

Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG).
Revista digital del Programa de Docencia e Investigación en
Sistemas de Información Geográfica (PRODISIG). Universidad
Nacional de Luján, Argentina.

<http://www.revistageosig.wixsite.com/geosig> (ISSN 1852-8031)

Luján, Año 14, Número 24, 2022, Sección I: Artículos. pp. 1-16

RECARGA DE ACUÍFEROS EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA, ESTADO DE MÉXICO (2014-2018). UN ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO

Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo – Brenda Yazmin Reza Curiel – Luis Miguel

Espinosa Rodriguez – José Isabel Juan Pérez

Universidad Autónoma del Estado de México

brenda_reza@hotmail.com

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo calcular la recarga del acuífero en el Parque Otomí – Mexica Estado de México para los años 2014 y 2018, desde un enfoque de servicios ecosistémicos. El método fue aplicado con variables climáticas de temperatura y precipitación del Sistema Meteorológico Nacional: Las etapas metodológicas fueron: 1) Cálculo del volumen anual de la precipitación, con registros medios anuales de precipitación y temperatura; 2) Estimación del escurrimiento superficial con el método del escurrimiento medio; 3) Cálculo del volumen de recarga neta potencial; 4) Estimación del volumen de evapotranspiración. Los resultados para el año 2014, muestran las zonas con mayor recarga del acuífero que se localizan en las altitudes mayores con mayor precipitación; para el año 2018 la mayor recarga del acuífero se localiza en las zonas altas con bosque de pino – encino y las zonas bajas con agricultura de humedad.

Palabras clave: Escurrimiento superficial; Evapotranspiración; Precipitación; Recarga del acuífero; Servicios ecosistémicos.

ABSTRACT

The objective of this research is to calculate the aquifer recharge in the Otomí-Mexica Park for the years 2014 and 2018, from an ecosystem services approach. The method was applied with climatic variables of temperature and precipitation of the National Meteorological System: The methodological stages were: 1) Calculation of the annual volume of precipitation, with mean annual records of precipitation and temperature; 2) Estimation of surface runoff with the mean runoff method; 3) Calculation of the potential net recharge volume; 4) Estimation of the evapotranspiration volume. The results for 2014 show the areas with the highest recharge of the aquifer that are located at the higher altitudes with the highest rainfall; For the year 2018, the greatest recharge

of the aquifer is located in the high areas with pine-oak forest and the low areas with moisture agriculture.

Keywords: Aquifer recharge; Ecosystem services; Evapotranspiration; Precipitation; Surface runoff.

INTRODUCCIÓN

El Parque Otomí – Mexica presenta alteraciones por el manejo inapropiado de los recursos naturales ejemplo de ellos es la explotación y contaminación de los recursos hídricos afectando al servicio ecosistémico de recarga del acuífero.

Los más de 27 millones de personas que habitan las metrópolis de la Ciudad de México y la Ciudad de Toluca están ocasionando la demanda de nuevos espacios para satisfacer las necesidades de vivienda, establecimientos industriales, centros comerciales, espacios recreativos; así como la apertura de zonas agrícolas y de pastoreo para la producción de alimentos, destinados a los asentamientos humanos que convergen con el territorio administrativo del Parque Otomí Mexica. Su ubicación estratégica está generando procesos de cambio de usos del suelo, los cuales impactan de forma negativa sobre los componentes y funciones del parque, trayendo consigo, pérdida de biodiversidad de flora y fauna, contaminación hidrológica y de suelos; todos ellos servicios ecosistémicos vitales para el desarrollo local y regional de los asentamientos humanos.

La sociedad interactúa de manera dinámica con los ecosistemas que se presentan en el territorio lo que da lugar a distintos beneficios o servicios ecosistémicos. Según la SEMARNAT (2019), México representa una parte significativa, que equivale a cerca del 10 % de la biodiversidad global. Es esencial que la población conozca la importancia que tienen los Servicios Ecosistémicos en nuestro entorno para tomar decisiones con opciones informadas y críticas para frenar el impacto ambiental y hacer conciencia en la conservación de los ecosistemas. El beneficio de los servicios ecosistémicos como agentes de resiliencia socioambiental es utilizado para la capacidad de resistir un impacto y permanecer en estado de equilibrio dinámico.

El método empleado fue de Llerena (2003), utilizando información de variables climáticas de temperatura y precipitación del Sistema Meteorológico Nacional para el periodo comprendido 2014 – 2018. Las etapas metodológicas empleadas incluyen: 1) Estimación de la precipitación se realizó por medio de álgebra de mapas en el Sistema de Información Geográfica (SIG) Arc Map 10.4 propuesta por Aparicio (2009), para el cálculo se utilizaron promedios medios anuales. 2) Cálculo del volumen anual de la precipitación, se ubicaron las estaciones climatológicas dentro del parque con registros medios anuales de precipitación y temperatura; se interpolaron los valores anuales de precipitación, para obtener un raster para el comportamiento promedio de la precipitación en el parque. El cálculo del volumen de lluvia se obtiene a partir del raster de precipitación multiplicada por el área del parque. 3) Estimación del escurrimiento superficial, que se estimó con el método del escurrimiento medio (SARH-CP, 1982), el cual requiere de los datos de la lluvia media anual en el área del parque. El coeficiente de escurrimiento se obtuvo del Apéndice Normativo A (A.1.2.1.2) de la NOM-011-CNA-2000 (SEMARNAT, 2002). 4) Estimación del volumen de recarga neta potencial, que se calculó a partir del volumen total infiltrado y el volumen evapotranspirado; 5)

Estimación del volumen de evapotranspiración, que se calculó a partir del volumen evapotranspirado, el área del parque y la evapotranspiración anual real.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para conocer la importancia que tiene el Parque Otomí – Mexica como zona de recarga del acuífero y regulación de ecosistemas se estimó el volumen anual de agua (m^3) que escurre y se infiltra, comparando áreas dentro del área natural protegida, para lo que se generó su polígono respectivo. Para el cálculo se utilizaron los promedios medios anuales reportados en el área. Se usó la metodología del balance hídrico –ecuaciones (1) y (2) propuesta por Llerena (2003).

$$P = Q + ET \quad (1)$$

Donde:

P = Precipitación (m^3)

Q = Escurrimiento (m^3)

ET = Evapotranspiración (m^3)

$$Q = Es + Essl + Essr + Est \quad (2)$$

Donde:

Es = Escurrimiento superficial (m^3)

Essl = Escurrimiento subsuperficial lento (m^3)

Essr = Escurrimiento subsuperficial rápido (m^3)

Est = Escurrimiento subterráneo (m^3)

El escurrimiento subsuperficial (Ess) se dividió en escurrimiento subsuperficial rápido y lento. El primero generalmente emerge a la superficie y forma los llamados manantiales; el lento se une al escurrimiento subterráneo (Est) y conforman el volumen de infiltración (In) que no es evapotranspirado y se le conoce como volumen de recarga neta potencial (FIRCO, 2002). Sustituyendo lo anterior en la ecuación (1) se obtiene la ecuación (3).

$$P = Es + In + ET \quad (3)$$

Estimación de la Precipitación

La estimación del volumen anual precipitado se realizó mediante álgebra de mapas en el sistema de información geográfica (SIG) ArcMap 10.4, con base en las ecuaciones propuestas por (Aparicio, 2009) para datos de precipitación media anual (ecuación 4).

$$VP = P * AC \quad (4)$$

Donde:

VP = Volumen anual de precipitación (m^3)

P = Precipitación media anual (m)

AC = Área del parque (m^2)

Para determinar VP se ubicaron las estaciones climatológicas (figura 2) con influencia en el área natural protegida con registro de medias mensuales y anuales de precipitación y temperatura. Se interpolaron los valores anuales de precipitación (m) para obtener un raster que refleja el comportamiento promedio de la precipitación en la cuenca. El cálculo del volumen de lluvia se obtuvo a partir del raster precipitación multiplicada por el área del parque, tanto dentro como fuera del área natural protegida.

Estimación del Escurrimiento Superficial

El escurrimiento superficial se estimó con el método del escurrimiento medio (SARH-CP, 1982), el cual requiere de la lluvia media anual (m) en el área del parque, el área de drenaje y su coeficiente de escurrimiento, como se muestra en la ecuación (5).

$$Es = AC * C * P \quad (5)$$

Donde:

Es = Volumen promedio que puede escurrir (m³)

AC = Área del parque (m²)

C = Coeficiente de escurrimiento, con valores adimensionales entre 0,1 - 1,0

P = Precipitación media anual en la cuenca (m).

La metodología utilizada para determinar el coeficiente de escurrimiento es la que se presenta en el Apéndice Normativo A (A.1.2.1.2) de la NOM-011-CNA-2000 (SEMARNAT, 2002) y se expresa en las ecuaciones (6) y (7) y en las tablas 1 y 2.

$$C = k * \frac{P-250}{2000} + \frac{k-0.15}{1.50} \quad \text{cuando } k > 0.15 \quad (6)$$

$$C = k * \frac{P-250}{2000} \quad \text{cuando } k \leq 0.15 \quad (7)$$

Donde:

k =Parámetro que depende del tipo y uso del suelo

P = Precipitación anual o mensual (mm)

El factor k refleja la capacidad del suelo para resistir al desprendimiento de partículas por efecto de la lluvia, es decir, mide la energía necesaria para que, conforme a las condiciones físicas del suelo y su tipo de cobertura, ocurra desprendimiento de partículas. Para calcular el valor de k, y generar un mapa con estos valores, primero se determinaron los mapas de uso de suelo. El uso de suelo se digitalizó a través de la fotointerpretación de imágenes de satélite con el software Google Earth V.5.0, los polígonos generados en formato kml fueron exportados a un formato shape (shp) para su manipulación. Posteriormente se les asignó los valores de k a las áreas con características homogéneas (Tabla 1 y 2).

Tabla 1. Valores k que son utilizados en México.

Uso de suelo o cubierta vegetal	Tipo de suelo		
	A	B	C
Pastizal	0,14	0,2	0,28
Bosque	0,07	0,16	0,24
Asentamientos humanos	0,26	0,29	0,32
Agricultura	0,24	0,27	0,3

Fuente: Elaboración propia con base en la normatividad conforme al Método de la SARH-CP, 1982.

Tabla 2. Tipos de suelo y sus características principales.

Tipo de Suelo	Características del suelo
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos.
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los suelos A; terrenos migajosos.
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas.

Fuente: Elaboración propia con base en la normatividad conforme al Método de la SARH-CP, 1982.

Para la generación del mapa de los tipos de suelo se utilizó el conjunto de datos vectoriales de suelo de la carta edafológica 1:250 000 del INEGI, Serie IV y VI.

Estimación del Volumen de Recarga Neta Potencial

El volumen de la recarga neta potencial o infiltración neta potencial, se estimó con la ecuación (8).

$$In = It - ET \quad (8)$$

Donde:

In = Volumen infiltrado (m³)

It = Volumen total infiltrado (m³)

ET = Volumen evapotranspirado (m³)

El volumen total infiltrado anual puede estimarse como una función del coeficiente de escurrimiento y de la precipitación media anual, de acuerdo con la ecuación (9).

$$It = (I-C) * P * AC \quad (9)$$

Donde:

I_t = Volumen total infiltrado (m^3)

P = Precipitación media anual (m)

AC = Área del parque (m^2)

C = coeficiente de escurrimiento

Estimación del volumen de evapotranspiración

El volumen anual de evapotranspiración, se obtuvo con la ecuación (10).

$$ET = AC * ETR \quad (10)$$

Donde:

ET = Volumen evapotranspirado (m^3)

AC = Área del parque (m^2)

ETR = Evapotranspiración anual real (m)

Para fines prácticos la determinación de la evapotranspiración anual real se utilizó el método de Turc, quien propone una fórmula simple en función de la precipitación y la temperatura del lugar de estudio (ecuación 11).

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.90 + (P/L)^2}} \quad (11)$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración anual real (m)

P = Precipitación media anual (m)

L = Parámetro que está en función de la temperatura media conforme con la ecuación (12).

$$L = 300 + 25 * T + 0.05 * T^3 \quad (12)$$

Donde:

P = Precipitación media anual (mm)

T = Temperatura media anual ($^{\circ}C$)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados obtenidos sobre la recarga del acuífero del Parque Otomí Mexica, para los años 2014 y 2018.

Estimación de la precipitación en el Parque Otomí Mexica 2014 y 2018

Los datos de la precipitación del parque se obtuvieron de ocho estaciones meteorológicas ubicadas dentro del área de estudio para dos años 2014 y 2018, de la página del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), las cuales se observan en la siguiente (Tabla 3).

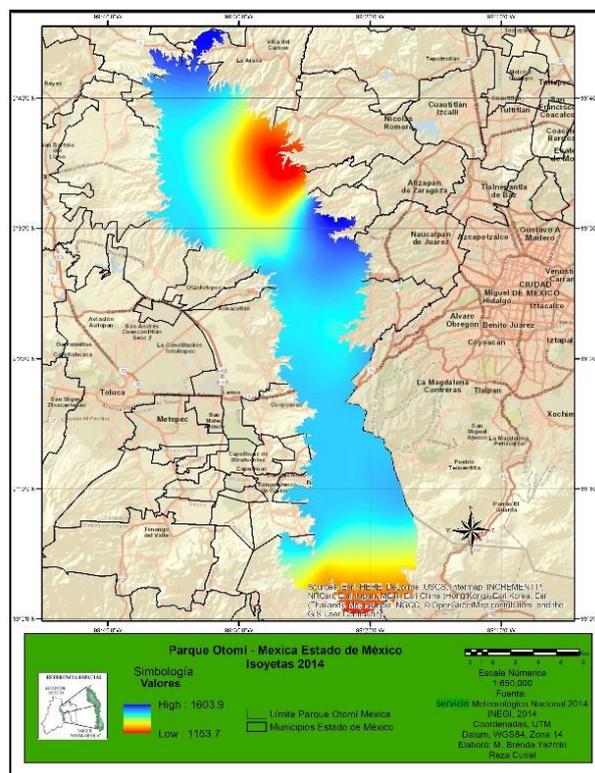
Tabla 3. Precipitación Media Anual (PMA) en el Parque Otomí – Mexica, Estado de México 2014 – 2018.

Estaciones Meteorológicas No. clave	Estaciones Meteorológicas Nombre	Municipio	PMA 2014 (mm)	PMA 2018 (mm)
15037	Jiquipilco	Jiquipilco	1,423.4	1,045.9
15045	La Marquesa	Ocoyoacac	1,447.8	1,932.0
15057	Mimiapan	Xonacatlan	1,461.8	1,068.8
15095	San Luis Ayucan	Jilotzingo	1,583.3	1,390.0
15114	Santiago Tlazala	Isidro Fabela	1,153.7	1,315.9
15231	Presa Iturbide	Isidro Fabela	1,438.6	1,728.0
15298	Santa Cruz Tezontepec E-21	Ocuilan	1,175.3	1,020.7
15394	Monte de Peña	Villa del Carbón	1,603.9	1,297.5

Fuente: Elaboración propia con base en (SMN, 2014 – 2018).

En la Figura 1, para el año 2014, indica las áreas homogéneas de precipitación en el parque. Las mayores precipitaciones se localizan en los municipios Villa del Carbón, Jilotzngo y Naucalpan de Juárez ubicados al noroeste y centro del parque. Las menores precipitaciones se localizan en el municipio de Nicolás Romero, Isidro Fabela ubicados al noreste y en el municipio de Ocuilan ubicados en el extremo sur de la zona estudiada.

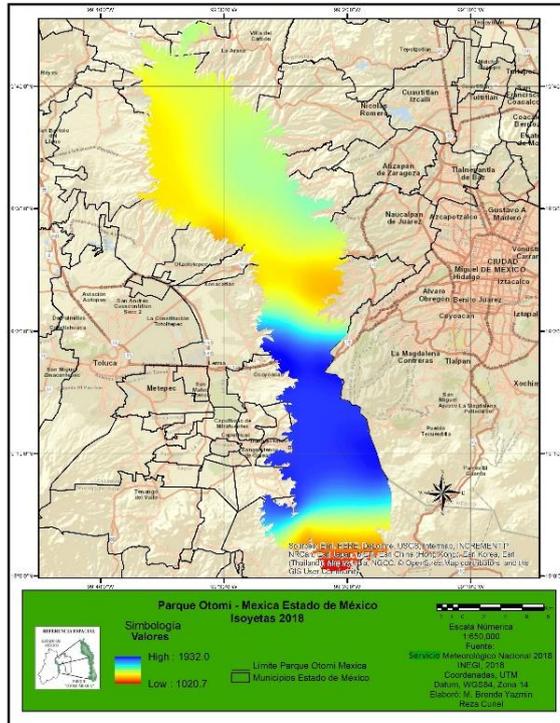
Figura 1. Isoyetas Parque Otomí – Mexica, Estado de México 2014.



Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2014) y (SNM, 2014).

En la Figura 2, se observa para el año 2018, las áreas homogéneas de precipitación en el parque. Las mayores precipitaciones se presentaron en los municipios Ocoyoacac, Tianguistenco y Xalatlaco que se localizan en la parte media y hacia el sur de la zona estudiada. Las menores precipitaciones se localizan en el municipio de Ocuilan ubicado en el extremo sur del parque.

Figura 2. Isoyetas Parque Otomí – Mexica Estado de México 2018.



Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2018) y (SMN, 2018).

Los datos de temperatura del parque se obtuvieron de ocho estaciones meteorológicas ubicadas dentro del área de estudio para los años 2014 y 2018, de la página del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), los cuales se observan en la siguiente (Tabla 4).

Tabla 4. Temperatura media anual (TMA) en el Parque Otomí – Mexica, Estado de México 2014 – 2018.

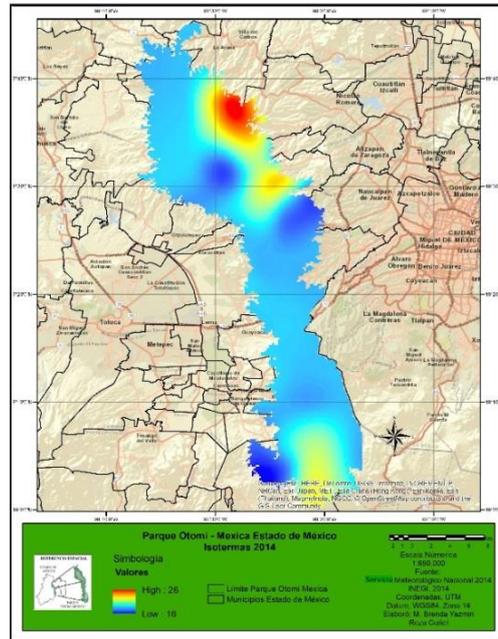
Estaciones Meteorológicas No. clave	Estaciones Meteorológicas Nombre	Municipio	TMA 2014	TMA 2018
15037	Jiquipilco	Jiquipilco	18	23
15045	La Marquesa	Ocoyoacac	19	20
15057	Mimiapan	Xonacatlan	16	21
15095	San Luis Ayucan	Jilotzingo	24	28
15114	Santiago Tlazala	Isidro Fabela	21	22
15231	Presa Iturbide	Isidro Fabela	20	22
15298	Santa Cruz Tezontepec E-21	Ocuilan	24	28
15394	Monte de Peña	Villa del Carbón	26	20

Fuente: Elaboración propia con base en (SMN, 2014-2018).

En la Figura 3, se observa que para el año 2014, los municipios que mostraron mayores isotermas fueron Nicolás Romero y Villa del Carbón, que se localizan al noreste del

parque, los municipios con menores isotermas fueron Otzolotepec y Naucalpan de Juárez que se localizan al noroeste y centro del parque, y el municipio de Ocuilan localizado al suroeste.

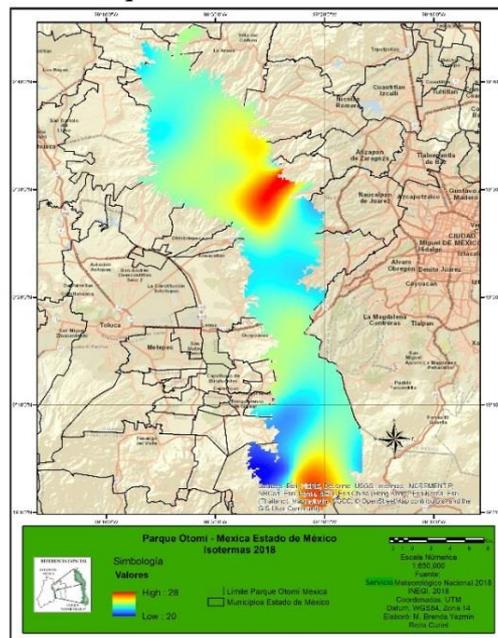
Figura 3. Isotermas Parque Otomí – Mexica Estado de México 2014.



Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2014) y (SMN, 2014).

En la figura 4 se aprecia que para el año 2018, los municipios con mayores isotermas se localizan en Jilotzingo ubicado al noreste del parque y Ocuilan ubicado en el extremo sur del parque, mientras que los municipios con menores isotermas son Ocuilan y Tianguistenco ubicados al suroeste del parque.

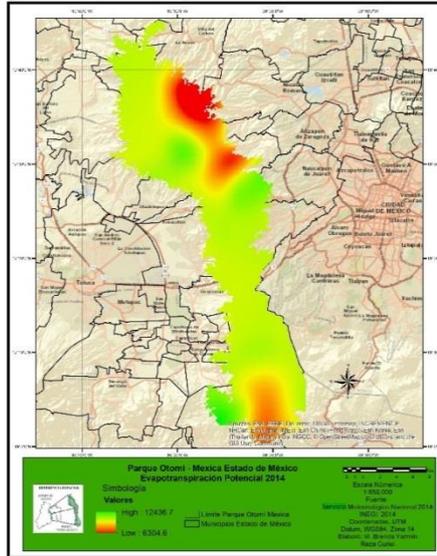
Figura 4. Isotermas Parque Otomí – Mexica Estado de México 2018.



Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2018) y (SMN, 2018).

En la Figura 5, se observa que para el año 2014, la mayor evapotranspiración se presentó en los municipios de Oztolotepec y Naucalpan de Juárez, que se localizan al noroeste y centro del parque y en el municipio de Ocuilan ubicado al suroeste del parque. La menor evapotranspiración se observa en los municipios de Villa del Carbón, Nicolas Romero, Isidro Fabela y Jilotzingo ubicados al noreste del parque y en el municipio de Ocuilan ubicado al sureste del parque.

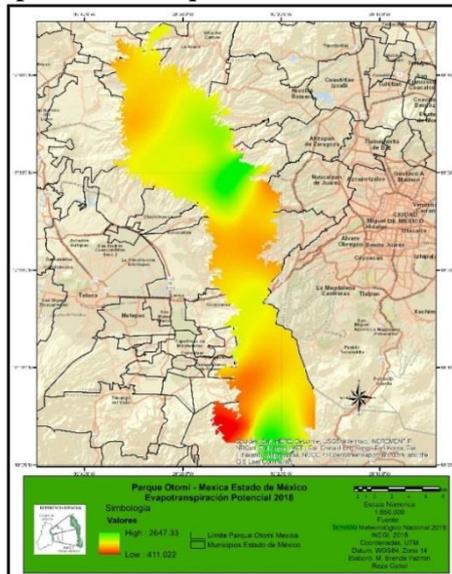
Figura 5. Evapotranspiración. Parque Otomí – Mexica Estado de México 2014.



Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2014) y (SMN, 2014).

En la figura 6 puede apreciarse que para el año 2018, la mayor evapotranspiración se localizó en el municipio de Ocuilan ubicado al suroeste del parque. La menor evapotranspiración se observa en los municipios de Jilotzingo e Isidro Fabela ubicados al noreste y Ocuilan ubicado al sureste del parque.

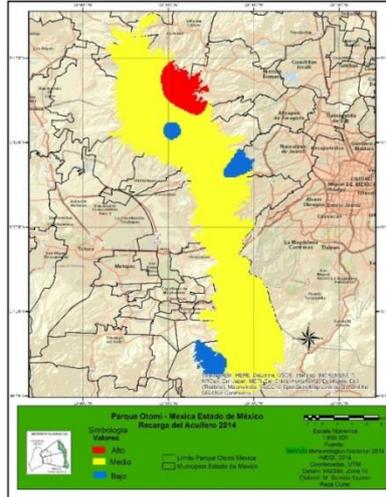
Figura 6. Evapotranspiración. Parque Otomí – Mexica Estado de México 2018.



Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2018) y (SMN, 2018).

En la Figura 7, puede apreciarse que para el año 2014 la mayor recarga del acuífero se localizó en los municipios de Villa del Carbón y Nicolás Romero ubicados al suroeste del parque. La menor recarga del acuífero se presentó en los municipios de Ocuilan ubicado al extremo sur, Naucalpan de Juárez e Isidro Fabela ubicados al noreste del parque, predominando la recarga media en la mayor parte del parque.

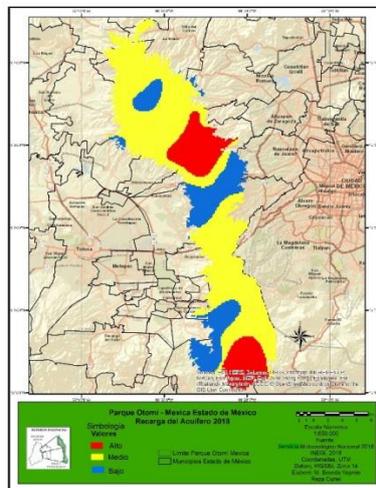
Figura 7. Recarga del acuífero. Parque Otomí – Mexica 2014.



Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2014) y (SMN, 2014).

En la figura 8 se aprecia que para el año 2018, la mayor recarga del acuífero se localizó en el municipio de Ocuilan ubicado en el extremo sur del parque, además de los municipios de Jilotzingo e Isidro Fabela. La menor recarga del acuífero se presentó en los municipios de Jiquipilco ubicado al noreste del parque; Lerma y Naucalpan de Juárez ubicado en el centro del parque; Xalatlaco, Tianguistenco y Ocuilan ubicados al suroeste del parque. Los valores medios para la recarga del acuífero se observan en los siguientes municipios; Morelos, Villa del Carbón, Nicolás Romero, Temoaya, Ocotlán, Xonacatlan, Isidro Fabela ubicados al norte del área de estudio; Lerma, Huixquilucan, Ocoyoacac, Tianguistenco, Xalatlaco y Ocuilan ubicados al sur del parque.

Figura 8. Recarga del acuífero. Parque Otomí – Mexica Estado de México 2018.



Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2018) y (SMN, 2018).

El análisis estadístico comparativo entre los años 2014 y 2018 (Tabla 5), muestra el cálculo del balance hídrico en el Parque Otomí Mexica, las variables analizadas precipitación media anual, temperatura media anual y evapotranspiración potencial para los años 2014 y 2018, muestran que existe una disminución en la precipitación media anual de 61.12 mm/año, con una disminución en la temperatura de 2 °C para el año 2018 y disminución en la evapotranspiración de 29.56 mm/año.

Tabla 5. Cálculo del balance hídrico del Parque Otomí Mexica.

Variables	Parque Otomí – Mexica 2014	Parque Otomí – Mexica 2018
Precipitación media anual	1,410.97 mm	1,349.85 mm
Temperatura media anual	21 °C	23 °C
Evapotranspiración Potencial	715.98 mm	686.42 mm

Fuente: Elaboración propia con base en (SMN, 2014 – 2018).

En el análisis comparativo geoespacial entre los años 2014 y 2018 se observa que el exceso hídrico aumentó para el año 2018 en 14,764.79 has. lo que corresponde al 13.84 % del área. El déficit hídrico también aumentó en el año 2018 en 11,847.49 has. lo que corresponde al 11.1 % de la superficie del parque. Sin embargo, del 2014 al 2018 la estabilidad hídrica disminuyó en 26,625.02 has. que corresponden al 24.94 % del área. Por tanto, para el año 2018 se observa mayor exceso hídrico y mayor déficit hídrico y para el año 2014 mayor estabilidad hídrica, (Tabla 6).

Tabla 6. Balance hídrico del Parque Otomí Mexica.

	Exceso hídrico has.	Exceso hídrico %	Déficit hídrico has.	Déficit hídrico %	Estabilidad hídrica has.	Estabilidad hídrica %
Año 2014	6,766.89	6.34	6,894.59	6.46	93,046.98	87.19
Año 2018	21,531.68	20.18	18,742.08	17.56	66,421.96	62.25

Fuente: Elaboración propia con base en (SMN, 2014 – 2018).

La recarga del acuífero en el Parque es de vital importancia para la preservación del Área Natural Protegida y para la calidad de vida de la población de las 166 localidades (15 de ellas urbanas) al interior del ANP; y las ubicadas en su zona de influencia. El proceso de recarga se genera a partir de la infiltración y escorrentía superficial, esto es la cantidad de agua que entra en la zona saturada y que pasa a formar parte de las reservas subterráneas; lo que favorece el potencial de servicios ecosistémicos del Parque. Estos procesos se ven afectados por los fenómenos meteorológicos que se presentaron durante el período estudiado.

El Parque Otomí Mexica se vio afectado por siete ciclones para el periodo de estudio 2014 - 2018 entre ellos se destacan para el año 2014 el ciclón Dolly, con una precipitación de 884 mm. anuales; para el año 2015 los ciclones Carlos y Patricia, con una precipitación de 858.5 mm. En el año 2016 los ciclones fueron Danielle y Earl, los cuales generaron una precipitación anual de 915 mm. En el año 2017, los ciclones Beatriz y Franklin, contribuyeron con una precipitación de 865.3 mm.

Entre otros fenómenos climatológicos, el año 2014 se caracterizó por ser neutral sin presencia de El Niño y La Niña, sin embargo, en verano se presentó una canícula débil (con disminución de lluvia) del 0 al 10 % que tuvo una duración de uno a dos meses en porciones del Estado de México.

De enero a marzo del 2015 se formó El Niño con intensidad débil. El Niño incrementó su intensidad pasando a ser moderado el 15 de junio y fuerte a partir del 1 de septiembre del 2015. En verano se presentó una canícula moderada del 11 al 15 % la cual se prolongó hasta por tres meses en pequeñas porciones del Estado de México.

El año 2016, se considera como el más cálido, registrando que El Niño finalizó en la primavera y dio lugar a un evento La Niña débil a finales del año. En verano (junio – agosto 2016) se presentaron anomalías de Radiación Saliente de Onda Larga (OLR) que gradualmente se fueron desplazando hacia el norte del país en los meses de julio y agosto por las lluvias asociadas al huracán de Norteamérica. En la Península de Baja California y sobre la región del Golfo de México persistieron anomalías positivas de OLR.

Para el año 2017, de enero a junio las condiciones del Estatus del Niño Oscilación del Sur (ENOS) fueron neutrales, es decir, sin condiciones de El Niño y La Niña a lo largo del pacífico ecuatorial. Durante el mes de octubre los valores de la temperatura de la superficie del mar (TSM) comenzaron a desarrollar condiciones de la Niña débil en el Pacífico Ecuatorial; en tanto que las condiciones atmosféricas fueron favorables para La Niña, con vientos alisios intensos y mayor actividad convectiva en el Pacífico Occidental; mientras que en el Pacífico Oriental la actividad convectiva y las lluvias estuvieron por debajo de lo normal. En verano (junio-agosto 2017) se presentaron huracanes que se mantuvieron cerca de las costas mexicanas; y se observaron anomalías negativas de la radiación saliente de onda larga (OLR) sobre los estados del sur del país, en la vertiente del Pacífico y en la Península de Yucatán debido al paso de ondas tropicales en el mes de junio.

Para el año 2018, en los primeros meses se presentaron condiciones de La Niña en el Pacífico Ecuatorial. A partir de mediados de abril se transitó a condiciones neutrales, es decir, sin condiciones de El Niño o la Niña, que se mantuvieron de abril hasta diciembre. Sin embargo, en verano (junio – agosto 2018), sobre el noroeste de México se observaron anomalías negativas de la radiación saliente de onda larga (OLR) asociadas a nubosidad y precipitaciones características del huracán de Norteamérica. En los estados del noreste, centro y sur de México se presentó la canícula con lluvias por debajo del promedio y temperaturas por arriba del promedio en estas regiones. En México, el trimestre se caracterizó con lluvias por arriba del promedio en la mayor parte del territorio nacional asociada a la actividad ciclónica, principalmente del Pacífico Oriental, y en menor medida, por el inicio de la temporada de sistemas frontales.

Debido a su ubicación geográfica con coordenadas geográficas extremas siguientes: 18° 59' 59.57'' - 19° 45' 19.34'' de latitud norte y 99° 20' 21.75'' - 99° 32' 01.41'' de longitud oeste; la precipitación y temperatura en el área de estudio están influenciados por los ciclones antes mencionados; y de igual manera alcanzan a llegar rachas de fenómenos como lo son El Niño y La Niña, así como otros fenómenos climatológicos.

Debido a todas estas condiciones, para el año 2014 la zona de mayor recarga del acuífero se localizó en las áreas con mayores altitudes del parque, donde se registró mayor precipitación, temperatura y evapotranspiración; mientras que para el año 2018 la mayor recarga del acuífero se localizó en áreas altas y bajas de la zona de estudio registrando en estas zonas mayor precipitación, temperatura y evapotranspiración, (figura 7 y 8). En estas áreas presentaron usos del suelo con agricultura de humedad y bosque de pino – encino.

CONSIDERACIONES FINALES

La recarga del acuífero permitió estudiar el comportamiento de los procesos hidrológicos y la afectación que se produce en el rendimiento de agua, localizando las áreas secas y húmedas del parque; por lo que se concluye que durante las estaciones de estiaje se produce déficit de agua en los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril; mientras que los meses restantes favorecen la demanda de la evapotranspiración, siendo junio el mes con mayor precipitación en el parque.

La recarga del acuífero se vio afectado por los fenómenos meteorológicos que se presentaron durante el periodo de estudio los cuales fueron: ciclones, El Niño y la Niña. Haciendo un análisis el municipio de Ocuilan ubicado en el extremo sur del parque prevaleció con menor isoyetas, isoterma y evapotranspiración esto trajo como consecuencia cambios en la cobertura terrestre ocasionando que la infiltración tienda a disminuir obteniendo menor recarga del acuífero en esta área del parque.

Analizando el comportamiento del balance hídrico para el año 2014 hay menor exceso hídrico y déficit hídrico lo que da como consecuencia mayor estabilidad hídrica, sin embargo, para el año 2018 se observa que hay mayor exceso hídrico y déficit hídrico lo que da como resultado menor estabilidad hídrica para dicho periodo.

La recarga del acuífero es una fuente confiable de ingresos de agua durante todo el año que ayuda a mantener el flujo de agua en épocas secas para la conservación de los ecosistemas en el parque Otomí Mexica, además de que previene erosión y reduce los riesgos de inundaciones, así también facilita la regulación de los micro-climas y mantiene los niveles de aguas subterráneas. Las zonas de recarga ayudan en la purificación del agua que pasa a través del suelo.

Esta investigación radica en la importancia de la recarga del acuífero para la toma de decisiones por parte de las autoridades correspondientes para tomar acciones en cuanto a la restauración y preservación del parque Otomí Mexica.

Con base en los resultados obtenidos se recomienda implementar en la zona de estudio actividades de conservación y reforestación para que la evapotranspiración aumente y haya una mayor recarga del acuífero.

BIBLIOGRAFÍA

Aparicio F. J. (2009). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa. México.

Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) (2017). Manual de Organización General del Fideicomiso de Riesgo Compartido. México, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), disponible en: https://normateca.agricultura.gob.mx/sites/default/files/normateca/Documentos/manual_de_organizacion_general_firco.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2014) División Política del Estado de México. México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2018) División Política del Estado de México. México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>

Llerena C. (2003). Servicios ambientales de las cuencas y producción de agua. Conceptos, valoración, experiencias y sus posibilidades de aplicación en el Perú. Arequipa, Perú, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina, disponible en: <https://docplayer.es/38310600-Servicios-ambientales-de-las-cuencas-y-produccion-de-agua-conceptos-valoracion-experiencias-y-sus-posibilidades-de-aplicacion-en-el-peru.html>

SARH-CP (1982). *Manual de Conservación del Suelo y del Agua*. Colegio de Postgraduados. Estado de México, Chapingo.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000. México, Distrito Federal Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, disponible en: <http://siga.jalisco.gob.mx/Assets/documentos/normatividad/nom011cna2000.htm>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2019). Biodiversidad, México y su diversidad biológica. México, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, disponible en: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap4.html#tema1>

Sistema Meteorológico Nacional, (SMN) (2014) Resúmenes Mensuales de Temperatura y Lluvia. México, Sistema Meteorológico Nacional, disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

Sistema Meteorológico Nacional, (SMN) (2018) Resúmenes Mensuales de Temperatura y Lluvia. México, Sistema Meteorológico Nacional, disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvia>

© Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo, Brenda Yazmin Reza Curiel, Luis Miguel Espinosa Rodríguez, José Isabel Juan Pérez.

Gutiérrez, J.; Reza, B.; Espinosa L.; Juan Pérez, J. (2022). Recarga de acuíferos en el Parque Otomí Mexica Estado de México (2014-2018). Un análisis espacio temporal del servicio ecosistémico. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GeoSIG)*. 14(24) Sección I:1-16

On-line: www.revistageosig.wixsite.com/geosig

Recibido: 11 de abril de 2022

Aceptado: 20 de agosto de 2022