





DOI: 10.24850/j-tyca-2024-04-07

Artículos

Relación entre población y nivel estático: acuíferos Alto Atoyac y Huamantla, México

Relationship between population and water table: Alto Atoyac and Huamantla aquifers, Mexico

Hipólito Muñoz-Nava¹, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8792-2208

Jenny Jaret Torres-Luna², ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3087-4341

¹Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Tlaxcala, México, hipolito78@hotmail.com

²Gestora ambiental, Tlaxcala, México, jungsjenny@gmail.com

Autor para correspondencia: Hipólito Muñoz-Nava, hipolito78@hotmail.com

Resumen

En el área del estratovolcán La Malinche la fuente de agua es el acuífero. El objetivo de este trabajo fue analizar la relación entre población y niveles estáticos (NE) en los acuíferos Alto Atoyac y Huamantla. Se utilizaron las siguientes variables: número de habitantes (NH), tasas de







cambio anual de NE, porcentajes de cambio anual de NE (PCA_{NE}), tendencias de NE y NH. Los pozos se agruparon con análisis de componentes principales (ACP). Los PCA_{NE} se compararon con un diseño factorial. La tasa de cambio anual promedio de NE fue igual a -0.159 $m \cdot a\tilde{n}o^{-1}$ y 6.7% de PCA_{NE} . Las tasas de cambio de NE fueron estadísticamente diferentes entre los acuíferos. La relación entre NE y NH que resalta fue igual a -16.5 cm·hab⁻¹. Las tendencias de NH fueron mayores que las tendencias de NE. El diseño factorial arrojó que entre las temporadas de lluvia y estiaje, los PCA_{NE} no tuvieron diferencias significativas, pero entre los tipos de concesión sí los hubo. El ACP correlacionó 51 pozos con una componente. En resumen, este estudio reveló que los PCA_{NE} son mayores en las zonas agrícolas y urbanas. El NEen los pozos de uso industrial se abate cinco veces más que en los de uso público. La relación entre población y NE fue más clara en la montaña que en los valles. El ACP mostró que los pozos de los alrededores de La Malinche se diferencian de los demás del área de estudio.

Palabras clave: uso de agua, regresión lineal, componentes principales.

Abstract

In the area of the La Malinche stratovolcano the source of water is aquifer. The objective of this work was to analyze the relationship between population and water table (WT) in the Alto Atoyac and Huamantla aquifers. The following variables were used: Number of inhabitants (NH), WT annual change rates, WT annual percentage changes (APC_{WT}) , and trends of WT and NH. Wells were grouped with principal components analysis (PCA). The APC_{WT} were compared with a factorial design. The WT







annual change rates and APC_{WT} were -0.159 m·year⁻¹ and 6.7%, respectively. The rates of change of WT, were statistically different between aquifers. The relationship between WT and NH that stands out was equal to -16.5 cm·hab⁻¹. NH trends were greater than WT trends. The factorial design showed that between the rainy and the low water seasons there were no significant differences, but between concession type there were. The PCA correlated 51 wells with one component. In summary, this study revealed that the APC_{WT} are higher in agricultural and urban areas, the WT one in the wells of industrial use is reduced five times more than in those of public use. The relationship between population and WT was clearer in the mountains than in the valleys. The PCA showed that the wells around La Malinche differ from others in the study area.

Keywords: Water use, lineal regression, principal components.

Recibido: 17/11/2022

Aceptado: 24/02/2023

Publicado Online: 15/03/2023

Introducción

El agua es un recurso natural insustituible para los seres vivos. El ser humano requiere de agua para uso público, agrícola, comercial o industrial. Las fuentes del vital líquido son los cuerpos de agua superficiales, las aguas subterráneas, la captación de agua pluvial y agua







residual tratada para usos que no requieren agua con calidad predeterminada.

A través de la historia, el agua subterránea ha sido una fuente primordial para sostener a la humanidad (Fienen & Arshad, 2016). La disponibilidad de agua subterránea está disminuyendo conforme las entradas bajan y las salidas de agua del acuífero se incrementan por extracción intensiva, especialmente en regiones agrícolas áridas y centros urbanos (Lall, Josset, & Russo, 2020). En regiones tropicales de África, Sudamérica y Centroamérica, la extracción de agua subterránea es escasa, porque las aguas superficiales son abundantes y no se requiere de irrigación en la agricultura (Margat & van der Gun, 2013).

La extracción global de agua subterránea es de 650 km³-año-¹ (Margat & van der Gun, 2013); el 70% del agua subterránea se usa para la agricultura (Fienen & Arshad, 2016), y el 24% en la industria (Valencia, Mendoza, Vargas, & Domínguez, 2006). A nivel global, el agua subterránea aporta en promedio el 20% para consumo humano y en algunos países puede ser el 90% (Jakeman *et al.*, 2016). El 50% del agua consumida en las zonas urbanas proviene de fuentes subterráneas (Fienen & Arshad, 2016) y en las zonas rurales aumenta a un valor de 66% (Carrard, Foster, & Willetts, 2019).

En el año 1910, México tenía una disponibilidad de agua de más de 31 000 m³·hab⁻¹·año⁻¹; en 1950 disminuyó a 18 000 m³·hab⁻¹·año⁻¹; el día de hoy es de aproximadamente 3 600 m³·hab⁻¹·año⁻¹ (Palma, 2020). En la actualidad (año 2021), se desconoce con una aproximación aceptable cuántos mexicanos viven escasez extrema de agua. En ciudades del norte del país (p. ej., la ciudad de Monterrey), esta situación







se hizo evidente en 2022. Breña y Breña (2007) reportaron que, en 2004, 35 millones de mexicanos se encontraban en escasez extrema de agua y 43 millones con disponibilidad baja.

Anualmente, las precipitaciones pluviales aportan a México unos 1 449.5 km³ de agua. De este volumen, se estima que la evapotranspiración representa el 72.1%; el 21.4% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.4% (92.544 km³) se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos (Conagua, 2018).

En México, el 39.1% de las fuentes de agua son subterráneas y el 60.9% son superficiales (ríos, arroyos y lagos) (Conagua, 2018; Conagua, 2019); este nivel de extracción coloca a México como el sexto país consumidor de agua subterránea del mundo (Margat & van der Gun, 2013). En la literatura se reportan valores de extracción de agua subterránea para México de 27.4 a 25 km³·año-¹ (Margat & van der Gun, 2013; Fienen & Arshad, 2016). De este volumen, de 22 a 64% se usa para abastecimiento público; de 33 a 72% para irrigación en la agricultura, y de 6 a 24% para la industria (Valencia *et al.*, 2006; Margat & van der Gun, 2013). Sin embargo, Jiménez (2008) reporta que los acuíferos aportan cerca de 75% de agua para consumo de la población, más aún, para la Zona Metropolitana del Valle de México, este valor aumenta a 80.1% y solo en el 19.9% la fuente es de cuerpos de agua superficiales (National Research Council, 1995).

Los principales focos rojos de la disminución del nivel de agua subterránea se observan en las partes áridas y semiáridas del mundo, como resultado principalmente de la alta densidad de población, fuerte dependencia del agua subterránea, pocas y fuertes precipitaciones que

276







tienen bajas tasas de recarga natural que escurren rápidamente (Fienen & Arshad, 2016). Esto conlleva a que en algunos países los acuíferos pueden estar sobrexplotados, como es el caso de México (Jakeman *et al.*, 2016).

En México hay 653 acuíferos, 105 de estos (16.1%) fueron colocados en la categoría de sobreexplotados a finales del año 2017 (Conagua, 2018). Los acuíferos Alto Atoyac y Huamantla, que corresponden al área de estudio de este trabajo, están fuera de esta clasificación. Los datos reportados en la literatura (Conagua, 2015a; Conagua, 2020a) indican que la disponibilidad de agua en el acuífero Alto Atoyac disminuyó 37.1%, pasando de 0.0467 km³ en 2013 a 0.0294 km³ en 2020. Por su parte, la disponibilidad de agua en el acuífero Huamantla aumentó 12.9%, pasando de 0.0139 km³ en 2002 a 0.0157 km³ en 2020 (Conagua, 2015b; Conagua, 2020b). En el escenario del área del volcán La Malinche, el agua subterránea es la fuente preponderante para uso público (ciudad de Apizaco, zona metropolitana de Puebla y Tlaxcala); para la agricultura intensiva de riego (valle de Huamantla), y para la industria (parques y corredores industriales), lo cual se debe a que en esta área no hay fuentes superficiales importantes de agua. El objetivo del presente trabajo fue analizar la relación entre la población de las localidades y los niveles estáticos de los pozos clasificados por su tipo de concesión (público, agrícola e industrial) en los acuíferos Alto Atoyac y Huamantla, pues hasta ahora este tipo de estudio no se ha hecho en esta zona.







Materiales y métodos

Área de estudio

Este estudio se realizó en los acuíferos Huamantla 2903 y Alto Atoyac 2901 en el estado de Tlaxcala. Dichos acuíferos se encuentran en la Región Hidrológica del Río Balsas, el primero localizado en la subcuenca cerrada de la laguna de Totolcingo y el segundo en las subcuencas de los ríos Zahuapan y Atoyac, los cuales desembocan en el océano Pacífico (Conagua, 2020a; Conagua, 2020b) (Figura 1). El estratovolcán La Malinche es la zona de recarga de tales acuíferos; ambos son de tipo libre, heterogéneos y anisótropos, constituidos en su porción superior por sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada. La porción inferior del acuífero Huamantla está alojada en una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias marinas (calizas), y el acuífero Atoyac está alojado en una secuencia de rocas ígneas extrusivas de basaltos, tobas y andesitas. Más información de los acuíferos se tiene en la Tabla 1. En el acuífero Alto Atoyac, año 2011, se registraron 890 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 600 son pozos activos. En el acuífero Huamantla, año 2014, se registraron 324 aprovechamientos, de éstos, 300 son pozos profundos (Conagua, 2020a; Conagua, 2020b).







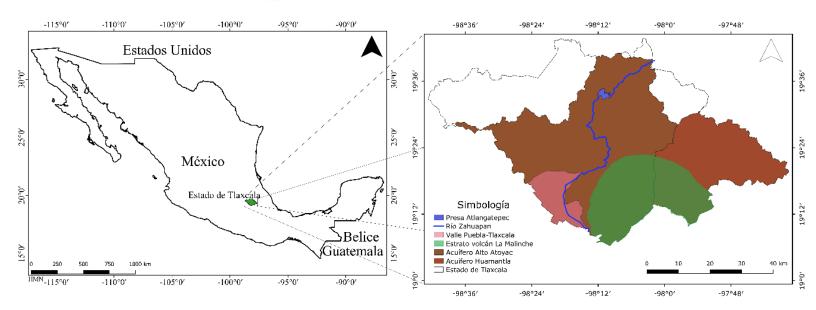


Figura 1. Área de estudio, acuíferos en el volcán La Malinche, estado de Tlaxcala.

Tabla 1. Características de los acuíferos Alto Atoyac y Huamantla.

Parámetro	Alto Atoyac	Huamantla 10 a 16 °C	
Temperatura media anual	16.2 °C		
Precipitación media anual	878 mm	538 mm	
Región hidrológica	No. 18 Río Balsas	No. 18 Río Balsas	
Cuenca	Alto Balsas-río Atoyac	Alto Balsas-cerrada Libres oriental	
Fisiografía	Cinturón neovolcánico. Lagos y volcanes de Anáhuac	Planicie neovolcánica	
Transmisividad	De 0.6 a 11.6 x 10 ⁻³ m ² ·s ⁻¹ De 51.8 a 1 002 m ² ·d ⁻¹	De 2.7 x 10 ⁻⁴ a 2.4 x 10 ⁻² m ² ·s ⁻¹ De 23.3 a 2 074 m ² ·d ⁻¹	







Parámetro	Alto Atoyac	Huamantla		
Conductividad hidráulica	De 0.5 a 5 m·d ⁻¹			
Coeficiente de almacenamiento	De 0.1 a 1 x 10 ⁻⁵			
Profundidad del nivel estático	De 5 a 160 m La Malinche De 5 a 25 m sur del acuífero	De 3 a 140 m		
Dirección preferencial del flujo subterráneo	De norte a sur, con alimentaciones de los flancos oriental y occidental hacia el acuífero Valle de Puebla	Direcciones norte y sur, convergiendo al oriente a la laguna de Totolcingo		
Geología superficial	Afloramientos de rocas volcánicas: riolitas, andesitas, basaltos, tobas y brechas volcánicas			
Geología del subsuelo	Porción superior del acuífero: sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada. Porción inferior del acuífero: rocas ígneas extrusivas, integradas por derrames volcánicos, de basaltos, tobas y andesitas			
Estratigrafía	Cretácico, Terciario, Cuaternario	Cuaternario aluvial permeable (Qal) y volcánico andesítico (Qvab). Terciario andesítico basáltico (Tvab).		

Fuente: Conagua (2015a), Conagua (2015b).







Número de habitantes

Los datos del número total de habitantes (NH) de México, del estado de Tlaxcala y de las localidades estudiadas en este trabajo se obtuvieron de la página del Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática (INEGI) (https://www.inegi.org.mx/, fecha de descarga: 2 de marzo de 2021). En México, se han hecho 16 censos de población de 1900 a 2020; con estos datos se obtuvo la ecuación de regresión de NH, en función del tiempo, y las tasas de crecimiento de México, Tlaxcala y las localidades. Con las coordenadas geográficas se elaboró en QGIS una capa vectorial para poner las localidades sobre los acuíferos Alto Atoyac y Huamantla. El QGIS es un sistema de información geográfica de licencia libre.

Tasa de cambio del nivel estático

Para evaluar la tasa de cambio del *NE* con respecto al tiempo (años) se utilizaron datos de los años de 1997 a 2017 de 73 pozos concesionados. Del acuífero Alto Atoyac fueron 50 pozos: 28 para uso agrícola, 4 para uso industrial y 18 para uso público. Del acuífero Huamantla fueron 23: 16 para uso agrícola, 1 para uso industrial y 6 para uso público. El análisis de los datos de la fluctuación del *NE* es el método más directo y simple para estimar el volumen de disminución de agua del acuífero (Fienen & Arshad, 2016). Los pozos analizados forman parte de la red de monitoreo de agua subterránea que realiza en las temporadas de lluvia y estiaje la Comisión Nacional del Agua (Conagua) Dirección Local Tlaxcala. Mediante solicitud al Instituto Nacional de Acceso a la Información (INAI), la







Conagua proporcionó los datos de *NE* de cada pozo. A estos datos se calcularon los parámetros como mínimo, máximo, promedio, coeficiente de variación, sesgo y curtosis. Se utilizó la prueba de *t* para evaluar si los valores de *NE* entre los acuíferos Alto Atoyac y Huamantla son estadísticamente diferentes.

La tasa de cambio de la profundidad (m·año-1) del NE de cada pozo con respecto al tiempo (t) se calculó con la pendiente (m_{NE}) de la ecuación de regresión lineal, para lo cual se utilizó la serie de datos de 1997 a 2017. La ecuación de regresión lineal se describe como sigue (McBean & Rovers, 1998; Schuenemeyer & Drew, 2011):

$$NE = a + m_{NE}t + e_t \tag{1}$$

donde:

a = ordenada al origen

 $e_t \sim N[0, \sigma^2]$ = término de error aleatorio

La significancia de los valores de m_{NE} se estableció a p < 0.05. Para visualizar los gradientes relativos de las m_{NE} , los valores puntuales de cada pozo se representaron en isolíneas, para ello se hizo una interpolación espacial con la técnica de la ponderación inversa de la distancia en el sistema de información geográfica QGIS.







Porcentaje de cambio anual del NE

Un estimador de cambio del NE es el porcentaje de cambio anual (PCA_{NE}), el cual se calculó con la ecuación utilizada por Andersen (2019) en econometría. En este método no solo se consideran los valores inicial y final, sino todos los valores de la serie datos de manera conjunta en el término (t-1) de la siguiente ecuación:

$$PCA_{NE} = m_1(t-1) * 100 (2)$$

donde:

 m_1 = pendiente de la ecuación de regresión lineal estimada con la siguiente ecuación

$$lnNE = b + m_1 t + e_t (3)$$

lnNE = logaritmo natural de NE

b = ordenada al origen

En estadística, el empleo de logaritmo natural reduce el coeficiente de variación de los valores (Malamud & Turcotte, 2013).

283







Comparación de PCA_{NE}

La comparación simultánea y combinada del PCA_{NE} se realizó mediante un diseño factorial. La Conagua reporta mediciones del NE hechas en las temporadas de estiaje y de lluvias en pozos concesionados para uso público, agrícola e industrial. Considerando la temporada de muestreo y tipo de concesión o uso de agua de los pozos, se seleccionó un diseño factorial de efectos fijos de dos factores. La temporada de muestreo, factor A, tuvo dos niveles: lluvia y estiaje. El tipo de concesión del pozo, factor B, tuvo tres niveles: público, agrícola e industrial. El modelo factorial de dos factores se representa con la siguiente ecuación (Schuenemeyer & Drew, 2011):

$$PCA_{NE.ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_i + (\alpha\beta)_{ij} + e_{kij}$$
(4)

$$i = 1, ..., a,$$
 ; $j = 1, ..., b,$; $k = 1, ..., m$

donde:

 $PCA_{NE,ijk}$ = porcentaje de cambio anual del NE del pozo ijk

 μ = promedio general del PCA_{NE} de todos los pozos

 α_i = efecto del nivel *i*-ésimo del factor A

 β_i = efecto del nivel j-ésimo del factor B sobre el PCA_{NE}

 $\alpha \beta_{ij}$ = interacción entre los niveles i y j de los factores A y B

 $e_{k(ij)} = \text{error } \sim N(0, \sigma^2)$





Ciencias Agua





Evaluación de la relación entre NE y NH

Para el análisis de la relación de *NE* y *NH* por localidad en los acuíferos Alto Atoyac y Huamantla se calcularon los valores de *NH* para los años intercensales de 2000 a 2020 con las ecuaciones de regresión descritas en el apartado "Número de habitantes".

La evaluación de la relación entre *NE* y *NH* se realizó con la ecuación de regresión lineal:

$$NH = c + m_2 NE + e_t (5)$$

donde:

c = una constante

 m_2 = pendiente de la recta que indica la relación entre el NE de un pozo NH = localidad cercana de un pozo

Esta relación se estableció como válida a un nivel de significancia *p* < 0.05. Dado que los censos y conteos de población de 1995 a 2020 aportan seis datos, se utilizó el segmento recto de la curva exponencial de la población en función del tiempo (Figura 2), para calcular el *NH* de las localidades en los años intercensales de este periodo; de esta manera, el número de pares de datos para el cálculo de los coeficientes de correlación de *NH* y *NE* aumentó a 20.







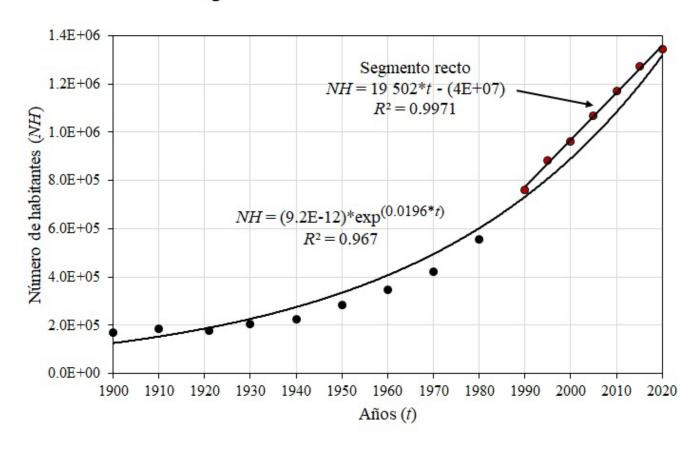


Figura 2. Comportamiento del número de habitantes para el Estado de Tlaxcala.

Tendencias de NE y NH

No fue plausible asociar la tendencia de NH de una localidad dada con la tendencia del NE de los pozos cercanos con los datos crudos de estas variables debido a que tienen diferentes unidades e intervalos. Por tal razón, se estandarizaron los datos de NH y NE con la siguiente ecuación:

$$Dato \ estandarizado = \frac{(dato \ crudo-promedio)}{desviación \ estándar} \tag{6}$$



Ciencias Agua



Posteriormente, se obtuvieron las ecuaciones de regresión lineal de los datos estandarizados de NH y NE en función del tiempo t. La significancia del modelo fue establecida a un nivel de p < 0.05:

$$NH = c + m_{NH}^* t + e_t \tag{7}$$

$$NE = a + m_{NE}^* t + e_t \tag{8}$$

Dado que m_{NE}^* tiende a disminuir y m_{NH}^* a aumentar con el tiempo, los valores de m_{NE}^* se multiplicaron por -1. Las pendientes se transformaron a grados de inclinación (\not) mediante las siguientes expresiones:

$$4_{NE} = \operatorname{atan}(-1 * m_{NE}^*) * \frac{180}{\pi}$$
 (10)

Para determinar si los valores de $\not \Delta_{NH}$ y $\not \Delta_{NE}$ tienen diferencias estadísticas, se utilizó la prueba de t^* a p < 0.05, para dos muestras pareadas.







Análisis de componentes principales

La combinación lineal de los niveles estáticos de los pozos se estudió mediante el análisis de componentes principales (ACP). Una combinación lineal es el vector de los niveles estáticos multiplicados por un escalar, lo cual indica que los niveles estáticos están relacionados; de otra manera, los pozos que no lo están tienen un comportamiento que no cumple con este criterio. El ACP es un procedimiento matemático que transforma un sistema de variables correlacionadas a otra de variables no correlacionadas para reducir su dimensionalidad y determinar las combinaciones lineales (Daultrey, 1976; Schuenemeyer & Drew, 2011).

Los escalares o valores propios (λ_i) de los componentes principales —que a su vez representan las varianzas de los niveles estáticos (variables originales)— se calcularon con la ecuación característica de la matriz $\{R\}$:

$$|\{R\} - \lambda_i\{I\}| = 0 \tag{11}$$

donde:

 $\{R\}$ = matriz de correlaciones de los NE

 λ_i = valores propios de los componentes principales

 ${I}$ = matriz identidad

Las cargas o correlaciones de los componentes principales con los NE se calcularon con la siguiente ecuación matricial:







$$\{L\} = \{E\} \cdot \{\Lambda\}^{\frac{1}{2}} \tag{12}$$

donde:

Ciencias 4A

- $\{L\}$ = matriz de las cargas o correlaciones entre los componentes principales y los *NE*
- $\{E\}$ = matriz de vectores propios asociados con cada valor propio
- $\{\Lambda\}$ = matriz diagonal de λ_i ; los elementos fuera de la diagonal son cero

Las operaciones matemáticas se realizaron en Excel, con los complementos Solver, MMult y Real Statistics.

Resultados

Número de habitantes

El censo de 2020 reportó que el NH en México fue de 126 014 024 habitantes y del estado de Tlaxcala 1 342 977. De los años 1900 a 2020, la población en México aumentó más de 800% y en el estado de Tlaxcala cerca de 700%; en número de habitantes, estos porcentajes son igual a 112.40 y 1.17 millones de habitantes, respectivamente. Hasta 1940, el número de habitantes se mantuvo constante, incluso con un descenso por la Revolución Mexicana de 1910 a 1924. El comportamiento de 1900 a 2020 del número de habitantes (NH) en México y en el estado de Tlaxcala se describió con un modelo exponencial $NH = C \cdot e^{kt}$ (p < 0.05), donde C







y k son constantes, con un comportamiento recto en los últimos 30 años; en este lapso, el NH aumentó 55.1% (44.7 millones) y 76.4% (581 mil), en México y en el estado de Tlaxcala, respectivamente. En particular, para el estado de Tlaxcala, de 1900 a 1910, la tasa de incremento fue de 1 285 hab·año⁻¹ y para 2010 a 2020 este valor aumentó a 17 304 hab·año⁻¹ (Figura 2).

Tasa de cambio de NE

La estadística básica mostró que los pozos del acuífero Alto Atoyac tuvieron valores de NE promedio, mínimo y máximo iguales a 57, 0.9 y 184 m, respectivamente. Para los pozos del acuífero Huamantla, los valores respectivos fueron de 68, 2.3 y 153 m. Los coeficientes de variación y de sesgo fueron mayores en los pozos del acuífero Alto Atoyac (70% y 0.8) que en los pozos del acuífero Huamantla (60% y 0.2). Los valores de curtosis resultaron igual a 0.5 para el acuífero Alto Atoyac y - 0.6 para el acuífero Huamantla. La prueba de t mostró que los valores de t0.05 entre los acuíferos fueron estadísticamente diferentes (t0.05).

El análisis mostró que en la época de lluvia seis pozos tuvieron tasas de cambio (m_{NE}) positivas y 67 pozos tuvieron tasas negativas. El promedio de m_{NE} fue igual a -0.159 m·año⁻¹; el mínimo de -0.838 (pozo Huamantla 39); el máximo de 0.677 m·año⁻¹ (pozo Tecopilco 7), y desviación estándar de 0.194 m·año⁻¹. Los valores más frecuentes de m_{NE} se encontraron entre 0.0 y -0.4 m·año⁻¹ en 87% de los pozos. El valor del coeficiente de correlación r de la ecuación de regresión (NE versus tiempo) resultó significativo (p < 0.05) en 57 pozos. En cuanto a la época







de estiaje, seis pozos tuvieron valores positivos de m_{NE} . El valor promedio de m_{NE} fue igual a -0.153 m·año⁻¹; el mínimo de -0.820 m·año⁻¹ (pozo Huamantla 39); el máximo de 0.759 m·año⁻¹ (pozo Tecopilco 7), y desviación estándar de 0.197 m·año⁻¹. Las tasas más frecuentes se encontraron entre 0.0 y -0.4 m·año⁻¹ en 85% de los pozos. El valor del coeficiente de correlación r de la ecuación de regresión resultó significativo (p < 0.05) en 63 pozos. La Figura 3 muestra las isolíneas de los valores de m_{NE} . La gráfica de NE de los pozos clasificados de acuerdo con el tipo de concesión o de uso versus tiempo (Figura 4) muestra una tendencia lineal de cambio descendente en todos los pozos.

(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)







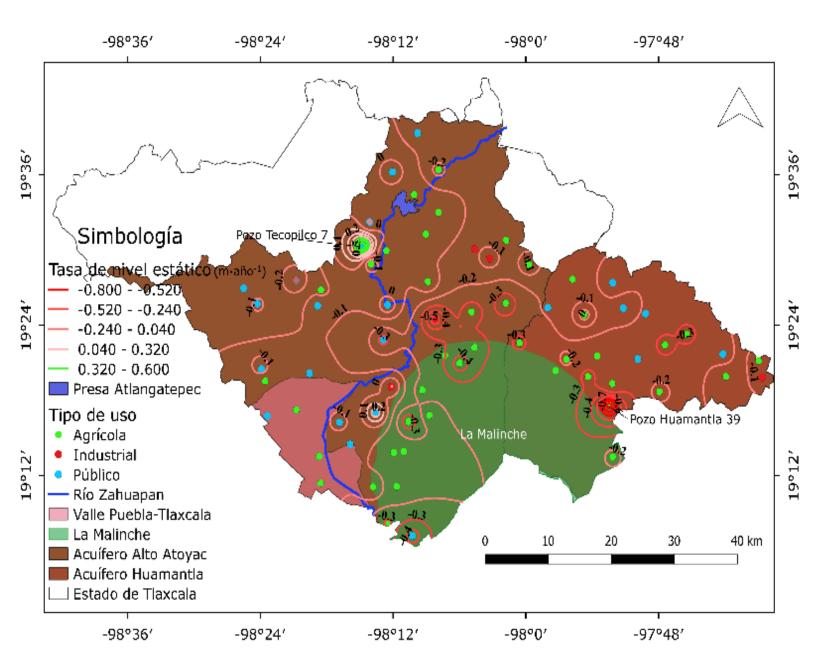


Figura 3. Isolíneas de las tasas de cambio del nivel estático (m_{NE}) .







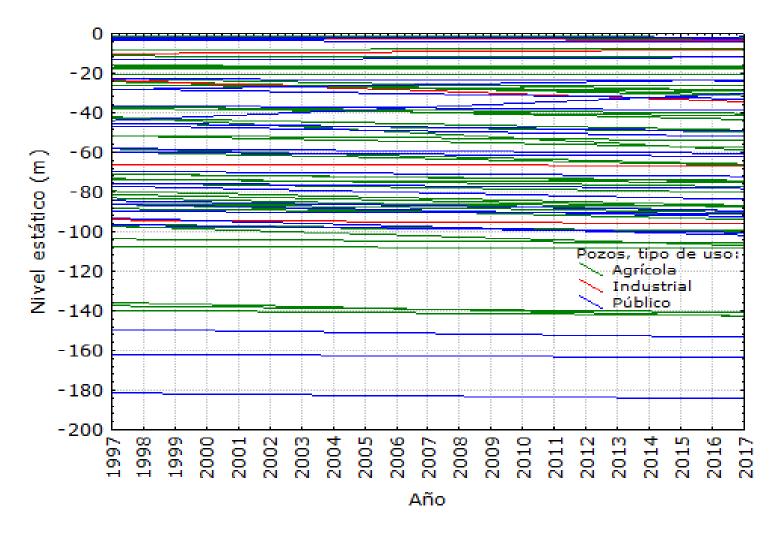


Figura 4. Niveles estáticos de los pozos clasificados por su uso *versus* tiempo.

Porcentaje de cambio anual del NE (PCA_{NE})

Los promedios de PCA_{NE} fueron iguales a -6.4% (-0.159 m·año⁻¹) y -7.3% (-0.153 m·año⁻¹), en la temporadas de lluvia y estiaje, respectivamente. El valor de PCA_{NE} más recurrente fue de 0 a -20% (de 0 a -0.4 m·año⁻¹)







en 80% de los pozos. En seis pozos, los valores de PCA_{NE} fueron positivos. Los valores extremos de PCA_{NE} fueron de -50% (-0.8 m·año⁻¹) en el pozo Huamantla 39 y \approx 50% (0.7 m·año⁻¹) en el pozo Tecopilco 7. La distribución espacial de los valores de PCA_{NE} se encuentran en las isolíneas de la Figura 5. Las dos temporadas, lluvia y estiaje, tuvieron isolíneas comparables.

294







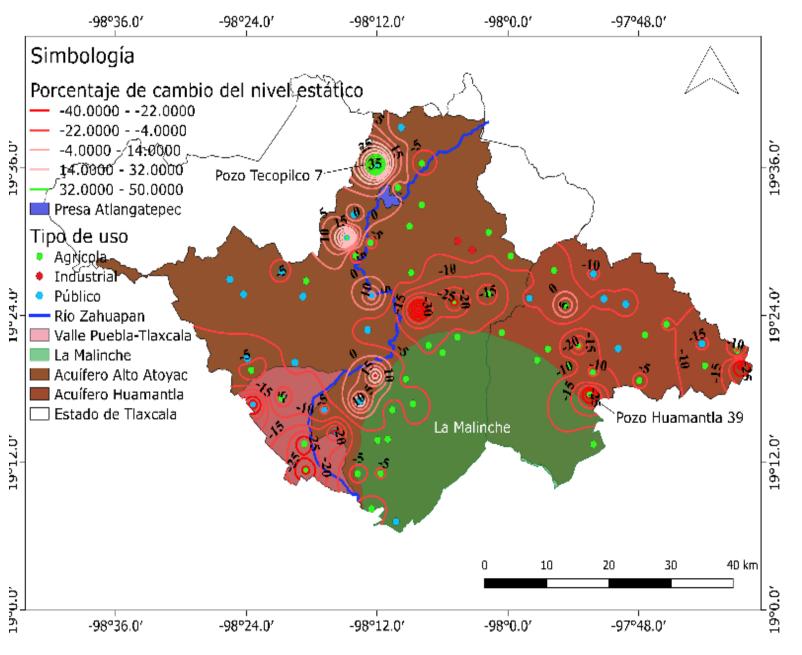


Figura 5. Isolíneas de porcentaje de cambio anual de los niveles estáticos (PCA_{NE}) .







Comparación de PCA_{NE}

El análisis de varianza del diseño factorial de efectos fijos de dos factores (Tabla 2) para comparar de manera simultánea y combinada los pozos de acuerdo con su tipo de concesión y temporada de muestreo mostró que los valores de PCA_{NE} en las temporadas de lluvias y estiaje no tuvieron diferencias significativas, cuyos valores promedio fueron de -6.9 y -7.5%, respectivamente (Figura 6a). Mientras que los PCA_{NE} de los pozos concesionados para uso agrícola, industrial y público tuvieron diferencias significativas (p < 0.05). De acuerdo con la Figura 6b, estas diferencias se deben a que los PCA_{NE} en los pozos concesionados para uso agrícola e industrial son más pronunciados que en los pozos de uso público. El PCA_{NE} promedio en los pozos de uso público fue de -2.4% (n = 24); en los pozos de uso agrícola fue de -8.9% (n = 44), y en los pozos de uso industrial de -10.3% (n = 5).

Tabla 2. Análisis de varianza del diseño factorial de PCA_{NE} .

Fuente de variación	S.C.	g.l.	C.M.	F _{cal.}	P
Factor A (temporada)	5.85	1	5.9	0.03	0.87
Factor B (concesión)	1427.9	2	714.0	3.44	0.03
Interacción AB	8.20	2	4.1	0.02	0.98
Residual	29 026.9	140	207.3		
Total	30 468.9	145			

S.C. = suma de cuadrados

g.l.= grados de libertad

C.M.= cuadrados medios







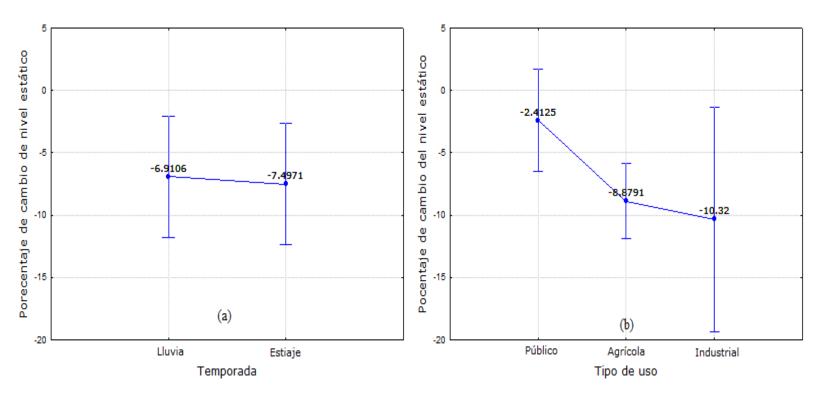


Figura 6. PCA_{NE} en temporada y tipo de uso.

Relación entre NE y NH

De los 73 pozos evaluados, 59 se asociaron con el NH de localidades aledañas (Figura 7), con los cuales se calcularon los valores de m_2 y r para los años de 1997 a 2017. Los valores de m_2 , que indican la relación entre NE de un pozo y el NH de una localidad, fueron negativos en 55 asociaciones y en 4 fueron positivos. El valor negativo de m_2 más pronunciado fue igual a -16.5 cm·hab⁻¹ (localidad Ocotitla), seguido de un valor de -4.9 en la localidad de Mesa Redonda. En 10 localidades, los valores de m_2 se encontraron de -1 a -2 cm·hab⁻¹; en 23 fue de -1 a -9



Ciencias Agua



mm·hab⁻¹, y en 20 localidades fue de -0.07 a -0.9 mm·hab⁻¹. Los valores positivos m_2 estuvieron entre 0.2 y 2.6 mm·hab⁻¹. Los valores de r fueron significativos (p < 0.05) en 43 asociaciones de NE con la población y en 16 no lo fueron; es decir, en 73% de los casos la relación fue significativa.

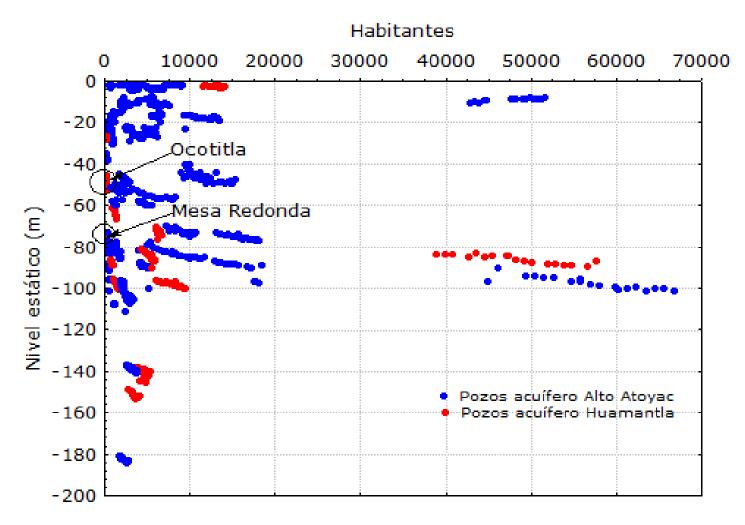


Figura 7. Relación entre NE y NH.







Tendencias de NE y NH

El análisis de las tendencias —negativas de NE y positivas de NH— con respecto al tiempo empleando datos estandarizados mostró que en 30 casos los grados de inclinación de las líneas de tendencia del nivel estático (4_{NE}) fueron mayores que los grados de inclinación de las líneas del número de habitantes (4_{NH}) y en 25 casos el resultado fue inverso. El promedio de los valores de 4_{NE} fue igual a 5.2° y el promedio de los valores de 4_{NE} fue igual a 6.3°. La prueba t^* de dos colas mostró que los promedios de 4_{NE} y 4_{NH} no tuvieron diferencias significativas (p > 0.05), y que el promedio de 4_{NE} fue ligeramente mayor (4.2%) que 4_{NE} . Sin embargo, los valores de 4_{NE} tuvieron cuatro veces mayor variabilidad que los valores de 4_{NH} .

Análisis de componentes principales

La Figura 8, Figura 9 y Figura 10 muestran el resultado del análisis de componentes principales. La distribución geográfica de los pozos correlacionados con los componentes a valores de r > 0.8 y r < -0.8 se encuentra en la Figura 8. La Figura 9 muestra los primeros 10 componentes principales con sus respectivos valores de λ_i que explican la varianza de los valores originales y la varianza acumulada en el eje derecho. El componente 1 tuvo un valor de λ_1 igual a 42.0, que representó 57.6% del total de los pozos; los componentes 2, 3 y 4 representaron el 6.4, 5.8 y 4.9%, respectivamente; los componentes 5 al 20 representaron de 2 a 1%. El 91% de los datos originales fue representado con 10

(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)







componentes y el 100% con 20. Sin embargo, solo tres componentes tuvieron cargas o correlaciones de r > 0.8 y r < -0.8 con las variables originales (niveles estáticos), y cinco componentes tuvieron correlaciones de r > 0.6 y r < -0.6. La Figura 10 muestra las cargas de los componentes 1 y 2: la Figura 10a para los pozos calificados con base en el acuífero y la Figura 10b con base en el tipo de uso. En ambas gráficas se observa una concentración de 47 pozos (64.4%) del lado derecho, los cuales tuvieron correlaciones positivas (r > 0.6) con el componente 1; en el lado izquierdo se encuentran cuatro pozos (5.5%), con correlaciones negativas (r < -0.6) con esta misma componente; es decir, con la componente 1 estuvieron correlacionados 51 (69.9%) de los 73 pozos. Dos pozos (2.7%) tuvieron correlaciones (r > 0.6) con la componente 2. Con la componente 3 estuvieron correlacionados negativamente (r < -0.6) cuatro pozos (5.5%). Con la componente 4 estuvieron correlacionados positiva y negativamente dos pozos (2.7%). Con la componente 5 estuvo correlacionado negativamente un pozo (1.37%), y 13 pozos (17.8%) no estuvieron correlacionados con ningún componente.







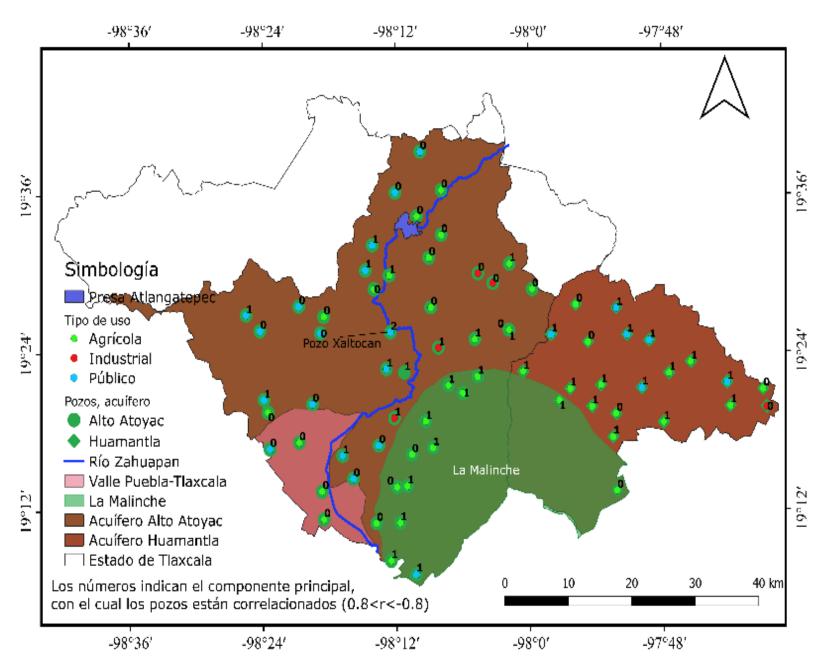


Figura 8. Pozos correlacionados con las componentes 1 y 2 a un valor de 0.8 < r < -0.8. El cero indica no correlación con estas componentes.







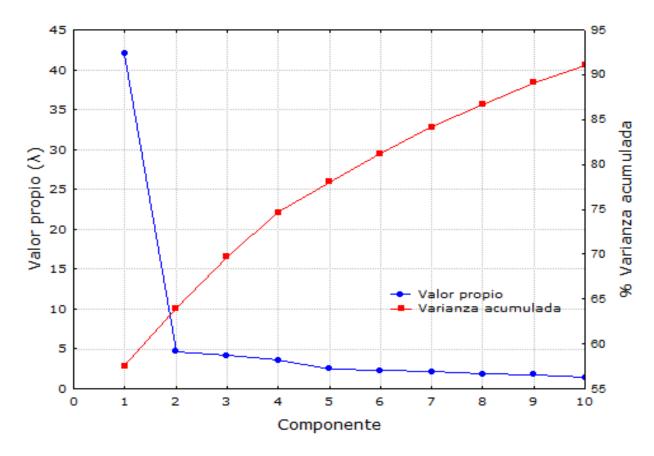


Figura 9. Varianza de los componentes principales.







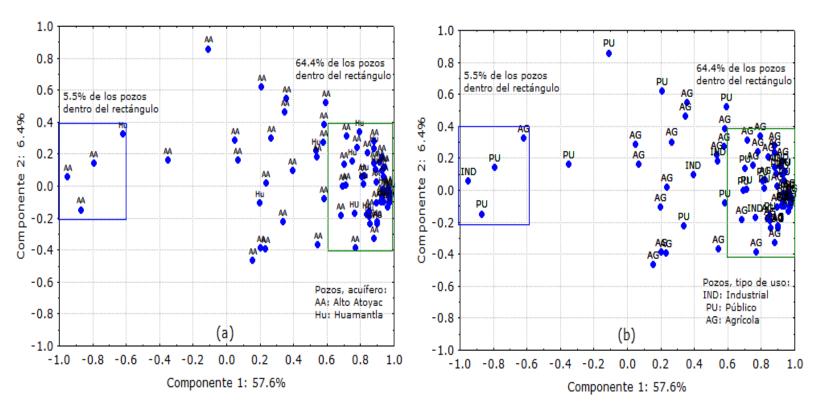


Figura 10. Correlaciones de los componentes 1 y 2. Pozos clasificados de acuerdo con el acuífero(a) y el tipo de uso (b).

Discusión

Número de habitantes

El NH de 1900 a 2020 en el estado de Tlaxcala se multiplicó por siete, con una tasa de crecimiento anual igual a 1.96%, la cual es ligeramente mayor a la tasa de 1.19% para México, que se encuentra casi en la parte media del *ranking* mundial de tasas de crecimiento de 116 países reportados por el WorldData.info (https://www.worlddata.info). En esta







misma base de datos se reporta que de 2012 a 2021 el NH en México se incrementó 11.07%, mientras que en el estado de Tlaxcala el NH de 2010 a 2020 aumentó 14.8%. El comportamiento del NH en el área de estudio se puede describir con un modelo exponencial, como se puede observar en la Figura 2. En los últimos 30 años, el crecimiento del NH fue recto, sumándose 581 mil habitantes; este comportamiento del NH es ligeramente diferente al de México, el cual tiende a estabilizarse, como se muestra en la página del INEGI (https://www.inegi.org.mx). Si el NH continúa aumentando de forma exponencial en los próximos 20 años, se sumarán unos 400 mil habitantes, lo cual traerá consigo mayor demanda y presión sobre el recurso hídrico.

Tasa de cambio de NE

Las profundidades promedio de NE indicaron que los acuíferos Alto Atoyac y Huamantla son comparables con los reportados para el Valle de Atemajac y Toluquilla, Jalisco, México (Hernández-Antonio et~al., 2015). Los valores mínimos se ubicaron en pozos del Valle Puebla-Tlaxcala y los valores máximos en el área del Volcán La Malinche, lo cual hace evidente la influencia de la altitud y topografía. Los valores de sesgo y curtosis indicaron que los NE tienen distribución normal con base en el criterio que establecen McBean y Rovers (1998) para este estadístico, aunque los datos están ligeramente sesgados a la derecha ($C_s < 1$) y concentrados alrededor de la media ($C_k \approx 0$).

El número de pozos con signos positivos y negativos de m_{NE} fueron iguales tanto en la temporada de lluvias como de estiaje. El promedio,







mínimo, máximo, desviación estándar y frecuencia de los valores de $m_{\it NE}$ de las temporada de lluvias prácticamente fueron iguales a las de la temporada de sequía, lo cual podría ser un indicio de que la entrada de agua por lluvias a los acuíferos Alto Atoyac y Huamantla no compensa la extracción. Las lluvias en el acuífero Alto Atoyac son de 878 mm anuales y en el acuífero Huamantla de 538 mm. El valor negativo más extremo de m_{NE} fue igual a -0.838 m·año⁻¹ en el pozo Huamantla 39, para riego en el Valle de Huamantla, el cual se aproxima al valor de -1 m·año-1 para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Carrera-Hernández & Gaskin, 2007), y es comparable al valor reportado por Rahman, Kamruzzaman, Jahan, Mazumder y Hossain (2016) para el noroeste de Bangladesh. Los valores intermedios de m_{NE} (-0.15 m·año⁻¹) indican que el agotamiento del agua subterránea en el área de estudio se encuentra dentro de los intervalos reportados en la literatura (Herbert & Döll, 2019; Hu et al., 2019; Joshi et al., 2021). En particular, para el acuífero Alto Atoyac, la Conagua (2015a) reportó una tasa de abatimiento de 0.1-0.2 m·año⁻¹, en el periodo 1997-2011, y para el acuífero Huamantla una tasa de abatimiento de 0.3-0.5 m·año-1 (Conagua, 2015b). La prueba de t mostró que estas tasas de abatimiento son estadísticamente diferentes (p < 0.05). En cinco pozos, los valores de m_{NE} tuvieron signos positivos; estos pozos se encontraron cerca de la presa de Atlangatepec y de la laguna de Acuitlapilco, lo cual significa que dichos cuerpos de agua elevan el NE en alrededor 0.65 m·año⁻¹. Joshi et al. (2021) reportaron valores de elevación del nivel de agua subterránea de 1.28 m·año-1. En la literatura se reporta que la elevación del nivel estático está correlacionada con corrientes superficiales y precipitación (Weider & Boutt, 2010; Dudley &







Hodgkins, 2013). En nuestra área de estudio, la cercanía de los pozos con los cuerpos de agua puede ser la causa de la elevación del nivel estático.

Porcentaje de cambio anual del NE (PCA_{NE})

Los valores de PCA_{NE} durante el periodo de 1997 a 2017 se encontraron en alrededor de 7%. En las zonas agrícolas de los valles de Huamantla y sur de la cuenca del Alto Atoyac, así como en la zona urbana de Apizaco, los valores de PCA_{NE} fueron de 10 a 35%; estos valores son altos, comparados con los reportados en la literatura (0.05-0.4%); valores de PCA_{NE} mayores a 1% se consideran significativos (Taranaki Regional Council, 2016). El análisis de varianza de tipo factorial del PCA_{NE} arrojó que no existen diferencias significativas entre las épocas del año; este resultado confirma que los cambios del NE no están asociados con el clima, sobre todo las precipitaciones pluviales (Rahman et al., 2016; Fienen & Arshad, 2016; Kumar, Chandniha, Lohani, Krishan, & Nema, 2018; Lall et al., 2020). El análisis de varianza mostró claramente el efecto del tipo de concesión sobre el cambio de NE; los pozos concesionados para uso industrial tuvieron valores de PCA_{NE} más pronunciados, seguidos por los de uso agrícola y público. Este resultado evidencia que el NE en los pozos de las industrias se abate unas cinco veces más que en los pozos de uso público.







Relación entre NE y NH

El análisis de la relación (m_2) entre NE y NH mostró mayores valores en dos pequeñas localidades aledañas: Ocotitla y Mesa Redonda. Una posibilidad de que en estas localidades se registraron los mayores valores de m_2 es que están localizadas en la montaña, en la parte alta de la cuenca, al norte del acuífero Huamantla, donde posiblemente las entradas de agua, como las precipitaciones pluviales, no compensan la extracción de agua del acuífero. Por otro lado, los menores valores de m_2 se calcularon en los pozos que se encuentra en los valles de las cuencas del río Zahuapan y del valle de Huamantla. En esta área no fue plausible evidenciar con claridad el efecto de NH sobre el abatimiento de NE, aunque la densidad de población es mayor comparado con la población que habita en la parte alta de la cuenca; esto se debe tal vez a que el volumen de agua extraída por los pozos es compensado por las entradas de agua superficiales y subsuperficiales; ello se argumenta con el resultado obtenido en el pozo Xicohtzingo, que se encuentra en la confluencia de los ríos Zahuapan y Atoyac, en el cual se calculó un valor de m_2 cercano a 0 y un valor de r = -0.06 (p = 0.7922).

Tendencias de NE y NH

Las tendencias de NE y NH medidas con los ángulos de inclinación ($\rlap/4$) de las rectas de regresión mostraron que en 55% de los casos los ángulos de NE fueron mayores que los ángulos de NH y en 45% el resultado fue inverso. Aunque el ángulo promedio de NH fue ligeramente mayor al







ángulo promedio de NE, la prueba de t^* de dos colas mostró que los ángulos de NE y de NH no tuvieron diferencias significativas (p > 0.05). En la literatura se reporta —para las zonas áridas y semiáridas— una clara relación del abatimiento del acuífero por mayor demanda de agua debido al aumento de la población (Margat & van der Gun, 2013; Jakeman et al., 2016; Islam & Islam, 2017; Kumar et al., 2018; Boretti & Rosa, 2019; Elizondo & Mendoza-Espinosa, 2020; Hu et al., 2019). Para el área de estudio, la relación del abatimiento del acuífero con el crecimiento de la población se observó que no es generalizado en todas las poblaciones y pozos, esto se puede deber a que el uso principal del agua es el agrícola y a que el área de estudio se encuentra en el altiplano mexicano, donde el factor de la altitud y la topografía tienen un rol en la recarga del acuífero como se ha reportado en la literatura (Jakeman et al., 2016; Taranaki Regional Council, 2016; Islam & Islam, 2017). Este resultado implica que hay áreas en la zona de estudio donde hay una relación de NH con NE que debe ser tratada de manera diferente de aquellas áreas donde no existe, a fin de evitar posible desabasto de agua a la población.

Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales mostró que los valores de *NE* en 60 pozos son una combinación lineal. Un solo componente representó cerca del 60% de la varianza, lo cual indica que *NE* de los pozos en torno a esta componente están en una misma dimensión y su comportamiento es colineal. La representación de la varianza aumentó a 75% con cuatro componentes. Con la componente 1 estuvieron correlacionados positiva y

(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)







negativamente 39 pozos (r > 0.8 y r < -0.8), de los cuales 23 se encuentran en el acuífero Atoyac y 16 en el acuífero Huamantla; a su vez, estos pozos fueron 23 de uso agrícola, 2 de uso industrial y 14 de uso público. Los pozos con valores de r < -0.8 asociados con la componente 1 tuvieron un valor de m_{NE} positivo. Con la componente 2 se correlacionó el pozo Xaltocan del acuífero Alto Atoyac para uso público, el cual se ubica cerca del río Zahuapan (Figura 8).

Es notorio el resultado que de los 33 pozos que no estuvieron correlacionados con ningún componente (valores de cero en la Figura 8), 27 se encontraron en el acuífero Atoyac y 6 en el acuífero Huamantla; 21 están dedicados a la agricultura, 3 a la industria y 9 para uso público. El efecto de la ubicación geográfica de los pozos sobre las correlaciones de NE con la componente 1 es evidente debido a que los pozos se encontraron en los alrededores del volcán La Malinche y en el Valle de Huamantla. Al norte y sur de la cuenca del Atoyac están los pozos que no se correlacionaron con ningún componente. Ello sugiere que el análisis de la correlación de los niveles estáticos con los componentes principales podría servir de apoyo para estudiar los pozos de agua de manera holística y mejorar su gestión, a fin de asegurar la provisión de agua a las futuras generaciones.

(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)







Conclusiones

El comportamiento del número de habitantes de México y Tlaxcala se describió con un modelo exponencial, pero en los últimos 30 años fue recto. Con este tipo de crecimiento se estima que en los próximos 20 años se sumarán 400 mil habitantes en el estado de Tlaxcala, los cuales aumentarán la demanda y presión sobre el agua.

La tasa promedio de NE respecto al tiempo fue igual a -0.159 m·año¹. En seis pozos, las tasas fueron positivas y en 67 pozos fueron negativas. Las tasas de NE entre los acuíferos Alto Atoyac y Huamantla fueron estadísticamente diferentes (p < 0.05). La tasa promedio de NE —en términos de porcentaje de cambio anual— resultó igual a -6.4%. Estos valores indican que los descensos del nivel estático son comparables con los reportados en la literatura para otros lugares y tiempo, pero en términos de porcentaje de cambio son mayores. En las zonas agrícolas y en la zona urbana de Apizaco, los porcentajes alcanzaron valores de 10 a 35%.

El diseño factorial mostró que NE medido en las temporadas de lluvias y estiaje no tuvieron diferencias estadísticas, mientras que con base en el uso, las diferencias fueron significativas (p < 0.05). Gráficamente se observó que los pozos para uso agrícola e industrial tuvieron mayores porcentajes de cambio que los pozos de uso público. El NE en los pozos de uso industrial se abate hasta cinco veces más que en los pozos para uso público.

La relación entre el nivel estático y el número de habitantes resultó significativo en 73% de las localidades estudiadas; el valor más







pronunciado resultó igual a -16.5 cm·hab⁻¹ en un pozo y población ubicados en la montaña; en 52 casos, los valores se encontraron entre - $0.01 \text{ y } -2 \text{ cm} \cdot \text{hab}^{-1}$ en pozos ubicados en los valles. Los valores significativos de r se obtuvieron en pozos ubicados en la montaña y los no significativos en los valles.

El promedio de los ángulos de las tendencias de NE fue menor que el promedio de los ángulos de las tendencias de NH. Es decir, los valores de NE disminuyen con menor rapidez que el aumento de NH. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre ambos.

Los niveles estáticos del 57.6% de los pozos fueron representados en un componente principal. Los primeros cuatro componentes representaron 74.7% de los pozos. No obstante, con tres componentes, las correlaciones tuvieron valores r > 0.8 y r < -0.8, y con cinco componentes a valores r > 0.6 y r < -0.6. Los pozos correlacionados con la componente 1 se encuentran en el valle de Huamantla y alrededores de la Malinche. Los pozos que no tuvieron correlación con ningún componente están mayoritariamente al norte y sur del acuífero del Atoyac.

Referencias

Andersen, M. A. (2019). Calculating and interpreting percentage changes for economic analysis. Applied Economics Teaching Resources, 32(1), 25-31.

Boretti, A., & Rosa, L. (2019). Reassessing the projections of the world water development report. npj Clean Water, 2(15), 1-6. DOI: 10.1038/s41545-019-0039-9

(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



Ciencias Agua



- Breña, A. F., & Breña, J. A. (2007). Disponibilidad de agua en el futuro de México. Ciencia, 58(2), 64-71.
- Carrard, N., Foster, T., & Willetts, J. (2019). Groundwater as a source of drinking water in Southeast Asia and the Pacific: A multi-country review of current reliance and resource concerns. Water, 11(8), 1605. DOI: 10.3390/w11081605
- Carrera-Hernández, J. J., & Gaskin, S. J. (2007). The basin of Mexico aquifer system: Regional groundwater level dynamics and database development. Hydrogeology Journal, 15, 1577-1590. DOI: 10.1007/s10040-007-0194-9
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2015a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Alto Atoyac (2901), Estado de Tlaxcala. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103387/DR_29 01.pdf
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2015b). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Huamantla (2903), Estado de Tlaxcala. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103389/DR_29 03.pdf
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2018). Estadísticas del agua en México. Recuperado de http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?publicaciones=1

(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)







- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2019). Usos del agua. Recuperado de https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/usos-delagua
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2020a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Alto Atoyac.

 Recuperado de https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1(Edos_Acuiferos_18/tlaxcala/DR_2901.pdf
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2020b). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Huamantla (2903). Recuperado de https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1(Edos_Acuiferos_18/tlaxcala/DR_2903.pdf
- Daultrey, S. (1976). Principal components analysis. Recuperado de https://alexsingleton.files.wordpress.com/2014/09/8-principle-components-analysis.pdf, descargado 23/07/2008
- Dudley, R. W., & Hodgkins, G. A. (2013). Historical groundwater trends in Northern New England and relations with streamflow and climatic variables. USGS Staff-Plublished Research, 731, 1-15. Recuperado de https://digitalcommons.unl.edu/usgsstaffpub/731
- Elizondo, L. S., & Mendoza-Espinosa, L. G. (2020). An analysis of water scarcity in a drought prone city: The case of Ensenada, Baja California, Mexico. Tecnología y ciencias del agua, 11(2), 01-55. DOI: 10.24850/j-tyca-2020-02-01







- Fienen, M. N., & Arshad, M. (2016). The international scale of the groundwater issue. In: Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. L., Rinaudo, J. D., & Ross, A. (eds.). Integrated groundwater management: Concepts, approaches and challenges (pp. 21-48). DOI: 10.1007/978-3-319-23576-9
- Herbert, C., & Döll, P. (2019). Global assessment of current and future groundwater stress with a focus on transboundary aquifers. Water Resources Research, 55, 4760-4784. DOI: 10.1029/2018WR023321
- Hernández-Antonio, A., Mahlknecht, J., Tamez-Meléndez, C., Ramos-Leal, J., Ramírez-Orozco, A., Parra, R., Ornelas-Soto, N., & Eastoe C. J. (2015). Groundwater flow processes and mixing in active volcanic systems: the case of Guadalajara (Mexico). Hydrology and Earth System Sciences, 19, 3937-3950. DOI: 10.5194/hess-19-3937-2015
- Hu, Z., Zhou, Q., Chen, X., Chen, D., Li, J., Guo, M., Yin, G., & Duan, Z. (2019). Groundwater depletion estimated from GRACE: A challenge of sustainable development in an arid region of Central Asia. Remote Sensing, 11(16), 1908. DOI: 10.3390/rs11161908
- Islam, S., & Islam, F. F. (2017). Spatial disparity of groundwater depletion in Dhaka City. Recuperado de https://cest2017.gnest.org/group/2261/proceedings.html

314





- Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. J., Rinaudo, J. D., Ross, A., Arshad, M., & Hamilton, S. (2016). Integrated groundwater management: An overview of concepts and challenges. In: Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. L., Rinaudo, J. D., & Ross, A. (eds.). Integrated Groundwater Management: Concepts, approaches and challenges (pp. 3-20). DOI: 10.1007/978-3-319-23576-9
- Jiménez, C. B. (2008). Calidad del agua en México: principales retos. En:
 Olivares, R., & Sandoval, R. (eds.). El agua potable en México:
 historia reciente, actores, procesos y propuestas (pp. 159-172).
 México, DF, México: Asociación Nacional de Entidades de agua y
 Saneamiento de México. Recuperado de
 https://aneas.com.mx/documentos/
- Joshi, K. S., Gupta, S., Sinha, R., Densmore, A. L., Rai, S. P., Shekhar, S., Mason, P. J., & van Dijk, W. M. (2021). Strongly heterogeneous patterns of groundwater depletion in Northwestern India. Journal of Hydrology, 593, 126492. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126492
- Kumar, P., Chandniha, S. K., Lohani, A. K., Krishan, G., & Nema, K. (2018). Trend analysis of groundwater level using non-parametric test in alluvial aquifers of Uttar Pradesh, India. Current World Environment, 13(1), 44-54. DOI: 10.12944/CWE.13.1.05
- Lall, U., Josset, L., & Russo, T. (2020). A snapshot of the world's groundwater challenges. Annual Review of Environment and Resources, 45, 171-94. DOI: 10.1146/annurev-environ-102017-025800







- Malamud, B. D., & Turcotte, D. L. (2013). Time series: Analysis and modelling. In: Wainwright, J., & Mulligan, M. (eds.). Environmental modelling: Finding simplicity in complexity (pp. 27-43). Oxford, UK: Wiley and Blackwell.
- Margat, J., & van der Gun, J. (2013). Groundwater around the world: A geographic synopsis. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/282660947_Groundwat er around the World A Geographic Synopsis
- McBean, E. A., & Rovers, F. A. (1998). Statistical procedures for analysis of environmental monitoring and risk assessment. Vol. 3. Upper Saddle River, EEUU: Prentice Hall.
- National Research Council. (1995). Mexico City's water supply: Improving the outlook for sustainability. DOI: 10.17226/4937
- Palma, C. A. J. (2020). Calidad y disponibilidad del agua en México: visión de economía circular. En: Zamora. I., & Sánchez, D. (eds.).
 Panorama y perspectivas del agua en México, 2019-2024 (40-42).
 Ciudad de México, México: Instituto Belisario Domínguez, Senado de la República. Recuperado de http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/handle/123456789/4803
- Rahman, A. T. M. S., Kamruzzaman, Md., Jahan, C. S., Mazumder, Q. H., & Hossain, A. (2016). Evaluation of spatio-temporal dynamics of water table in NW Bangladesh: An integrated approach of GIS and Statistics. Sustainable Water Resources Management, 2, 297-312. DOI: 10.1007/s40899-016-0057-4







- Schuenemeyer, J. H., & Drew, L. J. (2011). Statistics for earth and environmental scientists. New Jersey, USA: John Wiley and Sons.
- Taranaki Regional Council. (2016). State of the environment monitoring groundwater levels 1989-2013: Technical report 2014-126.

 Recuperado de https://www.trc.govt.nz/council/plans-and-reports/monitoring-reports/environmental-monitoring-technical-reports/
- Valencia, V. J. C., Mendoza, J. F., Vargas, M. L., & Domínguez, E. M. L. (2006). El agua en México. México, DF, México: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de http://www.conagua.gob.mx
- Weider, K., & Boutt, D. F. (2010). Heterogeneous water table response to climate revealed by 60 years of ground water data. Geophysical Research Letters, 37(24), L24405. DOI: 10.1029/2010GL045561