4,654.60
	129.34	114.25	118.72	116.74	139.98	177.20	214.62	220.18	207.11	158.19	132.69	132.29	1,861.31
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	219.50	211.53	215.53	233.89	246.95	235.33	250.72	264.53	257.93	223.34	223.77	226.21	2,809.23
	9.49	8.01	14.75	31.74	58.45	111.04	122.34	114.91	93.83	47.67	11.42	6.57	630.22
	13.3	13.3	13.5	13.6	13.8	13.9	13.7	13.5	13.7	13.2	13.1	13.2	162.00
Total 2	435.32	399.42	450.10	669.99	1023.10	1491.53	1632.72	1571.32	1326.00	678.85	453.30	432.00	10,563.85
VARIACIÓN DE VOLUMEN													
	-0.06	18.51	43.40	-2.09	-73.46	-5.66	-31.32	-43.19	-10.93	151.52	-4.21	-25.18	17.33

Dos variables la infiltración y la extracción por bombeo, se integran a la ecuación propuesta y para su obtención se debe utilizar la ecuación del balance subterráneo tradicional. La infiltración, debida principalmente a la lluvia, considerando el tipo de suelo existente en el suelo (el de mayor predominio resultó el Feozem con el 45% de la superficie total), es igual a 630 millones de m³ al año. Ahora bien, no toda el agua infiltrada llega al acuífero, por lo cual en este estudio no se considera a la infiltración y recarga como sinónimos. Por lo tanto, tomando en cuenta el tipo de roca (cuaternario aluvión y cuaternario volcánico representan aproximadamente el 50% de la superficie total) se obtuvo un valor de recarga anual de 143 millones de m³. La extracción por bombeo es de 1,639 millones de m³ y como resultado del balance subterráneo se obtuvo un cambio de almacenamiento de -1,496 millones de m³ al año.

Respecto a los valores de consumo, se comprobó que el principal uso en esta cuenca fue el uso público urbano con 2,191 millones de m³ al año. Debido a la importancia de este uso se consideró relevante estimar los volúmenes asociados a las

pérdidas en los sistemas de distribución asociados con este uso, las cuales resultaron de 823 millones de m³ (37%). Sin embargo, el valor a considerar dentro de la ecuación es la cantidad que se pierde por infiltración profunda (162 hm³) ya que la diferencia se mide a la salida de la cuenca.

Referencias

- Aparicio, M.F.J., 1997, *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa.
- Birkle P., Torres V., y González E., 1998, "The Water Balance for the Basin of the Valley of Mexico and Implications for Future Water Consumption". *Hydrogeology Journal* vol. 6, pp.500-517
- Comisión Nacional del Agua, 1998, *Estimación de la disponibilidad de agua superficial en cuencas*.
- Comisión Nacional del Agua, 2000, *Programa Hidráulico de Gran Visión 2001-2020 Región XIII Valle de México*. Síntesis básica.
- Sánchez, S.R., 2001, *Evapotranspiración*. Depto. de Geología, UNAM.

Autores



Jaqueline Lafragua Contreras. Ingeniera Civil, Instituto Tecnológico de Zacatepec, Morelos, 1988. Maestra en Ingeniería Hidráulica, UNAM (DEPFI-Morelos), 1996. Master en hidrología, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, España, 1997. Líneas de trabajo: Hidrología de superficie; curvas intensidad-duración-periodo de retorno, estimación de avenidas de diseño de obras hidráulicas, proceso lluvia-escurrimiento y balances hídricos.



Roberto Mejía-Zermeño. Ingeniero Civil y Maestro en Hidráulica, ambas en la Universidad Nacional Autónoma de México. Subcoordinador de Hidrología y Mecánica de Ríos. Líneas de trabajo: Hidrología superficial y fluvial.



Alfonso Gutiérrez López. Ingeniero Civil, UNAM, 1991. Maestro en Ingeniería Hidráulica, UNAM, 1995. Doctor en Hidrología y Medio Ambiente, por el Instituto Nacional Politécnico de Grenoble, Francia, 2003. Líneas de trabajo: Hidrología superficial, pronóstico hidrológico y regionalización, así como hidráulica fluvial.



Oscar David Santillán Hernández. Ingeniero civil, UNAM, 1977. Maestro en Aprovechamientos hidráulicos, UNAM, 1996. Campo de trabajo: Estudios hidrológicos, seguridad de presas, modelos de inundaciones.



Ernesto Aguilar Garduño. Ingeniero Civil (1988) y Maestro en Ingeniería Hidráulica (1994) por la Universidad Nacional Autónoma de México. Líneas de trabajo: Modelación de tránsitos de avenidas en cauces con modelos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales, y con modelos hidrológicos con y sin base física, simulación de ruptura de presas, Estimación de avenidas de diseño, modelación de escurrimiento en cuencas, balances hidrológicos.



Ma. de los Ángeles Suárez Medina. Ingeniera Civil y Maestra en ingeniería Hidráulica, por la universidad Nacional Autónoma de México, 1995. Líneas de trabajo: Hidrología de superficie, estudios relacionados con la modelación del proceso lluvia-escurrimiento, tanto para la determinación de volúmenes de escurrimientos normales como para la estimación de eventos extremos; estudios de predicción y control de inundaciones.



Fco. Javier Aparicio Mijares. Ingeniero civil, UNAM, 1979. Maestro en Ingeniería (Hidráulica), UNAM, con mención honorífica, 1982. Doctor en Ingeniería (Hidráulica), UNAM, con mención honorífica, 1985. Coordinador de Tecnología hidrológica. Líneas de trabajo: Hidrología de superficie, aprovechamientos hidráulicos, modelación numérica, ecohidrología.



Margarita Preciado Jiménez. Ingeniera Civil, Universidad de Colima, 1994. Maestra en Ingeniería Hidráulica. UNAM (DEPFI-Campus Morelos), 2002. Líneas de trabajo: Modelación numérica, Hidrología de superficie, Sistemas de Información Geográfica.