



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD IZTAPALA

POSGRADO EN ENERGÍA Y
MEDIO AMBIENTE

BALANCE HÍDRICO EN EL PARQUE NACIONAL FUENTES BROTANTES DE TLALPAN

TESIS

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS
(ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE)**

PRESENTA:

Diego Antonio Valencia Soto

CODIRECTORES:

**Dra. Claudia Rojas Serna
M. en I. Marco Antonio Jacobo Villa**

ASESOR:

Dr. Gerardo Figueroa Lucero

CIUDAD DE MÉXICO, JUNIO DE 2018

AGRADECIMIENTOS

La Maestría en Ciencias (Energía y Medio Ambiente) de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, pertenece al Padrón Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT y cuenta con apoyo del mismo Consejo con el convenio 003893; por lo que agradezco la beca recibida, a través del convenio No. 594523 para el desarrollo de esta tesis.

COMITÉ TUTORIAL

Codirector:

Dra. Claudia Rojas Serna. Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

Codirector:

M. en I. Marco Antonio Jacobo Villa. Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

Asesor:

Dr. Gerardo Figueroa Lucero. Departamento de Hidrobiología. División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

El jurado designado por la
Comisión Académica del Posgrado en Energía y Medio Ambiente

de la Unidad Iztapalapa aprobó la tesis que presentó

Diego Antonio Valencia Soto

El día 13 de junio del año **2018**

Miembros del Jurado:



Dr. Ariosto Aguilar Chávez

Presidente



Dr. Gerardo Figueroa Lucero

Secretario



Dr. Agustín Felipe Breña Puyol

Vocal

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
CAPÍTULO I	2
INTRODUCCIÓN	2
1.1. ANTECEDENTES	3
1.2. JUSTIFICACIÓN	7
1.3. OBJETIVOS.....	8
1.3.1. Objetivo general.....	8
1.3.2. Objetivos específicos	8
1.4. ALCANCES DEL ESTUDIO.....	9
1.5. GENERALIDADES DEL PARQUE NACIONAL FUENTES BROTANTES.....	10
1.5.1. Historia	10
1.5.2 Ubicación.....	11
1.5.3. Clima	12
1.5.4. Vegetación, uso y tipo de suelo.....	13
1.5.5. Hidrología.....	14
1.5.6. Geología	15
1.6. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	16
1.6.1. El ciclo hidrológico y la hidrología	16
1.6.2. Precipitación	20
1.6.3. Evapotranspiración	23
1.6.4. Esguimientos.....	28
1.6.5. Infiltración.....	30
1.6.6. Humedad del suelo	31
1.6.7. La cuenca hidrográfica	33
1.6.8. El balance hídrico	35
CAPÍTULO II	39
BALANCE HÍDRICO EN EL PARQUE.....	39
2.1. PRECIPITACIÓN EN EL PARQUE	40
2.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN EN EL PARQUE.....	41
2.3. MODELO DE BALANCE HÍDRICO EN EL PARQUE.....	43

CAPÍTULO III	45
METODOLOGÍA.....	45
3.1. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	46
3.2. SELECCIÓN DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS.....	46
3.3. CÁLCULO DE ALTURA DE LLUVIA MEDIA DIARIA.....	46
3.4. CÁLCULO DE LA DISPONIBILIDAD PLUVIAL MEDIA	47
3.5. CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL	48
3.6. DETERMINACIÓN DE EXCESOS Y DÉFICITS MENSUALES.....	49
3.7. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO.....	50
3.8. MODELO DE BALANCE HÍDRICO.....	50
CAPÍTULO IV	52
DESARROLLO.....	52
4.1. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	53
4.2. SELECCIÓN DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS.....	54
4.3. CÁLCULO DE ALTURA DE LLUVIA MEDIA DIARIA.....	55
4.4. CÁLCULO DE LA DISPONIBILIDAD PLUVIAL MEDIA	55
4.5. CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL	56
4.6. DETERMINACIÓN DE EXCESOS Y DÉFICITS MENSUALES.....	56
4.7. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO.....	57
4.8. MODELO DE BALANCE HÍDRICO.....	58
CAPÍTULO V	59
RESULTADOS	59
CAPÍTULO VI	76
DISCUSIÓN	76
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
REFERENCIAS.....	85
ANEXO	95

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PÉRDIDA DE SUPERFICIE DEL PARQUE NACIONAL FUENTES BROTTANTES HASTA EL AÑO 2005 (IMAGEN SPOT 2005 SOT-PAOT; CITADO POR PAOT, 2009).	4
FIGURA 2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL PARQUE NACIONAL FUENTES BROTTANTES DE TLALPAN (CONANP, 2017).	12
FIGURA 3. UBICACIÓN DEL PARQUE NACIONAL FUENTES BROTTANTES DE TLALPAN EN LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO Y LA SUBCUENCA RH26DP (PRONACOSE, 2014).	15
FIGURA 4. DIAGRAMA DEL CICLO HIDROLÓGICO GLOBAL (MODIFICADO DE CAHUAN Y YUGAR, 2009).	17
FIGURA 5. PROCESO DE CIRCULACIÓN DE LAS GOTAS Y CRISTALES DE HIELO EN LAS NUBES Y FORMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN (CHOW ET AL., 1994).	21
FIGURA 6. PRINCIPALES FACTORES QUE CONTROLAN LA TASA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)..	24
FIGURA 7. CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO Y AGUA TOTAL DISPONIBLE (MODIFICADO DE BROUWER ET AL., 1985).	32
FIGURA 8. COMPONENTES DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (CAHUANA Y YUGAR, 2009).	34
FIGURA 9. REPRESENTACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA (MODIFICADO DE CAHUANA Y YUGAR, 2009).	37
FIGURA 10. PROXIMIDAD DEL PARQUE NACIONAL FUENTES BROTTANTES DE TLALPAN A LA SIERRA DEL AJUSCO (GOOGLE EARTH).	40
FIGURA 11. CLASIFICACIÓN DE LAS ECUACIONES PARA CALCULAR LA ET PRESENTADA POR OUDIN ET AL. (2005)..	42
FIGURA 12. UBICACIÓN DE LA MICROCUENCA Y EL POLÍGONO DEL PARQUE EN LA SUBCUENCA RH26DP (INEGI, 2010; CONANP, 2017).	60
FIGURA 13. VISTA AMPLIADA DE LA MICROCUENCA Y EN EL POLÍGONO DEL PARQUE.	61
FIGURA 14. VISTA SATELITAL DE LA MICROCUENCA (ROJO) Y EL POLÍGONO DEL PARQUE (VERDE) (FUENTE: GOOGLE EARTH).	62
FIGURA 15. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS Y SUS ÁREAS DE INFLUENCIA.	64
FIGURA 16. DIFERENTES TIPOS DE VEGETACIÓN Y USO DE SUELO EN LA MICROCUENCA DEL PARQUE.	67
FIGURA 17. CAMBIO EN EL CONTENIDO DE AGUA (EN MM) EN EL SUELO EN LA MICROCUENCA DEL PARQUE (EX= EXCESO DE AGUA; RHS= RECARGA DE HUMEDAD EN EL SUELO; UHS= USO DE HUMEDAD DEL SUELO).	71
FIGURA 18. PRECIPITACIÓN, EVAPOTRANSPIRACIÓN Y TEMPERATURA EN LA MICROCUENCA DEL PARQUE.	72
FIGURA 19. CAMBIO EN EL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO DEL POLÍGONO DEL PARQUE (EX= EXCESO DE AGUA; RHS= RECARGA DE HUMEDAD EN EL SUELO; UHS= USO DE HUMEDAD DEL SUELO).	74
FIGURA 20. PRECIPITACIÓN, EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL Y REAL EN EL POLÍGONO DEL PARQUE.	75
FIGURA A 1. RELACIÓN ENTRE VARIABLES CLIMÁTICAS EN EL POLÍGONO DEL PARQUE Y PATRÓN DE COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN (P), EN MM; TEMPERATURA (T), EN °C; Y EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP), EN MM.	104
FIGURA A 2. RELACIÓN ENTRE VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA MICROCUENCA DEL PARQUE Y PATRÓN DE COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN (P), EN MM; TEMPERATURA (T), EN °C; Y EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP), EN MM.	105

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PRINCIPALES MÉTODOS DE MEDICIÓN DIRECTA CONSIDERADOS POR LA ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM, 2014).....	26
TABLA 2. ALGUNOS MÉTODOS USADOS PARA LA ESTIMACIÓN INDIRECTA DE LA ET (DINGMAN, 1994; TABARI ET AL., 2013).	27
TABLA 3. ÁREA, PERÍMETRO Y UBICACIÓN DE LA SUBCUENCA RH26DP, LA MICROCUENCA Y EN EL POLÍGONO DEL PARQUE.	62
TABLA 4. ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS Y SUS AÑOS CON DATOS Y PERIODOS DE REGISTRO EMPLEADOS EN LOS CÁLCULOS DEL BALANCE HÍDRICO.	63
TABLA 5. ALTURA DE LLUVIA MEDIA DIARIA EN LA SUBCUENCA RH26DP, EN LA MICROCUENCA Y EN EL POLÍGONO DEL PARQUE.	65
TABLA 6. DISPONIBILIDAD MEDIA DE AGUA PLUVIAL EN LA SUBCUENCA RH26DP, EN LA MICROCUENCA Y EN EL POLÍGONO DEL PARQUE.	66
TABLA 7. USO DE SUELO Y VEGETACIÓN EN LA MICROCUENCA Y EN EL POLÍGONO DEL PARQUE (INEGI, 2003; INEGI, 2014).	66
TABLA 8. CÁLCULO DEL AGUA DISPONIBLE TOTAL (ADT) EN LA MICROCUENCA Y EN EL POLÍGONO DEL PARQUE.	68
TABLA 9. CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN (P) Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP) EN LA MICROCUENCA DEL PARQUE (EN MM).	68
TABLA 10. BALANCE HÍDRICO MENSUAL PARA TODOS LOS USOS DE SUELO EN LA MICROCUENCA DEL PARQUE (EN MM).	69
TABLA 11. BALANCE HÍDRICO MENSUAL PONDERADO EN LA MICROCUENCA DEL PARQUE (EN MM).	70
TABLA 12. BALANCE HÍDRICO MENSUAL PARA EL POLÍGONO DEL PARQUE (EN MM).	73
TABLA 13. MESES CON EXCESO Y DÉFICIT EN LA MICROCUENCA Y EN EL POLÍGONO DEL PARQUE.	73
TABLA A 1. ALTURA DE LA LÁMINA DE LLUVIA MEDIA DIARIA (P_{ALT}) Y DISPONIBILIDAD MEDIA PLUVIAL (V) EN TEMPORADA DE ESTIAJE, HÚMEDA Y ANUAL, POR ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA EN LA SUBCUENCA (RH26DP). 96	
TABLA A 2. LLUVIA MEDIA ACUMULADA EN EL POLÍGONO DEL PARQUE (ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA 9020, EN MM).	98
TABLA A 3. LLUVIA MEDIA ACUMULADA EN LA MICROCUENCA DEL PARQUE (ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS 9002 Y 9020, EN MM).	99
TABLA A 4. TEMPERATURA MEDIA MENSUAL EN EL POLÍGONO DEL PARQUE (ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA 9020, EN °C).	100
TABLA A 5. TEMPERATURA MEDIA MENSUAL EN LA MICROCUENCA DEL PARQUE (ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS 9002 Y 9020, EN °C).	101
TABLA A 6. CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MEDIA ACUMULADA EN EL POLÍGONO DEL PARQUE (MM).	102
TABLA A 7. CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MEDIA ACUMULADA EN LA MICROCUENCA DEL PARQUE (PROMEDIO ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS 9002 Y 9020, EN MM).	103

RESUMEN

El conocimiento del balance de agua es fundamental en la mejora del manejo del recurso hídrico y de la cuenca hidrológica. Particularmente, para el mantenimiento de las áreas naturales protegidas que se encuentran bajo la presión de las grandes urbes.

En el presente trabajo se realiza un balance hídrico climático mensual en el Parque Nacional Fuentes Brotantes de Tlalpan, con el objeto de determinar: las temporadas de lluvia y estiaje; definir los excesos y déficits mensuales; cuantificar las pérdidas por evapotranspiración; y la disponibilidad, representada como escurrimiento anual.

El método de balance hídrico empleado está basado en las variables climáticas y el contenido de humedad del suelo según Thornthwaite y Mather (1957) y Santillán et al. (2013). La evapotranspiración potencial (ETP) se calculó con la ecuación desarrollada por Oudin et al. (2005). Los datos climáticos se obtuvieron del Servicio Meteorológico Nacional. El balance se aplicó a la cuenca de aportación al Parque y al polígono que delimita al Parque. De los resultados, se identificó: que los meses de junio a octubre son meses con exceso; que los meses de noviembre a mayo son meses con déficit; que la capacidad de campo (suelo saturado) en el Parque se presenta en los meses de julio a octubre, con déficit de enero a junio y la humedad es nula de febrero a mayo; que las pérdidas por evapotranspiración son entre 60 y 70% de la lluvia total; y que la disponibilidad anual en el Parque es de 438 606 m³. La ecuación de Oudin et al. resultó una opción aceptable para estimar la ETP en la zona, pues ofrece resultados comparables con los reportados oficialmente por INEGI y otros investigadores (Birkle et al., 1995). Cabe mencionar que los escurrimientos superficiales en la cuenca de estudio son intermitentes, convirtiéndose en parte de la recarga del acuífero.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El Parque Nacional Fuentes Brotantes de Tlalpan (en ocasiones referido como “Parque” o “PNFBT”) es un área natural protegida desde 1936 (DOF, 1936). Ubicado al sur de la Ciudad de México (CDMX), el Parque es visitado por sus áreas verdes y paisajes naturales propicios para el esparcimiento y la recreación. Así mismo, es una zona reconocida por la presencia de manantiales, en especial el manantial Fuentes Brotantes. En la actualidad, el PNFBT es uno de los dos parques urbanos en la Delegación Tlalpan, junto al Bosque de Tlalpan, ya que se encuentran totalmente absorbidos por la urbe.

El manantial Fuentes Brotantes, principal y mayor fuente natural de agua en el lugar, brota durante las 24 horas del día, en el fondo de una caverna, localizada en el extremo sur del Parque. Las descargas del manantial son captadas y suministradas como agua potable, beneficiando principalmente a las colonias Miguel Hidalgo, Ampliación Miguel Hidalgo y parte de las colonias Ejidos y Héroes de Padierna (AIASA, 2001). Además, son suficientes para abastecer a los carros cisterna, a través de cuatro garzas instaladas en el Parque, que transportan el agua a otras localidades que carecen del servicio.

El agua que nace del manantial no es captada en su totalidad, existe un volumen que descarga desde la caverna hacia un lago o estanque recreativo que se encuentra aledaño y cuyas demasías circulan por un canal superficial que conduce el agua por todo el Parque. El destino final de dicho escurrimiento es la red de alcantarillado de la ciudad.

Existen también dos pozos de extracción (Fuentes Brotantes 1 y Fuentes Brotantes 2) localizados en las inmediaciones del Parque, pero se sabe que no están conectados al acuífero que da origen al manantial (ININSA, 1988).

Actualmente el estado que guarda el Parque es de deterioro. Ya desde 1999 se advertía que se encontraba en “condiciones de grave deterioro ecológico y reducción de superficie”

(DOF, 1999). Para 2010, el Parque ya había disminuido su extensión de 129 ha (1.29 km²) a 17.82 ha (0.1782 km²), por causa de “diferentes factores” (GODF, 2010). Aunado a esto, a pesar de ser un área natural protegida, al día de la realización de este proyecto, el Parque no cuenta con un plan de manejo (SIMEC, 2018).

La evolución en el deterioro del Parque, que equivale a una pérdida del 86% de su extensión original, principalmente representada en áreas verdes, ha llevado a que año tras año se generen propuestas encaminadas su rescate y mantenimiento. La administración actual 2015-2018, en su Programa de Desarrollo Delegacional, manifiesta que el Parque requiere mantenimiento y restauración ecológica, comprometiéndose a rescatarlo (Sheinbaum, 2015).



Figura 1. Pérdida de superficie del Parque Nacional Fuentes Brotantes hasta el año 2005 (Imagen spot 2005 SOT-PAOT; citado por PAOT, 2009).

Debido a la presencia e importancia del manantial Fuentes Brotantes, ha sido prioridad para la CDMX y la Delegación, realizar diferentes estudios hidrogeológicos, de aprovechamiento, gestión y calidad del agua que aflora (ACSA, 1979; ACSA, 1980; ININSA, 1988; ITSMO, 2000; AIASA, 2001). Mientras que no se encuentran referencias de estudios enfocados al análisis hidrológico superficial y solo se exponen, de manera dispersa y como suplemento de los anteriores, algunos elementos del balance hídrico como la precipitación media y la evapotranspiración.

Se sabe que el estudio del recurso hídrico es fundamental en una cuenca hidrográfica. El análisis y cuantificación del volumen de agua presente, así como las pérdidas que suceden durante un periodo de tiempo definido, representan información básica y relevante sobre el estado que guarda el recurso y la cuenca misma, así como en la conformación de un plan de gestión que apunte a la sustentabilidad.

En el documento “Métodos de Cálculo del Balance Hídrico” publicado por UNESCO se menciona la importancia de las técnicas de balance hídrico para solucionar problemas hidrológicos teóricos y prácticos tanto en cuencas superficiales y subterráneas. Entre sus ventajas más destacadas se menciona la posibilidad de conseguir un uso más racional del recurso en el espacio y el tiempo, predicciones hidrológicas, conocimiento de las variaciones en el ciclo hidrológico, y evaluación indirecta de componentes desconocidos por diferencia entre los sí conocidos (Sokolov y Chapman, 1981).

En México se emplean diferentes técnicas de balance hídrico a variados problemas hidrológicos. Por ejemplo, mediante balance hídrico se ha cuantificado la pérdida de agua por evapotranspiración en el Valle de México (Birkle et al., 1995); se evaluó la disponibilidad de agua en el Valle de México (Birkle et al., 1998); la influencia del cambio de uso de suelo y vegetación sobre el balance hídrico en Guanajuato (Rivas et al., 2011); se realizó una clasificación climática en el estado de Tabasco (Ruiz-Álvarez et al., 2012); se determinó la lámina de escurrimiento superficial anual del río Cazonas en Veracruz (Santillán et al., 2013);

y se analizó la importancia de la Reserva de la Biosfera del Triunfo, en Chiapas, como zona de recarga hídrica (Mendoza et al., 2016).

1.2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente el Parque Nacional Fuentes Brotantes de Tlalpan requiere de un programa de rehabilitación y protección que garantice la continuidad de los servicios ambientales que presta a la Ciudad y sus habitantes. Dada la presencia del manantial Fuentes Brotantes, de importancia estratégica en la prestación del servicio de agua potable a la Ciudad, y su grado de deterioro y pérdida de superficie en favor del crecimiento urbano, el PNFBT requiere de un balance hídrico. Al respecto se conoce que se han llevado a cabo diferentes trabajos sobre el flujo y calidad de las aguas subterráneas en el Parque, sin que hasta el momento se conozcan trabajos enfocados a determinar la disponibilidad del agua superficial y su distribución a lo largo del año. Un estudio de este tipo es necesario para complementar los ya existentes de manera que se tenga un panorama más amplio de la situación del recurso en el Parque y a partir del cual se puedan tomar decisiones sobre la gestión de este y de la cuenca.

Por tal motivo, en esta tesis se realiza el balance hídrico del PNFBT que permita identificar sus déficits y excesos de agua. Partiendo del conocimiento de las precipitaciones medias mensuales y de la evapotranspiración mensual, podemos estudiar el balance de la humedad en el Parque a lo largo del año.

Este trabajo se origina como propuesta de la Delegación de Tlalpan, ante el compromiso hecho de rescatar de PNFBT. Sin embargo, y dados los antecedentes, se mantiene gracias al deseo de contribuir con una investigación útil y disponible para otros investigadores, esta administración o la siguiente, que se interesen en atender la problemática de esta área natural tan relevante en una ciudad donde cada vez hay menos espacios verdes como este.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Determinar el balance hídrico del Parque Nacional Fuentes Brotantes de Tlalpan.

1.3.2. Objetivos específicos

- Análisis hidrológico del Parque.
- Análisis hidrológico de la microcuenca.
- Balance hídrico climático en el Parque y en su cuenca de aportación.
- Determinación cuantitativa de meses con exceso y déficit hídrico.

1.4. ALCANCES DEL ESTUDIO

En el presente estudio se estima la disponibilidad del recurso hídrico superficial en el Parque Nacional Fuentes Brotantes de Tlalpan. Para ello se lleva a cabo la recopilación y análisis de datos climáticos, medidos directa (lluvia, temperatura, uso y tipo de suelo) e indirectamente (radiación, evapotranspiración). Posteriormente se planteó el modelo conceptual de funcionamiento hidrológico, esto es, se identificaron las principales variables hidrológicas involucradas, determinando la forma en la que interactúan entre sí, considerando la variación temporal y espacial. Con el modelo conceptual definido, entonces se procedió a la aplicación de un modelo de balance hídrico superficial, cuyos resultados podrán ser utilizados por los tomadores de decisiones en lo referente a la gestión del Parque, o bien como referente para otro tipo de estudios que se requieran en un futuro.

En este trabajo se omite la parte que concierne al balance de agua subterránea principalmente porque el interés particular es conocer el estado mensual del recurso hídrico superficial con el fin de identificar los déficits y los excesos de agua que se presentan para hacer un aprovechamiento de ellos.

1.5. GENERALIDADES DEL PARQUE NACIONAL FUENTES BROTTANTES

1.5.1. Historia

El parque Fuentes Brotantes de Tlalpan fue declarado Parque Nacional por el presidente Lázaro Cárdenas con publicación en el Diario Oficial de la Federación el 28 de septiembre de 1936 (DOF, 1936). Convirtiéndose así en un área natural protegida por ser considerado “dentro de los sitios de mayor belleza natural que rodean la ciudad de México” y ser un “lugar excepcional, ya que, rodeadas por terrenos abruptos, pedregosos y sin ninguna perspectiva de aprovechamiento económico agrícola, emergen a la superficie las aguas de los manantiales al fondo de profunda barranca cubierta de arbolado”. Desde entonces, el Parque ha formado parte importante de la historia de la Delegación y sus habitantes que, durante diferentes etapas, y hasta el día de hoy, ha contribuido a su desarrollo económico, cultural y social.

Como lo describe Mendoza (2014), en su libro «Tlalpan, crónica y patrimonio»:

Esta área natural, surgió cercana a las faldas del Ajusco, como consecuencia de la erupción del volcán Xitle en el año 76 d.C. De estos mismos derrames está cubierta toda la Delegación. Los manantiales, que luego dieron nombre al Parque, se originaron en un claro cercano al asentamiento de Cuicuico. El agua que aquí brota desde entonces proviene de las precipitaciones y deshielo del Ajusco. La abundancia de agua junto con la riqueza en nutrientes de la piedra volcánica y la ceniza, favorecieron desarrollo y sustento de una gran diversidad de flora y fauna.

Tras la conquista, los terrenos del Parque quedaron entre las haciendas de El Arenal y Tochiuitl y por los barrios de Santa Úrsula Xitla y Calvario. Entonces, pasó de ser un centro ceremonial del dios Tláloc (dios del agua) a tomar parte en el desarrollo económico de la zona en la primera revolución industrial de México, pues estos terrenos con todos sus recursos pasaron a pertenecer a la fábrica de

Hilado y Tejidos La Fama Montañesa cuya rueda hidráulica que accionaba sus telares era movida por las aguas provenientes del Parque. Generando el descontento entre la población pues se alegaba mala calidad del agua e injusticia en el reparto. Las aguas que emanaban en el Parque se empleaban principalmente por la población en el riego de huertas y actividades de índole higiénica. Así mismo, por su belleza natural, se constituyó en un punto de reunión, esparcimiento y socialización para la población cercana. Sin embargo, con el paso del tiempo las caídas de agua que ahí existían fueron entubadas y los terrenos fincados, situación que vino a reducir los espacios del Parque y la actividad social.

El decreto de 1936 estableció el Parque dentro de los terrenos del antiguo rancho de Teochihuitl con una extensión total de 129 hectáreas (1.29 km²). Quedando bajo la administración del desaparecido Departamento Forestal y de Caza y Pesca. En ese entonces se pretendía establecer dentro del parque actividades económicas que ayudaran a desarrollar la zona, así como actividades culturales y recreativas (DOF, 1936).

Desde entonces y a pesar de ser un área natural protegida, los procesos de urbanización de la Delegación, la urgencia de construir nuevos proyectos inmobiliarios después del 1985 y la pérdida de interés para su conservación, por parte de la población, han provocado un deterioro significativo del Parque.

1.5.2 Ubicación

El Parque Nacional Fuentes Brotantes de Tlalpan se localiza al sur de la Ciudad de México (CDMX); específicamente, al norte de la delegación política de Tlalpan. Se ubica geográficamente en las coordenadas latitud Norte 19° 16' 42" y 19° 17' 20" y longitud Oeste 99° 10' y 99° 11'.

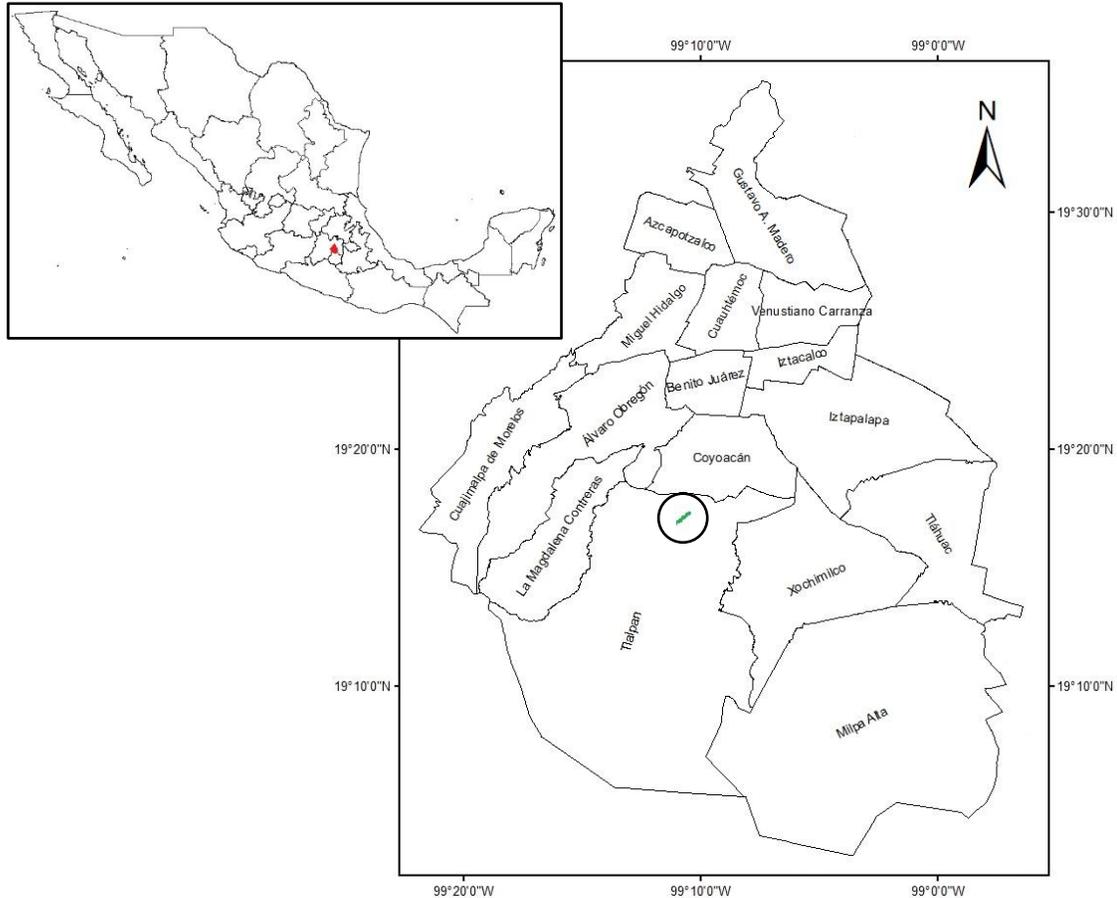


Figura 2. Ubicación geográfica del Parque Nacional Fuentes Brotantes de Tlalpan (CONANP, 2017).

El Parque se encuentra ahora rodeado por la mancha urbana; hacia el norte (acceso principal) colinda con la avenida de los Insurgentes Sur, la colonia Tlalpan Centro y colonia La Fama; al este con la colonia Camiseta Calvario y la unidad habitacional Fuentes Brotantes; al oeste con la colonia Santa Úrsula Xitla; al sur con la avenida Miguel Hidalgo y la unidad habitacional Fuentes Brotantes (Figura 1).

1.5.3. Clima

El Parque presenta un clima típico del Valle de México. Según información espacial de Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2008), el clima de la zona es templado subhúmedo con régimen de lluvias en verano, temperatura media

anual entre 12 y 18°C, menos del 5% de la lluvia ocurre en la temporada invernal y el mes más seco recibe menos de 40 mm precipitación. La temperatura mínima es de 7°C en invierno y máxima de 33°C en el verano y una temperatura media mensual de 16°C. El mes más frío es enero, y mayo el más caliente (ITSMO, 2000). La precipitación media anual es de 800 a 1000 mm (INEGI, 2006).

1.5.4. Vegetación, uso y tipo de suelo

El Parque se encuentra en suelo urbano, por esta consideración, la clasificación de INEGI (2003) indica que posee un tipo de vegetación de zona urbana. En una inspección de campo, puede observarse que las especies vegetales predominantes dentro de los límites del Parque pertenecen al matorral xerófilo, entre los que destaca el tepozán (*Buddleia cordata*), tepozancillo (*Buddleia parviflora*), chapulixtle (*Dodonaea viscosa*) y el palo loco (*Pittocaulon praecox*). También, hay presencia de bosque pino-encino y abunda el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), especie no endémica del lugar (PAOT, 2009).

El tipo de suelo dominante en el parque es litosol, un suelo secundario de feozem háplico. De acuerdo con el tamaño de las partículas que componen el suelo en los primeros 30 cm de profundidad, la clase textural del suelo es media, es decir, corresponde a un equilibrio de arcilla, limo y arena (INEGI, 2014). Además, existe una extensión considerable del Parque cementada o pavimentada (caminos, asentamientos, paseos peatonales y una explanada principal). En los recorridos realizados se recabó información que confirma la presencia de arcilla, limo y arena. Para los fines del presente estudio, se considera suficiente la información disponible; si en un futuro se analiza como opción la infiltración y percolación del agua superficial, entonces en ese caso sería conveniente llevar a cabo un muestreo detallado del suelo.

El litosol es un suelo con un espesor menor a 10 cm, limitado por material lítico o paralítico. Tienen un porcentaje moderado de poros y su textura varía de arenosa a

arcillosa. Son aptos para la agricultura, ganadería o silvicultura con bajos rendimientos por lo que las áreas con estos suelos deben ser consideradas como zonas de reserva para la flora y fauna (IPN, 1989). El feozem háplico se caracteriza por tener una capa oscura y otra gris. Tiene una textura de migajón arcillo arenoso con porcentaje de poros moderado. Su profundidad varía de 15 a más de 100 cm (IPN, 1989).

1.5.5. Hidrología

Según la organización y administración hidrológica del país, el PNFBT se encuentra en la región hidrográfica RH26 Panuco; en la cuenca hidrográfica R26D Río Moctezuma; y la subcuenca hidrográfica RH26Dp Lago de Texcoco y Zumpango (Figura 3) (INEGI, 2010). La subcuenca RH26Dp es de tipo endorreica y se encuentra en la región del Valle de México por lo que corresponde su administración al Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. Además, el PNFBT y la subcuenca RH26Dp forman parte del sistema acuífero Zona Metropolitana de la CDMX (PRONACOSE, 2014).

En el Parque aflora el manantial «Fuentes Brotantes» cuyas emanaciones abastecen de agua potable a las colonias cercanas y al lago interior del parque. Un arroyo escurre a través del Parque llevando los excedentes del lago.

La cuenca asociada a la descarga del acuífero al que pertenece el manantial se extiende desde los alrededores del volcán del Ajusco, que es la zona de recarga, y tiene su salida en la caverna donde brota el manantial. Debido a la alta permeabilidad de los suelos los escurrimientos existentes son escasos y de corta duración (ACSA, 1979).

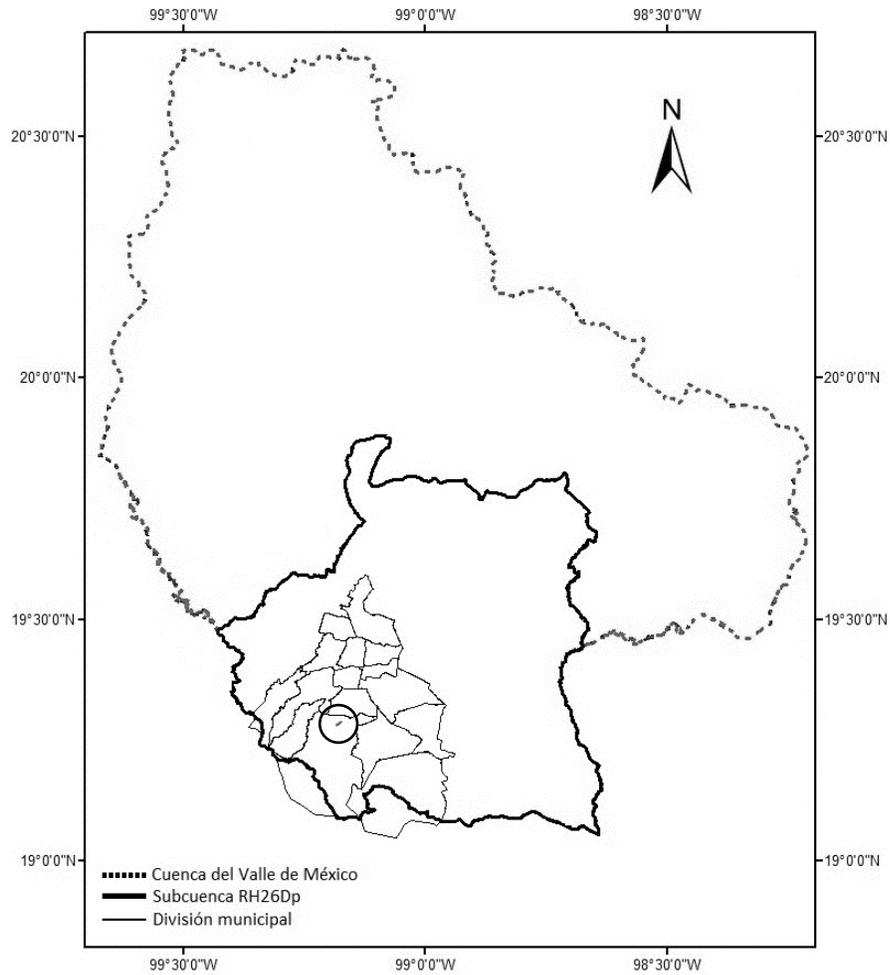


Figura 3. Ubicación del Parque Nacional Fuentes Brotantes de Tlalpan en la cuenca del Valle de México y la subcuenca RH26Dp (PRONACOSE, 2014).

1.5.6. Geología

Según estudios realizados por ACSA en 1979, desde el volcán Xitle, en las faldas del Ajusco, hasta el Parque, afloran unidades litológicas comprendidas desde el Oligoceno Mioceno del Terciario, hasta el Reciente, predominado los derrames lávicos basálticos andesíticos. Ya en el Parque predomina la serie volcánica del Chichinautzin, constituida por lavas y tobas estratificadas, generalmente basálticas.

Según ININSA (1988), un importante afloramiento de la formación Tarango del Plioceno Medio-superior, ocurre en los alrededores del manantial. Esta formación está constituida por rocas de origen tanto volcánico (flujos piroclásticos, tobas y derrames), así como sedimentario (lahares y abanicos aluviales). En el Parque sus laderas están conformadas por lahares (fragmentos de rocas de diferentes tamaños embebidas en una matriz areno-arcillosa, en general, medianamente consolidada). Añade que en las inmediaciones del manantial las rocas son de permeabilidad baja o nula, y bajas a medias en los terrenos inmediatamente abajo del lago.

Un estudio más reciente (ITSMO, 2000) coincide en la presencia de tobas y basalto, y agrega arenas con arcillas, arenas con grava, conglomerados, areniscas y tobas con algunos estratos de boleó, así como andesita gris y rosa.

1.6. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

1.6.1. El ciclo hidrológico y la hidrología

El agua es un recurso natural fundamental en la constitución y sustento de todos los seres vivos, una fuerza modeladora constante de la superficie terrestre, componente elemental en la generación y modificación del clima y en el proceso civilizatorio de las sociedades humanas.

Al movimiento constante del agua, en sus tres estados de agregación, a través de la atmósfera, el suelo y el subsuelo, se denomina ciclo hidrológico. En este, el agua atraviesa por diferentes procesos y etapas donde es almacenada, modificado su estado y desplazada a través del planeta.

Aunque el concepto de ciclo hidrológico puede ser sencillamente definido como: el movimiento continuo del agua a través de la atmósfera y la tierra; este constituye un

sistema más bien complejo, intrincado e irregular, sin principio ni fin definidos y cuyas etapas ocurren todas a la vez y de manera ininterrumpida.

Este se compone de muchos otros procesos más pequeños que ocurren a escala continental, regional y local. Así que, aunque el ciclo es un sistema cerrado, es decir, el volumen total de agua permanece constante, la distribución de este varía de continentes a regiones y en cuencas locales.

Para facilitar su estudio, el ciclo hidrológico puede ser representado como un *sistema*. Es decir, un todo que puede ser separado en partes. Así, este se dividió en subsistemas y etapas, los cuales pueden ser estudiados de manera individual y después, según sus interacciones, relacionarse permitiendo así conocer el sistema completo (Chow et al., 1994).

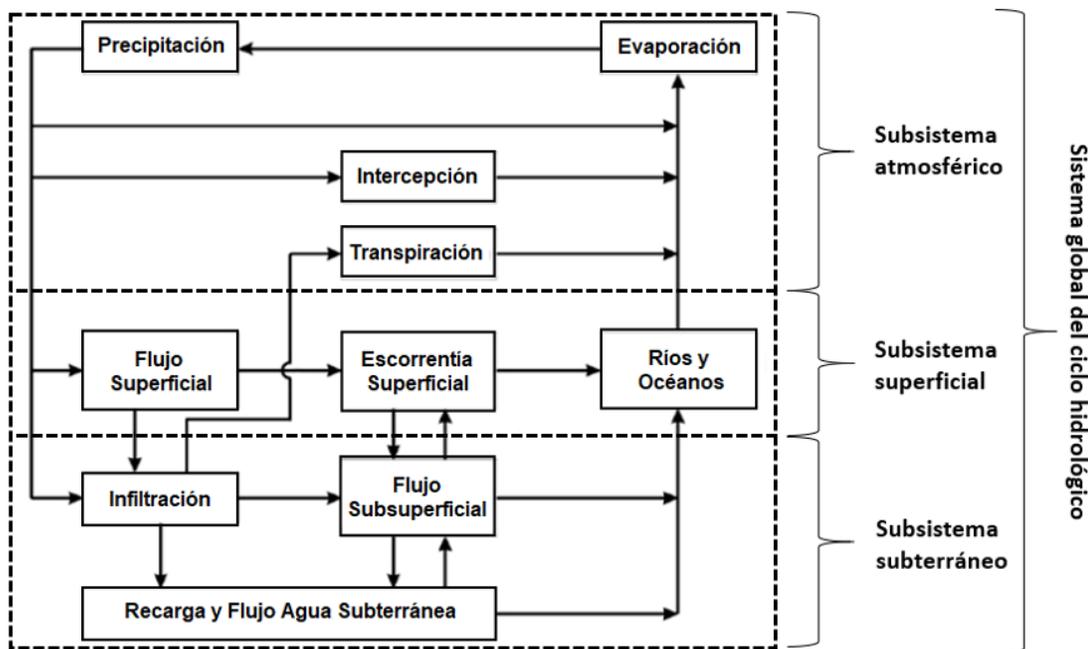


Figura 4. Diagrama del ciclo hidrológico global (modificado de Cahuan y Yugar, 2009)

Como se observa en la Figura 4, el ciclo hidrológico se divide en tres subsistemas, cada uno con una etapa de entrada, almacenamiento y salida (Breña y Jacobo, 2006):

- *Subsistema atmosférico.* Contiene los procesos de precipitación, evaporación, interceptación y transpiración. Este retiene el vapor de agua que llega desde la superficie de los océanos, cuerpos de agua, plantas y la superficie del suelo. Bajo las condiciones adecuadas, el vapor se condensa y precipita (lluvia, nieve, hielo o rocío, etc.). Parte de la precipitación se incorporará al subsistema superficial (precipitación sobre océanos o escurrimiento) y al subsistema subterráneo (infiltración); otra parte será interceptada (atrapada en copas de árboles, techos de casas, etc.) y volverá a la atmósfera por evapotranspiración sin incorporarse a ninguno de los subsistemas anteriores.
- *Subsistema superficial.* Contiene los procesos de flujo y escorrentía superficial, nacimientos de agua subsuperficial y subterránea, y escorrentía hacia ríos y océanos. Aquí, la precipitación se considera como la entrada al sistema; la salida corresponde a la infiltración (subsistema de agua subterránea) y evaporación (subsistema de agua atmosférica).
- *Subsistema subterráneo.* Contiene los procesos de infiltración, recarga de acuífero, flujo subsuperficial y subterráneo. Aquí la infiltración se considera como la entrada al sistema; las descargas o afloramientos superficiales, la salida. Aquí, el agua puede alcanzar estratos profundos del suelo o quedarse en regiones del subsuelo cercanas a la superficie donde se almacenará o seguirá desplazándose hasta encontrar un punto de descarga.

Además de su importancia *per se*, el ciclo hidrológico requiere de un estudio y monitoreo constante pues las actividades antropogénicas están constantemente cambiando el entorno y alterando su funcionamiento: interviniendo los cauces naturales, deforestando, erigiendo almacenamientos artificiales, extrayendo agua del subsuelo, etc. Sin embargo, para la mayor parte de los problemas prácticos, solo se

consideran algunos procesos del ciclo hidrológico en un determinado momento, y únicamente se tiene en cuenta una pequeña porción de la superficie de la Tierra. Así, la hidrología de una región está determinada por su topografía, geología y vegetación (Chow et al., 1994).

El ciclo hidrológico global constituye el tema central de estudio para la hidrología por ser fundamental para el entendimiento de la dinámica del agua en un territorio, y su influencia en la naturaleza y el desarrollo humano. La hidrología puede subdividirse, principalmente en hidrología superficial e hidrología subterránea. La primera se encarga de los fenómenos hidrológicos que ocurren en la atmósfera y el suelo; la segunda, de los que ocurren debajo del suelo.

Dingman (1994) describe a la hidrología como la ciencia que se enfoca en el ciclo hidrológico global y en los procesos que se relacionan y ocurren en la superficie terrestre. La cataloga como una geociencia que describe y predice:

- La variación temporal y espacial del agua en las etapas terrestre, oceánica y atmosférica del ciclo global del agua.
- El movimiento del agua sobre y debajo de la superficie terrestre, así como los procesos físicos, químicos y biológicos que acompañan e influyen en su circulación.

La hidrología tiene como objetivos la planeación y la administración del recurso agua, para lo cual se analizan aspectos tales como el abastecimiento de agua, drenaje y saneamiento de aguas residuales, control de inundaciones, sistemas de irrigación agrícola, disminución de contaminación, generación hidroeléctrica, uso recreativo y protección ambiental.

El conocimiento de la hidrología local es fundamental, para poder adaptar los conocimientos generales a las condiciones locales. En consecuencia, es necesario realizar estudios de los sistemas de recursos hídricos locales, que contribuirán a una gestión eficaz del suelo y del agua. (Orsolini et al., 2000; citado por Mecca, 2008).

Los principales procesos que intervienen en el ciclo hidrológico, y que estudia la hidrología, se presentan en las secciones siguientes.

1.6.2. Precipitación

La precipitación (P) es usualmente considerada como el inicio del ciclo hidrológico y la principal fuente de agua en la superficie de la tierra. Esta incluye toda el agua que se desplaza desde la atmósfera y se deposita en el suelo y océanos, ya sea en forma líquida (lluvia, neblina o rocío), sólida (nieve o granizo) o combinada (aguanieve). Por ello, desde el punto de vista de la ingeniería hidrológica, es considerada el punto de partida de la mayoría de los estudios concernientes al uso y control del agua (Aparicio, 1992).

Los factores que condicionan la génesis de las gotas de agua y cristales de hielo en las nubes, así como la gestación de la precipitación, son la humedad atmosférica y la temperatura de condensación. A su vez, la humedad atmosférica depende de la evaporación de océanos, cuerpos de agua y suelos, así como de la transpiración de las plantas (Breña, 2004).

Dos procesos atmosféricos son los principales responsables de producir la precipitación: el proceso Bergeron o de formación de cristales de hielo, responsable de la formación de nieve y granizo; y el proceso colisión-coalescencia, que genera la lluvia (Lutgens y Tarbuck, 2013). Dingman (1994) resume ambos procesos en cuatro pasos (Figura 5): (1) enfriamiento del aire hasta aproximadamente el punto de rocío; (2) condensación alrededor de partículas sólidas (núcleos de condensación), como sal

marina, polen, partículas de polvo, compuestos de sulfuro y nitrógeno, etc., para formar microgotas o cristales de hielo; (3) crecimiento, por colisión y agregación, de las microgotas y los cristales de hielo, en gotas de lluvia, copos de nieve o granizo; e (4) importación de vapor de agua para sustentar el proceso.

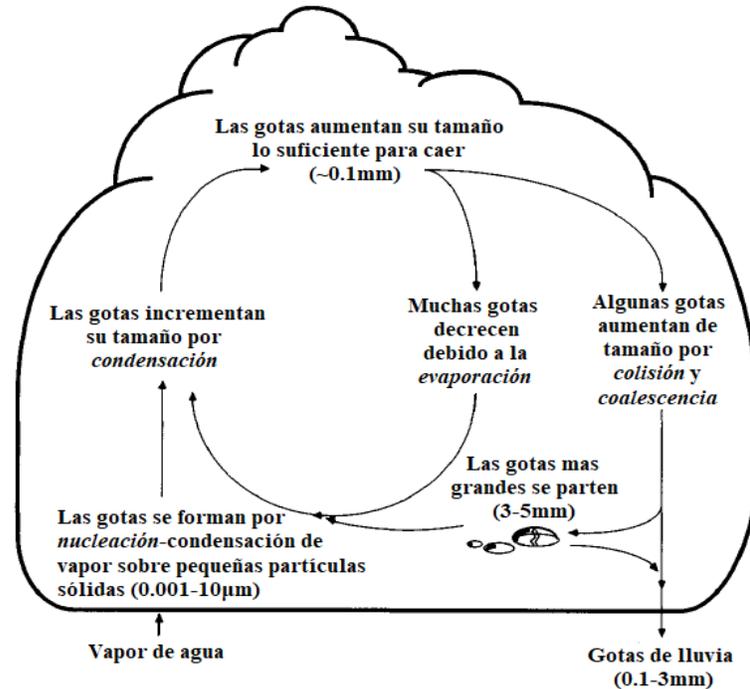


Figura 5. Proceso de circulación de las gotas y cristales de hielo en las nubes y formación de la precipitación (Chow et al., 1994).

La precipitación varía espacial y temporalmente de acuerdo con el patrón general de circulación atmosférica, la geografía y otros factores locales. Su formación es consecuencia de la elevación, enfriamiento y condensación de una masa de aire húmedo hacia la atmósfera. Los tres principales mecanismos, precursores de la precipitación son (Chow et al., 1994; Lutgens y Tarbuck, 2013):

- *Elevación frontal o ciclónica.* Se asocia a la convergencia de una masa de aire caliente (menos denso) con otra de aire frío (más denso). La masa de aire frío

actúa como una barrera impulsando al aire caliente a elevarse sobre ella hacia partes más altas, donde puede producirse la condensación y precipitación.

- *Elevación orográfica.* Ocurre cuando una masa de aire se eleva al chocar la pendiente de un terreno elevado, como las cadenas montañosas. Mientras el aire asciende, es enfriado adiabáticamente generando nubes y precipitaciones copiosas.
- *Elevación convectiva.* Ocurre cuando una masa de aire se desplaza hacia arriba por una acción convectiva (por ejemplo, fricción de una corriente de aire con la superficie del océano). Una masa de aire más caliente que las circundantes, tendrá menor densidad y ascenderá a partes más altas donde se condensará y producirá precipitación.

La precipitación pluvial es la más común al rededor del mundo y medir y conocer su magnitud es básico en el campo de la hidrología. Esta se cuantifica en términos de altura de lámina de agua, usualmente representada en milímetros (mm). La altura de lámina de agua indica la altura de la columna de agua que se acumularía en una superficie horizontal, si la precipitación no escurriera o infiltrara, permaneciendo donde cayó (Cahuana y Yugar, 2009).

La cuantificación de la lluvia puede ser puntual o por área. Cuando es puntual, comúnmente se mide mediante el uso de pluviómetros, cuando se trata de mediciones directas; y con pluviógrafo, para mediciones continuas (Breña y Jacobo, 2006). Dado que la lámina de lluvia que cae en un punto difiere de la que cae en los alrededores, se hace necesario medir la lluvia en una área delimitada o lluvia media. Para el cálculo de la lluvia media, existen tres métodos de uso generalizado: el método aritmético, los polígonos de Thiessen y el método de las isoyetas (Aparicio, 1992). Además de los anteriores, Dingman (1994) enumera 12 métodos más para la determinación de la lámina de lluvia en un área definida, entre los que destacan los métodos de interpolación de *spline* y *kriging*.

En general, el método más adecuado para cuantificar P en áreas extensas depende varios factores, como: objetivo del análisis, las características de la región y, el tiempo y recurso disponibles (Dingman, 1994).

1.6.3. Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) es el proceso mediante el cual, una parte de la precipitación que cae en la tierra regresa a la atmósfera como vapor de agua. El término engloba tres fenómenos que, normalmente, son difíciles de medir por separado: evaporación de la humedad del suelo, transpiración de plantas y animales (está en una cantidad despreciable) y sublimación de nieve y hielo (Verstraeten et al., 2008). De estos, los más destacados son la evaporación y la transpiración vegetal.

El vapor de agua resultante de este proceso se desplaza desde la superficie terrestre hacia la atmósfera sin poder ser captado. Así, el agua evapotranspirada se considera una pérdida. En el mundo, cerca del 62% de la precipitación que cae en los continentes se pierde por evapotranspiración, lo que equivale a 72 000 km³ por año. De esta, cerca del 97% ocurre en la superficie terrestre (suelo y vegetación) y el 3% restante en los cuerpos de agua superficiales (océanos, ríos y lagos) (Dingman, 1994). En las regiones áridas, el porcentaje de pérdida de agua por ET puede llegar a ser mayor al 90% de la precipitación anual (OMM, 2012).

La ET es un fenómeno dependiente de las condiciones atmosféricas, principalmente del suministro de energía y el transporte de vapor. El proceso puede describirse, a grandes rasgos, así (Allen et al., 2006):

1. La radiación solar incidente suministra la energía necesaria para iniciar y sustentar el proceso, elevando la temperatura de las hojas, el suelo y la

atmósfera. Esta depende de la localización, época del año, turbidez de la atmósfera y cobertura de nubes.

2. La radiación absorbida por la atmósfera y el calor emitido por la tierra elevan la temperatura del aire. El calor sensible del aire, así como la incidencia directa de la radiación, transfieren energía a la vegetación y al suelo alcanzando la temperatura de vaporización del agua. En el caso de las plantas, la transpiración resulta en parte un mecanismo de defensa contra el sobrecalentamiento de las hojas (Thornthwaite y Mather, 1951).
3. La diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie evapotranspirante y el aire circundante determinan la tasa de remoción de vapor.
4. Una vez iniciado el proceso, la tasa de ET también variara dependiendo de la velocidad de circulación del aire. Este factor permite remover el aire circundante ya saturado y sustituirlo por un aire más seco.

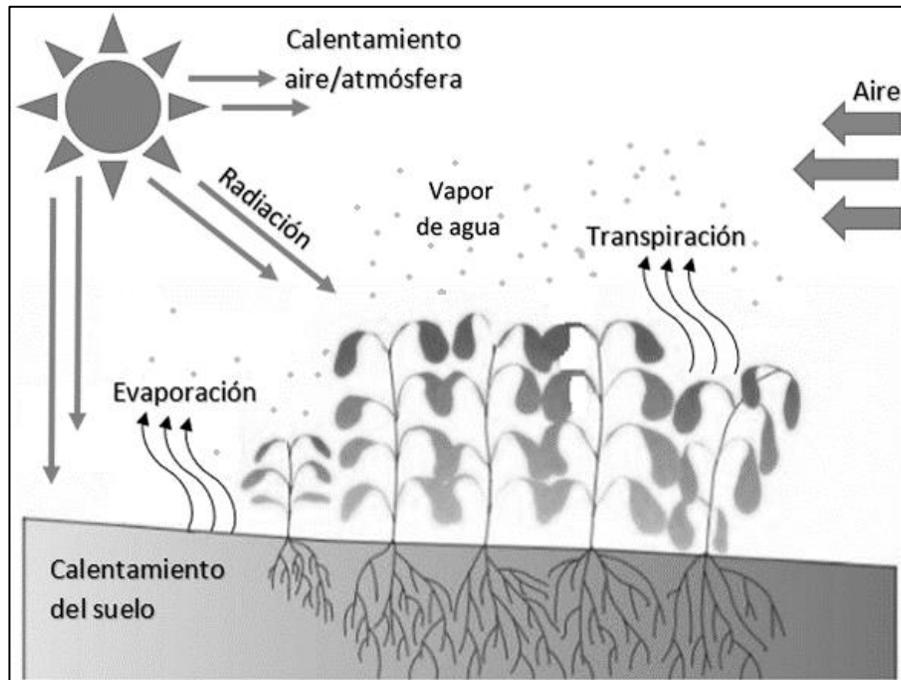


Figura 6. Principales factores que controlan la tasa de evapotranspiración (elaboración propia).

Por lo tanto, los principales factores climáticos que ponen en marcha el mecanismo de la ET es, la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento.

Por otro lado, la magnitud de la ET está determinada por las características del suelo y la vegetación; tipo y densidad de vegetación, variedad y etapa de desarrollo, resistencia a la transpiración, altura, rugosidad, albedo, características radicales, tipo y uso de suelo, así como su cobertura y contenido de humedad, son las características más influyentes (Allen et al., 2006).

El concepto de evapotranspiración incluye tres tipos principales:

- *Evapotranspiración potencial (ETP)*. Cantidad máxima de agua que puede evaporarse de una superficie completamente cubierta de vegetación, bajo las características climáticas predominantes, suponiendo que no hay limitación en el suministro de agua del suelo y en una región y tiempo determinados (OMM, 2014).
- *Evapotranspiración real (ETR)*. Es la cantidad real de agua evaporada del suelo y la vegetación bajo las condiciones del terreno y climáticas imperantes. Sin condiciones idealizadas de vegetación o humedad del suelo (OMM, 2014).
- *Evapotranspiración de referencia (ET₀)*. Es la cantidad de agua que es removida de una superficie de referencia o cultivo hipotético con las siguientes características: 0.12 m de altura, una resistencia superficial fija de 70 S m⁻¹ y un albedo de 0.23. la Superficie de referencia es similar a una superficie extensa de pasto verde, bien regada, de altura uniforme, creciendo activamente y ensombreciendo totalmente el suelo (Allen et al., 2006).

La tasa de evapotranspiración se define como la cantidad de agua que evapotranspira de una unidad de superficie por unidad de tiempo.

Habitualmente se expresa como milímetros por día (OMM, 2010; citado por OMM, 2014).

La ET es un proceso invisible y muy complejo de medir debido a la cantidad de factores meteorológico y propios de la superficie, que le influyen. Sánchez (2001) considera dos grandes grupos de métodos de cuantificación, de acuerdo a los condiciones y parámetros que se consideran durante la medición: métodos de *medición o directos*, que consideran las condiciones ambientales y espaciales reales al momento de medir; y los métodos de *estimación o indirectos*, que consideran solo algunos parámetros climáticos y espaciales.

Los métodos directos calculan la ET a través del control de entradas y salidas de agua en suelos con una cubierta vegetal, por ello miden o cuantifican directamente la evapotranspiración en cualquier cultivo o tipo vegetal para las condiciones de suelo, clima y disponibilidad de agua presentes (Sánchez, 2001).

Tabla 1. Principales métodos de medición directa considerados por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2014).

INSTRUMENTO	EQUIPO	DESCRIPCIÓN
<i>Evaporímetros</i>	Atmómetro y cubetas o tanques de evaporación	Miden la pérdida de agua en una superficie saturada estándar. Los valores obtenidos deben corregirse para obtener estimaciones fiables de evaporación de lagos, de ETR y ETP
<i>Evapotranspirómetros</i>	Lisímetros	Son recipientes que se instalan bajo la superficie del suelo y se rellenan de tierra en la que pueden cultivarse vegetales. Permiten estimar la evaporación o ETP

En general, para estimar la ET se aplican métodos indirectos, basados en mediciones puntuales u otros cálculos que dan resultados aceptables (OMM, 2014). Los métodos

indirectos son simplificaciones de algunos de los métodos directos, lo que ha permitido la derivación de un sin número de fórmulas empíricas de complejidad variable (Sánchez, 2001). Estos han permitido estudiar la ET de amplias extensiones naturales de agua o tierra o firme, lo que actualmente resulta imposible con las mediciones directas (OMM, 2014).

Tabla 2. Algunos métodos usados para la estimación indirecta de la ET (Dingman, 1994; Tabari et al., 2013).

BASADO EN	MÉTODO	DESCRIPCIÓN
<i>Temperatura</i>	Thornthwaite Blaney-Criddle Hargeraves-Samani	Uno de los primeros métodos desarrollados para estimar ET. Emplea la temperatura del aire y a veces las horas de duración del día (del amanecer al atardecer)
<i>Radiación</i>	Jensen-Haise McGuinness-Bordne Oudin et al.	Emplea la radiación neta y la temperatura del aire
<i>Transferencia de masa</i>	Penman Romanenko OMM	Basado en el concepto de transferencia de vapor de agua desde una superficie a la atmósfera (ley de los gases de Dalton)
<i>Combinados</i>	Penman-Monteith	Emplea la radiación neta, temperatura del aire, velocidad del viento y humedad relativa

Los métodos indirectos son empleados para determinar la ETP y ET_0 , a partir de las cuales se pueden establecer relaciones o coeficientes de corrección para conocer la ETR (Sánchez, 2001; OMM, 2012). La selección del método más adecuado dependerá, en general, del objetivo del análisis, la extensión y características del área de estudio, así como de la disponibilidad de los datos.

El conocimiento de la ET es fundamental en las ciencias agrícolas para determinar las necesidades hídricas de los cultivos y así poder diseñar sistemas de riego óptimos, determinar las fuentes y dimensiones de los sistemas de almacenamiento, conducción, distribución y drenaje (Aparicio, 1992). Así mismo, es útil en la determinación de los periodos húmedos y secos, déficits y excesos en la disponibilidad natural de agua de una región cuando se le compara con la precipitación (Andray et al., 1998; Santillán et al., 2013).

1.6.4. Escurrimientos

El escurrimiento se define como el agua de la precipitación, comúnmente pluvial, que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que descarga en un cauce principal. Es decir, el agua pluvial que no es evaporada o interceptada por la vegetación, depresiones en el terreno o estructuras artificiales se convierte en escurrimiento superficial, subsuperficial y subterráneo (Aparicio, 1992).

El escurrimiento se inicia cuando, durante una precipitación intensa o prolongada, el agua se infiltra hasta saturar las capas superiores del suelo. Una parte de la precipitación es retenida también en las depresiones del terreno. Si la precipitación continúa, el excedente comenzara a desplazarse sobre la superficie del suelo hasta alcanzar el cauce de un río o la cuenca de un lago. (Breña y Jacobo, 2006). Tanto el escurrimiento sobre la superficie como los escurrimientos en un cauce conforman el *flujo superficial*. Parte del agua infiltrada que se desplaza cerca de la superficie del suelo conforma el *flujo subsuperficial*. La parte del agua infiltra hasta niveles inferiores al freático se denomina *flujo subterráneo* (Aparicio, 1992).

Los actores que afectan el escurrimiento, de acuerdo a Cahuana y Yugar (2009), están relacionados con las características de la precipitación (forma, tipo, duración,

intensidad, dirección, velocidad y distribución) y las características fisiográficas de la zona, el tipo y uso de suelo, y su contenido de humedad inicial.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2012) reconoce a las estaciones hidrométricas como medios ideales de medición del flujo superficial. Estos registros, si son continuos, ayudan a realizar evaluaciones más precisas de los recursos hídricos. Estos pueden ser simplemente lecturas manuales de la altura del nivel del agua, pero idealmente deben realizarse automáticamente.

Cuando existen datos incompletos en los registros o definitivamente no hay registros, estos pueden ser determinados, de acuerdo a la OMM (2012), por los siguientes métodos:

- *Regresión con los datos de una estación de medición cercana.* Para estaciones con registros incompletos.
- *Método de la relación del área de drenaje.* Para estaciones con registros incompletos.
- *Modelos precipitación-escurrimiento.* Para escurrimientos sin estaciones de medición o estaciones con registros incompletos.

Este último permite estimar el caudal de escurrimiento a partir de datos de un evento de precipitación. Es el método de uso más generalizado, pues normalmente, los registros de precipitación son más abundantes que los de escurrimiento. Entre los más comunes están, la formula racional, hidrograma unitario y el método del número de curva (Aparicio, 1992; OMM, 2012).

El escurrimiento también puede ser determinado mediante el establecimiento de relaciones entre otras variables climáticas e hidrológicas conocidas (Calvo, 1986; Andray et al., 1998; Bohn y Campo, 2010; Santillán et al. 2016).

1.6.5. Infiltración

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua se desplaza desde la superficie del terreno hacia dentro y a través de las diferentes capas del suelo. El movimiento del agua es impulsado por las fuerzas gravitacionales y capilares (Aparicio, 1992). Una parte del agua infiltrada se convertirá en flujo subsuperficial. La porción de agua que se infiltra hasta capas más profundas se dice que percola (Breña y Jacobo, 2006).

La infiltración juega un papel de primer orden en la relación lluvia-escurrimiento y, por lo tanto, en los problemas de diseño y predicción asociados a la dimensión y operación de obras hidráulicas. La tasa de infiltración es la cantidad de agua que atraviesa la superficie del terreno por unidad de tiempo. Generalmente se expresa en milímetros por hora (Aparicio, 1992).

Muchos factores influyen en la tasa de infiltración, Breña y Jacobo (2006) resaltan los siguientes:

- Propiedades físicas y químicas del agua.
- Conductividad hidráulica del suelo.
- Contenido de humedad del suelo.
- Pendiente y rugosidad del suelo.
- Características químicas del suelo.

La infiltración puede medirse empelando los infiltrómetros, lisímetros o parcelas de ensayo (Cahuana y Yugar, 2009). También puede determinarse a partir de métodos empíricos, cuando se tienen mediciones simultáneas de lluvia escurrimiento. Por ejemplo, por diferencia entre la altura de lluvia y el escurrimiento directo; el método del número de curva; y otros criterios mencionados por Aparicio (1992).

1.6.6. Humedad del suelo

La humedad del suelo se refiere a la cantidad de agua que el suelo puede retener y que está disponible para ser usada por las plantas. Se expresa comúnmente como la cantidad de agua (en mm o cm de columna de agua) presente en una profundidad de un metro de suelo. también puede ser expresado en porcentaje de volumen (Brouwer et al., 1985).

El contenido de humedad del suelo (CHS) se compone de tres variables: capacidad de campo, punto de marchitez permanente y agua total disponible. Estas tres son constantes para un tipo de suelo dado, pero varían ampliamente de un tipo de suelo a otro (Brouwer et al., 1985).

Capacidad de campo (CC). Si a un suelo saturado, después de una lluvia o riego, se le deja drenar libremente, evitando las pérdidas por ET, su contenido de agua disminuirá hasta alcanzar un valor límite después del cual la disminución será muy lenta (Dingman, 1994). Este valor representa la cantidad total de agua que el suelo puede retener en contra de la fuerza de gravedad, es decir, cuando el drenaje descendente (infiltración) ha disminuido significativamente (Allen et al., 2006).

Punto de marchitez permanente (PMP): En ausencia de una fuente de agua y en presencia de una cubierta vegetal, el CHS disminuirá en la zona radicular como resultado del consumo de agua por las plantas. A medida que aumenta el consumo, más seco se vuelve el suelo y retiene el agua con mayor fuerza haciendo más difícil la extracción por parte de las raíces. Eventualmente se alcanza un punto en el que la extracción será nula. Este valor representa el CHS en el cual las plantas se marchitan permanentemente (Allen et al., 2006).

Agua disponible total (ADT): Este valor representa el agua disponible para ser usada por las plantas, es decir, el agua comprendida entre la CC y el PMP.

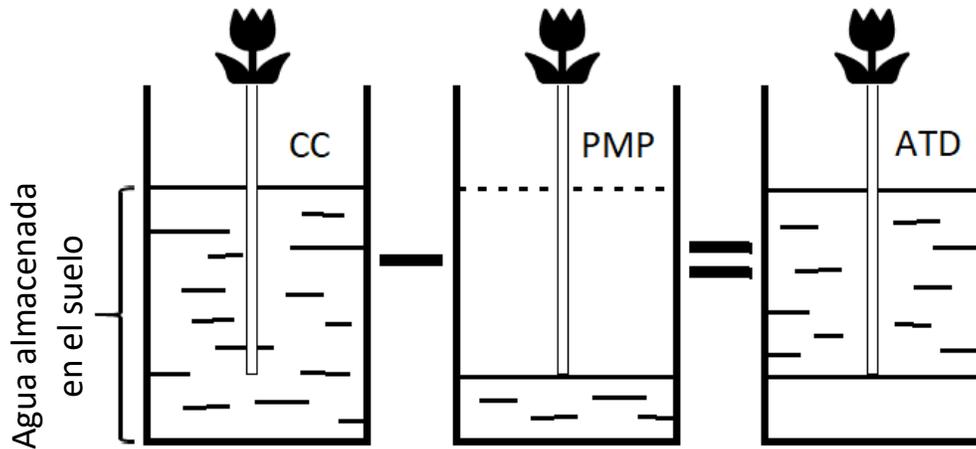


Figura 7. Contenido de humedad del suelo y agua total disponible (Modificado de Brouwer et al., 1985).

La CC y PMP dependen principalmente de la textura y estructura del suelo. Por ejemplo, Los suelos de grano fino tienen capacidades de campo mayores (arcilla y limos) que los suelos de grano grueso (arenoso) (OMM, 2012). Mientras que la magnitud de la lámina ADT depende del tipo de suelo y la profundidad radicular (Allen et al., 2006).

La humedad del suelo se mide *in situ* mediante una variedad de técnicas. Sin embargo, debido a su variabilidad espacial y la falta de mediciones, dichos métodos no pueden usarse directamente para su medición a gran escala. Dado que las metodologías de medición puntuales no son prácticas, las técnicas de teledetección y modelos de equilibrio hídrico (de diversa sofisticación) suelen emplearse para estimarla. Estos enfoques son, sin embargo, de profundidad limitada (OMM, 2012).

La humedad del suelo es un componente importante del ciclo hidrológico atmosférico, tanto a la pequeña escala de los usos agrarios como para modelizar en gran escala la

interacción entre la tierra y la atmósfera, encontrándose directamente relacionada con la ET (Verstraeten et al., 2008).

1.6.7. La cuenca hidrográfica

Para Ramakrishna (1997), la cuenca hidrográfica es un área natural conformada por un componente biofísico (agua y suelo), un componente biológico (flora y fauna), y un componente antropocéntrico (actividad socioeconómica, cultural, etc.), interrelacionados y en equilibrio entre sí.

Para la hidrología, la cuenca hidrográfica representa la unidad fundamental para el estudio del ciclo hidrológico. Desde el punto de vista de la hidrología, la OMM (2008) la define como el área que recibe la precipitación y, después de una serie de pérdidas y retrasos producto de los procesos hidrológicos que en ella ocurren, la conduce a un punto de salida.

La cuenca se compone de un cauce principal y un único punto de salida que puede drenar hacia afuera de la cuenca, por ejemplo, un río (cuenca exorreica); o hacia dentro de ella, por ejemplo, un lago (cuenca endorreica) (Aparicio, 1992).

La definición y extensión de la cuenca depende de su línea divisoria o parteaguas. Esta es la línea imaginaria que une los puntos topográficos más altos y separa la cuenca de otras cuencas vecinas. El principio del parteaguas se basa en que cualquier precipitación que caiga sobre él, se divide, drenando una parte hacia el cauce principal de la cuenca en cuestión, mientras que la otra parte drena hacia otra cuenca diferente (OMM, 2008).

La cuenca hidrográfica se suele definir mediante el uso de mapas de curvas de nivel o fotografías aéreas. Por su extensión se definen tres tipos: la cuenca, de cinco mil a 50

mil hectáreas, donde se encuentra el cauce principal en donde concurre toda el agua que precipita dentro de la cuenca; la subcuenca, de tres mil a cinco mil hectáreas, delimitada por el parteaguas de un arroyo o río secundario que drena hacia el cauce principal; y las microcuencas, menores a tres mil hectáreas, que representa una subdivisión de la subcuenca (Ramakrishna, 1997; Sánchez et al., 2003).



Figura 8. Componentes de la cuenca hidrográfica (Cahuana y Yugar, 2009).

En la práctica, las microcuencas son vistas bajo un enfoque social, económico y operativo, además del enfoque territorial e hidrológico tradicional, por lo que son consideradas como unidades básicas de planeación para la conservación y explotación de los recursos, principalmente la vegetación, el suelo y el agua (Sánchez et al., 2003; Tobar, 2010).

1.6.8. El balance hídrico

El balance hídrico es un método empleado en hidrología para cuantificar los volúmenes de agua que entran y salen de una cuenca hidrográfica, así como los cambios ocurridos en el almacenamiento. Este incluye el balance de agua superficial y el balance de agua subterránea, los que pueden realizarse en conjunto o de manera independiente. Es decir, y de acuerdo a Lvovitch (1970), el balance hídrico es una expresión cuantitativa de un proceso más grande: el ciclo hidrológico.

Esencialmente un balance hídrico cuantifica las entradas y salidas de agua dentro de la cuenca hidrográfica, analizando de acuerdo a sus relaciones, los principales componentes del ciclo hidrológico (precipitación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración, etc.) que se suceden hacia el interior del parteaguas, y en diferentes escalas de tiempo (por hora, diario, mensual y anual).

La fórmula sintética del balance hídrico es:

$$\pm \frac{dV}{dt} = E - S \quad (1)$$

Esta se fundamenta en el principio de conservación de la masa o ecuación de continuidad, que establece que, para cualquier volumen (V) arbitrario y durante cualquier período de tiempo (t), la diferencia entre las entradas (E) y salidas (S) estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada (Sokolov y Chapman, 1981). Amparado en este principio, el balance hídrico ofrece información básica para conocer el estado del recurso hídrico, así como el estado de la cuenca en tanto unidad básica de estudio de la hidrología.

Una forma generalizada de la ecuación de balance hídrico, que toma en cuenta los flujos superficiales y subterráneos es la que Sokolov y Chapman (1981) proponen para cualquier masa de agua y cualquier intervalo de tiempo:

$$P + Q_{sl} + Q_{ul} - ET - Q_{so} - Q_{uo} - \Delta S = 0 \quad (2)$$

Donde:

P	Precipitación (lluvia o nieve)
Q_{sl}	Entrada de agua superficial (escurrimientos, afloramientos)
Q_{ul}	Entrada de agua subterránea (percolación, flujo subterráneo)
ET	Evapotranspiración
Q_{so}	Salida de agua superficial (escurrimientos)
Q_{uo}	Salida de agua subterránea (flujo subterráneo)
ΔS	Cambio en el almacenamiento (superficial y subterráneo)

La ecuación de balance hídrico intenta establecer las relaciones entre la precipitación que cae sobre una cuenca, el volumen de agua interceptada por la vegetación y depresiones en el terreno, los escurrimientos superficiales, flujos y almacenamientos subterráneos, evaporación de superficies libres y transpiración vegetal, entre otras. Así, la ecuación (2) contempla todas las entradas y salidas de agua posibles en el sistema, de manera generalizada. Sin embargo, esta puede simplificarse o hacerse más compleja de acuerdo al objetivo que se persiga en cada estudio particular y de acuerdo a la disponibilidad y calidad de la información requerida, escala de tiempo, extensión de la cuenca y otros factores y suposiciones.

Algunas versiones de la ecuación de balance hídrico incluyen, además de los flujos naturales de agua que forman parte del ciclo hidrológico, los usos consuntivos, extracciones de agua subterránea, importaciones y exportaciones de cuencas vecinas. A este tipo de balance más completo Mirolovic y Marjanovic (1998) lo llaman *balance*

de gestión de recursos hídricos para diferenciarlo del balance hídrico convencional. Este tiene un enfoque en las necesidades antropogénicas más que en la evaluación de la disponibilidad natural del agua en la cuenca.

Los balances hídricos que emplean escalas de tiempo horaria o diaria son más exigentes en cuanto al número de parámetros que emplean y requieren más información que los métodos de escala mensual. Los modelos mensuales son usados principalmente para determinar la importancia de las variables hidrológicas en una gran variedad de cuencas (Xu y Singh, 1998).

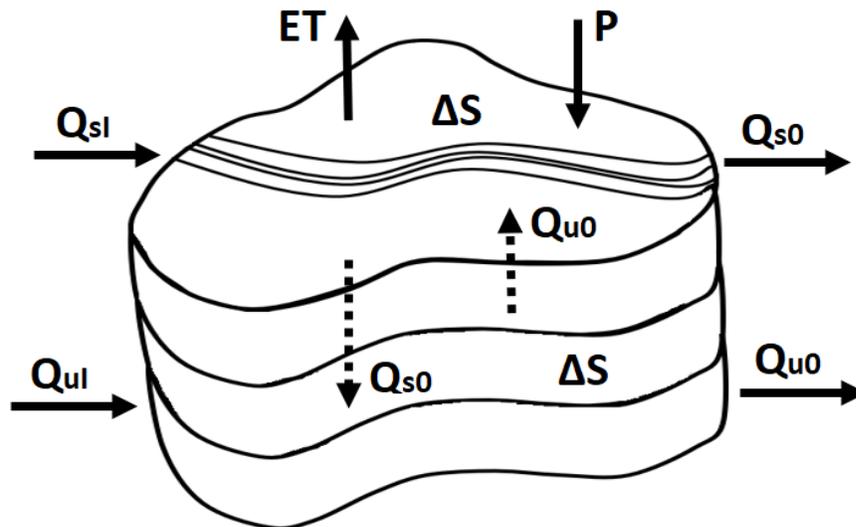


Figura 9. Representación del balance hídrico en una cuenca hidrográfica (modificado de Cahuana y Yugar, 2009).

Aunque ningún modelo del balance hídrico ofrece un balance perfecto, este método ha sido empleado ampliamente a un gran número de problemas hídricos y climáticos, por ejemplo, hoy en día se aplica a la investigación en cambio climático (Galvínco, et al., 2008; Xu y Halldin, 1996), predicción de escurrimientos (Bohn y Campo, 2010; Jujnovsky et al., 2010; Arriaga, 2012), determinación de excesos y déficits hídricos (Singh et al., 2004; Santillán et al., 2013), volúmenes de infiltración para recarga de acuíferos (Mendoza et al., 2016), entre otros problemas.

Hoy en día el balance hídrico es una de las principales herramientas en hidrología para el estudio de la distribución y disponibilidad del agua en una cuenca hidrográfica, con un grado de precisión que varía dependiendo del número y calidad de datos disponibles. A partir de él se puede dar solución a problemas teóricos y prácticos que ocurren dentro de la cuenca hidrográfica y estudiar los componentes del ciclo hidrológico a escala local, regional y mundial.

CAPÍTULO II

BALANCE HÍDRICO EN EL PARQUE

2.1. PRECIPITACIÓN EN EL PARQUE

En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) como en la mayor parte del territorio nacional, predomina la precipitación pluvial orográfica (Lara, 2005). También ocurre, en menor medida, la precipitación de granizo que es un indicativo de actividad convectiva (Jáuregui, 2000).



Figura 10. Proximidad del Parque Nacional Fuentes Brotantes de Tlalpan a la sierra del Ajusco (Google Earth).

El régimen anual de precipitación para la ZMVM está definido por la intensidad y frecuencia de fenómenos meteorológicos sinópticos en las costas del Pacífico y Atlántico mexicano, y comprende los meses de mayo a octubre. El resto del año es seco con un régimen no definido de lluvias aisladas. Por su gran extensión, en la ZMVM se presenta un esquema de precipitación no uniforme (Lara, 2005). Jáuregui (2000) documenta una precipitación promedio entre 700 y 1200 mm anuales al pie de los levantamientos orográficos hacia el sur y sureste, que corresponde a la zona de ubicación del PNFBT, cercano al volcán del Xitle y la sierra del Ajusco (Figura 10). En esta zona se presenta una mayor frecuencia de lluvia

diaria durante el periodo mayo-octubre (más de 100 días con precipitación) (Jáuregui, 2000).

La precipitación pluvial se mide con pluviómetros en las estaciones climatológicas, operadas por el Servicio Meteorológico Nacional. En la subcuenca Lago de Texcoco y Zumpango (RH26Dp), donde se ubica el Parque Nacional Fuentes Brotantes de Tlalpan (Figura 3), existen 121 estaciones climatológicas que registran los datos de lluvia diarios, así como otras variables climáticas. La altura de la lámina de lluvia se registra de manera diaria y en milímetros (mm). La precipitación pluvial representa la única entrada de agua en el balance hídrico que se realiza al PNFBT.

2.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN EN EL PARQUE

En 2015, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2016) reportó que en el país las pérdidas por evapotranspiración (ET) son cercanas al 72.5% de la precipitación total. En el PNFBT según estimaciones de INEGI (2004), la evapotranspiración real (ETR) media anual es de alrededor de 600 mm.

La ET se considera la salida principal de agua en el Parque debido a su magnitud. Esta fue calculada como evapotranspiración potencial (ETP) y, a partir de esta, y la relación entre la precipitación pluvial y la variación en el contenido de humedad del suelo, se determinó la ETR.

En este trabajo, la ETP se calcula empleando la ecuación propuesta por Oudin et al. (2005) (ecuación 12, ver apartado 3.6. de la Metodología). Esta es una ecuación basada en la radiación extraterrestre diaria y temperatura media mensual. Esta fue desarrollada tomando como modelo las ecuaciones de Jensen-Haise (1963) y McGuinness-Bordne (1972).

Las ecuaciones de Jensen-Haise y McGuinness-Bordne son la base del modelo de la ecuación 12, fueron seleccionadas por Oudin et al. de entre otras 27 ecuaciones empleadas para calcular la ET; probadas en 308 cuencas de Francia, Australia y Estados Unidos, con diferentes características físicas y climáticas; y con cuatro modelos lluvia-escorrentamiento.

La ecuación de Oudin et al. fue comparada con ecuaciones de diferente complejidad, variada demanda paramétrica (temperatura, radiación, velocidad del viento, precipitación, humedad relativa, etc.) y que incluso se emplean para determinar diferentes tipos de evapotranspiración (ETP, ETR, ET₀).

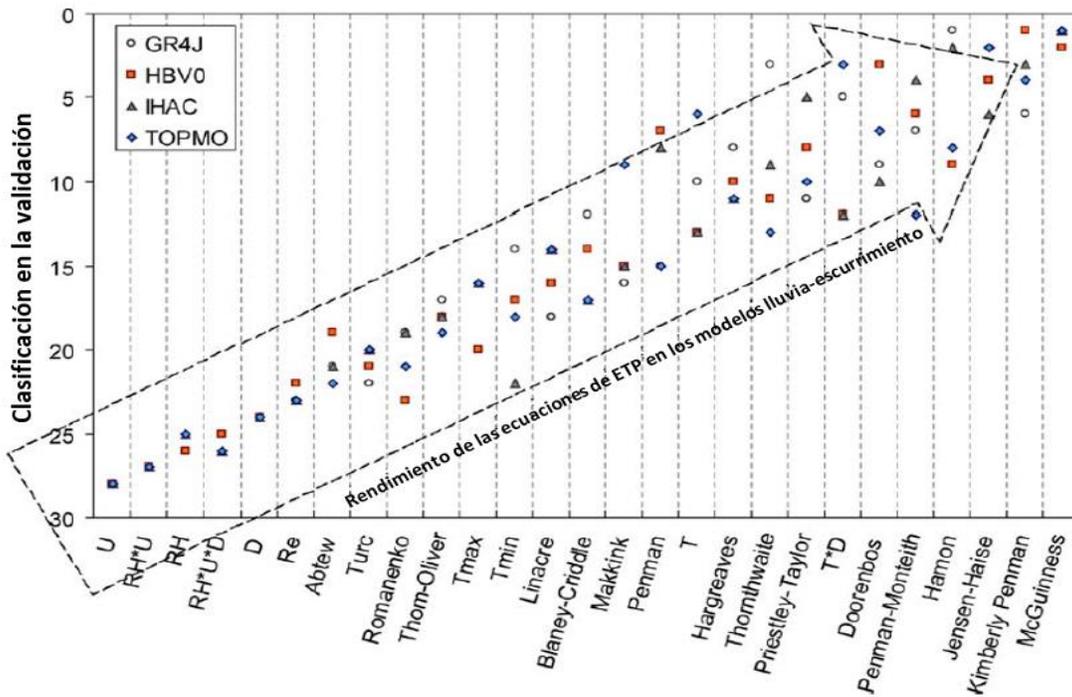


Figura 11. Clasificación de las ecuaciones para calcular la ET presentada por Oudin et al. (2005).

De entre las 27 ecuaciones utilizadas, destacamos tres, la ecuación de Turc (1961), la ecuación de Thornthwaite (1948) y la ecuación de Penman-Monteith (1965), esta última un referente en la determinación de la ET y recomendada por la FAO (Allen et al., 2006). La ecuación de Penman-Monteith requiere de una variedad de parámetros que no están disponibles o no son medidos por el Servicio Meteorológico Nacional por lo que no puede

aplicarse para la determinación de la ET en el Parque, mientras que la ecuación de Turc (1961) sólo necesita de la precipitación y temperatura.

En la Figura 11 se muestra el desempeño de las 27 ecuaciones probadas por Oudin et al., en cuatro modelos lluvia-escurrimiento. Puede observarse que las ecuaciones de Jensen-Haise y McGuinness-Bordne se encuentran entre las mejor clasificadas de acuerdo a su rendimiento. Además, ambas ecuaciones requieren de parámetros simples que son fáciles de conseguir o calcular, esto si se comparan con otras ecuaciones que también fueron bien clasificadas como la de Kimberly-Penman o la misma Penman-Monteith. Dado su buen desempeño y relativa simplicidad, Oudin et al. las seleccionaron para diseñar una ecuación nueva que intenta ser de aplicación universal.

(Para información más detallada dirigirse al artículo de los autores en las referencias).

2.3. MODELO DE BALANCE HÍDRICO EN EL PARQUE

En el Parque se aplica un balance hídrico mensual de acuerdo al método aplicado por Santillán et al. (2013), el cual se basa en el balance hídrico desarrollado por Thornthwaite y Mather (1957). Esta permite determinar los periodos húmedos y secos, de excesos o déficit, en el suelo, así como los escurrimientos mensuales, mediante el computo de variables climáticas sencillas.

El balance hídrico aquí presentado se desarrolla a partir de la precipitación pluvial incidente sobre el Parque y registrada por las estaciones climatológicas más cercanas. Esta se considera la única entrada de agua. La ETP se toma como la única pérdida de agua en el balance hídrico que se aplica aquí debido a que en general esta representa un gran porcentaje de la precipitación. Así, se obtendrá, con respecto a la lluvia, el porcentaje de agua perdida como ET mensual y anual; el porcentaje de agua disponible como escurrimientos (excesos), mensual y anual; los meses con déficit de agua en el suelo; y la temporada de lluvias (periodo húmedo) y de estiaje (periodo seco) en el Parque. Las

ecuaciones del balance hídrico empleadas aquí se describen en la sección 3.9. de la Metodología.

En el mundo y la República Mexicana, el método de Thornthwaite y Mather ha sido aplicado con mayor o menor éxito. Actualmente sigue siendo empleado por su sencillez y relativa facilidad de aplicación en regiones con escasa información climática. Desde su publicación en 1948 y de sus subsiguientes actualizaciones (Thornthwaite y Mather, 1957), este método ha sido aplicado a un gran número de proyectos (Keim, 2010). A pesar de sus buenos resultados, la ecuación para calcular ETP desarrollada por Thornthwaite es válida solo para regiones con condiciones climáticas similares a las de la costa media atlántica de Estados Unidos, según la OMM (1994), esto plantea cierta limitante para el caso de la Ciudad de México. Aun cuando ha sido aplicada en otros estados del territorio nacional como Guanajuato (Rivas et al., 2011), Tabasco (Ruiz-Álvarez et al., 2012) y Veracruz (Santillán et al., 2013), la ecuación de ETP de Thornthwaite ha sido criticada por subestimar la ETP en invierno y sobreestimarla en verano (Black, 2007).

En este trabajo se sustituye la ecuación de Thornthwaite para calcular la ETP, por la ecuación de Oudin et al. (2005) (ecuación 12).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

1. Obtención de datos geográficos y vectoriales del polígono del Parque a través de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP).
2. Ubicación del Parque en las cuencas oficiales definidas por Conagua y con información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
3. Delimitación de la microcuenca de aportación al Parque Nacional Fuentes Brotantes de Tlalpan.

3.2. SELECCIÓN DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS

1. Ubicación geográfica de las estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).
2. Identificación espacial de las estaciones climatológicas en la cuenca donde se ubica el Parque.
3. Trazo del área de influencia de las estaciones climatológicas utilizando el método de polígonos de Thiessen.
4. Selección de estaciones climatológicas de acuerdo a los periodos de registro (OMM, 1994).

3.3. CÁLCULO DE ALTURA DE LLUVIA MEDIA DIARIA

1. Cálculo del promedio aritmético de la altura de lluvia diaria mensual para cada año de registro de todas las estaciones climatológica seleccionadas.
2. Para cada estación climatológica: cálculo del promedio aritmético de altura de lluvia diaria anual y en temporadas de lluvias y de estiaje.
3. Cálculo de la altura de lluvia media diaria en la subcuenca RH26Dp empleando la ecuación de polígonos de Thiessen (ecuación 3), de acuerdo a Aparicio (1994):

$$P_{ALT} = \frac{1}{A_c} \sum_{i=1}^n (p_{alt\ i})(APT_i) \quad (3)$$

Donde:

P_{ALT} Altura de lluvia media diaria en la subcuenca (m)

A_c Área total de la subcuenca (m²)

$p_{alt\ i}$ Altura de lluvia media diaria en la estación i (m)

APT_i Área de influencia de la estación i (m²)

3.4. CÁLCULO DE LA DISPONIBILIDAD PLUVIAL MEDIA

La estimación de la disponibilidad de agua pluvial por temporada de lluvia, temporada de estiaje y anual por estación climatológica se determinó mediante las siguientes ecuaciones:

$$v_c = p_{alt\ i} * a_c \quad (4)$$

$$V_c = \sum_{i=1}^n (V_i) \quad (5)$$

$$V_i = p_{alt\ i} * APT_i \quad (6)$$

Donde:

V_c Volumen de agua pluvial disponible en la cuenca (m³)

V_i Volumen de agua pluvial en la estación i (m³)

v_c Volumen de agua pluvial en la fracción de área bajo influencia de la estación i
[m³]

APT_i Área de influencia de la estación i (m²)

a_c Fracción del área de la cuenca dentro del área de influencia de la estación climatológica i

3.5. CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

La evapotranspiración potencial se determinó de acuerdo a lo siguiente:

1. Obtención de la temperatura media diaria (T_a) para todos los años de registro de las estaciones climatológicas más cercanas a la microcuenca del Parque, empleando el Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC) versión III 2.0 desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) con información del SMN.
2. Estimación de la radiación extraterrestre (R_e) incidente en la microcuenca del Parque de acuerdo al método descrito por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) (Allen et al., 2006).

$$R_e = \frac{24 * 60}{\pi} G_{SC} d_r [\omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (7)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (8)$$

$$J = \left(275 \frac{M}{9} - 30 + D\right) - 2 \quad (9)$$

si $M < 3$, entonces $J = J + 2$

si año bisiesto y $M > 2$, entonces $J = J + 1$

$$\delta = 0.409 \sin\left[\left(\frac{2\pi J}{365}\right)\right] - 1.39 \quad (10)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\phi)\tan(\delta)] \quad (11)$$

Donde:

R_e Radiación extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)

G_{SC} Constante solar ($0.082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)

d_r Distancia relativa inversa Tierra-Sol (adimensional)

ω_s Ángulo de radiación a la puesta del sol (rad)

ϕ Latitud (rad)

δ	Declinación solar (rad)
J	Número del día del año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre)
M	Número de mes
D	Número de día del mes M

3. Determinación de la evapotranspiración potencial diaria con la ecuación propuesta por Oudin et al. (2005).

$$ETP = \frac{R_e T_a + 5}{\lambda \rho 100} \quad \text{si } T_a + 5 > 0$$

$$ETP = 0 \quad \text{si } T_a + 5 \leq 0$$
(12)

Donde:

ETP	Evapotranspiración potencial (mm día ⁻¹)
R_e	Radiación extraterrestre (MJ m ⁻² día ⁻¹)
λ	Calor latente de vaporización (2.45 MJ kg ⁻¹)
ρ	Densidad del agua (kg m ⁻³)
T_a	Temperatura media diaria del aire (°C)

3.6. DETERMINACIÓN DE EXCESOS Y DÉFICITS MENSUALES

Los excesos y déficits mensuales se determinaron de acuerdo a lo siguiente:

1. Obtención de la lluvia media mensual acumulada (P) por año de las estaciones climatológicas seleccionadas, con información extraída del ERIC.
2. La diferencia entre P y ETP mensuales determina el déficit o exceso del mes i en el año j .

$$P - ETP < 0 \quad \text{mes seco (con déficit)} \quad (13)$$

$$P - ETP > 0 \quad \text{mes húmedo (con exceso)} \quad (14)$$

3. Obtención del promedio aritmético de los excesos y déficits mensuales históricos para determinar la temporada de lluvias y de estiaje en la microcuenca del Parque.

3.7. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO

El contenido de agua en el suelo se determinó de acuerdo a lo siguiente:

1. Obtención de la información de vegetación predominante y tipo y uso de suelo en la microcuenca del Parque, del INEGI.
2. Determinación de la profundidad radicular homologada según Dunne y Leopold (1978; citado por Santillán et al., 2013).
3. Obtención de la capacidad de campo de tablas de la FAO (Allen et al., 2006).
4. Obtención del punto de marchitez permanente de tablas de la FAO (Allen et al., 2006).
5. Determinación de la reserva o contenido de agua en el suelo y disponible para la evapotranspiración mediante la ecuación presentada por la FAO (Allen et al., 2006).

$$ADT = 1000 (CC - PMP) * PR \quad (15)$$

Donde:

ADT Agua disponible total (mm)

CC Capacidad de campo en fracción de volumen ($m^3 m^{-3}$)

PMP Punto de marchitez permanente en fracción de volumen ($m^3 m^{-3}$)

PR Profundidad radicular (m)

3.8. MODELO DE BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico superficial se determinó de acuerdo al método de Thornthwaite-Mather (1957) presentado por Santillán et al. (2013):

$$R_i = R_{i-l} + (P_i - ETP_i) \quad \text{si } 0 < R_{i-l} + (P_i - ETP_i) < R_{m\acute{a}x} \quad (16)$$

$$R_i = R_{m\acute{a}x} \quad \text{si } R_{i-l} + (P_i - ETP_i) > R_{m\acute{a}x} \quad (17)$$

$$R_i = 0 \quad \text{si } R_{i-l} + (P_i - ETP_i) < 0 \quad (18)$$

$$VR_i = R_i - R_{i-l} \quad (19)$$

$$ETR_i = ETP_i \quad \text{si } (P_i - ETP_i) > 0 \quad (20)$$

$$ETR_i = P_i + |VR| \quad \text{si } (P_i - ETP_i) < 0 \quad (21)$$

$$DEF_i = ETP_i - ETR_i \quad (22)$$

$$EX_i = P_i - ETP_i - VR_i \quad \text{si } (P_i - ETP_i) > 0 \quad (23)$$

$$EX_i = 0 \quad \text{si } (P_i - ETP_i) \leq 0 \quad (24)$$

$$D_i = 0.5 * (D_{i-l} + EX_i) \quad (25)$$

Donde:

R	Contenido de humedad del suelo (mm)
$R_{m\acute{a}x}$	Contenido máximo de humedad del suelo (mm)
P	Precipitación acumulada media (mm)
VR	Variación en el contenido de humedad del suelo (mm)
ETP	Evapotranspiración potencial (mm)
ETR	Evapotranspiración real (mm)
DEF	Déficit de agua (mm)
EX	Exceso de agua (mm)
D	Escurremientos (mm)
i	Mes en curso
$i-l$	Mes anterior

CAPÍTULO IV

DESARROLLO

4.1. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se delimitó considerando la siguiente información: la página web de algunas instituciones oficiales, los archivos con la información geoespacial del área de estudio; del INEGI, la correspondiente a la subcuenca RH26Dp (Figura 12); y de la CONANP, la que corresponde al polígono del Parque Nacional Fuentes Brotantes de Tlalpan. Esta información se manejó principalmente, con el sistema de información geográfica (SIG) Esri ArcMap 10.1 (ArcMap), y como auxiliar, el Mapa Digital de México versión 6.1 desarrollado por el INEGI (MDM).

Para realizar el balance hídrico en el Parque fue necesario primero delimitar el área de estudio, esta es, el polígono que define los límites administrativos del Parque, que ya están definidos por la CONANP y, la microcuenca que define los límites hidrográficos del Parque, no delimitada hasta el momento de la realización de este trabajo.

La definición del parteaguas o límite de la microcuenca se realizó de manera manual empleando ArcMap y aplicando el método convencional:

1. Se identificó la red de drenaje o corrientes superficiales y se hizo un esbozo general del parteaguas.
2. Se identificaron, alrededor del Parque, los puntos más altos del terreno (mayor cota o curva de nivel) (cerros, colinas y montañas).
3. Se seleccionó como punto de salida la alcantarilla hacia donde drena el arroyo que circula en el Parque, y que se ubica en la cota más baja.
4. Se trazo el límite de la microcuenca con una línea ascendente, desde la cota menor (punto de salida) hasta la mayor (volcán el Xitle).
5. El trazo cortó, en su punto medio y de manera perpendicular, a las curvas de nivel en su lado cóncavo hasta llegar a la cota más alta, y el lado convexo cuando descendió de la más alta a la más baja.

4.2. SELECCIÓN DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS

La información climatológica fue provista por el SMN a través de su página web. La información geoespacial referente a las estaciones climatológicas se obtuvo, con el mismo procedimiento, de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Esta información se manejó mediante el uso del sistema de información geográfica Esri ArcMap 10.1, y como auxiliar el Mapa Digital de México versión 6.1.

Se trazaron las áreas de influencia (polígonos de Thiessen) de las estaciones empleando los SIG mencionados (ArcMap y MDM). El método de los polígonos de Thiessen es recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1994) y respaldado en México por la NOM-011-CONAGUA-2015 (DOF, 2015) para estudios hidrológicos. De acuerdo a Aparicio (1994), los polígonos se trazan como sigue:

1. Se unen, mediante líneas rectas, las estaciones climatológicas más próximas entre sí, de manera que se forman triángulos en cuyos vértices están las estaciones.
2. Se trazan líneas rectas que bisectan los lados de los triángulos (las líneas correspondientes a cada triángulo convergen en un solo punto).
3. Cada estación climatológica quedará rodeada por las líneas rectas del paso 2, que forman los P-T y, en algunos casos, en parte por el límite de la cuenca. Esta es el área de influencia de la estación correspondiente.

De esta forma se seleccionaron las estaciones ubicadas dentro de los límites de la subcuenca RH26Dp, de la microcuenca y del polígono del Parque, o que se encuentran cercanas a ellas.

Tomando en cuenta recomendaciones de la OMM (1994), se descartaron las estaciones con las siguientes características:

- Cuya área de influencia se encuentre fuera de los límites de la subcuenca RH26Dp, de la microcuenca y del polígono del Parque, en más de un 50% de su extensión.
- Estaciones con registros de lluvia de 10 años o menos.

4.3. CÁLCULO DE ALTURA DE LLUVIA MEDIA DIARIA

El cálculo de la lluvia media diaria se realizó con el promedio aritmético de los datos de lluvia de cada estación climatológica seleccionada (Tabla 6). En las estaciones, los registros de lluvia se presentan en [mm día⁻¹]. Para obtener el valor de la lluvia media mensual, se siguieron los siguientes pasos:

1. Se obtuvo el promedio aritmético de todos los días del mes *i* del año *j*, desde el primer año de registro hasta el año *n*-ésimo.
2. Se obtuvo el promedio de altura de lluvia diaria mensual, desde enero a diciembre, para todos los años de registro de cada estación.
3. Se obtuvo la altura de lluvia media diaria por temporada para cada estación, considerando la temporada de lluvias (periodo húmedo de mayo a octubre) y la temporada de estiaje (periodo seco de noviembre a abril) para las zonas en estudio.
4. En el caso de la subcuenca RH26Dp, se calculó la altura de lluvia media diaria, con la ecuación de polígonos de Thiessen (ecuación 3).

4.4. CÁLCULO DE LA DISPONIBILIDAD PLUVIAL MEDIA

Con los promedios de altura de lluvia diaria anual y por temporada, se obtuvo la disponibilidad pluvial o volumen disponible de agua de origen pluvial (Tabla 7).

Para obtener la disponibilidad pluvial en la subcuenca RH26Dp se aplicaron las ecuaciones 5 y 6, tanto para la temporada de lluvias y de estiaje, como para todo el año.

En el caso de la microcuenca y del polígono del Parque, ninguna estación se ubica hacia adentro de sus límites (Figura 15). Por lo que, el volumen de agua o disponibilidad se obtuvo multiplicando la altura de lluvia media diaria de la estación i , más cercana, por la fracción del área de la microcuenca que se encuentra dentro del área de influencia de la estación i (ecuación 4).

4.5. CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

La ETP se calculó únicamente para la microcuenca y para el polígono del Parque. La ecuación de Oudin et al. (2005) requiere de la temperatura media diaria del aire y la radiación extraterrestre diaria. La temperatura se obtuvo a través del ERIC.

La radiación extraterrestre no se mide en las estaciones climatológicas por lo que se determinó con las ecuaciones del apartado 3.5, como lo describe la FAO (Allen et al., 2006). El cálculo de la radiación extraterrestre es puntual en la Tierra y se emplearon las coordenadas geográficas de las estaciones con influencia en la microcuenca y en el polígono del Parque (Figura 15).

Este método permite obtener la radiación total que incide directamente sobre la Tierra, la cual varía por día y por mes, pero anualmente es constante.

Con la temperatura y la radiación extraterrestre diarias, se determinó la ETP diaria con la ecuación 12.

4.6. DETERMINACIÓN DE EXCESOS Y DÉFICITS MENSUALES

Para la determinación de los excesos y déficits mensuales se consideraron todos los años de registro de las estaciones con influencia sobre la microcuenca y el polígono del Parque.

Se obtuvieron los valores acumulados mensuales de la ETP y de la P.

Se calculó la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial mensuales para identificar los meses húmedos y los meses secos (ecuaciones 13 y 14).

Se realizó un promedio aritmético de los excesos y déficits mensuales históricos con el que se determinó la temporada de lluvias (periodo húmedo) y la temporada de estiaje (periodo seco).

4.7. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO

La columna de agua en el suelo susceptible de ser evapotranspirada se estimó con el contenido de agua del suelo, para lo cual se empleó la ecuación 15, que relaciona la capacidad de campo (CC), el punto de marchitez permanente (PMP) y la profundidad radicular (PR) de la vegetación presente en el suelo.

Para determinar la CC y PMP en el área de estudio, se obtuvo de INEGI la información de textura del suelo, mediante el conjunto de datos vectoriales de perfil del suelo, actualizado al 2014. Para la PR se siguió el mismo procedimiento, extrayendo la información de las cartas de uso de suelo y vegetación, actualizadas al 2003.

En base a los datos de textura del suelo, se obtuvo de tablas de la FAO (Allen et al., 2006) el valor de CC y PMP. La profundidad radicular se obtuvo de Dunne y Leopold (1978) de acuerdo a los valores homologados por Santillán et al. (2013) (ver la Tabla 8).

El agua disponible total en el suelo se determinó mediante la ecuación 15.

4.8. MODELO DE BALANCE HÍDRICO

Se aplicó el balance hídrico mensual con las ecuaciones del apartado 3.8, de acuerdo al método usado por Santillán et al. (2013) y basado en la metodología desarrollada por Thornthwaite y Mather (1957).

Las principales variables son la P, la ETP y el agua disponible total. Estas variables permitieron determinar el escurrimiento mensual y anual (excesos de agua) y los cambios del contenido de humedad en el suelo durante el año. También, se determinó el porcentaje de pérdida de agua (ETP) mensual y anual.

Consideraciones generales del balance hídrico:

- El balance se inicia considerando que después del periodo seco (temporada de estiaje) la reserva de agua en el suelo es nula.
- El 50% del excedente de agua del mes en curso escurre en ese mismo mes, y el 50% restante escurre en el siguiente mes.
- La ETR es igual a la ETP cuando llueve más de lo que se evapotranspira.
- El balance hídrico se cierra cuando se hace coincidir, mediante iteraciones, el exceso de agua anual con el escurrimiento anual.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

Delimitación de la microcuenca del Parque

Las Figuras 12 a 14 muestran la delimitación de la microcuenca del Parque y su ubicación con respecto de la subcuenca RH26Dp.

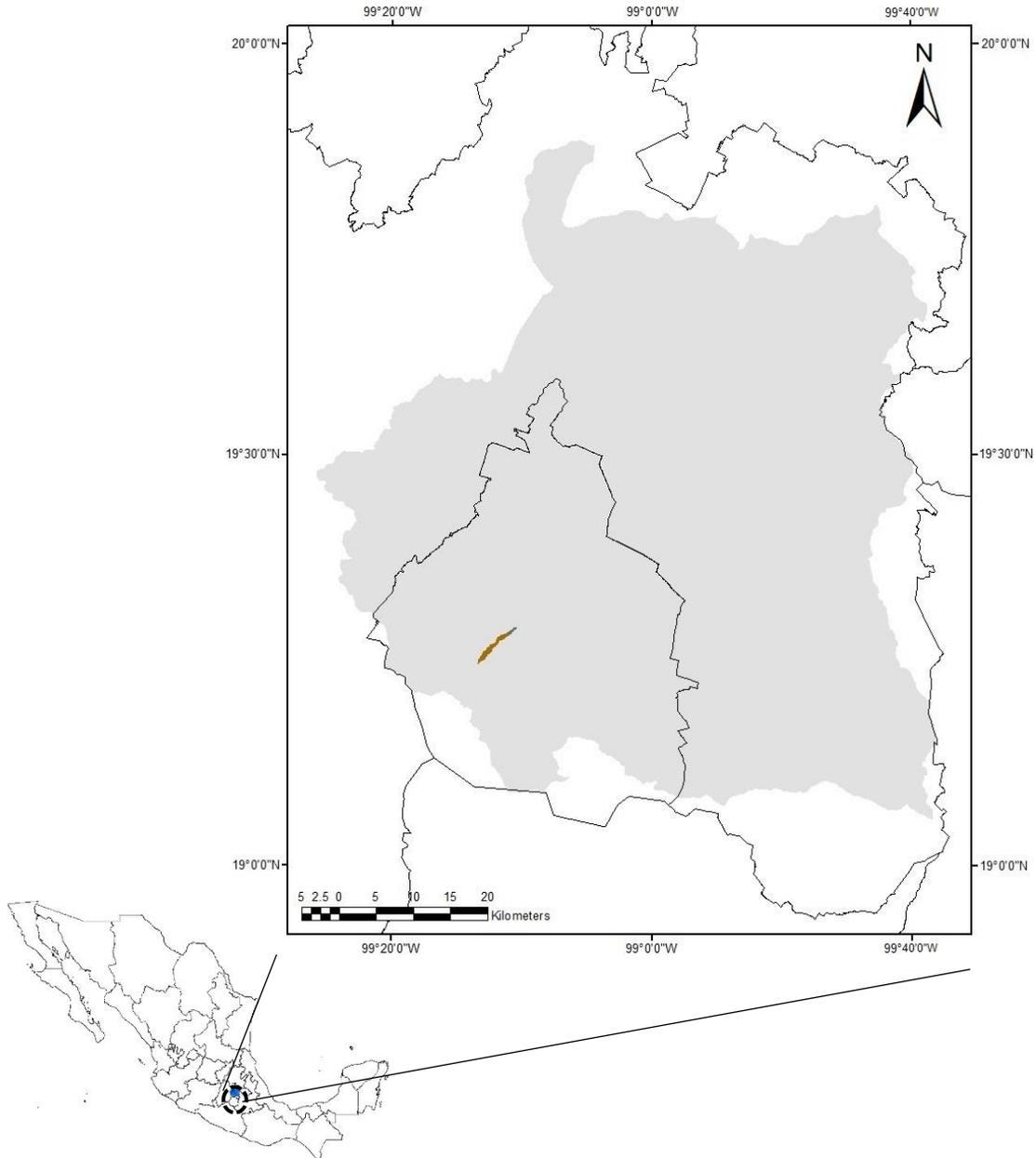


Figura 12. Ubicación de la microcuenca y el polígono del Parque en la subcuenca RH26Dp (INEGI, 2010; CONANP, 2017).

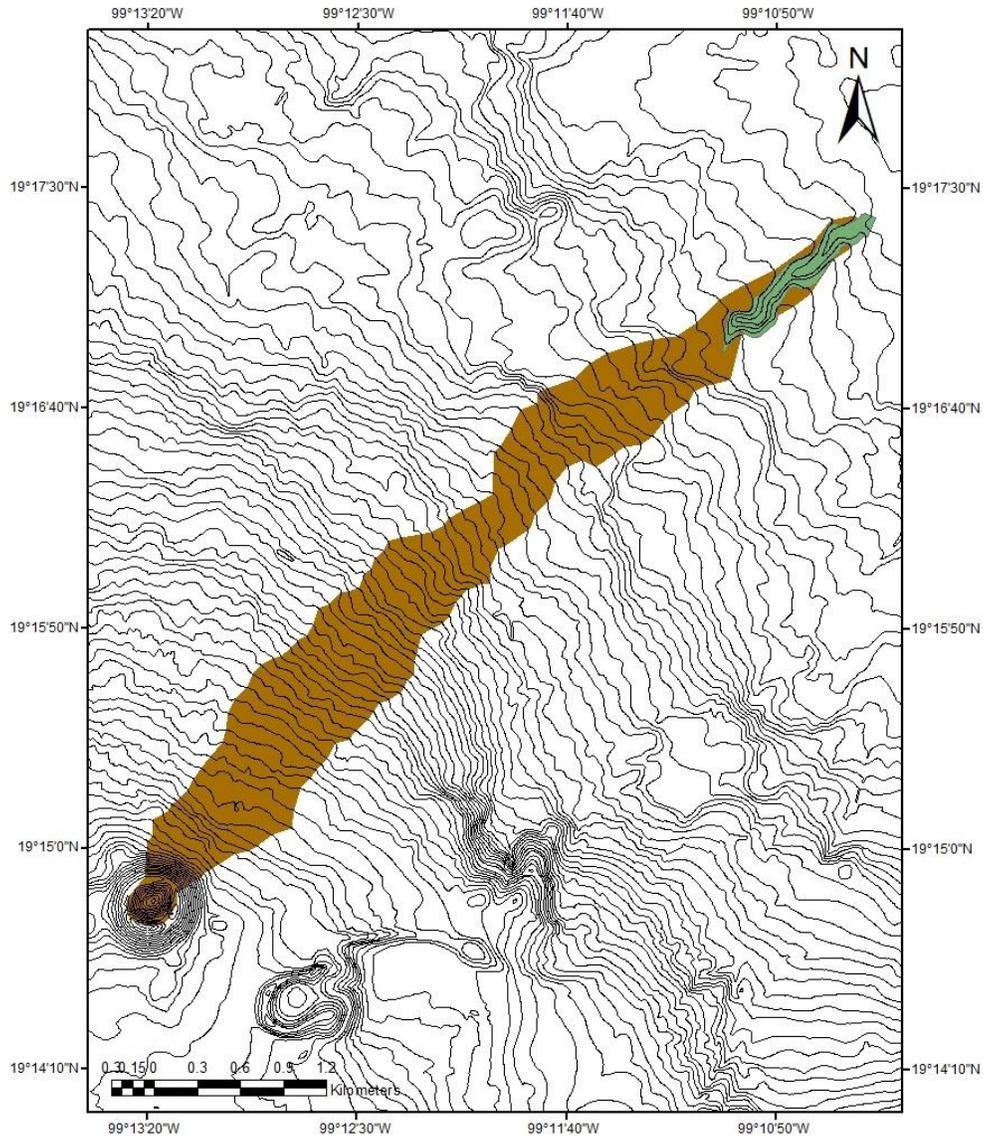


Figura 13. Vista ampliada de la microcuenca y en el polígono del Parque.

La microcuenca se extiende desde el volcán Xitle hasta el Parque. La cota más alta se encuentra a 3120 msnm, la más baja a 2280 msnm. La pendiente de la microcuenca es del 12%. En el polígono del Parque la cota más alta está a 2340 msnm y la más baja a 2280 msnm, con una pendiente del 4%. La extensión de la microcuenca es de aproximadamente 7 km, mientras que el polígono del Parque comprende 1.4 km.



Figura 14. Vista satelital de la microcuenca (rojo) y el polígono del Parque (verde) (Fuente: Google Earth).

En la Tabla 3 se registran el área, perímetro y ubicación de la subcuenca, la microcuenca y el polígono del Parque. El área del polígono del Parque corresponde al área decretada en 1936. Actualmente ésta se ha visto reducida en favor del crecimiento de la ciudad (Figura 1).

Tabla 3. Área, perímetro y ubicación de la subcuenca RH26Dp, la microcuenca y en el polígono del Parque.

	ÁREA (km ²)	PERÍMETRO (km)	UBICACIÓN	
			Latitud N	Longitud O
<i>Subcuenca RH26Dp</i>	4865.49	393.84	19°03'19" 19°52'52"	98°38'28" 99°24'01"
<i>Microcuenca del Parque</i>	3.64	15.48	19°14'43" 19°17'21"	99°10' 99°13'
<i>Polígono del Parque</i>	1.29	3.30	19°16'42" 19°17'20"	99°10' 99°11'

Selección y ubicación de estaciones climatológicas (EC)

Se identificaron 129 estaciones dentro de la subcuenca RH26Dp de las cuales fueron seleccionadas 105 (Tabla 4), de acuerdo a su área de influencia (P-T) y al número de años con registros de lluvia (sección 4.2.). Para el cálculo de altura de lluvia media diaria y disponibilidad de agua pluvial en la subcuenca RH26Dp se emplearon los datos diarios de lluvia de las 105 estaciones.

Dentro de los límites de la microcuenca y el polígono del Parque no hay ninguna estación, por lo que se seleccionaron, del total de estaciones (105), las que se encontraran más cercanas a ellas y que cumplieran las condiciones descritas antes (sección 4.2.).

Tabla 4. Estaciones climatológicas y sus años con datos y periodos de registro empleados en los cálculos del balance hídrico.

ÁREA DE ESTUDIO	ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS	PERIODO DE REGISTRO	AÑOS CON DATOS
<i>Subcuenca RH26Dp</i>	105	1921 – 2014	20 a 44
<i>Microcuenca del Parque</i>	2	1961 – 2008	48
<i>Polígono del Parque</i>	1	1962 – 2008	47

Solo una de las 105 estaciones cuenta con 11 años con datos, correspondientes al periodo de registro de 1997 a 2013, ésta fue la estación con menos años de información. La estación con mayor número de datos tiene 59 años de registros, correspondientes al periodo de 1952 a 2013.

Se eligieron las estaciones *Ajusco* (9002) y *Desviación alta al pedregal* (9020) para la microcuenca del Parque; y la estación 9020 para el polígono del Parque (Figura 15).

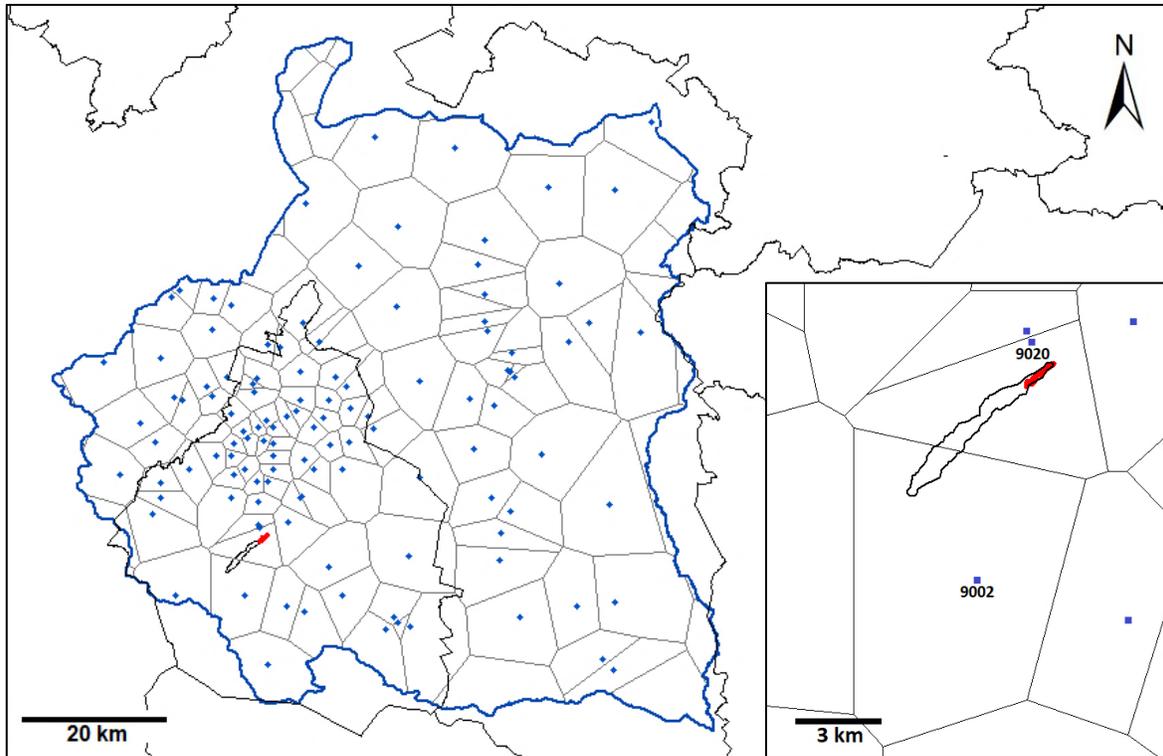


Figura 15. Ubicación de las estaciones climatológicas y sus áreas de influencia.

Las 105 estaciones seleccionadas, su clave, el número de años con información, su área de influencia, su altura de lluvia media diaria y el volumen medio pluvial, se encuentran en la Tabla A 1 del Anexo.

Cálculo de altura de lluvia media diaria y disponibilidad pluvial media

La Tabla 4 muestra los periodos de registro y los años con datos empleados en los cálculos de la altura de lluvia media diaria y disponibilidad pluvial media.

Se definió, en la microcuenca y en el polígono del Parque, como temporada de lluvias (periodo húmedo), los meses de mayo a octubre, y como temporada de estiaje (periodo seco), los meses de noviembre a abril. Los valores obtenidos de altura de lluvia media diaria para la subcuenca RH26DP, la microcuenca y el polígono del Parque, se encuentran en la Tabla 5.

Tabla 5. Altura de lluvia media diaria en la subcuenca RH26Dp, en la microcuenca y en el polígono del Parque.

TEMPORADA	SUBCUENCA RH26DP	MICROCUENCA DEL PARQUE	POLÍGONO DEL PARQUE
	mm	mm	mm
<i>Estiaje (noviembre-abril)</i>	0.4	0.5	0.4
<i>Lluvias (mayo-octubre)</i>	3.7	5.3	5.1
<i>Anual</i>	2.0	2.9	2.8

Se observa que, en general, en temporada de estiaje, la subcuenca, la microcuenca y el polígono del Parque tienen la misma altura de lluvia media diaria, independientemente de las diferencias que existen en tamaño y del número de EC empleadas, así como de años computados (Tabla 4).

En todos los casos, la lluvia media diaria en temporada de lluvias es cerca de dos veces mayor que la media anual. Mientras que, comparada con la temporada de estiaje, la lluvia media diaria en temporada de lluvias es 9 veces mayor en la subcuenca, 10 veces mayor en la microcuenca y 13 veces mayor en el polígono del Parque.

En la temporada de lluvias, la lluvia media diaria en la subcuenca RH26Dp es menor que en la microcuenca y en el polígono del Parque. Mientras que la disponibilidad pluvial media es mayor en la subcuenca. Esto es consecuencia de la diferencia del tamaño de la subcuenca, de la microcuenca y del Parque. Estas consideraciones son importantes para evitar subestimar la lluvia y sobreestimar la disponibilidad en la microcuenca y en el polígono del Parque.

Los valores de altura de lluvia media diaria y disponibilidad pluvial media, para cada una de las 105 estaciones climatológicas, se muestran en la Tabla A 1 del Anexo.

Tabla 6. Disponibilidad media de agua pluvial en la subcuenca RH26Dp, en la microcuenca y en el polígono del Parque.

TEMPORADA	SUBCUENCA RH26DP	MICROCUENCA DEL PARQUE	POLÍGONO DEL PARQUE
	m ³	m ³	m ³
<i>Estiaje (noviembre-abril)</i>	2.0x106	1 825.0	516.0
<i>Lluvias (mayo-octubre)</i>	17.9x106	19 345.0	6 579.0
<i>Anual</i>	9.9x106	10 585.0	3 612.0

Determinación del contenido de agua en el suelo (agua disponible total)

Esta determinación se realizó únicamente en la microcuenca y en el polígono del Parque.

En la Figura 16 puede observarse que se identificaron cuatro tipos de uso de suelo y vegetación en la microcuenca del Parque, uno de ellos representado por el polígono del Parque (bosque cedro y eucalipto). En el polígono del Parque se identificó solo un tipo de uso de suelo y vegetación. Esta información se registra en la Tabla 7 y 8.

Tabla 7. Uso de suelo y vegetación en la microcuenca y en el polígono del Parque (INEGI, 2003; INEGI, 2014).

ZONA EN ESTUDIO	TIPO DE VEGETACIÓN Y USO DE SUELO
<i>Microcuenca del Parque</i>	Bosque pino-encino (vegetación secundaria aparente sin erosión apreciable); bosque cedro y eucalipto, con encinos, pinos y ahuehuetes (matorral xerófilo original); área urbana; y área agrícola (agricultura temporal sin erosión apreciable)
<i>Polígono del Parque</i>	Bosque cedro y eucalipto, con encinos, pinos y ahuehuetes Matorral xerófilo original

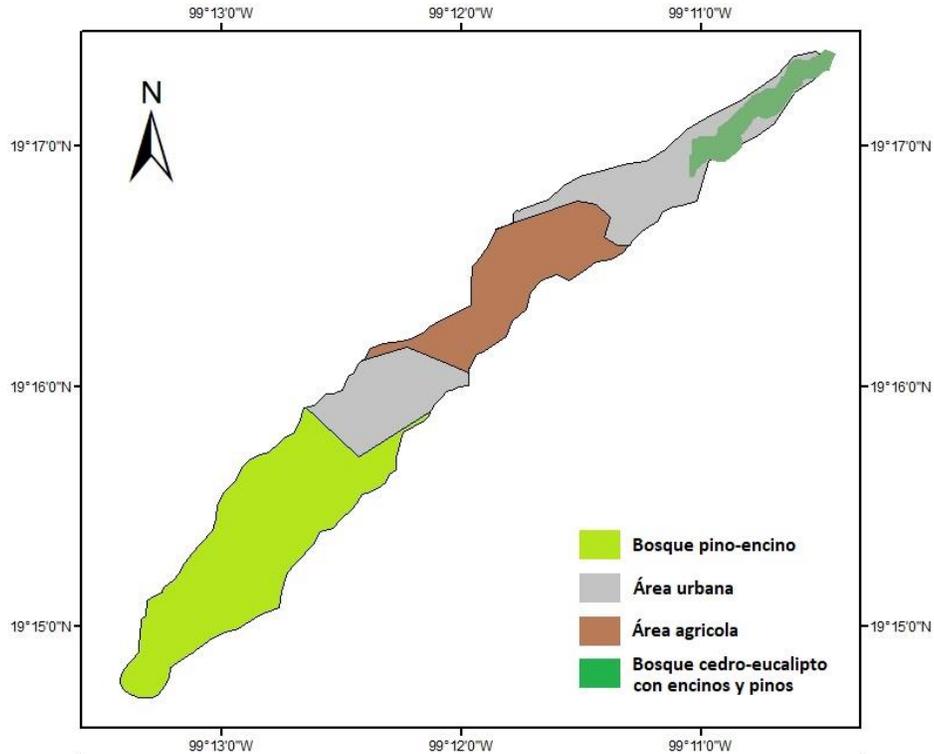


Figura 16. Diferentes tipos de vegetación y uso de suelo en la microcuenca del Parque.

Tanto en la microcuenca como en el polígono del Parque, el suelo es de textura media, es decir, con igual proporción de arcilla, limo y arena, de acuerdo a la descripción del INEGI.

Los valores, en proporción de volumen, de CC y PMP para cada tipo de suelo, según la FAO (Allen et al., 2006) son: arcilla, 0.36 (CC) y 0.22 (PMP); limo, 0.32 (CC) y 0.17 (PMP); y arena, 0.12 (CC) y 0.05 (PMP). Dado que los tipos de suelo se encuentran en igual proporción, se empleó el promedio de los tres (0.27 para CC y 0.15 para PMP) en los cálculos del agua disponible total (ADT) (Tabla 8).

La profundidad radicular de la vegetación fue tomada de las tablas de balance de Dunne y Leopold (1978) presentados y homologados por Santillán et al. (2013). Esta característica y los datos necesarios para estimar el ADT se muestran en la Tabla 8, así como el porcentaje de área que ocupa cada tipo de vegetación y uso de suelo en la microcuenca del Parque.

Tabla 8. Cálculo del agua disponible total (ADT) en la microcuenca y en el polígono del Parque.

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN	TEXTURA DEL SUELO	ÁREA	CC	PMP	PR	ADT
		% (km)	m ³ m ⁻³	m ³ m ⁻³	m	mm
<i>Bosque pino-encino</i>	Textura media: arcilla-limo-arena	43.1	0.27	0.15	1.17	142.35
<i>Área urbana</i>		15.5	0.27	0.15	0.50	60.83
<i>Área agrícola</i>		21.4	0.27	0.15	0.50	60.83
<i>Bosque cedro y eucalipto, con encinos pinos y ahuehuetes</i>		20.0	0.27	0.15	1.17	142.35

Balance hídrico (BH) en la microcuenca y en el polígono del Parque

La Tabla 9 muestra los valores medios mensuales acumulados de precipitación, ETP y el cómputo de P – ETP para la microcuenca del Parque. Se determinó el BH para las cuatro áreas que componen la microcuenca (Tabla 10) y posteriormente se realizó una ponderación de cada uno para determinar el BH en la microcuenca (Tabla 11). El balance hídrico en el polígono del Parque se muestra en la Tabla 12.

Tabla 9. Cálculo de la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP) en la microcuenca del Parque (en mm).

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
<i>T</i>	6.73	7.86	9.71	11.48	12.25	12.41	11.59	11.74	11.66	10.68	8.93	7.77	---
<i>P</i>	11.99	7.08	12.82	27.44	77.62	174.41	217.68	218.18	200.66	82.63	11.33	6.53	1048.37
<i>ETP</i>	40.34	45.77	64.71	75.84	84.73	83.36	81.96	80.12	72.82	63.10	47.39	40.90	781.03
<i>P – ETP</i>	-28.35	-38.70	-51.88	-48.40	-7.11	91.05	135.72	138.07	127.84	19.53	-36.06	-34.37	267.34

En la Tabla 9 puede observarse que, en la microcuenca del Parque, los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre corresponden al periodo húmedo, mientras que el resto (noviembre a mayo) corresponden al periodo seco.

Balance hídrico en el Parque Nacional Fuentes Brotantes

Tabla 10. Balance hídrico mensual para todos los usos de suelo en la microcuenca del Parque (en mm).

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Bosque pino-encino (ADT = 142.35)													
<i>R</i>	43.56	4.87	0.00	0.00	0.00	91.05	142.35	142.35	142.35	142.35	106.29	71.92	---
<i>VR</i>	-28.35	-38.70	-4.87	0.00	0.00	91.05	51.30	0.00	0.00	0.00	-36.06	-34.37	---
<i>ETR</i>	40.34	45.77	17.69	27.44	77.62	83.36	81.96	80.12	72.82	63.10	47.39	40.90	678.50
<i>DEF</i>	0.00	0.00	47.02	48.40	7.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	102.53
<i>EX</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	84.42	138.07	127.84	19.53	0.00	0.00	369.86
<i>D</i>	8.03	4.02	2.01	1.00	0.50	0.25	42.34	90.20	109.02	64.28	32.14	16.07	369.86
Área urbana (ADT = 60.83)													
<i>R</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	60.83	60.83	60.83	60.83	60.83	24.77	0.00	---
<i>VR</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	60.83	0.00	0.00	0.00	0.00	-36.06	-24.77	---
<i>ETR</i>	11.99	7.08	12.82	27.44	77.62	83.36	81.96	80.12	72.82	63.10	47.39	31.30	596.99
<i>DEF</i>	28.35	38.70	51.88	48.40	7.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.60	184.04
<i>EX</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	30.22	135.72	138.07	127.84	19.53	0.00	0.00	451.38
<i>D</i>	8.55	4.28	2.14	1.07	0.53	15.38	75.55	106.81	117.33	68.43	34.21	17.11	451.38
Área agrícola (ADT = 60.83)													
<i>R</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	60.83	60.83	60.83	60.83	60.83	24.77	0.00	---
<i>VR</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	60.83	0.00	0.00	0.00	0.00	-36.06	-24.77	---
<i>ETR</i>	11.99	7.08	12.82	27.44	77.62	83.36	81.96	80.12	72.82	63.10	47.39	31.30	596.99
<i>DEF</i>	28.35	38.70	51.88	48.40	7.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.60	184.04
<i>EX</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	30.22	135.72	138.07	127.84	19.53	0.00	0.00	451.38
<i>D</i>	8.55	4.28	2.14	1.07	0.53	15.38	75.55	106.81	117.33	68.43	34.21	17.11	451.38
Bosque cedro-eucalipto (ADT = 142.35)													
<i>R</i>	43.56	4.87	0.00	0.00	0.00	91.05	142.35	142.35	142.35	142.35	106.29	71.92	---
<i>VR</i>	-28.35	-38.70	-4.87	0.00	0.00	91.05	51.30	0.00	0.00	0.00	-36.06	-34.37	---
<i>ETR</i>	40.34	45.77	17.69	27.44	77.62	83.36	81.96	80.12	72.82	63.10	47.39	40.90	678.50
<i>DEF</i>	0.00	0.00	47.02	48.40	7.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	102.53
<i>EX</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	84.42	138.07	127.84	19.53	0.00	0.00	369.86
<i>D</i>	8.03	4.02	2.01	1.00	0.50	0.25	42.34	90.20	109.02	64.28	32.14	16.07	369.86

La Tabla 10 muestra que, en la microcuenca del Parque, el déficit (DEF) anual tiene el mismo valor en el bosque pino-encino y en el bosque cedro-eucalipto (102.53 mm). El DEF en el bosque, es menor que el que se presenta en el área agrícola y área urbana, que también son iguales (184.04 mm). Lo mismo ocurre con el exceso (EX) anual, este es igual en el bosque pino-encino y el bosque cedro-eucalipto (369.86 mm), y es menor que el que ocurre en el área agrícola y en el área urbana (451.38 mm). El mayor escurrimiento se registra en el área agrícola y área urbana (451.38 mm); el menor escurrimiento corresponde al bosque pino-encino y el bosque cedro-eucalipto (369.86 mm). En cuanto a la ETR, las zonas con bosque pierden más agua (678.50 mm) que las zonas agrícola y urbana (596.99 mm).

En el BH ponderado de la microcuenca (Tabla 11), el déficit anual es de 132.61 mm, mientras que el escurrimiento anual es de 399.94 mm.

Tabla 11. Balance hídrico mensual ponderado en la microcuenca del Parque (en mm).

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
<i>P</i>	11.99	7.08	12.82	27.44	77.62	174.41	217.68	218.18	200.66	82.63	11.33	6.53	1048.37
<i>ETP</i>	40.34	45.77	64.71	75.84	84.73	83.36	81.96	80.12	72.82	63.10	47.39	40.90	781.03
<i>ETR</i>	29.88	31.50	15.89	27.44	77.62	83.36	81.96	80.12	72.82	63.10	47.39	37.36	648.43
<i>DEF</i>	10.46	14.28	48.81	48.40	7.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.54	132.61
<i>EX</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.15	103.35	138.07	127.84	19.53	0.00	0.00	399.94
<i>D</i>	8.23	4.11	2.06	1.03	0.51	5.83	54.59	96.33	112.09	65.81	32.90	16.45	399.94

Puede observarse también que, del total de la lluvia que cae sobre la microcuenca del Parque (1048.37 mm), 74% (781.03 mm) se pierde a través de la ETP. La máxima ETP se presenta en el mes de mayo (84.73 mm) y disminuye hasta un mínimo en enero (40.34 mm). Mientras que la ETR representa el 62% (648.43 mm) de la lluvia total anual. La máxima ETR ocurre en junio (83.36 mm) y la mínima ETR se presenta en enero (29.88 mm).

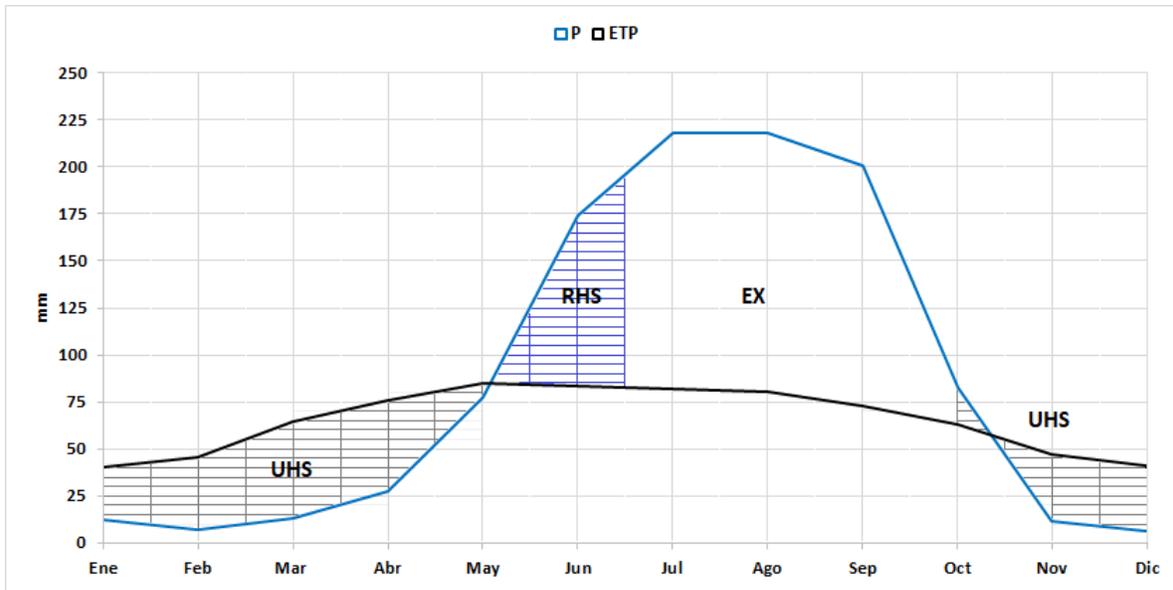


Figura 17. Cambio en el contenido de agua (en mm) en el suelo en la microcuenca del Parque (EX= exceso de agua; RHS= recarga de humedad en el suelo; UHS= uso de humedad del suelo).

Para observar los cambios en la humedad del suelo a lo largo del año en la microcuenca, en la Figura 17 se comparan dos variables incluidas en el BH de la microcuenca, la Precipitación (P) y la ETP. Se observa que de octubre a mayo la lluvia disminuye y empieza a usarse la humedad del suelo para cubrir la tasa de evapotranspiración, de mayo a mediados de junio las lluvias aumentan y el suelo empieza a recargarse, y de mediados de junio hasta octubre el suelo está saturado. Estos son los meses húmedos o con exceso (Tabla 9).

En la Figura 18, se representan la variación mensual de la precipitación, la ETP, la ETR y la temperatura en la microcuenca del Parque. Se observa que la evapotranspiración va en aumento en los meses secos hasta alcanzar un tope en los meses húmedos y luego disminuye al finalizar la temporada húmeda. Puede verse que la evapotranspiración sigue una tendencia similar a la de la temperatura. La precipitación aumenta y disminuye sin seguir tan marcadamente las fluctuaciones de la temperatura.

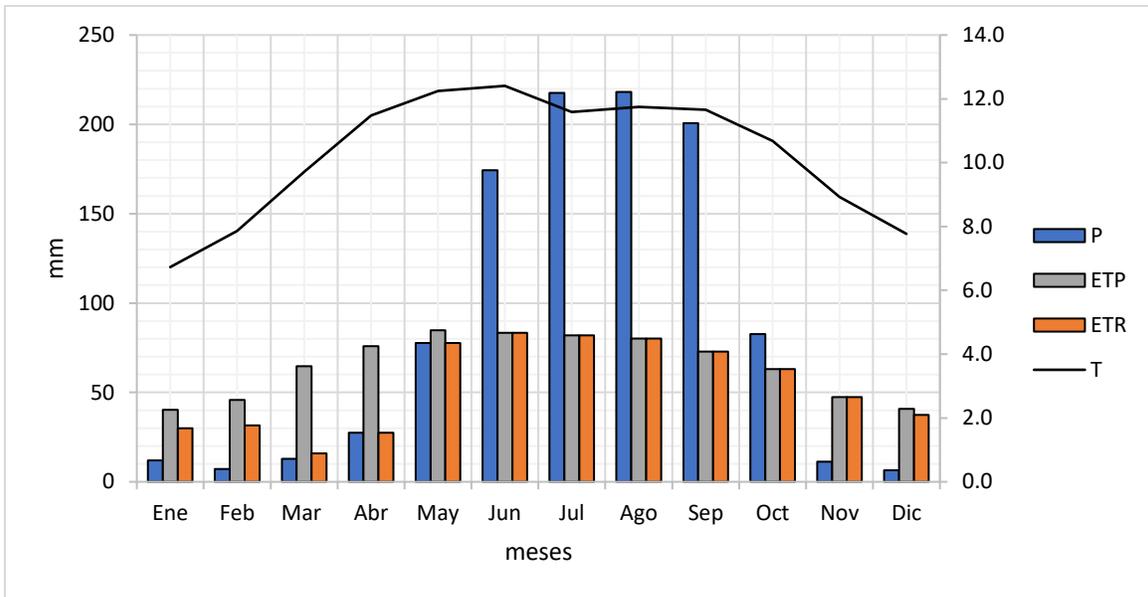


Figura 18. Precipitación, evapotranspiración y temperatura en la microcuenca del Parque.

De la Figura 18 también puede verse que en los meses de enero a marzo la ETR es mayor que P. Gradualmente la lluvia aumenta y sobrepasa la ETR hasta el mes de noviembre y diciembre cuando la ETR vuelve a ser mayor que P. En el caso de la ETP, esta es mayor que P tanto de enero a mayo, así como, en noviembre y diciembre. Esto representa los meses secos y con déficit de humedad en el suelo pues se pierde más agua de la que llueve. La ETR y la ETP son iguales de mayo a octubre y conforman el periodo húmedo.

La Tabla 12 muestra el balance hídrico del polígono del Parque con datos de la estación climatológica 9020. Se observa que del total de P (1022.37 mm), se pierde el 67% (682.37 mm) por ETR y 78% (803.99 mm) por ETP. El periodo húmedo y el periodo seco coinciden con los encontrados en la microcuenca (Tabla 13). El escurrimiento anual en el polígono del Parque es de 340 mm. Los fenómenos de uso y recarga de humedad del suelo se representan en la Figura 19.

Balance hídrico en el Parque Nacional Fuentes Brotantes

En la Tabla 13 se comparan los excesos y déficits de agua mensuales en la microcuenca y en el polígono del Parque. Se observa que el periodo húmedo y el periodo seco comprenden los mismo meses en la microcuenca y en el polígono del Parque.

Tabla 12. Balance hídrico mensual para el polígono del Parque (en mm).

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Bosque cedro-eucalipto (ADT = 142.35)													
<i>T</i>	7.05	7.98	10.06	11.79	12.89	13.12	12.36	12.35	12.46	11.28	9.21	7.69	---
<i>P</i>	10.26	5.88	11.94	24.73	74.18	166.25	217.75	213.21	199.13	83.53	10.13	5.38	1022.37
<i>ETP</i>	41.56	46.29	66.27	76.37	87.73	87.11	85.83	82.93	76.20	65.44	47.92	40.34	803.99
<i>P – ETP</i>	-31.29	-40.41	-54.33	-51.64	-13.55	79.14	131.92	130.28	122.93	18.08	-37.79	-34.96	218.38
<i>R</i>	38.30	0.00	0.00	0.00	0.00	79.14	142.35	142.35	142.35	142.35	104.56	69.60	---
<i>VR</i>	-31.29	-38.30	0.00	0.00	0.00	79.14	63.21	0.00	0.00	0.00	-37.79	-34.96	---
<i>ETR</i>	41.56	44.18	11.94	24.73	74.18	87.11	85.83	82.93	76.20	65.44	47.92	40.34	682.37
<i>DEF</i>	0.00	2.11	54.33	51.64	13.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	121.62
<i>EX</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	68.71	130.28	122.93	18.08	0.00	0.00	340.00
<i>D</i>	7.55	3.77	1.89	0.94	0.47	0.24	34.47	82.38	102.65	60.37	30.18	15.09	340.00

En el polígono del Parque, el déficit es nulo durante la mayor parte del año, presentándose en febrero, marzo, abril y mayo, con un máximo de 54.38 mm (marzo) y 2.11 mm (febrero) como mínimo. Los excesos de agua se observan de julio a octubre.

Tabla 13. Meses con exceso y déficit en la microcuenca y en el polígono del Parque.

ÁREA DE ESTUDIO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
<i>Microcuenca del Parque</i>	-28.35	-38.70	-51.88	-48.40	-7.11	91.05	135.72	138.07	127.84	19.53	-36.06	-34.37
<i>Polígono del Parque</i>	-31.29	-40.41	-54.33	-51.64	-13.55	79.14	131.92	130.28	122.93	18.08	-37.79	-34.96

En la Figura 19 se observa que en el polígono del Parque, el periodo con déficit de humedad en el suelo comprende de octubre a mayo. Este coincide con lo determinado para la microcuenca (Figura 17). Los meses de recarga de humedad del suelo son mayo, junio y julio, mientras que en la microcuenca esto ocurre de mayo a mediados de junio. De julio a octubre el suelo está a su capacidad de campo (CC). Estos son los meses con exeso hídrico, de los cuales agosto tiene el mayor exceso (130.28 mm) y octubre el menor (18.08 mm). En estos meses también se generan los mayores escurrimientos, siendo septiembre el de mayor escurrimiento (102.65 mm).

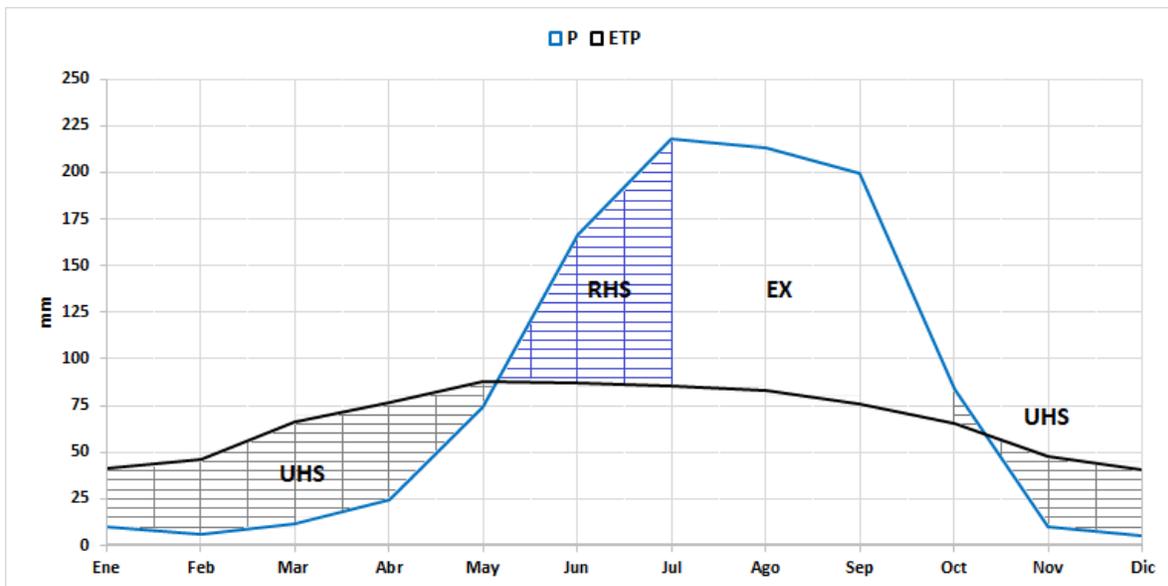


Figura 19. Cambio en el contenido de agua en el suelo del polígono del Parque (EX= exceso de agua; RHS= recarga de humedad en el suelo; UHS= uso de humedad del suelo).

En el polígono del Parque la ETP alcanza su máximo en el mes de mayo (87.73 mm) y en diciembre desciende hasta su mínimo (40.34 mm). Esta es mayor que la precipitación en los meses de enero a mayo y en noviembre y diciembre, mientras que supera a la ETR solo en cuatro meses, de febrero a mayo, el resto del año la ETP y la ETR son iguales. En los meses de enero, noviembre y diciembre, la ETR es mayor que la precipitación (Figura 20).

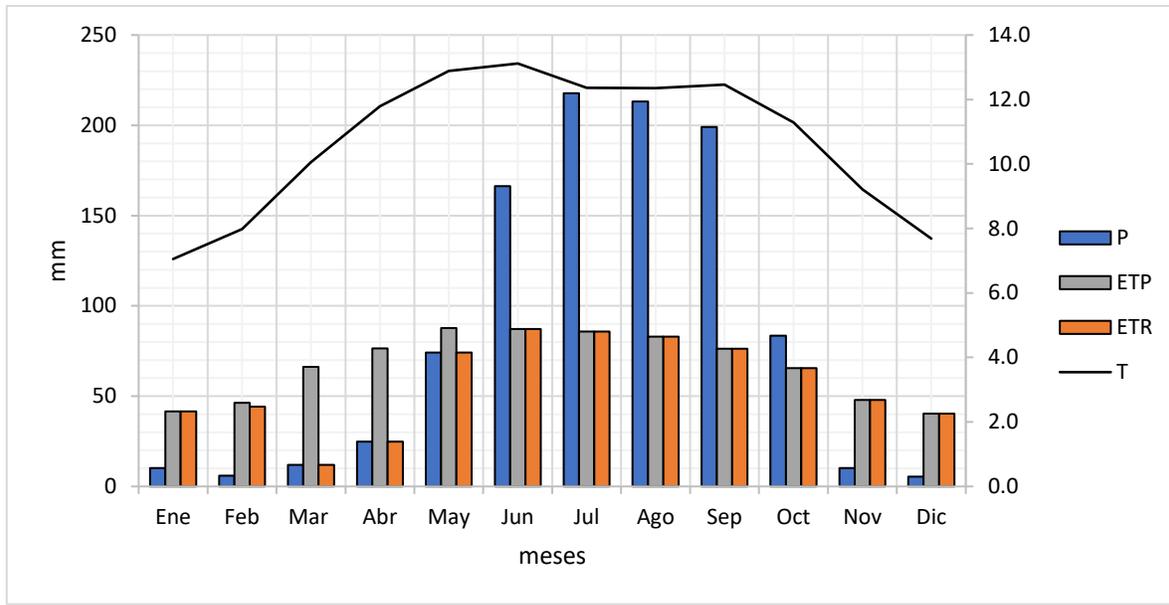


Figura 20. Precipitación, evapotranspiración potencial y real en el polígono del Parque.

Del balance hídrico podemos concluir que: en el polígono del Parque, el escurrimiento corresponde a 438 606 m³ anuales (1 202 mm/año ó 14 l/s), mientras que en la microcuenca del Parque este asciende a 1 455 785 m³ anuales (3 988 mm/año ó 46 l/s).

Los datos de lluvia acumulada, temperatura y la ETP calculada, en la microcuenca y en el polígono del Parque, pueden verse de la Tabla A 1 a la Tabla A 7 del Anexo. El patrón de comportamiento de las variables precipitación y evapotranspiración potencial, en la microcuenca y en el polígono del Parque, se observan en las Figuras A 1 y A 2 del Anexo.

CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN

En la temporada de estiaje (ver Tabla 5), la lluvia media diaria en la subcuenca Lago de Texcoco y Zumpango es semejante a la de la microcuenca del Parque y del propio Parque, indicando una distribución homogénea en esta temporada. En temporada de lluvias la homogeneidad de la lluvia media diaria se mantiene entre la microcuenca y el polígono del Parque, mientras que en la subcuenca Lago de Texcoco y Zumpango, la lluvia es menor. Esto indica la diferencia de precipitación en época de lluvias en diferentes zonas de la cuenca. Es importante remarcar que las estaciones climatológicas utilizadas para el estudio de la microcuenca están ubicadas físicamente en zona urbana. Esto podría influir en la similitud de la lluvia entre la microcuenca y el Parque, ya que se esperaría que en la zona boscosa la precipitación fuera mayor que en la zona urbana. Por ello es recomendable instalar una estación meteorológica en la zona de bosque del volcán Xitle para tener información más precisa.

De acuerdo a la diferencia entre lo que llueve y lo que se pierde como evapotranspiración, se observa que los meses con excesos en la microcuenca y en el polígono del Parque corresponden al periodo de junio a octubre (ver Tabla 13). Esto se ubica dentro del periodo de lluvias (de mayo a octubre) definido para el hemisferio norte y considerado por la CONAGUA (2015). Aún cuando el mes de mayo se ubica dentro del periodo de lluvias para el hemisferio norte, éste queda fuera del periodo húmedo en nuestros resultados, porque mayo es el último mes del periodo seco (ver Figuras 17 y 19,). Por lo que, la reserva de humedad en el suelo es nula y la demanda evapotranspirativa es mayor que la precipitación en este mes, por tanto, no existe la posibilidad de que se generen excesos de agua. En el polígono del Parque, en junio, primer mes del periodo húmedo, la reserva de humedad en el suelo es nula, pero las lluvias son el doble de las que se presentan en mayo, por lo que parte de la lluvia cubre la demanda de ETP y el resto inicia el ciclo de recarga de agua en el suelo, por ello tampoco se presentan excesos. En la microcuenca las lluvias en junio también son el doble que las que se presentan en mayo, pero la reserva de agua no es nula, por lo que en este mes (junio) si existe un exceso (11.15 mm). Esta diferencia, entre la microcuenca y el polígono del Parque, se debe a que en el área urbana y agrícola que

componen la microcuenca, la reserva de agua es menor que en el área de bosque (ver Tabla 10) y esto se refleja como el exceso de junio en el balance hídrico ponderado de la microcuenca.

Los meses de mayo y junio son los meses más calientes y sin embargo su diferencia de lluvia es del doble (ver Tablas 9 y 12), por lo que se detecta que la temperatura no tiene un efecto directo sobre la precipitación en la microcuenca o en el polígono del Parque. Sin embargo, se observa una relación directa entre la temperatura y la ET (ver Figuras 18 y 20); el aumento de la temperatura produce un aumento de la ET. Este comportamiento es esperado, pues un factor importante que determinan la ET es la temperatura del aire, y ésta a su vez, se relaciona con la radiación solar incidente (Allen et al., 2006). Santillán et al. (2013) reportó un comportamiento similar de estas variables en el balance hídrico del río Cazones en Veracruz, México. Por ello, un aumento o disminución de la precipitación, no provoca un efecto directo en la cantidad de agua evapotranspirada, pues la temperatura y radiación son más determinantes en su evolución a lo largo del año. Así, la ET alcanza su máximo valor en el periodo húmedo, e incluso desciende aun cuando las lluvias son abundantes, coincidiendo con la baja de la temperatura a la entrada del invierno (ver Figuras 18 y 20).

Algunos autores han encontrado este mismo comportamiento (Singh et al., 2004; Roy y Ophori, 2012; Santillán et al., 2013). En este sentido, Santillán et al. (2013) cita a Doria y Madramootoo (2012), Zhiqiang et al. (2009) y Ruiz et al. (2011), cuando menciona que la evapotranspiración y la precipitación son fenómenos físicos climáticos independientes, es decir, su intensidad (cantidad a lo largo de un año) difícilmente coincide en tiempo y espacio.

El déficit representa la cantidad de agua faltante para cubrir la demanda de ETP. En la microcuenca del Parque los meses sin déficit son de junio a noviembre, en el polígono del Parque son de junio a enero. En ambos casos esto incluye el periodo húmedo donde la lluvia cubre totalmente la demanda evapotranspirativa, lo que explica que el déficit es nulo. En

los meses restantes (que forman parte del periodo seco), la lluvia cubre una parte de la demanda de la ET y el resto se extrae de la humedad del suelo, por lo que el déficit también es nulo. En el resto de los meses existe déficit porque la lluvia es poca y la reserva del suelo está agotada.

Cabe destacar que, a pesar de la existencia de un déficit y de la falta de excesos de agua en algunos meses, no hay pérdida de vegetación relacionada con ello, pues como se observa en las Tablas 11 y 12, siempre existe escurrimiento a lo largo del año proveniente de los meses anteriores. También puede argumentarse la existencia de una reserva de agua debida tanto a las infiltraciones del lago ubicado dentro del Parque, como al arroyo que fluye por el mismo. Además, puede considerarse el aporte de la condensación de la humedad atmosférica.

Respecto a la evapotranspiración potencial y su cálculo con la ecuación de Oudin et al. (2005), se remarca que es una ecuación relativamente nueva y que no había sido aplicada en el país. Su utilización permitió generar información para futuras aplicaciones en diversas regiones en México. La ecuación de Oudin et al., de acuerdo a nuestros resultados y la comparación hecha con los reportados por otros autores e instituciones, es aceptable.

Birkle et al. (1995) estudiaron los efectos de la evapotranspiración en la cuenca del Valle de México y obtuvieron que, en promedio, el 80% del total de la precipitación, se pierde por evapotranspiración real. Sin embargo, al realizar un análisis por áreas, estimaron que, en la parte montañosa, que incluye Sierra Las Cruces, Sierra Nevada y Sierra Ajusco-Chichinautzin (este último lugar cercano a la ubicación de la microcuenca y el polígono del Parque (ver Figuras 10 y 14)), las pérdidas por ETR varían entre 50 y 65% del total de la precipitación. Siendo este un valor muy semejante al encontrado en nuestro trabajo. Birkle et al. (1995) citan que la Comisión Hidrológica de la Cuenca de México, en 1967, reportó pérdidas del 50% por ET en la misma zona montañosa. El porcentaje tan bajo encontrado por la Comisión Hidrológica de la Cuenca de México podría deberse a que, hasta ese año, los registros

meteorológicos eran escasos en el país. En la realización de nuestro trabajo se recabaron y analizaron registros de hasta 55 años de las 105 estaciones climatológicas ubicadas en la subcuenca RH26Dp. Mientras que, hasta 1967 se contaba con un máximo de 19 años de datos.

La ETR determinada en nuestro trabajo se asemeja al valor que se presenta en las cartas climáticas de INEGI (2004) escala 1:1 000 000, donde la lámina de ETR alrededor de la microcuenca y el polígono del Parque es de 600 mm. Nuestros resultados en la microcuenca del Parque indican que la lámina de ETR es de 648.43 mm (ver Tabla 11), mientras que la correspondiente al polígono del Parque es de 682.73 mm (ver Tabla 12).

Las pérdidas por ETP en la microcuenca del Parque representa el 74% del total del agua que ingresa como lluvia, mientras que en el polígono del Parque se pierde hasta el 79%. La ETR, ajustada a partir de la ETP, precipitación y el cambio en la humedad del suelo, resultó ser del 65% en la microcuenca del Parque y de 67% en el polígono del Parque. La radiación extraterrestre y la temperatura son similares en la microcuenca y en el polígono del Parque, por lo que la diferencia de 2% en la evapotranspiración podría atribuirse al tipo de vegetación. En este caso la presencia del eucalipto en el polígono del Parque podría estar influyendo en una mayor ET (ver Tabla 7). Un análisis más detallado de la vegetación ayudaría a definir qué tipos de especies son más abundantes en la microcuenca y el polígono del Parque y su influencia sobre la ET.

La determinación de la ETP de este trabajo tiene un impacto relevante en el cuidado de las áreas naturales y especialmente en el mantenimiento y conservación del Parque. El modelado hidrológico, planes de riego, estudios geo-botánicos, estudios de cambio climático y desarrollo de índices de aridez son algunas de las aplicaciones que puede tener (Allen, 2000; Hunsaker et al., 2002; Fisher et al., 2005; Yin, 2008; Paparrizos et al., 2004).

Relacionados con la ET están los escurrimientos. Estudios anteriores (ACSA, 1979) afirman la ausencia de drenaje superficial en esta zona ya que la mayoría de los escurrimientos se infiltran al subsuelo y son responsables de alimentar a los acuíferos, sobre todo en la parte alta de la microcuenca por lo que es probable que después de la evapotranspiración, el agua que queda disponible no sea factible de ser captada, esto debido al costo de las obras y a la importancia que tiene como agua de recarga para el acuífero. En este sentido, en los planes de manejo y conservación del Parque debe considerarse que la parte alta de la microcuenca representa una zona de recarga que podría estar descargando finalmente en el manantial Fuentes Brotantes ubicado en la parte baja de la cuenca.

En las Figuras A 1 y A 2, se encuentra representado el patrón de comportamiento de la ETP, P y T a lo largo de 47 años, cumpliendo con el mínimo de 30 años requerido por la Organización Meteorológica Mundial, para el análisis de las normales climáticas (OMM, 1989).

En las mismas Figuras, se observa que la variación de la ETP presenta un patrón más o menos regular, lo cual puede corresponder al método de cálculo empleado pues la ecuación de Oudin et al. depende la radiación extraterrestre que es una variable cíclica (Allen et al., 2006). Además de esto, no se observan cambios drásticos o tendencias que adviertan un desvío del comportamiento normal de las variables climáticas (ETP, P y T) y que pudieran indicar influencia de la urbanización, o que sugieran una alteración atribuible al denominado “cambio climático”. Sin embargo, son necesarios mayores estudios en este campo para hacer una determinación más precisa del efecto de estos dos factores.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En general, en temporada de lluvias, la altura de lluvia media diaria en las tres zonas de estudio es 10 veces mayor que en temporada de estiaje y dos veces mayor que el promedio anual.
- En la microcuenca y el polígono del Parque se identificaron la temporada húmeda y la temporada seca; los meses de junio a octubre son meses húmedos y de noviembre a mayo son meses secos.
- De acuerdo al balance hídrico, el suelo en el polígono del Parque está a su capacidad de campo de julio a octubre; con déficit de noviembre a junio; y de febrero a mayo se presenta contenido de humedad nulo.
- En la microcuenca, de la lluvia total anual, el 62% se pierde por evapotranspiración real y el 74% se pierde por evapotranspiración potencial, dejando una disponibilidad anual de $1\,455\,785\text{ m}^3$ ($3\,988\text{ m}^3/\text{día}$ ó 46 l/s).
- En el polígono del Parque, de la lluvia total anual, el 67% se pierde por evapotranspiración real y el 78% se pierde por evapotranspiración potencial, dejando una disponibilidad anual de $438\,606\text{ m}^3$ ($1\,202\text{ m}^3/\text{día}$ ó 14 l/s).
- El tipo de vegetación tiene una mayor influencia sobre la evapotranspiración en el Parque que en la microcuenca. Se recomienda la realización de estudios más detallados sobre el tipo de especies vegetales presentes y su influencia sobre esta variable.
- La ecuación de Oudin et al. resultó una opción aceptable para estimar la evapotranspiración potencial en la zona.

- Existe un aporte de humedad en el suelo que no está contemplada en el balance hídrico y que corresponde tanto a las infiltraciones del manantial y del arroyo del Parque, así como, a la humedad en la atmósfera.
- La evaluación de la disponibilidad mensual considerando los periodos seco y húmedo en el polígono del Parque, ofrece información fundamental y precisa para la gestión de los recursos hídricos del parque.
- Dado que los escurrimientos superficiales en la parte alta de la microcuenca son efímeros, y no es recomendable su captación por ser una zona de recarga al acuífero, se sugiere el empleo de los datos determinados con el balance hídrico del polígono del Parque para el diseño de un plan de manejo.
- A partir del análisis de los 50 años de precipitación considerados en la subcuenca RH26Dp, se observa un comportamiento cíclico anual de la lluvia y de la evapotranspiración. Se recomiendan estudios climáticos más detallados al respecto.
- Los planes de conservación del Parque deben extenderse hasta la parte alta de la microcuenca (volcán Xitle), esto ya que existe información (ACSA, 1979) que sugiere que ésta representa una zona de recarga del acuífero y que aporta agua al manantial Fuentes Brotantes.
- Este trabajo proporciona la siguiente información fundamental para la rehabilitación de las áreas verdes en el Parque: las condiciones de humedad en el suelo, los excesos y los déficits mensuales. Esto permite identificar e implementar acciones más específicas en el Parque, por ejemplo, cambio en la cobertura vegetal (siendo necesario realizar estudios posteriores más detallados respecto al tipo de suelo y tipo de vegetación).

REFERENCIAS

- ACSA (1979). Estudio geohidrológico de la zona de monte alegre, sumideros del Xitle y manantiales de Tlalpan. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
- ACSA (1980). Estudio geohidrológico de la zona de monte alegre, sumideros del Xitle y manantiales de Tlalpan. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
- AIASA, S.A. de C.V. (2001). Estudio para la rehabilitación de la captación y planteamiento de la red de riego con el sistema de humedad permanente del Parque Nacional Fuentes Brotantes, en la delegación Tlalpan. Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
- Allen, R. G. (2000). Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *J. Hydrol.*, 229(1-2): 27-41.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua en los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. 298 pp.
- Andray, A. B., Ramírez, S. M., y Cisneros, C. C. (1998). Un modelo de balances hídricos para cuencas hidrográficas: discusión, propuesta y aplicaciones. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 6: 11-20.
- Aparicio, F. M. (1992). Fundamentos de hidrología de superficie. D.F., México: Limusa. 302 pp.
- Arriaga, E. R. (2012). Metodología y estimación del balance hídrico de la cuenca Usumacinta. Desarrollo de redes para la gestión territorial del corredor biológico Mesoamericano. FORDECYT-CONACYT-CENTROGEO. D.F., México. 37 pp.
- Birkle, P., Rodríguez, V.T. y Partida, E.G. (1995). Effects of evapotranspiration on the water balance of the Valley of Mexico. *Geofísica Internacional*, 35(1): 63-72.
- Birkle, P., Rodríguez, V.T. y González, E.P. (1998). The water balance for the Basin of the Valley of Mexico and implications for future water consumption. *Hydrogeology Journal*, 6(4): 500-517.

- Black, P.E. (2007) Revisiting the Thornthwaite and Mather water balance. *Journal of the American Water Resources Association*, 43(6), 1604–1605.
- Breña, A. P. (2004). Precipitación y recursos hidráulicos en México. Tlalpan, D.F., México: Universidad Autónoma Metropolitana. 316 pp.
- Breña, A. P. y Jacobo, A. V. (2006). Principios y fundamentos de la hidrología superficial. Tlalpan, D.F., México: Universidad Autónoma Metropolitana. 286 pp.
- Bohn, V. Y. y Campo, A. M. (2010). Estimación de escurrimientos superficiales para cuencas no aforadas en Corrientes, Argentina. *Investigaciones geográficas*, 71: 13-42.
- Brouwer, C., Goffeau, A. y Heibloem, M. (1985). Irrigation water management: training manual no. 1-introduction to irrigation. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. Consultado en: <http://www.fao.org/docrep/r4082e/r4082e03.htm#2.4> available water content.
- Cahuana, A. A. y Yugar, W. M. (2009). Material de Apoyo Didáctico para la Enseñanza y Aprendizaje de la Asignatura de Hidrología CIV-233. Facultad de Ciencia y Tecnología. Universidad Mayor de San Simón, Bolivia. 380 pp.
- Calvo, J. C. (1986). An evaluation on Thornthwaite's water balance technique in predicting stream runoff in Costa Rica. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1): 51-60.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Wags, L. W. (1994). Hidrología aplicada. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana. 584 pp.
- CHCVM, Comisión Hidrológica de la Cuenca de México. (1967). Datos diarios del Valle de México correspondientes a 1966. Secretaría de Recursos Hidráulicos. México. Bol., 19, 243.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2015). Canícula en México. Caracterización, resumen 2014 y perspectiva de precipitación y temperatura en agosto y septiembre 2015. Gerencia de Meteorología y Climatología. México.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2016). Atlas del agua en México 2016. CONAGUA-SEMARNAT. México. 137 pp.

- CONANP, Consejo Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2017). Áreas Naturales Protegidas Federal de la República Mexicana. Información espacial. Consultado en: http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm.
- Dingman, S. L. (1994). Physical hydrology. New Jersey, USA: Prentice Hall. 575 pp.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (1936). Decreto de la creación del parque nacional Fuentes Brotantes de Tlalpan. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 28 de septiembre de 1936. México.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (1999). Acuerdo para recategorizar algunas áreas naturales protegidas de interés de la Federación. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 16 de abril de 1999. México.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (2015). Conservación del recurso agua - Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 27 de marzo de 2015. México.
- Doria, R. O. y Madramootoo, C. A. (2012). Retracted: estimation of irrigation requirements for some crops in southern Quebec using CROPWAT. *Irrigation and Drainage*, 61(4): 1-11.
- Dunne, T. y Leopold, L. (1978). Water in environmental planning. W. H. Freeman and co. San Francisco, CA. 818 pp.
- Galvêncio, J. D., Moura, M. B. y Sousa, F. S. (2008). Water balance model to predict climate change impacts in the watershed Epitácio Pessoa dam-Paraíba river, Brazil. *13th world water congress*, Montpellier, France.
- GODF, Gaceta Oficial del Distrito Federal. (2010). Decreto que contiene el programa delegacional de desarrollo urbano para la Delegación Tlalpan del Distrito Federal.
- Fisher, J. B., DeBiase, T. A., Qi, Y., Xu, M. y Goldstein, A. H. (2005). Evapotranspiration models compared on a Sierra Nevada forest ecosystem. *Environ Model Softw*, 20(6): 783-796.
- Hunsaker, D. J., Pinter, P. J. y Cai, H. (2002). Alfalfa basal crop coefficients for FAO-56 procedure in the desert regions of the southwestern US, *Trans. ASAE*, 45(6): 1799-1815.

- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2003). Conjunto de datos vectoriales de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación. Escala 1:1 000 000 Serie II. México. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/usosuelo/Default.aspx>.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2004). Conjunto de datos vectoriales de evapotranspiración. Escala 1:1 000 000. México. Recuperado de: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267520>.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2006). Conjunto de datos vectoriales de Precipitación media anual. Escala 1:1 000 000. México. Recuperado de: www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267544.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2008). Unidades climáticas. Conjunto de datos vectoriales. Escala 1:1 000 000. México. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/clima/default.aspx>.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2010). Red hidrográfica escala 1:50 000. Edición: 2.0, subcuenca hidrográfica RH26Dp L. Texcoco y Zumpango/cuenca R. Moctezuma/ R.H. Pánuco. México. Recuperado de: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/hidrologia/regiones_hidrograficas.aspx.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2014). Conjunto de datos vectoriales Perfiles de suelos. Escala 1:1 000 000. México. Recuperado de: www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267636.
- ININSA, S.A. de C.V. (1988). Estudio hidrogeológico del manantial fuentes Brotantes Tlalpan, D.F. Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
- ITSMO Consultores S.A. de C.V. (2000). Estudio de factibilidad para el aprovechamiento del caudal total del manantial Fuentes Brotantes. Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
- IPN, Instituto Politécnico Nacional. (1989). Insumos para el ordenamiento ecológico de la zona árida. Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología. México. Consultado en: http://repositorio.inecc.gob.mx/pdf/AE_005314/AE_005314.pdf.

- Jáuregui, E. (2000). El clima en la Ciudad de México. Temas selectos de geografía de México (I.4. 1). Instituto de geografía. Plaza y Valdés. D.F., México. 131 pp.
- Jensen, M. E. y Haise, H. R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE* 89 (LR4), 15–41.
- Jujnovsky, J., González-Martínez, T., Cantoral-Uriza, E. y Almeida-Leñero, L. (2012). Assessment of water supply as an ecosystem service in a rural-urban watershed in southwestern Mexico City. *Environmental Management*, 49(3): 690-702.
- Keim, B. D. (2010). The lasting scientific impact of the Thornthwaite water–balance model. *Geographical Review*, 100(3): 295-300.
- Lara, F. (2005). Informe climatológico ambiental del Valle de México: 2005. Secretaría del medio ambiente. Gobierno del Distrito Federal. México. 194 pp.
- Lutgens, F. K. y Tarbuck, E. J. (2013). The atmosphere. An introduction to meteorology. (12 ed.). USA. Pearson Education, Inc. P506 pp.
- Lvovitch, M. I. (1970). World water balance (general report). Symposium on the world water balance. Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, Pub. No 93, Vol. II, 401-415.
- McGuinness, J. L. y Bordne, E. F. (1972). A comparison of lysimeterderived potential evapotranspiration with computed values. Technical Bulletin 1452, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, Washington, DC.
- Mecca, J. C. (2008). Análisis y modelación del comportamiento hidrológico de las lagunas Don Tomas y Bajo Giuliani, Santa Rosa, La Pampa (tesis de maestría). Universidad Nacional de La Pampa. Argentina.
- Mendoza, J. M. (2014). Tlalpan, crónica y patrimonio. Consejo de Cronistas de Tlalpan. Dirección General de Cultura. Delegación Tlalpan. México. 150 pp.
- Mendoza, I. C., González, R. M., Salinas, E. C., Santos, R. R. y Báez, W. L. (2016). Balance hídrico de la cuenca Pijijiapan en Chiapas, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(2): 18-28.

- Miloradov, M. y Marjanovic, P. (1998). Guidelines for conducting water resources assessment. International hydrological programme. Project M.1-1(a) (IHP-IV). UNESCO. France. 120 pp.
- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (1989). Cálculo de normales estándar de 30 años, mensuales y anuales (OMM-TD/No. 341). Ginebra, Suiza. (Versión en inglés). 11 pp.
- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (1994). Guía de prácticas hidrológicas (OMM-No. 168). Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones. Ginebra, Suiza. 781 pp.
- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (2008). Guía de prácticas hidrológicas vol I. Hidrología – De la medición a la información hidrológica (OMM-Nº 168). Ginebra, Suiza. (Versión en inglés).
- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (2010). Manual del sistema mundial de observación (OMM-Nº 544), volumen I. Ginebra, Suiza.
- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (2012). Material técnico para la evaluación de recursos hídricos. Serie No. 2. (OMM-Nº 1095). Ginebra, Suiza. (Versión en inglés).
- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (2014). Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos (OMM-Nº 8). Ginebra, Suiza.
- Orsolini, H.E; Zimmermann, E.D y Basile, P.A. (2000). Hidrología. Procesos y Métodos. Rosario. Argentina. 245 pp.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. y Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of hydrology*, 303(1-4): 290-306.
- PAOT, Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F. (2009). Estudio sobre la superficie ocupada en áreas naturales protegidas del Distrito Federal.
- Paparrizos, S., Maris, F. y Matzarakis, A. (2014). Estimation and comparison of potential evapotranspiration based on daily and monthly data from Sperchios River Valley in Central Greece. *Glob. NEST J.*, 16(2): 204-217.

- PRONACOSE, Programa Nacional Contra la Sequía. (2014). Shapefiles por consejo de cuenca. 26 Valle de México. Comisión Nacional del Agua. México. Recuperado de: www.pronacose.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=1111&n3=1133.
- Ramakrishna, B. (1997). Estrategias de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: conceptos y experiencias. Serie investigación y educación. IICA, BMZ/GTZ. San José, Costa Rica.
- Rivas, N. M., Domínguez, M. A. y Vela, M. P. (2011). Influencia del uso y vegetación en el balance hídrico en tres microcuencas de Tarimoro, Guanajuato. 2do Congreso Nacional de Manejo de Cuencas. Tabasco, México.
- Roy, S. y Ophori, D. (2012). Assessment of water balance of the semi-arid region in southern San Joaquin valley California using thornthwaite and mather's model. *Journal of Environmental Hydrology*, 20(15): 1-9.
- Ruiz-Álvarez, O., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M.A., Ontiveros-Capurata, R.E. y López-López, R. (2012). Balance hídrico y clasificación climática del Estado de Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 28(1): 1-14.
- Sánchez, M. M. (2001). Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 28: 3-10.
- Sánchez, A. V., Núñez, R. G. y Trujano, A. P. (2003). La cuenca hidrográfica: unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales. SEMARNAT. D.F., México. 47 pp.
- Santillán, G. E., Davila-Vazquez, G., de Anda, J.S. y Díaz, J.T. (2013). Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazones, Veracruz, México. *Ambient. Agua*, 8(3): 104-117.
- Sheinbaum, C. (2015). Programa de Desarrollo de la Delegación Tlalpan 2015-2018. Tlalpan, Ciudad de México. Consultado en: http://www.tlalpan.gob.mx/docs/Programa_Delegacional.pdf
- SIMEC, Sistema de Información, Monitoreo y Evaluación para la Conservación. (2018). Ficha SIMEC: Fuentes Brotantes de Tlalpan. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México. Consultado en <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=75&=11>.

- Singh, R. K., Prasad, V. H. y Bhatt, C. M. (2004). Remote sensing and GIS approach for assessment of the water balance of watershed. *Hydrological sciences journal*, 49(1): 131-141.
- Sokolov, A.A. y Chapman, T.G. (ed.) (1981). Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos. Instituto de Hidrología de España. UNESCO. 183 pp.
- Ruiz, A. O., Arteaga, R. R., Vázquez, P. M., López, L. R. y Ontiveros, C. R. (2011). Requerimiento de riego y predicción del rendimiento en gramíneas forrajeras mediante un modelo de simulación en Tabasco, México. *Agrociencia*, 45: 745-760.
- Tabari, H., Grismer, M. y Trajkovic (2013). Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrig. Sci.*, 31: 107-117.
- Thiessen, A. H. (1911). Precipitation averages for large areas. *Monthly weather review*, 39(7): 1082-1089.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review* 38: 55-94.
- Thornthwaite, C.W. y Mather, J.R. (1951). The role of evapotranspiration in climate. *Arch. Met. Geoph. Biokl. B*, 3(1): 16-39.
- Thornthwaite, C. W. y Mather, J. R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Centerton: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology. (Publications in Climatology, 10).
- Tobar, J. (coord.) (2010). Apoyo a la rehabilitación productiva y el manejo sostenible de microcuencas en municipios de Ahuachapán a consecuencia de la tormenta Stan y la erupción del volcán Ilamatepec (GCP/ELS/008/SPA). Nota técnica 1. LA microcuenca como ámbito de planificación de los recursos naturales. FAO. San Salvador, El Salvador. 10 pp.
- Turc, L. (1961). Evaluation des besoins en eau d'irrigation, e'vapotranspiration potentielle. *Annales Agronomiques*, 12: 13-49.
- Verstraeten, W., Veroustraete, F. y Feyen, J. (2008). Assessment of evapotranspiration and soil moisture content across different scales of observation. *Sensors*, 8(1): 70-117.

- Xu, C.-Y. y Halldin, S. (1996). The effect of climate change in river flow and snow cover in the NOPEX area simulated by a simple water balance model. Proc. of Nordic Hydrological Conference. Alkureyri, Iceland, 1:436–445.
- Xu, C.-Y. y Singh, V. P. (1998). A review on monthly water balance models for water resources investigations. *Water resources management*, 12: 31-50.
- Yin, Y., Wu, S., Zheng, D y Yang, Q. (2008). Radiation calibration of FAO-56 Penman-Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China. *Agric. Water. Manag.*, 95: 77-84.
- Zhigiang, W., Baoyuan, L. y Yan, Z. (2009). Soil moisture of different vegetation types on the Loess Plateau. *Journal of Geographical Science*, 19: 707-718.

ANEXO

Balance hídrico en el Parque Nacional Fuentes Brotantes

Tabla A 1. Altura de la lámina de lluvia media diaria (p_{alt}) y disponibilidad media pluvial (V) en temporada de estiaje, húmeda y anual, por estación climatológica en la subcuenca (RH26Dp).

ESTACIÓN		AÑOS CON INFORMACIÓN	APT km ²	p_{alt} (mm)			V (10 ³ m ³)		
n	CLAVE			ESTIAJE	LLUVIAS	ANUAL	ESTIAJE	LLUVIAS	ANUAL
1	9002	26	68.29	0.53	5.50	3.02	36.194	375.595	205.894
2	9003	51	3.28	0.38	3.38	1.88	1.246	11.086	6.166
3	9004	34	33.76	0.38	4.65	2.52	12.829	156.984	84.906
4	9007	33	9.51	0.33	3.09	1.71	3.138	29.386	16.262
5	9009	26	14.36	0.32	2.70	1.51	4.595	38.772	21.684
6	9010	33	4.75	0.39	4.57	2.48	1.853	21.708	11.780
7	9011	20	5.72	0.34	3.12	1.73	1.945	17.846	9.896
8	9012	35	3.83	0.40	3.73	2.07	1.532	14.286	7.909
9	9013	18	7.92	0.38	3.25	1.82	3.010	25.740	14.375
10	9014	38	30.32	0.37	4.12	2.25	11.218	124.918	68.068
11	9015	36	6.34	0.37	3.12	1.75	2.346	19.781	11.063
12	9016	19	15.68	0.38	6.17	3.28	5.958	96.746	51.352
13	9017	15	49.63	0.23	3.10	1.67	11.415	153.853	82.634
14	9019	24	49.49	0.64	6.64	3.64	31.674	328.614	180.144
15	9020	57	30.72	0.40	5.14	2.77	12.288	157.901	85.094
16	9021	29	13.03	0.34	3.63	1.99	4.430	47.299	25.865
17	9022	44	117.25	0.68	6.34	3.51	79.730	743.365	411.548
18	9023	12	5.55	0.32	4.30	2.31	1.776	23.865	12.821
19	9024	17	11.47	0.35	4.08	2.22	4.015	46.798	25.406
20	9025	29	13.05	0.36	2.94	1.65	4.698	38.367	21.533
21	9026	36	46.59	0.39	2.95	1.67	18.170	137.441	77.805
22	9028	26	8.82	0.42	3.32	1.87	3.704	29.282	16.493
23	9029	59	19.60	0.37	2.95	1.66	7.252	57.820	32.536
24	9030	34	17.88	0.65	6.42	3.54	11.622	114.790	63.206
25	9031	22	3.98	0.38	3.07	1.73	1.512	12.219	6.866
26	9032	50	22.59	0.49	3.58	2.04	11.069	80.872	45.971
27	9033	27	11.28	0.36	3.90	2.13	4.061	43.992	24.026
28	9034	41	58.11	0.39	3.93	2.16	22.663	228.372	125.518
29	9036	41	9.66	0.33	3.77	2.05	3.188	36.418	19.803
30	9037	35	36.39	0.47	4.46	2.47	17.103	162.299	89.701
31	9038	52	26.77	0.37	4.12	2.25	9.905	110.292	60.099
32	9039	34	4.98	0.35	3.97	2.16	1.743	19.771	10.757
33	9041	39	43.50	0.47	4.74	2.61	20.445	206.190	113.318
34	9042	23	40.36	0.48	3.68	2.08	19.373	148.525	83.949
35	9043	55	22.45	0.39	2.93	1.66	8.756	65.779	37.267
36	9044	20	74.48	0.42	3.75	2.09	31.282	279.300	155.291
37	9045	33	98.75	0.46	3.42	1.94	45.425	337.725	191.575
38	9046	19	12.15	0.41	5.12	2.77	4.982	62.208	33.595
39	9047	25	11.00	0.32	3.58	1.95	3.520	39.380	21.450
40	9049	18	8.30	0.26	4.50	2.38	2.158	37.350	19.754
41	9050	20	10.06	0.45	4.58	2.52	4.527	46.075	25.301
42	9051	41	99.83	0.30	2.75	1.53	29.949	274.533	152.241
43	9052	18	11.09	0.35	3.58	1.97	3.882	39.702	21.792
44	9054	32	7.63	0.37	3.91	2.14	2.823	29.833	16.328
45	9056	17	12.19	0.31	2.88	1.60	3.779	35.107	19.443
46	9058	16	3.19	0.40	3.38	1.89	1.276	10.782	6.029
47	9059	19	6.47	0.51	3.91	2.21	3.300	25.298	14.299
48	9068	28	16.62	0.26	1.89	1.08	4.321	31.412	17.867
49	9070	25	7.05	0.41	4.29	2.35	2.891	30.245	16.568
50	15007	31	45.37	0.52	4.36	2.44	23.592	197.813	110.703

Balance hídrico en el Parque Nacional Fuentes Brotantes

ESTACIÓN		AÑOS CON INFORMACIÓN	APT km ²	p _{ait} (mm)			V (m ³)		
n	CLAVE			ESTIAJE	LLUVIAS	ANUAL	ESTIAJE	LLUVIAS	ANUAL
51	15008	47	19.10	0.36	2.74	1.55	6.876	52.334	29.605
52	15013	44	32.27	0.39	4.08	2.24	12.585	131.662	72.123
53	15015	19	53.82	0.49	4.46	2.48	26.372	240.037	133.205
54	15017	41	109.93	0.47	3.07	1.77	51.667	337.485	194.576
55	15018	37	150.22	0.62	3.64	2.13	93.136	546.801	319.969
56	15020	48	70.10	0.35	2.89	1.62	24.535	202.589	113.562
57	15022	44	99.51	0.38	2.80	1.59	37.814	278.628	158.221
58	15023	18	51.18	0.37	2.87	1.62	18.937	146.887	82.912
59	10527	26	49.19	0.41	4.16	2.29	20.168	204.630	112.399
60	15033	27	58.06	0.55	5.69	3.12	31.933	330.361	181.147
61	15040	22	75.26	0.37	2.73	1.55	27.846	205.460	116.653
62	15041	46	87.56	0.37	2.93	1.65	32.397	256.551	144.474
63	15042	29	40.71	0.45	2.80	1.63	18.320	113.988	66.154
64	15044	40	23.06	0.42	2.79	1.61	9.685	64.337	37.011
65	15047	41	29.63	0.38	3.97	2.18	11.259	117.631	64.445
66	15050	40	85.63	0.37	2.70	1.54	31.683	231.201	131.442
67	15053	28	45.77	0.50	5.49	3.00	22.885	251.277	137.081
68	15058	44	9.20	0.35	4.50	2.43	3.220	41.400	22.310
69	15059	48	18.93	0.38	4.19	2.29	7.193	79.317	43.255
70	15061	41	31.74	0.44	3.84	2.14	13.966	121.882	67.924
71	15065	39	115.58	0.54	2.31	1.43	62.413	266.990	164.702
72	15075	42	15.11	0.41	4.10	2.26	6.195	61.951	34.073
73	15077	44	19.86	0.47	4.90	2.69	9.334	97.314	53.324
74	15083	47	25.97	0.41	2.75	1.58	10.648	71.418	41.033
75	15090	42	110.23	0.44	2.69	1.57	48.501	296.519	172.510
76	15092	34	11.91	0.37	3.04	1.71	4.407	36.206	20.307
77	15094	43	97.14	0.47	3.24	1.86	45.656	314.734	180.195
78	15095	40	71.62	0.68	6.01	3.35	48.702	430.436	239.569
79	15097	14	99.88	0.50	2.86	1.68	49.940	285.657	167.798
80	15098	42	70.28	0.40	3.38	1.89	28.112	237.546	132.829
81	15099	38	93.73	0.45	2.81	1.63	42.179	263.381	152.780
82	15100	34	22.13	0.24	2.65	1.45	5.311	58.645	31.978
83	15101	40	71.34	0.41	2.85	1.63	29.249	203.319	116.284
84	15106	35	126.58	0.62	5.20	2.91	78.480	658.216	368.348
85	15123	19	99.01	0.42	2.92	1.67	41.584	289.109	165.347
86	15124	36	41.81	0.35	2.53	1.44	14.634	105.779	60.206
87	15125	39	11.81	0.36	2.68	1.52	4.252	31.651	17.951
88	15127	45	14.79	0.37	4.20	2.29	5.472	62.118	33.795
89	15129	43	91.75	0.38	3.05	1.72	34.865	279.838	157.351
90	15135	26	40.38	0.51	3.00	1.76	20.594	121.140	70.867
91	15137	11	24.64	0.38	3.32	1.85	9.363	81.805	45.584
92	15141	20	42.60	0.36	2.83	1.60	15.336	120.558	67.947
93	15145	40	40.76	0.39	2.68	1.54	15.896	109.237	62.567
94	15147	22	23.88	0.52	5.83	3.18	12.418	139.220	75.819
95	15163	47	22.34	0.45	3.60	2.03	10.053	80.424	45.239
96	15167	42	29.18	0.36	2.70	1.53	10.505	78.786	44.645
97	15170	57	12.02	0.45	2.90	1.68	5.409	34.858	20.134
98	15209	16	16.10	0.43	4.83	2.63	6.923	77.763	42.343
99	15210	26	111.04	0.49	2.58	1.54	54.410	286.483	170.446
100	15216	13	115.56	0.54	2.48	1.51	62.402	286.589	174.496
101	15263	12	79.94	0.29	2.83	1.56	23.183	226.230	124.706
102	15268	13	42.15	0.40	3.03	1.72	16.860	127.715	72.287
103	15280	17	68.60	0.42	3.78	2.10	28.812	259.308	144.060
104	15383	15	75.51	0.35	2.70	1.53	26.429	203.877	115.153
105	29013	16	35.96	0.57	3.43	2.00	20.497	123.343	71.920

Balance hídrico en el Parque Nacional Fuentes Brotantes

Tabla A 2. Lluvia media acumulada en el polígono del Parque (estación climatológica 9020, en mm).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1962	0.0	0.0	4.0	114.0	32.8	172.4	143.8	223.5	198.0	59.5	0.0	10.0
1963	0.0	0.0	15.0	11.5	65.5	116.8	273.1	206.7	181.8	90.5	4.0	2.0
1964	29.9	0.0	0.7	4.2	143.1	214.0	188.1	114.3	162.9	57.3	20.7	11.5
1965	6.0	20.5	14.7	25.7	60.3	159.4	202.7	254.6	165.8	116.2	0.0	6.9
1966	19.2	0.0	62.5	34.1	84.6	107.3	355.0	327.9	251.5	37.9	0.0	2.8
1967	73.2	0.0	7.4	12.0	129.8	198.4	189.1	286.4	232.0	61.0	2.0	8.5
1968	7.8	11.5	0.8	55.1	45.9	228.6	229.9	145.8	157.1	52.0	5.2	40.6
1969	5.0	0.0	5.5	4.0	30.2	78.9	263.6	475.7	275.5	74.5	0.0	0.0
1970	0.5	11.9	1.1	9.7	47.7	151.0	244.9	123.8	244.5	57.8	5.3	0.0
1971	1.6	0.0	23.3	14.5	36.5	85.5	257.6	232.9	270.7	150.3	16.1	4.4
1972	1.3	2.4	13.4	24.5	119.9	135.5	156.1	144.5	179.1	293.5	18.6	4.2
1973	0.0	7.0	0.0	11.1	62.2	177.7	325.3	277.3	211.7	46.3	51.2	0.4
1974	8.0	9.1	6.1	67.6	47.1	245.5	285.7	156.6	175.9	25.9	10.2	0.0
1975	33.7	---	0.1	16.2	95.6	192.4	146.9	195.2	89.2	53.0	0.0	0.0
1976	0.1	1.5	18.0	25.0	44.1	93.5	145.1	203.3	181.1	140.9	6.2	21.6
1977	1.4	2.4	0.0	11.3	95.8	185.4	184.5	115.9	196.9	70.3	6.5	2.8
1978	5.5	11.6	58.4	2.1	310.0	170.4	211.5	141.6	111.4	91.3	14.6	0.0
1979	0.0	16.9	8.0	28.8	62.8	133.8	113.8	188.1	99.1	6.0	3.3	19.6
1980	55.4	7.0	0.0	28.7	75.3	79.7	108.6	205.4	207.1	67.0	6.3	0.0
1981	---	19.7	3.9	56.7	65.6	261.5	231.9	176.4	288.0	86.2	6.4	4.0
1982	0.0	8.4	5.8	15.4	119.5	124.7	153.0	123.9	58.8	44.3	2.4	3.2
1983	13.0	17.0	0.0	0.0	26.2	106.1	300.9	207.0	329.6	99.9	16.0	0.0
1984	8.0	1.0	2.7	1.6	98.9	112.4	357.7	285.6	316.3	47.8	0.5	3.3
1985	2.0	20.0	16.5	75.1	79.4	290.6	226.8	210.9	148.4	74.6	0.6	0.0
1986	0.0	0.0	0.0	27.6	107.1	388.7	243.6	188.6	169.5	87.0	8.3	0.0
1987	0.0	2.0	26.2	15.2	54.3	200.8	281.2	206.1	75.9	0.0	3.8	0.0
1988	0.0	1.6	23.3	1.6	74.5	157.3	210.9	217.8	140.7	53.1	10.0	0.0
1989	14.9	5.0	10.4	29.8	77.7	---	---	98.0	166.5	28.5	5.5	23.5
1990	4.5	8.0	11.8	61.9	63.0	145.0	405.5	196.5	186.4	125.0	0.0	5.5
1991	15.5	0.0	0.0	11.5	60.5	236.0	280.5	131.0	171.5	152.0	15.0	---
1992	32.5	17.5	12.0	36.5	68.5	34.0	183.0	232.0	261.5	126.5	33.0	---
1993	2.0	1.5	1.0	28.5	15.0	0.0	252.0	167.5	131.0	---	---	---
1994	24.5	1.0	7.5	2.5	35.2	200.0	199.1	372.5	237.5	142.1	14.0	---
1995	0.0	0.0	2.5	0.0	---	15.5	0.0	0.0	0.0	67.5	50.5	---
1996	0.0	0.0	0.0	32.0	---	231.5	223.5	170.0	266.0	95.0	0.0	18.5
1997	1.5	0.0	47.0	33.0	101.0	121.5	318.5	189.0	205.0	61.5	19.0	4.5
1998	8.0	0.0	0.0	11.5	0.0	105.2	155.0	362.7	421.0	108.0	9.5	---
1999	0.0	0.0	21.0	18.5	23.0	84.5	203.0	388.0	57.3	132.5	2.0	0.0
2000	0.0	0.0	13.0	13.5	138.5	231.5	182.5	232.0	229.5	45.5	8.5	0.0
2001	0.0	15.0	15.5	29.0	130.0	250.5	236.0	216.0	335.0	26.0	0.0	0.0
2002	0.0	6.5	9.5	36.0	16.5	120.0	180.0	123.0	238.0	106.0	32.5	0.0
2003	1.5	0.0	19.5	8.5	30.5	308.5	211.0	219.0	244.5	98.5	22.0	0.0
2004	79.5	0.0	38.5	28.0	---	311.0	156.0	191.0	332.5	58.0	3.5	---
2005	14.5	---	4.0	0.0	---	135.5	170.5	287.0	112.0	122.0	5.0	0.0
2006	1.5	3.5	8.0	50.5	103.5	156.0	214.5	287.5	270.5	161.0	24.0	12.0
2007	0.0	35.0	22.5	10.5	38.0	121.5	189.5	292.5	220.5	61.5	4.0	---
2008	0.0	0.0	0.0	27.5	---	271.5	225.0	230.0	154.5	81.0	0.0	0.0

Balance hídrico en el Parque Nacional Fuentes Brotantes

Tabla A 3. Lluvia media acumulada en la microcuenca del Parque (estaciones climatológicas 9002 y 9020, en mm).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1961	0.0	0.0	12.5	23.5	55.0	135.5	216.5	77.5	31.5	22.8	10.0	5.0
1967	85.6	0.0	11.7	11.0	125.9	201.7	243.3	296.5	259.3	72.0	4.5	12.5
1968	4.9	30.5	6.2	63.8	70.7	228.6	232.0	168.2	150.9	64.0	5.1	39.6
1969	7.3	0.0	7.3	4.8	35.6	78.9	253.6	464.4	270.3	88.3	1.8	1.3
1970	3.5	14.7	0.6	7.4	66.6	163.5	282.0	193.2	225.3	80.2	16.7	0.0
1971	0.8	0.0	12.4	18.9	50.0	125.3	281.8	196.7	241.6	166.2	19.8	10.2
1972	2.9	3.2	16.2	37.5	173.0	177.3	220.7	147.3	228.1	175.8	23.7	5.1
1973	0.5	7.8	0.0	43.1	111.2	201.4	265.4	275.6	228.1	59.2	32.9	4.5
1974	4.5	14.8	20.1	57.6	63.1	305.8	266.6	146.9	236.0	43.0	12.1	0.0
1975	48.1	---	0.1	17.9	110.3	216.5	181.0	210.6	113.4	57.0	5.5	0.0
1976	3.3	5.3	20.5	47.5	63.8	130.5	142.6	314.8	215.0	171.2	5.8	26.6
1977	2.2	5.5	0.0	22.7	116.6	171.7	183.0	207.2	193.8	70.8	15.9	4.3
1978	6.5	17.1	49.5	6.0	172.9	248.5	231.4	218.0	136.7	123.9	11.8	1.0
1979	0.0	18.5	5.0	37.0	71.7	142.5	158.4	239.0	169.9	5.0	1.7	19.9
1980	97.2	4.9	0.0	39.9	122.1	140.9	124.0	232.1	223.2	61.9	15.2	0.0
1981	22.5	19.7	3.9	50.4	76.0	303.2	237.1	205.6	285.0	78.4	3.7	6.0
1982	0.0	15.5	3.5	12.6	120.1	129.8	159.3	139.6	72.9	45.7	4.7	5.6
1983	6.5	8.5	0.0	0.0	49.9	53.1	280.0	195.3	261.3	50.0	8.0	0.0
1984	10.0	5.5	6.4	2.3	112.5	137.7	308.9	248.8	364.4	73.9	1.3	15.7
1985	4.5	15.5	12.3	73.1	82.2	306.8	234.4	226.5	175.2	80.3	1.8	1.5
1986	0.0	0.5	0.0	31.3	124.8	392.4	201.3	203.8	147.3	78.0	22.2	1.5
1987	0.0	5.0	26.6	32.6	54.7	227.4	302.6	215.6	121.5	0.0	9.4	0.0
1988	1.5	1.8	69.2	3.8	82.3	157.3	210.9	217.8	140.7	53.1	10.0	0.0
1989	14.9	5.0	10.4	29.8	77.7	---	---	98.0	166.5	28.5	5.5	23.5
1990	4.5	8.0	11.8	61.9	63.0	145.0	405.5	196.5	186.4	125.0	0.0	5.5
1991	15.5	0.0	0.0	11.5	60.5	236.0	280.5	131.0	171.5	152.0	15.0	---
1992	32.5	17.5	12.0	36.5	68.5	34.0	183.0	232.0	261.5	126.5	33.0	---
1993	2.0	1.5	1.0	28.5	15.0	0.0	252.0	167.5	131.0	---	---	---
1994	24.5	1.0	7.5	2.5	35.2	200.0	199.1	372.5	237.5	142.1	14.0	---
1995	0.0	0.0	2.5	0.0	---	15.5	0.0	0.0	0.0	67.5	50.5	---
1996	0.0	0.0	0.0	32.0	---	231.5	223.5	170.0	266.0	95.0	0.0	18.5
1997	1.5	0.0	47.0	33.0	101.0	121.5	318.5	189.0	205.0	61.5	19.0	4.5
1998	8.0	0.0	0.0	11.5	0.0	105.2	155.0	362.7	421.0	108.0	9.5	---
1999	0.0	0.0	21.0	18.5	23.0	84.5	203.0	388.0	57.3	132.5	2.0	0.0
2000	0.0	0.0	13.0	13.5	138.5	231.5	182.5	232.0	229.5	45.5	8.5	0.0
2001	0.0	15.0	15.5	29.0	130.0	250.5	236.0	216.0	335.0	26.0	0.0	0.0
2002	0.0	6.5	9.5	36.0	16.5	120.0	180.0	123.0	238.0	106.0	32.5	0.0
2003	1.5	0.0	19.5	8.5	30.5	308.5	211.0	219.0	244.5	98.5	22.0	0.0
2004	79.5	0.0	38.5	28.0	---	311.0	156.0	191.0	332.5	58.0	3.5	---
2005	14.5	---	4.0	0.0	---	135.5	170.5	287.0	112.0	122.0	5.0	0.0
2006	1.5	3.5	8.0	50.5	103.5	156.0	214.5	287.5	270.5	161.0	24.0	12.0
2007	0.0	35.0	22.5	10.5	38.0	121.5	189.5	292.5	220.5	61.5	4.0	---
2008	0.0	0.0	0.0	27.5	---	271.5	225.0	230.0	154.5	81.0	0.0	0.0

Balance hídrico en el Parque Nacional Fuentes Brotantes

Tabla A 4. Temperatura media mensual en el polígono del Parque (estación climatológica 9020, en °C).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1967	---	---	8.8	11.5	12.1	13.7	12.5	12.5	12.3	10.1	8.1	7.6
1968	5.5	6.6	8.7	12.3	13.5	13.9	13.5	12.6	12.9	11.3	9.1	9.2
1969	7.1	9.5	11.3	12.4	14.6	15.6	13.9	13.9	13.4	11.5	9.7	9.2
1970	6.4	8.1	11	14.4	13.3	13.5	13.3	12.8	12.7	11.3	7.8	6.1
1971	7.3	7.1	10.4	11.8	14.4	13.9	12.9	12.9	13.1	11.6	9.3	7.7
1972	8.9	7.6	9.8	12.1	13.3	13.4	12.7	12.3	12	11.4	10.8	6.5
1973	5.5	7.9	11.4	14	14.6	13.8	12.7	12.6	12.4	11.5	9.7	6.8
1974	6.8	7.7	9.6	10.9	13.4	13.5	11.5	12.4	12.4	10.5	7.9	7.1
1975	7.3	---	12.5	14.3	13.4	12.4	11.9	12.2	11.7	11.3	8.1	5.7
1976	6.5	6.9	10.5	10.6	13.2	14.4	13.2	13.2	13.1	13.3	9.8	8.9
1977	8.3	10.2	10.4	11.1	13	13.1	13	13.5	13.3	13.3	11.2	8.4
1978	9.4	12.1	11.3	14.1	13.9	13.2	12.5	11.4	12.6	11.2	11	9.4
1979	8	11	12.3	12.9	13	13.6	13.5	13.6	12.8	12.2	11.2	8.4
1980	9.5	6.5	10.1	9.6	12.2	13.2	12.6	12.1	11.9	10.5	7.2	5.8
1981	---	6.6	9.1	11	12.3	13.1	11.8	11.9	11.5	11.1	6.7	7.4
1982	7	7.2	9.8	12.8	12.6	11.9	11.5	11.1	11.8	10	7.7	6.8
1983	6.5	6	8.7	10.9	14.4	14.2	12.5	11.8	12.2	10.3	9.3	7.2
1984	6.2	6.8	9.8	11.8	11	12.8	12.3	11.5	11.7	11	7.9	6.4
1985	7.1	7.7	9.6	10.6	12.5	12.9	11.6	12	11.2	9.9	8	8.5
1986	5.7	8.2	8.6	13.4	13.5	13.3	12.6	12.6	13.4	12.9	13.2	10.6
1987	5.5	4.2	9.3	12.1	13	14.2	13.5	13.1	13.5	12.9	10.4	12.3
1988	8.4	9.5	12.9	13.4	13.3	14	13.2	12.8	13.1	12.2	7.6	7.3
1989	9.3	11.9	6.1	9.9	11.2	---	---	15.3	14	11.1	9.6	8.4
1990	8.2	7.1	8.9	10.3	12.4	12	12.3	12.3	12.4	11.1	7.5	6.9
1991	6.4	7.4	10.5	12.1	12.5	12.9	12.4	12.5	12.8	11.2	7.8	---
1992	8.5	10.1	9.6	11.5	11.9	13.6	12.4	12.3	12.5	10.9	9.6	---
1993	7.5	6.7	9.1	11.3	13.6	14.4	13	13	13.1	---	---	---
1994	8.5	9.7	10.6	---	14.4	13.4	12.6	12.2	12.3	12	11.3	---
1995	9.5	10.6	10.6	11.8	---	14.3	13	13.4	13.4	10.9	11.2	---
1996	6.3	8.1	10.6	10.7	---	12.1	12.6	12.2	12.1	11.1	9.2	9.2
1997	7.6	8.2	10.3	11.3	11.1	12.6	12.2	11.7	12.4	11	10.4	9.1
1998	6.5	6.2	10.4	12.8	12.6	13.7	12.3	12.4	13.1	11.9	12.3	---
1999	5.2	8.6	10.1	---	12.8	13	11.3	12.3	11.2	9.3	6.5	---
2000	6.5	---	9.9	11.2	12.3	12.2	11.2	11.7	12.2	10.7	9.9	---
2001	6.5	7.5	9.7	---	12.2	12.3	12	12	11.6	11.6	---	---
2002	6	7.6	11	11.1	---	12.1	11.9	11.5	12.2	11.2	10.1	---
2003	6.5	9.4	10.5	---	13.7	12.9	11.4	11.8	12.7	11.6	10.2	4.6
2004	6.7	6.3	9.9	10.6	---	11.1	11.4	12	12	12.2	9.2	---
2005	6.8	---	11.9	13.3	---	14	12.4	12.4	12.3	12.3	10	7.4
2006	6.9	9.1	9.3	12	12.1	11.8	12.1	12.3	12.6	12.3	---	6.5
2007	7.5	8.1	9.6	9.6	10.6	11.1	11.1	11.6	11.9	8.6	5.2	---
2008	3.6	4.1	7.9	10.6	---	10.7	10.6	10.9	11.7	10.3	7.5	5.2

Balance hídrico en el Parque Nacional Fuentes Brotantes

Tabla A 5. Temperatura media mensual en la microcuenca del Parque (estaciones climatológicas 9002 y 9020, en °C).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1961	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	11.8
1962	---	---	---	13.8	13.4	14.7	---	12.5	13.2	12.9	12.0	---
1963	---	---	---	14.8	12.7	12.9	13.4	13.8	12.9	13.5	---	---
1964	---	---	---	---	---	11.4	11.0	11.3	10.1	8.6	9.2	7.4
1965	5.3	8.0	11.1	12.9	14.3	12.6	11.3	10.9	11.6	10.1	11.9	10.0
1966	7.2	9.6	10.2	12.2	13.5	12.8	12.1	12.6	11.8	11.5	11.4	9.3
1967	7.3	8.6	10.9	12.1	13.1	13.3	12.1	12.2	11.4	10.4	8.0	6.7
1968	5.7	6.3	8.2	10.8	12.6	13.1	11.7	12.0	11.8	10.1	7.7	7.9
1969	5.7	7.3	10.0	10.7	12.3	15.6	12.6	12.9	11.7	10.6	8.9	8.5
1970	5.6	7.5	10.2	14.2	12.1	12.5	11.7	12.6	11.6	10.4	8.4	8.8
1971	8.3	9.6	10.6	12.0	13.5	12.1	11.2	11.1	11.3	10.8	8.6	8.2
1972	7.5	7.9	8.7	12.4	12.5	12.4	11.2	11.2	10.6	10.9	9.3	7.9
1973	5.3	8.8	10.8	13.6	12.7	12.4	10.9	11.2	11.1	10.8	8.6	7.6
1974	6.8	8.8	8.7	10.8	11.8	12.1	10.1	10.9	10.6	9.5	7.2	7.9
1975	7.5	---	12.7	14.2	12.6	12.2	11.2	11.6	10.7	10.4	9.0	7.3
1976	6.2	7.5	9.7	10.1	11.6	11.9	11.1	10.5	10.7	10.7	8.5	7.8
1977	7.3	8.1	9.1	9.6	11.5	11.0	11.0	11.5	11.4	11.0	9.3	7.8
1978	7.7	8.6	9.0	11.5	12.3	11.1	11.3	10.6	10.5	9.0	8.8	8.5
1979	6.7	8.4	9.6	11.3	11.7	11.2	12.1	11.4	10.7	9.5	7.3	6.4
1980	6.5	5.3	8.2	8.0	10.3	10.2	10.4	9.7	9.4	9.1	7.8	6.4
1981	6.1	6.6	8.6	9.6	12.3	12.3	10.9	11.5	11.7	12.0	8.3	7.9
1982	7.5	7.3	10.9	13.5	13.0	12.8	11.2	10.8	10.7	9.2	8.0	6.4
1983	6.4	7.0	8.6	9.7	13.0	12.0	10.5	10.2	10.4	8.5	7.6	6.8
1984	5.4	6.0	8.7	10.1	8.9	10.4	9.9	9.4	9.8	9.8	7.5	6.7
1985	6.5	8.1	9.9	9.9	11.4	11.0	10.1	10.3	9.4	8.4	6.7	7.0
1986	5.2	7.5	8.1	11.1	10.7	11.5	10.3	10.5	10.7	10.7	10.4	8.6
1987	6.2	5.4	8.4	10.8	11.4	11.7	11.4	10.8	11.3	10.0	8.9	10.5
1988	7.0	8.7	10.4	13.0	11.9	14.0	13.2	12.8	13.1	12.2	7.6	7.3
1989	9.3	11.9	6.1	9.9	11.2	---	---	15.3	14.0	11.1	9.6	8.4
1990	8.2	7.1	8.9	10.3	12.4	12.0	12.3	12.3	12.4	11.1	7.5	6.9
1991	6.4	7.4	10.5	12.1	12.5	12.9	12.4	12.5	12.8	11.2	7.8	---
1992	8.5	10.1	9.6	11.5	11.9	13.6	12.4	12.3	12.5	10.9	9.6	---
1993	7.5	6.7	9.1	11.3	13.6	14.4	13.0	13.0	13.1	---	---	---
1994	8.5	9.7	10.6	---	14.4	13.4	12.6	12.2	12.3	12.0	11.3	---
1995	9.5	10.6	10.6	11.8	---	14.3	13.0	13.4	13.4	10.9	11.2	---
1996	6.3	8.1	10.6	10.7	---	12.1	12.6	12.2	12.1	11.1	9.2	9.2
1997	7.6	8.2	10.3	11.3	11.1	12.6	12.2	11.7	12.4	11.0	10.4	9.1
1998	6.5	6.2	10.4	12.8	12.6	13.7	12.3	12.4	13.1	11.9	12.3	---
1999	5.2	8.6	10.1	---	12.8	13.0	11.3	12.3	11.2	9.3	6.5	---
2000	6.5	---	9.9	11.2	12.3	12.2	11.2	11.7	12.2	10.7	9.9	---
2001	6.5	7.5	9.7	---	12.2	12.3	12.0	12.0	11.6	11.6	---	---
2002	6.0	7.6	11.0	11.1	---	12.1	11.9	11.5	12.2	11.2	10.1	---
2003	6.5	9.4	10.5	---	13.7	12.9	11.4	11.8	12.7	11.6	10.2	4.6
2004	6.7	6.3	9.9	10.6	---	11.1	11.4	12.0	12.0	12.2	9.2	---
2005	6.8	---	11.9	13.3	---	14.0	12.4	12.4	12.3	12.3	10.0	7.4
2006	6.9	9.1	9.3	12.0	12.1	11.8	12.1	12.3	12.6	12.3	---	6.5
2007	7.5	8.1	9.6	9.6	10.6	11.1	11.1	11.6	11.9	8.6	5.2	---
2008	3.6	4.1	7.9	10.6	---	10.7	10.6	10.9	11.7	10.3	7.5	5.2
2009	5.8	7.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Balance hídrico en el Parque Nacional Fuentes Brotantes

Tabla A 6. Cálculo de la evapotranspiración potencial media acumulada en el polígono del Parque (mm).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1967	---	---	61.2	76.8	84.8	90.3	86.6	84.3	75.8	61.2	45.0	41.8
1968	36.2	42.3	60.9	80.7	91.8	91.2	91.3	84.7	78.0	65.6	48.2	46.9
1969	41.9	51.2	71.9	81.0	97.3	99.5	93.3	91.4	80.6	66.8	50.7	46.8
1970	39.4	46.3	70.8	90.0	90.5	89.0	90.8	85.8	77.4	65.8	44.0	36.8
1971	42.7	42.9	68.2	78.0	96.0	91.0	88.5	86.2	79.0	66.9	49.0	42.2
1972	48.1	46.4	65.6	79.6	91.0	88.8	87.5	83.4	74.3	65.9	54.0	37.9
1973	36.2	45.7	72.7	88.4	97.1	90.4	87.7	84.8	75.9	66.8	50.4	39.0
1974	40.7	44.6	64.6	73.9	91.4	89.3	81.5	84.0	76.1	62.4	44.3	40.2
1975	42.5	---	77.2	89.6	91.2	83.7	83.6	83.3	73.2	65.7	45.1	35.6
1976	40.0	43.8	68.6	72.9	90.2	93.4	90.0	87.9	79.0	73.3	50.6	45.9
1977	45.9	53.7	67.9	74.8	89.5	87.1	88.9	89.3	80.3	73.7	55.5	44.4
1978	49.7	60.1	72.0	88.9	93.7	88.0	86.6	79.1	77.0	65.4	54.9	47.7
1979	45.3	56.4	76.4	82.9	89.0	89.5	91.7	89.7	78.1	69.7	55.6	44.4
1980	50.1	42.3	67.1	67.8	85.3	88.0	86.9	82.4	73.6	61.9	41.6	35.7
1981	---	40.8	62.2	74.5	86.0	87.2	83.0	81.4	72.3	65.1	40.3	40.9
1982	41.4	43.0	65.6	82.8	87.3	81.7	81.5	78.0	73.4	60.6	43.3	39.0
1983	39.5	38.8	60.4	74.0	96.2	92.6	86.5	81.2	75.3	61.9	49.1	40.5
1984	38.9	43.3	65.7	78.2	79.1	85.6	85.4	79.5	72.7	64.2	44.2	37.8
1985	41.9	44.7	64.5	72.7	86.9	86.5	82.2	82.3	71.1	60.3	44.7	44.8
1986	37.0	46.7	59.9	85.7	91.8	88.1	86.9	85.1	80.7	72.1	62.5	51.7
1987	36.2	33.0	63.7	79.2	89.5	92.6	91.6	87.2	81.0	72.3	52.8	57.4
1988	46.0	53.2	79.3	85.6	90.8	91.6	90.1	85.8	79.0	69.3	43.2	40.8
1989	49.5	59.6	49.2	69.4	80.5	---	---	66.1	83.2	65.4	50.2	44.2
1990	45.6	42.4	61.6	71.2	86.0	82.0	85.8	83.3	76.3	65.0	42.9	39.3
1991	39.5	43.8	68.7	79.7	87.0	86.5	86.1	84.5	77.9	65.3	44.2	---
1992	46.6	55.2	64.6	76.7	83.8	89.9	86.0	83.4	76.2	63.9	50.2	---
1993	39.3	41.4	62.6	75.8	92.0	93.8	89.0	87.1	79.3	---	---	---
1994	46.8	52.0	68.8	---	96.3	88.9	87.0	83.2	75.7	68.8	55.9	---
1995	50.1	55.2	68.8	77.8	---	93.2	89.3	88.8	80.5	64.3	55.7	---
1996	39.2	46.1	69.0	72.9	---	82.7	87.0	83.2	74.6	65.0	48.9	47.1
1997	43.6	46.7	67.8	75.5	79.9	84.7	85.0	80.6	76.3	64.4	52.8	46.8
1998	39.9	39.5	46.9	82.4	59.2	90.0	85.8	84.0	79.4	68.3	59.4	---
1999	32.0	47.9	66.8	---	88.3	81.1	80.5	83.6	71.0	57.9	39.6	---
2000	39.9	---	66.4	75.4	86.0	83.2	80.4	80.7	75.0	63.0	50.9	---
2001	39.7	44.2	65.1	---	85.1	83.2	84.0	82.2	72.8	65.1	---	---
2002	38.0	44.6	71.0	74.6	---	82.5	83.8	79.4	75.3	65.5	52.0	---
2003	40.0	50.8	68.2	---	92.5	86.1	81.2	81.1	77.4	67.1	52.3	31.7
2004	40.4	41.4	66.2	72.4	---	77.5	81.2	82.1	74.0	68.8	48.5	---
2005	40.9	---	74.9	85.0	---	91.7	85.9	84.0	75.8	69.8	51.6	29.1
2006	41.2	49.9	63.1	79.1	84.6	81.0	84.9	83.6	77.1	69.7	---	27.1
2007	43.4	46.2	64.5	67.6	77.6	77.7	79.9	80.0	74.0	54.9	34.9	---
2008	24.2	33.5	57.4	72.5	---	75.8	77.2	76.8	72.8	61.4	42.9	33.8

Balance hídrico en el Parque Nacional Fuentes Brotantes

Tabla A 7. Cálculo de la evapotranspiración potencial media acumulada en la microcuenca del Parque (promedio estaciones climatológicas 9002 y 9020, en mm).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1961	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	44.8
1962	---	---	---	87.4	91.2	94.9	---	84.2	79.6	72.1	58.4	---
1963	---	---	---	---	---	86.3	91.1	90.5	78.4	74.4	---	---
1964	---	---	---	---	---	60.7	79.1	78.9	66.2	55.1	---	---
1965	35.8	45.9	71.4	83.2	95.5	84.8	80.6	76.7	72.6	61.0	58.1	49.8
1966	42.3	51.7	67.4	80.1	91.9	85.5	84.5	84.8	73.4	66.9	56.3	47.4
1967	43.0	48.4	70.4	79.4	89.6	87.9	84.3	82.8	71.9	62.3	44.8	38.8
1968	36.7	41.3	58.4	73.2	87.2	87.0	82.2	81.7	73.2	60.7	43.3	42.5
1969	36.9	43.3	65.9	72.8	85.6	99.5	86.9	86.4	73.0	62.9	47.0	44.6
1970	36.6	44.1	67.3	89.1	84.3	84.3	82.5	84.9	72.3	61.9	45.9	45.6
1971	46.1	51.5	69.0	78.8	91.6	82.1	80.1	77.3	71.0	63.4	46.4	43.8
1972	43.3	47.4	60.8	80.8	86.9	84.0	79.9	78.1	68.3	63.9	49.0	42.4
1973	35.5	48.8	69.7	86.5	87.3	83.8	78.6	78.1	70.2	63.9	46.6	41.5
1974	40.6	48.5	60.4	73.4	83.2	82.3	74.3	76.7	68.3	58.4	41.7	42.7
1975	43.3	---	78.1	89.0	87.1	82.6	80.0	80.1	68.6	61.9	47.9	40.8
1976	38.7	45.8	65.1	70.2	82.4	81.3	79.3	75.0	68.4	63.1	46.0	42.3
1977	42.5	46.2	62.1	67.9	81.7	76.8	78.9	79.7	71.6	64.3	49.0	42.4
1978	43.7	47.8	61.9	76.5	85.5	77.6	80.5	75.0	67.6	56.3	47.2	44.8
1979	40.6	47.3	64.5	75.3	82.3	77.8	84.4	79.2	68.6	58.5	42.3	37.6
1980	39.5	37.6	58.5	60.4	75.7	73.4	76.2	70.7	62.6	56.5	43.9	37.5
1981	38.4	40.8	59.9	67.7	85.9	83.2	78.7	79.3	73.0	68.3	45.7	42.6
1982	43.1	43.3	70.3	85.8	89.0	85.7	79.8	76.0	68.7	57.4	44.6	37.8
1983	39.3	42.0	60.1	68.3	89.2	81.9	73.3	73.6	67.5	54.6	43.2	38.9
1984	36.0	40.1	60.8	70.3	68.9	74.1	73.4	69.2	64.6	59.6	42.9	38.6
1985	39.9	46.2	65.9	69.4	81.2	77.0	74.8	74.0	63.1	53.9	40.1	39.6
1986	36.5	43.0	59.9	42.4	74.5	76.8	73.9	73.2	64.8	58.0	36.5	31.6
1987	38.5	37.0	59.3	72.9	81.3	80.4	81.1	75.9	71.4	60.5	47.6	51.4
1988	41.3	50.2	68.2	83.6	83.8	91.6	90.1	85.8	79.0	69.3	43.2	40.8
1989	49.5	59.6	49.2	69.4	80.5	---	---	66.1	83.2	65.4	50.2	44.2
1990	45.6	42.4	61.6	71.2	86.0	82.0	85.8	83.3	76.3	65.0	42.9	39.3
1991	39.5	43.8	68.7	79.7	87.0	86.5	86.1	84.5	77.9	65.3	44.2	---
1992	46.6	55.2	64.6	76.7	83.8	89.9	86.0	83.4	76.2	63.9	50.2	---
1993	39.3	41.4	62.6	75.8	92.0	93.8	89.0	87.1	79.3	---	---	---
1994	46.8	52.0	68.8	---	96.3	88.9	87.0	83.2	75.7	68.8	55.9	---
1995	50.1	55.2	68.8	77.8	---	93.2	89.3	88.8	80.5	64.3	55.7	---
1996	39.2	48.0	69.2	73.1	---	82.7	87.0	83.1	74.4	64.7	48.7	47.1
1997	43.6	46.7	67.8	75.5	79.9	84.7	85.0	80.6	76.3	64.4	52.8	46.8
1998	39.9	39.5	46.9	82.4	59.2	90.0	85.8	84.0	79.4	68.3	59.4	---
1999	32.0	47.9	66.8	---	88.3	81.1	80.5	83.6	71.0	57.9	39.6	---
2000	39.9	---	66.4	75.4	86.0	83.2	80.4	80.7	75.0	63.0	50.9	---
2001	39.7	44.2	65.1	---	85.1	83.2	84.0	82.2	72.8	65.1	NO_D	---
2002	38.0	44.6	71.0	74.6	---	82.5	83.8	79.4	75.3	65.5	52.0	---
2003	40.0	50.8	68.2	---	92.5	86.1	81.2	81.1	77.4	67.1	52.3	31.7
2004	40.4	41.4	66.2	72.4	---	77.5	81.2	82.1	74.0	68.8	48.5	---
2005	40.9	---	74.9	85.0	---	91.7	85.9	84.0	75.8	69.8	51.6	29.1
2006	41.2	49.9	63.1	79.1	84.6	81.0	84.9	83.6	77.1	69.7	---	27.1
2007	43.4	46.2	64.5	67.6	77.6	77.7	79.9	80.0	74.0	54.9	34.9	---
2008	24.2	33.5	57.4	72.5	---	75.8	77.2	76.8	72.8	61.4	42.9	33.8
2009	37.3	42.3	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Balance hídrico en el Parque Nacional Fuentes Brotantes

1967-2008

P ETP T

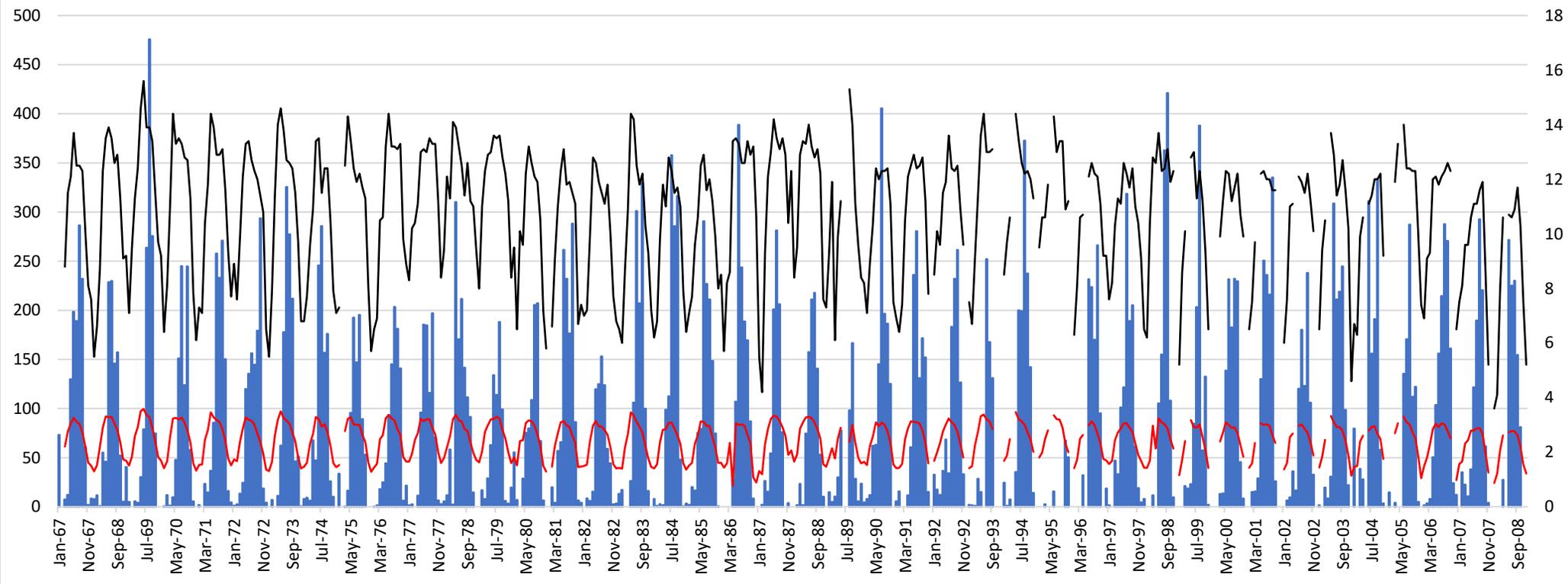


Figura A 1. Relación entre variables climáticas en el polígono del Parque y patrón de comportamiento de la precipitación (P), en mm; temperatura (T), en °C; y evapotranspiración potencial (ETP), en mm.

Balance hídrico en el Parque Nacional Fuentes Brotantes

1961-2008

P ETP T

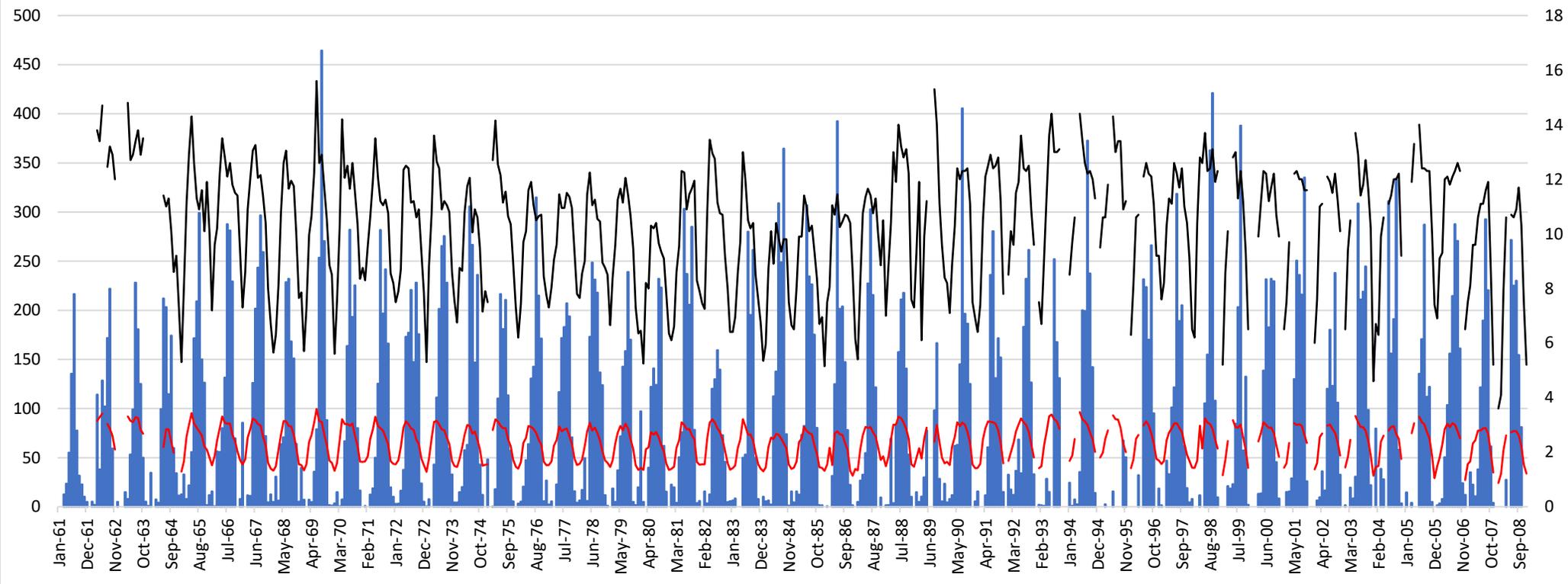


Figura A 2. Relación entre variables climáticas en la microcuenca del Parque y patrón de comportamiento de la precipitación (P), en mm; temperatura (T), en °C; y evapotranspiración potencial (ETP), en mm.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00040

Matrícula: 2161801503

BALANCE HÍDRICO EN EL PARQUE NACIONAL FUENTES BROTTANTES DE TLALPAN

En la Ciudad de México, se presentaron a las 11:00 horas del día 13 del mes de junio del año 2018 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. ARIOSTO AGUILAR CHAVEZ
DR. AGUSTIN FELIPE BREÑA PUYOL
DR. GERARDO FIGUEROA LUCERO

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS (ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE)

DE: DIEGO ANTONIO VALENCIA SOTO

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

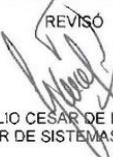
Aprobar

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó al interesado el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.



DIEGO ANTONIO VALENCIA SOTO
ALUMNO

REVISÓ



LIC JULIO CESAR DE LARA ISASSI
DIRECTOR DE SISTEMAS ESOLARES

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI



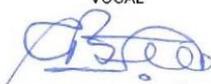
DR. JESUS ALBERTO OCHOA TAPIA

PRESIDENTE



DR. ARIOSTO AGUILAR CHAVEZ

VOCAL



DR. AGUSTIN FELIPE BREÑA PUYOL

SECRETARIO



DR. GERARDO FIGUEROA LUCERO