

ESCENARIOS ACTUAL Y FUTURO DE LA DISPONIBILIDAD Y DEMANDA DE AGUA EN UN ACUÍFERO: ESTUDIO DE CASO ACUÍFERO DE IXCAQUIXTLA, PUEBLA, MÉXICO

Luis Alberto Villarreal Manzo

Profesor Investigador. Colegio de Postgraduados,
Campus Puebla

Municipio de San Pedro Cholula, C.P. 72760,
Puebla, México

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3085-2082>

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



Resumen: El presente estudio tuvo el objetivo de realizar un balance general entre la disponibilidad y la demanda del acuífero Ixcaquixtla, Puebla, que permitiera la construcción de escenarios actuales y futuros y la proyección temporal de su disponibilidad o potencial carencia. Se consideraron todos los usos consuntivos del agua del acuífero, haciéndose énfasis en el uso agrícola, mismo que ocupa alrededor del 80 % del volumen total concesionado en un año. Se estimaron las necesidades hídricas y los requerimientos de riego del patrón de cultivos establecido (cíclicos y perennes) utilizando el método FAO-56 modificado por Penman-Monteith. Los resultados obtenidos respecto la disponibilidad y la demanda de agua subterránea, en un escenario proyectado para el período 2015-2070, muestran una disponibilidad de alrededor del 67.42 % para el año 2015, reduciéndose ésta paulatinamente en los años siguientes hasta llegar al 54.68 % para el año 2070. Limitaciones del estudio podrían residir en haber tomado como base un solo año en cuánto a la estadística agrícola (2016), a la realización de proyecciones lineales y por mínimos cuadrados en cuánto al crecimiento poblacional (2050-2070) a partir de datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2010) y del Consejo Nacional de Población (CONAPO) (2015-2030); y además, la necesidad de corroborar directamente en campo, la información y datos sobre necesidades hídricas y requerimientos de riego de los cultivos. Implicaciones del mismo sugieren que se deberán implementar medidas urgentes tendentes al uso y aprovechamiento sustentable y sobre todo a la conservación del agua subterránea aún disponible.

Palabras clave: Agua subterránea, uso consuntivo, déficit hídrico, conservación.

INTRODUCCIÓN

La satisfacción de la demanda de agua en sus principales usos consuntivos –domésticos y urbanos, agrícolas y pecuarios e industriales y otros usos- se fundamenta en una gran parte (39 %) en el acceso a fuentes de abastecimiento de agua subterránea. En el país existen 653 acuíferos, de los cuales 205 (31 %) se encuentran actualmente sin disponibilidad, en el estado de Puebla, los acuíferos del Valle de Tecamachalco y el de Libres-Oriental están en esta condición.

El agua constituye un recurso imprescindible para la vida. El 70 % de la superficie terrestre está cubierta por agua, de la cual sólo el 2,5 % de la misma es agua dulce. De este reducido porcentaje, escasamente el 1 % del total del agua del planeta puede ser utilizado por los seres vivos. (Jiménez, 2018, p.1).

El agua subterránea, en particular, es uno de los recursos naturales más valiosos ya que muchas de las áreas urbanas y rurales de los países desarrollados dependen de este recurso. De los 37 millones de km³ de agua dulce estimados en la Tierra, alrededor del 22 % existe como agua subterránea, lo cual constituye aproximadamente el 97 % del agua dulce en estado líquido disponible para el uso humano.

La disponibilidad del agua subterránea depende, en gran medida, de la recarga de los acuíferos. Esta recarga tiene lugar, principalmente, por el agua de lluvia.

La importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios. El 38.9 % del volumen total concesionado para usos consuntivos (es decir, 33,311 millones de metros cúbicos por año al 2015), pertenece a este origen. Para fines de la administración del agua subterránea, el país se ha dividido en 653 acuíferos. A partir de ese momento se inició un proceso de delimitación,

estudio y determinación de la disponibilidad media anual de los acuíferos. Al 31 de diciembre de 2015 se tenían publicadas las disponibilidades de los 653 acuíferos de la república, identificándose los 205 acuíferos sin disponibilidad, situación conocida también como en déficit hídrico. (CONAGUA, 2016, p.48).

De acuerdo con resultados de estudios recientes, se define si los acuíferos se consideran sobreexplotados o no, en función de la relación extracción/ recarga. Del 2001 a la fecha el número de acuíferos sobreexplotados ha oscilado entre 100 y 106. Al 31 de diciembre de 2015 existían 105 acuíferos en esta condición y en el caso de Puebla, los acuíferos Valle de Tecamachalco y el de Libres-Oriental, claves 2101 y 2102, respectivamente.

Con el fin de revertir la sobreexplotación de los acuíferos y cuencas de México, restaurar el equilibrio hidrológico y salvaguardar el abastecimiento público y el desarrollo socioeconómico, el Gobierno Federal dispone de diversos ordenamientos: vedas, reglamentos, reservas y rescates. Estos ordenamientos restringen la extracción de agua subterránea en diversas zonas del país.

Con respecto a la vulnerabilidad climática del país, específicamente aquella provocada por las condiciones de precipitación pluvial y de temperatura, la CONAGUA categoriza la sequía conforme sus características; resaltando la sequía meteorológica (periodos de tiempo sin lluvia), agrícola (secado en zonas de la rizósfera o zona inmediata a las raíces vivas de las plantas), hidrológica (que afecta el suministro de agua del subsuelo y los niveles de los cuerpos de agua) y socioeconómica (afectaciones a la sociedad y sus actividades económicas). (CONAGUA, 2015, p.40).

La evaluación de la sequía considera que al ser ésta un fenómeno en el que disminuye la precipitación por debajo de su promedio regional, sus características son específicas

para cada lugar donde ocurre. (CONAGUA, 2016, p.40).

Ante la creciente preocupación de la población en general, los diferentes órganos de gobierno, los productores agropecuarios, industriales y los proveedores de servicios, usuarios todos del agua subterránea de los acuíferos que forman parte de las cuencas y sub-cuencas de las regiones hidrológicas administrativas de la República Mexicana, respecto a la actual disponibilidad y demanda de agua subterránea y las perspectivas de disponibilidades futuras, se enmarca el presente estudio, en el cual a partir de un análisis de información estadística se realiza la proyección de escenarios futuros –a poco más de 50 años, de la fecha actual- sobre la demanda y disponibilidad de agua subterránea del acuífero Ixcaquixtla, esto de acuerdo a sus diferentes usos consuntivos; agrícola, urbano e industrial y otros usos.

Aunado a lo anterior y partiendo de la premisa de que en las actividades agropecuarias se realiza un mayor uso consuntivo de este vital recurso –en ocasiones en más del 80 % de los volúmenes disponibles y concesionados oficialmente- se estimaron los requerimientos y los volúmenes de riego de cada uno de los cultivos que formaron parte del patrón de cultivos establecidos, bajo condiciones de riego, en el año 2016, en el área de influencia del acuífero Ixcaquixtla.

La importancia del estudio estriba en la necesidad de contar con información objetiva y precisa a través del análisis de datos cuantitativos sobre los volúmenes de agua disponibles y la demanda de la misma, por cada uno de los usos consuntivos realizados en el área de influencia de un acuífero, en este caso, el acuífero Ixcaquixtla en el estado de Puebla para realizar una proyección construyendo escenarios actuales y futuros que permitan una planeación estratégica y la toma de decisiones orientadas a la gestión, la

protección, la conservación, el manejo y el uso sustentable del agua.

Estudios sobre balances hídricos.

Sahuquillo (2009) menciona que el agua subterránea es barata, fácilmente accesible y vital para un tercio de los riegos y el abastecimiento de la población mundial. A pesar de las posibilidades que permiten las aguas subterráneas, éstas no se consideran adecuadamente en las administraciones hidráulicas de muchos países. Además, muchos no tienen suficientes hidrogeólogos, y tienen carencias serias en la protección contra la contaminación.

Establece que las aguas subterráneas se han aprovechado desde la antigüedad para abastecimiento de poblaciones y para riego. La mejora de las técnicas de perforación de pozos y la introducción de la bomba sumergible han propiciado una mayor utilización de las aguas subterráneas. En los últimos decenios, el aumento ha sido espectacular, especialmente para el riego en las regiones áridas y semiáridas. En algunos casos, la explotación intensa de los acuíferos ha producido descensos importantes de los niveles de agua, descensos de los caudales de ríos y manantiales, afectando a humedales y ecosistemas y provocando la degradación de la calidad del agua o el fenómeno de la intrusión marina en acuíferos costeros.

Cruz, Ramírez, Vázquez, Nava, Troyo, y Fraga (2013) realizaron un balance hidrológico del acuífero de La Paz, B.C.S., México, que sirviera como instrumento para regular la extracción de agua del acuífero. Los mismos autores encontraron que la extracción es mayor que la recarga y por consiguiente, el acuífero se encontraba sobreexplotado, por lo que recomendaron la necesidad de implementar medidas para su conservación.

Lesser, Lesser, Arellano y González (2011) realizaron un estudio sobre balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero

del Valle del Mezquital, Hgo., realizando entre otras cosas, un estudio geohidrológico de actualización en el acuífero mediante el cual diferenciaron dos horizontes acuíferos que no se habían detectado en estudios previos, uno superficial y otro profundo. Como resultado del balance de aguas subterráneas, encontraron que la principal entrada de agua al acuífero correspondía a la infiltración de las aguas residuales sin tratar provenientes de la Ciudad de México, a través de canales y retornos de riego.

Valis (2017), menciona en relación al documento "Ley del agua subterránea: una propuesta" citando al Dr. Gonzalo Hatch Kuir, que actualmente la regulación de aguas subterráneas se realiza a partir de una base científica inadecuada, calculando el balance hídrico, mismo que toma en cuenta estimaciones con parámetros como evapotranspiración, precipitación y tipo suelo, sistema que considera es propenso a fallas, pues toman en consideración descripciones cartográficas antiguas, debido a que no existen las estaciones meteorológicas necesarias para llevar a cabo dichas estimaciones. La gestión del agua subterránea se realiza con base en estimaciones y delimitaciones convencionales de carácter administrativo, sin tomar en cuenta el tamaño real del acuífero, lo que se traduce en una ineficiente explotación y daños ambientales colaterales. Por lo que propone que para determinar las unidades geológicas (acuíferos) es necesario hacer perforaciones exploratorias, para conocer la temperatura y calidad del agua, además de realizar pruebas isotópicas. Al conocer la información propia del acuífero, se podrá determinar el tamaño y los puntos de recarga y descarga. (Valis, 2017, p.2).

Conforme a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en disposiciones publicadas en el Diario Oficial de la Federación (DOF) en el Acuerdo por el que se da a conocer el

resultado de los estudios técnicos de las aguas del acuífero Ixcaquixtla con fecha 20 de abril de 2015, se concluye que en el acuífero en estudio, existe una disponibilidad media anual de agua subterránea de aproximadamente 69'070,122 m³ /año para otorgar nuevas concesiones o asignaciones; no obstante lo anterior, el recurso hídrico subterráneo debe estar sujeto a una extracción, explotación, uso y aprovechamiento controlados para lograr la sustentabilidad ambiental y evitar que se agrave la sobreexplotación del acuífero. (DOF, 2016, p.27).

En el acuífero Ixcaquixtla, clave 2106, la extracción total es de 35.0 millones de metros cúbicos anuales y la descarga natural comprometida es de 1.3 millones de metros cúbicos anuales; mientras que la recarga que recibe el acuífero, está cuantificada en 110.3 millones de metros cúbicos anuales.

En caso de que en el futuro se establezcan en la superficie del acuífero grupos con ambiciosos proyectos agrícolas o industriales y de otras actividades productivas que requieran gran cantidad de agua, como ha ocurrido en otras regiones, que demanden mayores volúmenes de agua que la recarga que recibe el acuífero Ixcaquixtla, clave 2106, podría originar un desequilibrio en la relación recarga-extracción y causar sobreexplotación del recurso.

Actualmente, en el acuífero Ixcaquixtla, existe el riesgo de que el incremento de la demanda de agua subterránea genere los efectos perjudiciales causados por la explotación intensiva, tales como la inutilización de pozos, el incremento de los costos de bombeo, la disminución e incluso desaparición de los manantiales, así como el deterioro de la calidad del agua subterránea, por lo que es necesario prevenir la sobreexplotación y proteger al acuífero de un significativo desequilibrio hídrico y deterioro ambiental que pudiera llegar a afectar las

actividades socioeconómicas que dependen del agua subterránea en esta región.

MATERIALES Y MÉTODOS

El acuífero Ixcaquixtla, definido con la clave 2106 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), se ubica en la porción sur del Estado de Puebla, en los límites con los estados de Guerrero y Oaxaca, entre los paralelos 17 0 51' y 180 57' de latitud norte y los meridianos 97 0 37' y 990 04' de longitud oeste; abarcando una superficie aproximada de 9,559 km².

Limita al norte con los acuíferos Valle de Puebla y Valle de Tacamachalco, pertenecientes al estado de Puebla; al este con los acuíferos Valle de Tehuacán, del estado de Puebla, y con el acuífero Huajuapán de León, perteneciente al estado de Oaxaca; al sur con los acuíferos Mariscala, del estado de Oaxaca y Tlapa-Huamuxtlán del estado de Guerrero; al este con los acuíferos Huitzuco del estado de Guerrero y Atlixco-Izúcar de Matamoros, perteneciente al estado de Puebla.

Geopolíticamente el área del acuífero abarca en su totalidad los municipios Acatlán, Ahuatlán, Ahuehuetitla, Albino Zertuche, Axutla, Chiauutla, Chietla, Chigmecatitlán, Chila, Chila de la Sal, Chinantla, Coatzingo, Cohetzala, Coyotepec, Cuautinchán, Cuayuca de Andrade, Guadalupe, Huatlatlauca, Huehuetlán El Chico, Huehuetlán El Grande, Ixcamilpa de Guerrero, Ixcaquixtla, Jolalpan, Juan N. Méndez, La Magdalena Tlatlauquitepec, Petlalcingo, Piaxtla, San Jerónimo Xayacatlán, San Juan Atzompa, San Miguel Ixitlán, San Pablo Anicano, San Pedro Yeloixtlahuaca, Santa Catarina Tlaltempan, Santa Inés Ahuatempan, Tecomatlán, Tehuitzingo, Teotlalco, Tepexi de Rodríguez, Totoltepec de Guerrero, Tulcingo, Tzicatlacoyan, Xayacatlán de Bravo, Xicotlán, Zacapala; y parcialmente los municipios

Atexcal, Cuautinchán, Izúcar de Matamoros, Molcaxac, Tecali de Herrera, Teopantlán y Puebla.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea con fecha de corte en el Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014, se muestra en el Cuadro 1; resalta en el mismo, el dato de disponibilidad de agua subterránea en el acuífero del orden de 68'528,305 m³.

En la zona que cubre el acuífero no se han llevado a cabo estudios hidrogeológicos de evaluación, el único realizado en su superficie fue el siguiente: Estudio geohidrológico para determinar la disponibilidad del acuífero ixcaquixtla, en el estado de Puebla, elaborado por Ingeniería y Gestión Hídrica, S.C. para la Comisión Nacional del Agua, en 2011. El estudio tuvo como objetivo general actualizar el conocimiento del número de aprovechamientos del agua subterránea y obtener información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático (profundidad y elevación), para en una etapa posterior plantear el balance y determinar la disponibilidad. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance hidrometeorológico. (CONAGUA, 2015, p.5).

De acuerdo con la clasificación climatológica de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, en el acuífero Ixcaquixtla predominan los tipos de clima siguientes: cálido subhúmedo, semiseco muy cálido y semiseco subhúmedo. En la porción noreste domina el clima templado subhúmedo. Todos ellos con régimen de lluvias en verano. Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la cartografía digital de INEGI. Mediante las curvas de isoyetas e

isotermas medias se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de 785 mm y 24.0 °C, respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial, su valor promedio es del orden de 1950 mm anuales. (CONAGUA, 2015, p.6).

De acuerdo con los resultados del Censo de Población y Vivienda por localidad, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, para el año 2000 la población total en la superficie del acuífero Ixcaquixtla, clave 2106, ascendía a 293,375 habitantes, en el año 2005 era de 267,463 habitantes y en el año 2010 sumaba 281,572 habitantes, este último dato representa el 4.87 por ciento de la población total del Estado de Puebla. La población que habita en la superficie del acuífero está distribuida en 824 localidades, de las cuales sólo 18 corresponden a localidades urbanas, las que en conjunto concentraban en el año 2010 a 98,348 habitantes, que corresponde al 34.9 por ciento de la población total que habita dentro de los límites del acuífero; mientras que en las restantes 806 localidades rurales vivían 183,224 habitantes. De acuerdo con la información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía la tasa de crecimiento poblacional en el territorio que abarca el acuífero, evaluada del año 2000 al 2010 fue de 1.03 por ciento anual, la cual es inferior a la tasa de crecimiento estatal, que fue de 1.43 por ciento anual para el mismo periodo.

Las principales localidades ubicadas en el área de influencia del acuífero son Acatlán de Osorio, Ciudad de Chiautla de Tapia, San Andrés Azumiatla, Jolalpan, Tehuiztingo, Tulcingo de Valle, Tecali de Herrera, Tepexi de Rodríguez, San Juan Ixcaquixtla, Huehuetlán el Chico, Santa Inés Ahuatempan, Tlancualpican, San Baltazar Tetela, Tzicatlán, Teopantlán, San Vicente Boquerón, Tecomatlán y Petlalcingo; todas ellas mayores a 2,500 habitantes.

De acuerdo con las proyecciones de

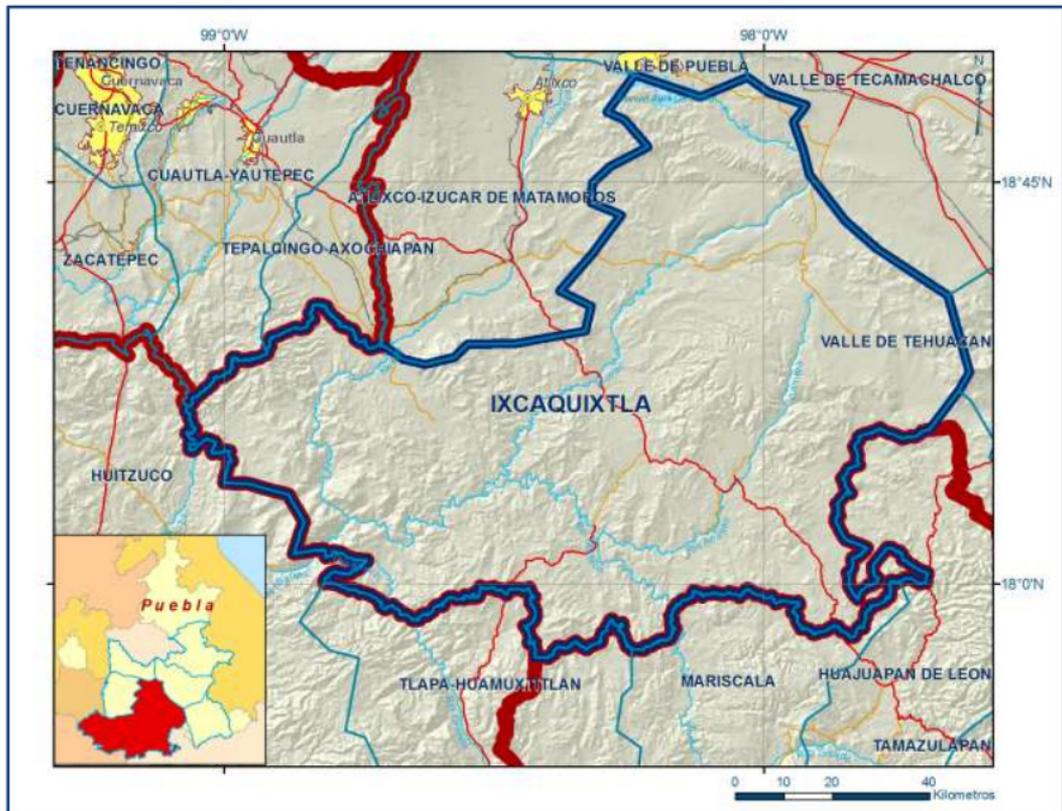


Figura 1. Localización del acuífero Ixcaquixtla, Puebla.

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
2106	IXCAQUIXTLA	110.3	1.3	40.471695	35.0	68.528305	0.000000

Cuadro 1. Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea del acuífero Ixcaquixtla.

REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA “BALSAS”

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales “3” y “4” de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000.

Esta cifra indica que existe volumen disponible para otorgar concesiones o asignaciones, en el acuífero Ixcaquixtla, clave 2106.

El máximo volumen que puede extraerse del acuífero para mantenerlo en condiciones sustentables, es de 109.0 millones de metros cúbicos anuales, que corresponde al volumen de recarga media anual que recibe el acuífero, menos la descarga natural comprometida

Fuente: DOF, 2015

Cultivo	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Producción	Rendimiento	PMR	Valor Producción
	(ha)	(ha)	(t)	(t/ha)	(\$/t)	(Miles de Pesos)
Caña de azúcar	9,486.00	8,782.00	1,058,639.00	128.40	501.12	543,274.62
Maíz grano	7,619.50	7,609.50	26,504.41	3.50	3,795.47	98,528.92
Elote	3,301.00	3,301.00	47,132.43	20.57	1,297.85	63,909.16
Cebolla	1,424.00	1,424.00	32,273.64	22.21	4,895.19	147,869.72
Tomate verde	1,000.50	983.50	13,965.30	13.02	4,762.46	66,823.01
Calabacita	761.50	761.50	9,811.25	12.77	4,252.36	42,581.39
Cilantro	500.50	500.50	4,282.15	8.34	3,580.73	15,812.41
Zanahoria	467.00	467.00	13,848.14	29.83	3,162.14	44,108.88
Frijol	305.00	304.00	515.61	1.73	10,996.02	5,628.79
Ejote	294.00	294.00	2,956.38	9.75	4,448.27	12,492.79
Aguacate	206.30	206.30	1,928.44	8.22	8,093.25	16,674.92
Lechuga	202.50	202.50	1,873.93	16.48	3,372.65	4,928.55
Papaya	190.15	190.15	6,921.27	45.12	3,271.10	26,265.01
Guaje	171.20	171.20	618.23	3.82	3,693.14	2,427.85
Alfalfa verde	148.00	148.00	12,834.20	80.44	529.96	8,010.74
Maíz forrajero	128.50	128.50	3,212.50	25.00	485.28	1,558.96
Albahaca	100.00	100.00	800.00	8.00	7,000.00	5,600.00
Pápalo	93.50	93.50	666.86	8.00	2,985.78	1,731.48
Col (repollo)	84.00	84.00	1,940.40	23.10	3,159.38	6,130.46
Pepino	73.00	73.00	1,023.00	13.26	5,097.36	5,295.60
Pipicha	65.00	65.00	204.08	3.14	2,403.65	490.54
Jícama	60.00	60.00	2,754.00	46.80	5,851.18	16,082.65
Sandía	60.00	60.00	1,400.70	23.60	5,803.09	8,141.80
Cacahuete	55.00	55.00	231.00	4.20	6,612.81	1,527.56
Tomate rojo (jitomate)	51.20	51.20	9,142.35	181.14	7,677.57	85,336.91
Sábila	49.00	49.00	4,335.41	88.48	623.62	2,897.93
Col de bruselas	43.00	43.00	1,401.80	32.60	6,606.00	9,260.29
Pitaya	34.00	34.00	130.30	3.74	7,250.00	982.85
Trigo grano	27.50	27.50	38.80	1.39	3,445.61	142.87

Rábano	27.00	27.00	554.25	20.44	2,193.42	1,238.50
Tuna	25.00	25.00	130.13	5.21	3,795.16	493.86
Mango	23.00	23.00	122.70	5.40	3,766.67	470.16
Higo	20.50	20.50	108.65	5.30	3,150.00	342.25
Naranja	16.00	16.00	145.80	9.33	1,636.94	295.65
Avena forrajera en verde	15.50	15.50	270.47	17.45	685.00	185.27
Chile verde	15.00	15.00	94.65	6.28	8,431.75	710.52
Haba grano	15.00	15.00	15.40	0.97	8,350.00	140.80
Caña de azúcar otro uso	12.00	12.00	732.00	61.00	484.45	354.62
Tomillo	7.00	7.00	21.14	3.02	10,900.00	230.43
Brócoli	5.50	5.50	44.00	8.00	4,008.16	176.36
Menta	5.00	5.00	21.70	4.34	22,100.00	479.57
Limón	2.00	2.00	14.20	7.10	4,401.07	62.50
Espinaca	1.80	1.80	13.52	7.51	2,500.00	33.80
Huauzontle	1.50	1.50	15.15	10.10	4,651.00	70.46
Pitahaya	1.20	1.20	10.70	8.92	15,400.00	164.78
	27,193.85	26,461.85	1,263,700.04	23.27	4,935.70	1,249,966.19

Cuadro 2. Estadística agrícola 2016 de cultivos anuales y perenes establecidos bajo riego en el área de influencia del acuífero Ixcaquixtla.

Fuente: SIAP, 2016.

Cultivo	Necesidades hídricas (mm)	Requerimiento de riego (mm)
Caña de azúcar	1,018.0	590.0
Maíz grano	656.0	242.8
Elote	656.0	242.8
Cebolla	320.8	308.6
Tomate verde	582.0	195.5
Calabacita	323.6	162.0
Cilantro	166.0	161.0
Zanahoria	415.1	371.9
Frijol	396.1	104.0
Ejote	396.1	104.1
Agucate	1,320.7	856.3
Lechuga	443.9	285.3
Papaya	1,320.7	856.3
Guaje	1,320.8	858.8

Alfalfa verde	1,344.2	847.5
Maíz forrajero	644.7	227.2
Albahaca	252.0	151.1
Pápalo	252.0	151.1
Col (repollo)	681.4	534.1
Pepino	378.5	66.2
Pipicha	158.8	153.6
Jícama	469.1	225.7
Sandía	345.6	133.8
Cacahuete	352.7	94.0
Tomate rojo	582.0	195.5
Sábila	646.4	329.3
Col de Bruselas	643.5	270.2
Pitaya	630.5	243.6
Trigo grano	745.5	294.5
Rábano	157.0	148.2
Tuna	677.5	248.4
Mango	1,320.8	825.5
Higo	630.5	253.6
Naranja	985.4	561.4
Avena forrajera	720.8	309.6
Chile verde	671.9	293.9
Haba grano	908.1	529.9
Caña de azúcar (otro uso)	1,018.0	590.0
Tomillo	472.5	254.0
Brócoli	643.5	270.2
Menta	442.7	408.1
Limón	985.4	561.4
Espinaca	252.0	151.1
Huauzontle	477.8	250.8
Pitahaya	630.5	243.6

Cuadro 3. Necesidades y requerimientos de riego del patrón de cultivos establecido en el acuífero Ixcaquixtla en el año 2016.

Fuente: Elaboración propia.

crecimiento poblacional del Consejo Nacional de Población, al año 2030 la población rural llegará a 199,201 habitantes; 15,977 habitantes más de los que había en el año 2010; mientras que la población urbana pasará de 98,348 habitantes a 116,952 habitantes.

Al final del año 2030, la población que habita dentro de la demarcación del acuífero requerirá 20.24 millones de metros cúbicos por año, para abastecimiento de agua potable, bajo un escenario inercial; lo cual representa 1.82 millones de metros cúbicos más de los utilizados en el año 2013.

. (DOF, 2016, p.4).

El patrón de cultivos establecidos bajo riego en el año 2016, estuvo conformado por 45 cultivos anuales y perennes, destacando la caña de azúcar en cuanto a superficie sembrada con 9,486.0 has, siguiéndole el maíz grano, el elote, la cebolla y el tomate verde, con 7,619.5, 3,301.0, 1,424.0 y 1,000.5 has, respectivamente.

La superficie sembrada total fue de 27,193.85 has, obteniéndose un total de 1'263,700.04 toneladas de productos agrícolas, con un valor de la producción de \$1'249,966.19 miles de pesos, mismo que representó el 5.37 % del Producto Interno Bruto (PIB) total por actividades primarias del estado de Puebla que fue de 23,272.54 millones de pesos (INEGI, 2016); destacando la caña de azúcar con una contribución de \$543'274,620.00, representando casi el 44 % del valor de la producción total en el acuífero Ixcaquixtla (Cuadro 2).

La información consultada y generada permitió la construcción de escenarios sobre la disponibilidad y la demanda de agua subterránea en el acuífero Ixcaquixtla en el período 2015-2070, realizándose a la vez, comparaciones y conclusiones entre los mismos escenarios construidos y elaborándose finalmente una serie de recomendaciones a seguir, sobre todo en lo concerniente al uso

del agua en actividades agrícolas, tendientes, las mismas, a realizar en todo momento, un uso más eficiente y racional del agua.

Debido a la falta de información de superficie y láminas de riego por cultivo, se consideró que un 40 % del volumen utilizado para riego, retornaba al acuífero en forma de recarga inducida, debido a la presencia de estratos de alta permeabilidad en el subsuelo. Considerando que el volumen de agua subterránea destinada al uso agrícola era de 68.02 millones de m³ anuales, 19.97 millones de m³ para uso doméstico y urbano y 2.22 millones de m³ para su uso industrial y otros usos, arrojando un volumen total de agua subterránea concesionado (VCAS) de 90.21 millones de m³ anuales.

Ahora bien, parte del análisis llevado a cabo en el presente estudio y ante la necesidad de contar con información sobre superficies y láminas de riego por cultivo, se enfocó a determinar los volúmenes de agua requeridos por el patrón de cultivos establecido bajo riego en el año 2016 en el área de influencia del acuífero Ixcaquixtla, de acuerdo a datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) órgano desconcentrado de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación (SAGARPA) del Gobierno Federal, a partir de la estimación de las láminas de riego por cultivo.

Para ello, se estimaron tanto las necesidades hídricas como los requerimientos de riego del patrón de cultivos, utilizando el método de estimación de Penman-Monteith (Cuadro 3).

Las necesidades hídricas de los cultivos se asocian al concepto de evapotranspiración (ET) del cultivo, mismo que considera la pérdida de agua bajo la forma de vapor desde un suelo con cubierta vegetal mediante la evaporación y a través de la transpiración del propio cultivo durante un intervalo de tiempo determinado. (Alcobendas y Moreno, 2011, p.2).

Fernández, Martínez, Tavaréz, Castillo, y Salas (2009), definieron al uso consuntivo o evapotranspiración como la suma de los volúmenes de agua usados por el crecimiento vegetativo de una cierta área por conceptos de transpiración y formación de tejidos vegetales y evaporada desde el suelo adyacente, proveniente de la nieve o de la precipitación interceptada en el área en cualquier tiempo dado, dividido por la superficie del área.

Mencionan que el requerimiento de riego de los cultivos (RR) o necesidades netas, se define como la suma de la evapotranspiración real corregida o evapotranspiración del cultivo corregida (ETc correg) menos la precipitación efectiva (Pe).

En la construcción de los escenarios respecto a la disponibilidad y demanda de agua en el acuífero Ixcaquixtla, de acuerdo a su uso por los diferentes sectores productivos (primario y secundario) y al aprovisionamiento a la población de las localidades y municipios que forman parte del área de influencia del acuífero, se siguió el siguiente procedimiento:

Con información de las publicaciones "*Panorama sociodemográfico de Puebla, Tomos I y II*", del año 2011, se contabilizó la población existente en el año 2010 en cada uno de los 49 municipios que forman parte del área de influencia del acuífero; mientras que con información del Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI, 2011) se contabilizó la población existente para los años 2011, 2012, 2013, 2014 y 2015 y finalmente, con información del Consejo Nacional de Población (CONAPO) y de acuerdo a las tasas de natalidad para los municipios estudiados, y utilizando tendencias lineales y mínimos cuadrados, se realizó la proyección de crecimiento poblacional hasta el año 2070.

La población total se dividió, para su análisis particular, en población urbana y población rural, correspondiendo un 72 % del

total a población urbana y el restante 28 % a población rural.

La demanda o uso consuntivo de la población utilizado en la construcción del primer escenario, -escenario actual- se determinó considerando que la población urbana tiene una demanda de 172 litros por habitante por día. Por su parte, la población rural demanda 150 litros por habitante por día, demandas muy por debajo de los 320 litros por habitante por día que reporta la CONAGUA dispone cada mexicano hoy en día y más cercanos a los 50 a 100 litros por persona por día que reporta la Organización Mundial de la Salud (OMS) debe disponer una persona para cubrir sus necesidades básicas y evitar la mayor parte de los problemas de salud. (Derechos Humanos de la ONU, OMS, 2011, p.13).

Por otra parte, en la construcción del segundo escenario -un escenario ajustado- la demanda o uso consuntivo de la población se determinó considerando una demanda de agua por la población urbana de 100 litros por habitante por día y de 50 litros por habitante por día por parte de la población rural.

De acuerdo a información oficial de la CONAGUA, la demanda o uso consuntivo del agua para actividades industriales y otras, corresponde a un 3 % del volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS) por parte de la misma Comisión. Para consumo público-urbano se consideró el 33 % del VCAS y para el uso agrícola el restante 64 % del VCAS. Para la construcción del escenario actual, se consideró un 79.80 % para uso agrícola, un 19.26 % para uso público-urbano y un 0.94 % para uso industrial. Finalmente, un escenario ajustado consideró un 87.95 % para uso agrícola, un 11.01 % para uso público-urbano y un 1.04 % para uso industrial.

El escenario de uso consuntivo de agua respecto al uso del suelo (ponderado general),

para el período 2015 – 2070, se construyó a partir de información de la superficie en hectáreas dedicadas a cada una de las actividades sustantivas de análisis para el uso del agua del acuífero Ixcaquixtla, a saber: uso agrícola, uso público-urbano y uso industrial y otros usos.

Los usos consuntivos de agua por actividad sustantiva, se tomaron de los cálculos realizados en las hojas correspondientes a volúmenes de agua requeridos por el patrón de cultivos establecido -que corresponde al uso consuntivo agrícola- el uso consuntivo realizado por la población y el uso consuntivo realizado por la industria.

La suma de estos usos consuntivos representa la demanda total de agua, misma que se graficó contra la disponibilidad de agua subterránea reportada por la CONAGUA en su estudio “Actualización de la disponibilidad media anual de agua del acuífero Ixcaquixtla al 20 de abril de 2015”. Mismo procedimiento se siguió para la construcción del escenario de uso consuntivo calculado o ajustado.

Finalmente, se realizó un análisis ponderado de los usos consuntivos de agua en el acuífero Ixcaquixtla, considerando como línea base la superficie agrícola sembrada y cosechada, el volumen de agua requerido por el patrón de cultivos establecido, e incrementos proyectados del 21 % y del 50 % de la superficie agrícola sembrada en el área de influencia del acuífero.

Los usos consuntivos público-urbano e industrial y otros usos, fueron los mismos reportados en los escenarios oficial y calculado o ajustado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la construcción de los escenarios de uso consuntivo, considerando los volúmenes de agua de acuerdo a la superficie sembrada y requeridos por cada uno de los cultivos establecidos, destacan los volúmenes

requeridos o usos consuntivos del cultivo de la caña de azúcar, maíz grano, del elote y de la cebolla, esto de acuerdo a la superficie sembrada y cosechada de cada uno de estos cultivos, mientras que el resto de cultivos mostraron una tendencia más o menos uniforme en cuánto a sus requerimientos de riego. Los cultivos establecidos en el área de influencia del acuífero Ixcaquixtla, tuvieron un uso consuntivo total de 102,792.83 miles de m³ de agua en las 27,193.85 has sembradas, (Cuadro 4).

Con un consumo de agua de 100 litros por día por habitante de localidades urbanas y de 50 litros por día por habitante de localidades rurales, los 49 municipios que conforman el acuífero Ixcaquixtla, con una población total de 386,711 habitantes, demandaron en el año 2010, un volumen de agua total de 12,139 miles de m³. Para el año 2015, la población proyectada sería de 409,788 habitantes, misma que demandará un volumen de agua total de 12,863 miles de m³; 23,077 habitantes más respecto al año 2010 y 724 miles de m³ de agua adicional.

Para el año 2070, la proyección de acuerdo a datos de CONAPO y de los resultados obtenidos aplicando tendencias lineales (método de mínimos cuadrados), la población total será de 561,453 habitantes, misma que demandará un volumen de agua total de 17,624 miles de m³; 151,665 habitantes más que en el año 2015 y 4,761 miles de m³ de agua adicional al mismo año (Cuadro 5).

El uso consuntivo mayoritario del agua subterránea recae en la actividad agrícola, que de acuerdo a datos de la CONAGUA ocupa un 64 % del volumen de agua total concesionado, le siguen el público-urbano y el industrial y otros usos.

Datos ajustados, arrojan un 87.95 % de los volúmenes concesionados para uso agrícola, un 11.01 % para uso público-urbano y un 1.04 % para uso industrial y otros usos. Resultando

Cultivo	Riego		Demanda neta de riego	UC total
	Hectáreas	%	m ³ * ha	m ³ /año
Caña de azúcar	9,486.00	34.88	5900.00	55,967,400.00
Maíz grano	7,619.50	28.02	2428.00	18,500,146.00
Elote	3,301.00	12.14	2459.00	8,117,159.00
Cebolla	1,424.00	5.24	3086.00	4,394,464.00
Tomate verde	1,000.50	3.68	1955.00	1,955,977.50
Calabacita	761.50	2.80	1620.00	1,233,630.00
Cilantro	500.50	1.84	1610.00	805,805.00
Zanahoria	467.00	1.72	3719.00	1,736,773.00
Frijol	305.00	1.12	1040.00	317,200.00
Ejote	294.00	1.08	1113.00	327,222.00
Aguacate	206.30	0.76	8563.00	1,766,546.90
Lechuga	202.50	0.74	2853.00	577,732.50
Papaya	190.15	0.70	8563.00	1,628,254.45
Guaje	171.20	0.63	8588.00	1,470,265.60
Alfalfa verde	148.00	0.54	8475.00	1,254,300.00
Maíz forrajero	128.50	0.47	2272.00	291,952.00
Albahaca	100.00	0.37	1511.00	151,100.00
Pápalo	93.50	0.34	1511.00	141,278.50
Col (repollo)	84.00	0.31	5341.00	448,644.00
Pepino	73.00	0.27	662.00	48,326.00
Pipicha	65.00	0.24	1536.00	99,840.00
Jícama	60.00	0.22	2257.00	135,420.00
Sandía	60.00	0.22	1338.00	80,280.00
Cacahuete	55.00	0.20	940.00	51,700.00
Tomate rojo (jitomate)	51.20	0.19	1955.00	100,096.00
Sábila	49.00	0.18	3293.00	161,357.00
Col de bruselas	43.00	0.16	2702.00	116,186.00
Pitaya	34.00	0.13	2436.00	82,824.00
Trigo grano	27.50	0.10	2945.00	80,987.50
Rábano	27.00	0.10	1482.00	40,014.00
Tuna	25.00	0.09	2484.00	62,100.00
Mango	23.00	0.08	8255.00	189,865.00
Higo	20.50	0.08	2536.00	51,988.00
Naranja	16.00	0.06	5614.00	89,824.00

Avena forrajera en verde	15.50	0.06	3096.00	47,988.00
Chile verde	15.00	0.06	2939.00	44,085.00
Haba grano	15.00	0.06	5299.00	79,485.00
Caña de azúcar otro uso	12.00	0.04	5900.00	70,800.00
Tomillo	7.00	0.03	2540.00	17,780.00
Brócoli	5.50	0.02	2702.00	14,861.00
Menta	5.00	0.02	4081.00	20,405.00
Limón	2.00	0.01	5614.00	11,228.00
Espinaca	1.80	0.01	1511.00	2,719.80
Huauzontle	1.50	0.01	2598.00	3,897.00
Pitahaya	1.20	0.00	2436.00	2,923.20
	27,193.85	100.00	151,758.00	102,792,829.95

Cuadro 4. Superficies y usos consuntivos del patrón de cultivos bajo riego en el acuífero Ixcaquixtla en el año 2016.

Fuente: Elaboración propia

Municipio	2010	2015	2030	2050	2070
Acatlán	33,865	35,886	40,301	44,734	49,167
Ahuatlán	3,403	3,606	4,050	4,495	4,941
Ahuehuetitla	2,008	2,128	2,390	2,652	2,915
Albino Zertuche	1,770	1,876	2,106	2,338	2,570
Atexcal	3,734	3,957	4,444	4,932	5,421
Axutla	947	1,004	1,127	1,251	1,375
Chiautla	19,037	20,173	22,655	25,147	27,639
Chietla	33,935	35,960	40,385	44,827	49,269
Chigmecatitlán	1,227	1,300	1,460	1,621	1,781
Chila	4,699	4,979	5,592	6,207	6,822
Chila de la Sal	1,237	1,311	1,472	1,634	1,796
Chinantla	2,468	2,615	2,937	3,260	3,583
Coatzingo	2,964	3,141	3,527	3,915	4,303
Cohetzala	1,283	1,360	1,527	1,695	1,863
Coyotepec	2,339	2,479	2,784	3,090	3,396
Cuautinchán	9,538	10,107	11,351	12,599	13,848
Cuayuca de Andrade	3,062	3,245	3,644	4,045	4,446
Guadalupe	6,276	6,651	7,469	8,290	9,112
Huatlatlahuca	6,643	7,039	7,906	8,775	9,645
Huehuetlán el Chico	8,679	9,197	10,328	11,465	12,601
Huehuetlán el Grande	7,060	7,481	8,402	9,326	10,250
Ixcamilpa de Guerrero	3,695	3,915	4,397	4,881	5,365
Ixcaquixtla	8,093	8,576	9,631	10,691	11,750

Izúcar de Matamoros	72,799	77,143	86,635	96,165	105,694
Jolalpan	12,662	13,418	15,068	16,726	18,384
Juan N. Méndez	5,223	5,535	6,216	6,899	7,583
La Magdalena Tlatlauquitepec	484	513	576	639	703
Molcaxac	6,218	6,589	7,400	8,214	9,028
Petlalcingo	9,382	9,942	11,165	12,393	13,621
Piaxtla	4,585	4,859	5,456	6,057	6,657
San Jerónimo Xayacatlán	3,777	4,002	4,495	4,989	5,484
San Juan Atzompa	872	924	1,038	1,152	1,266
San Miguel Ixitlán	586	621	697	774	851
San Pablo Anicano	3,554	3,766	4,229	4,695	5,160
San Pedro Yeloixtlahuaca	3,395	3,598	4,040	4,485	4,929
Santa Catarina Tlaltempan	874	926	1,040	1,155	1,269
Santa Inés Ahuatempan	5,944	6,299	7,074	7,852	8,630
Tecali de Herrera	20,267	21,476	24,119	26,772	29,425
Tecomatlán	5,420	5,743	6,450	7,160	7,869
Tehuiztingo	11,328	12,004	13,481	14,964	16,447
Teopantlán	4,024	4,264	4,789	5,316	5,842
Teotlalco	3,121	3,307	3,714	4,123	4,531
Tepexi de Rodríguez	20,478	21,700	24,370	27,051	29,731
Totoltepec de Guerrero	1,155	1,224	1,375	1,526	1,677
Tulcingo	9,245	9,797	11,002	12,212	13,423
Tzicatlacoyan	6,242	6,614	7,428	8,245	9,063
Xayacatlán de Bravo	1,649	1,747	1,962	2,178	2,394
Xicotlán	1,241	1,315	1,477	1,639	1,802
Zacapala	4,224	4,476	5,027	5,580	6,133
Total	386,711	409,788	460,207	510,830	561,453
población urbana	278,432	295,047	331,349	367,798	404,246
uso consuntivo (l/d/hab)					
uso consuntivo (m3/d)	27,843	29,505	33,135	36,780	40,425
población rural	108279.08	114740.5106	128858.0253	143032.4081	157206.7908
uso consuntivo (l/d/hab)					
uso consuntivo (m3/d)	5,414	5,737	6,443	7,152	7,860

Uso consuntivo del acuífero (m ³ /año)	12,138,858	12,863,231	14,445,905	16,034,955	17,624,004
---	------------	------------	------------	------------	------------

Cuadro 5. Población y uso consuntivo público-urbano ajustado de los municipios del área de influencia del acuífero Ixcaquixtla. Período 2015-2070.

Fuente: INEGI, CONAPO y cálculos propios utilizando tendencias lineales y mínimos cuadrados.

Datos oficiales 2016			Ajustado		
VCAS	Porcentaje	40,471,695.00	Porcentaje	116,870,211.61	
DOF 20 abril 2015	%	m3	%	m3	
Agrícola	0.64	25,901,884.80	87.95	102,792,829.95	
Público	0.33	13,355,659.35	11.01	12,863,230.81	
Industria y otros	0.03	1,214,150.85	1.04	1,214,150.85	
Suma	1.00	40,471,695.00	100.00	116,870,211.61	
Consideraciones: 100 l/hab/día uso urbano 50 l/hab/día uso rural 27,193.85 hectáreas					

Cuadro 6. Tabla comparativa de usos consuntivos del acuífero Ixcaquixtla.

Fuente: CNA, 2015 y elaboración propia.

Descripción	2015 (Ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)	2020 (Ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)	2030 (Ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)	2050 (Ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)	2070 (Ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)
Uso agrícola	27,193.85	102,792,829.95	28,553.54	107,932,471.45	29,981.22	113,329,095.02	31,480.28	118,995,549.77	33,054.29	124,945,327.26
Uso público urbano	18,979.55	12,863,230.81	19,928.53	13,469,923.70	20,924.96	14,445,905.05	21,971.21	16,034,954.60	23,069.77	17,624,004.16
Uso Industrial y otros	200.00	1,214,150.85	210.00	1,238,433.87	220.00	1,263,202.54	230.00	1,288,466.60	250.00	1,314,235.93
Total	46,373.40	116,870,211.61	48,692.07	122,640,829.02	51,126.18	129,038,202.61	53,681.49	136,318,970.97	56,374.06	143,883,567.35

Cuadro 7. Escenario de uso del suelo y usos consuntivos para los años 2015, 2030, 2050 y 2070 del acuífero Ixcaquixtla.

Fuente: Elaboración propia.

Descripción	2015 (Ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)	2020 (Ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)	2030 (Ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)	2050 (Ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)	2070 (Ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)
Uso agrícola	27,193.85	102,792,829.95	28,553.54	107,932,471.45	29,981.22	113,329,095.02	31,480.28	118,995,549.77	33,054.29	124,945,327.26
Uso público urbano	18,979.55	24,805,095.33	19,928.53	25,975,024.96	20,924.96	27,857,080.16	21,971.21	30,921,358.97	23,069.77	33,985,637.79
Uso Industrial y otros	200.00	1,214,150.85	210.00	1,238,433.87	220.00	1,263,202.54	230.00	1,288,466.60	250.00	1,314,235.93
Total	46,373.40	128,812,076.13	48,692.07	135,145,930.28	51,126.18	142,449,377.72	53,681.49	151,205,375.34	56,374.06	160,245,200.98

Cuadro 8. Escenario de uso del suelo y usos consuntivos para los años 2015, 2030, 2050 y 2070 de acuerdo a datos ajustados del acuífero Ixcaquixtla.

Fuente: Elaboración propia.

Año	Disponibilidad	Demanda	%	Superávit/Déficit
2015	128,812,076.13	395,340,258.03	32.58	67.42
2020	135,145,930.28	387,433,452.87	34.88	65.12
2030	142,449,377.72	375,810,449.28	37.90	62.10
2050	151,205,375.34	364,536,135.80	41.48	58.52
2070	160,245,200.98	353,600,051.73	45.32	54.68

Cuadro 9. Disponibilidad y demanda de agua subterránea, en miles de m³, del acuífero Ixcaquixtla, de acuerdo a datos ajustados, en el período 2015 - 2070.

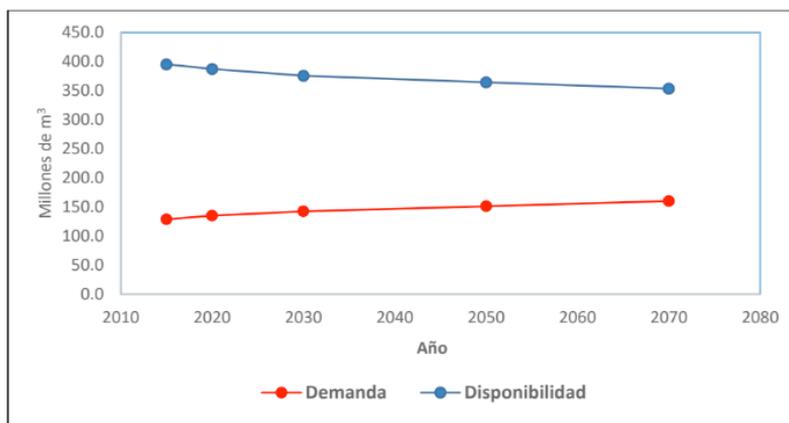


Figura 2. Disponibilidad y demanda de agua subterránea del acuífero Ixcaquixtla, de acuerdo a datos ajustados, en el período 2015 – 2070.

un VCAS ajustado de 116,870 miles de m³; 76,398 miles de m³ más respecto el VCAS oficial, (Cuadro 6).

Por lo que respecta al escenario de uso consuntivo conforme al uso del suelo (ponderado) de cada uno de los usos consuntivos de agua subterránea del acuífero Ixcaquixtla, para los años 2015, 2030, 2050 y 2070, se encontró que la superficie sembrada al 2015, era de 27,193.85 has, 18,979.55 has ocupadas por localidades urbanas y rurales, 200 has ocupadas por parques industriales y otros usos, con un uso consuntivo total de 46,373.4 miles de m³ de agua, (Cuadro 7).

Para el año 2070, la superficie agrícola será de 33,054.29 has; la superficie ocupada por localidades urbanas y rurales será de 23,069.77 has, mientras que la ocupada por parques industriales será de 250 has. El uso consuntivo total será de 56,374.06 miles de m³; 10,000.66 miles de m³ más respecto el uso consuntivo total del año 2015.

El volumen concesionado o extraído de agua subterránea del acuífero Ixcaquixtla (VCAS) y la disponibilidad de agua subterránea (DAS), se afectaron por los factores 0.98 para el año 2020 y de 0.97 para los años 2030, 2050 y 2070. Los resultados indican volúmenes totales de 395.34 millones de m³ para el año 2015, disminuyendo dicho volumen en años subsecuentes hasta llegar a 353.60 millones de m³ para el año 2070.

Por lo que respecta al escenario de uso consuntivo de acuerdo a datos ajustados y conforme al uso del suelo (ponderado) de cada uno de los usos consuntivos de agua subterránea del acuífero Ixcaquixtla, para los años 2015, 2030, 2050 y 2070, se encontró que la superficie sembrada al 2015, era de 27,193.85 has, 18,979.55 has ocupadas por localidades urbanas y rurales, 200 has ocupadas por parques industriales y otros usos, con un uso consuntivo total de 46,373.40 miles de m³ de agua.

Para el año 2070, la superficie agrícola será, de acuerdo a datos ajustados, de 33,054.29 has; la superficie ocupada por localidades urbanas y rurales será de 23,069.77 has, mientras que la ocupada por parques industriales será de 250 has. El uso consuntivo total será de 56,374.06 miles de m³; 10,000.66 miles de m³ menos respecto el uso consuntivo total del año 2015 (Cuadro 8).

Conforme lo anterior, la disponibilidad y la demanda de agua subterránea, de acuerdo a datos ajustados, para el período 2015-2070, muestran una disponibilidad de alrededor del 67.42 % para el año 2015, reduciéndose ésta paulatinamente en los años siguientes hasta llegar al 54.68 % de disponibilidad para el año 2070. (Cuadro 9 y Figura 2).

Conforme a un escenario ponderado, considerando la información oficial y la información calculada y ajustada en el presente estudio, con respecto al uso consuntivo del agua en actividades agrícolas, la línea base muestra una superficie agrícola de 27,193.85 has, con un uso consuntivo de agua subterránea de 102.79 millones de m³. También como línea base se establece un uso consuntivo del agua subterránea de 24.81 millones de m³ para uso público-urbano y un uso consuntivo del agua subterránea de 1.21 millones de m³ para uso industrial y otros usos (Cuadro 10 y Figura 3).

En este escenario ponderado, la superficie agrícola se incrementa primeramente en un 21 %, derivando este incremento en 32,904.56 has y un cambio del uso consuntivo en esta actividad a 124.37 millones de m³ de agua, arrojando esto un incremento de 21,58 miles de m³ de agua. El uso consuntivo de la población y el de la industria y otros usos, permanecen sin cambio.

Finalmente, se considera que en el área de influencia del acuífero Ixcaquixtla, existe una superficie potencial con vocación agrícola de 35,000 has, con un uso consuntivo potencial

	Millones de metros cúbicos		
	Uso del agua en actividades agrícola	Uso de agua por la población	Uso de agua por la industria
Línea base 27,193,85 ha.	102.79	24.81	1.21
21% 32,904,56 ha.	124.37	24.81	1.21
Vocación agrícola potencial 35,000,00 ha.	132.29	24.81	1.21

Cuadro 10. Escenario ponderado del uso consuntivo del agua en el acuífero Ixcaquixtla.

Fuente: Elaboración propia.

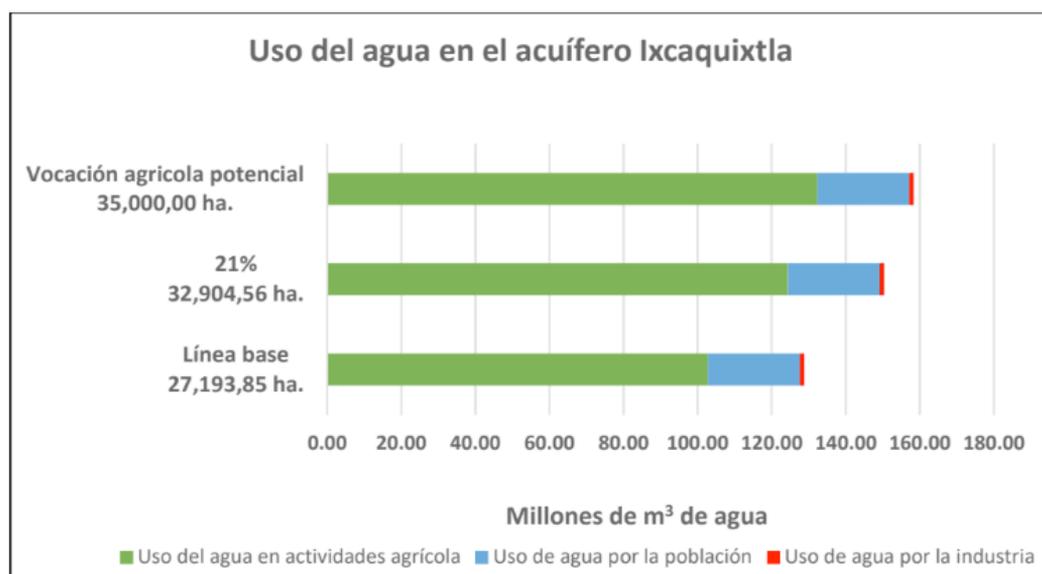


Figura 3. Uso consuntivo actual y potencial del agua en el acuífero Ixcaquixtla.

de agua subterránea de 132.29 millones de m³.

En el presente estudio se consideraron como demanda de agua subterránea, únicamente los usos consuntivos relacionados con el uso público-urbano, el uso agrícola y el uso industrial, totalizando los mismos, los volúmenes extraídos y concesionados a los usuarios por parte de la CONAGUA y como disponibilidad aquellos volúmenes de agua almacenados en el acuífero, resultados de la recarga media anual del acuífero y de las descargas naturales comprometidas.

Estos dos últimos aspectos, sobre todo el que tiene que ver con la recarga media anual del acuífero, en un escenario de cambio climático, dicho recarga se vería afectada por la variabilidad en tiempo y espacio de la precipitación pluvial. Al disminuir la recarga, se afectaría negativamente el almacenamiento del acuífero y con ello, los volúmenes de extracción y aquellos concesionados a los usuarios.

Otro aspecto a considerar como una alternativa viable para satisfacer parte de la demanda de agua de la población urbana y rural, es la captación de agua de lluvia, ya que con el establecimiento de este tipo de sistemas se puede solucionar el problema de escasez de agua en las poblaciones alejadas de las ciudades, incluso satisfacer las necesidades de la población periurbana, constituyéndose, además, en una alternativa para disminuir la explotación de los mantos acuíferos, (Villarreal, 2016).

CONCLUSIONES

Conforme a los resultados obtenidos se puede observar que la demanda industrial y doméstica de agua aumentará mucho más rápidamente que la demanda agrícola, aunque la actividad agrícola seguirá siendo la principal consumidora de agua del acuífero.

Resultados y consideraciones del presente estudio son similares a la proyección que hace

Grecko, 2018, de que una disponibilidad de 50 litros de agua por persona por día, podría estar paliando en alguna medida, la grave escasez que enfrentan en estos momentos grandes ciudades como Ciudad del Cabo, Sao Paulo, Bengaluru, Beijing, El Cairo, Yakarta, Moscú, Estambul, Cd. de México, Lonfres, Tokio y Miami, renunciando, claro, a la mayor parte de las cosas en las que uno emplea el agua.

De la misma forma, según las proyecciones de expertos respaldados por la ONU, *la demanda global de agua potable sobrepasará el suministro en 40 % para el año 2030*, gracias a una combinación de factores como el cambio climático, la acción humana y el crecimiento demográfico. (BBC Mundo, 2018, p.2).

El acuífero Ixcaquixtla, clave 2106, debido a su naturaleza de acuífero libre y somero, es extremadamente vulnerable a la contaminación generada por las actividades humanas, es decir que por sus características hidrogeológicas, es muy susceptible a ser contaminado y que la calidad del agua subterránea sea deteriorada hasta rebasar los límites máximos permisibles para consumo humano, por lo que es necesario controlar y vigilar las posibles fuentes de contaminación antropogénica que pudieran deteriorar la calidad del agua subterránea, ya que pueden acarrear problemas a la salud pública.

En el acuífero Ixcaquixtla, clave 2106, existe disponibilidad media anual de agua subterránea para otorgar nuevas concesiones o asignaciones; sin embargo, el acuífero debe estar sujeto a una extracción, explotación, uso y aprovechamiento controlados para continuar con la sustentabilidad ambiental y prevenir la sobreexplotación del acuífero.

En el acuífero Ixcaquixtla, clave 2106, persiste el riesgo de que la demanda supere la capacidad de renovación del acuífero, con el consecuente abatimiento del nivel de saturación, disminución o desaparición de los manantiales y del caudal base, el incremento

de los costos de bombeo y el deterioro de la calidad del agua subterránea, en detrimento del ambiente y de los usuarios de la misma.

El Acuerdo General de suspensión de libre alumbramiento, establece que estará vigente hasta en tanto se expida el instrumento jurídico que la Comisión Nacional del Agua, por conducto de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, proponga al titular del Ejecutivo Federal; mismo que permitirá realizar la administración y uso sustentable

de las aguas nacionales del subsuelo en el acuífero Ixcaquixtla, clave 2106.

AGRADECIMIENTO

Al M.C. Jesús Enrique López Avendaño, Profesor de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, por facilitar la hoja de cálculo utilizada en la estimación de las necesidades hídricas y los requerimientos de riego de los cultivos por el método de Penman-Monteith.

REFERENCIAS

- Alcobendas, C. P.J. y Moreno, V. M.M. (2011). Áreas de Ingeniería Agroforestal y de Producción Vegetal. Universidad de Castilla - La Mancha. España. Recuperado de https://previa.uclm.es/area/ing_rural/hidraulica/presentacionespdf_str/necesidadesriego.pdf
- BBC Mundo. (2018). 11 de las grandes urbes del mundo con más probabilidades de quedarse sin agua potable como Ciudad del Cabo. Redacción BBC Mundo. Recuperado de <http://www.bbc.com/mundo/noticias-42975307>
- Comisión Nacional del Agua. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ixcaquixtla (2106), Estado de Puebla. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos. Publicado en el Diario Oficial de la Federación. 20 de abril de 2015. México, D.F.
- Comisión Nacional del Agua. (2016). Atlas del Agua en México 2016. Subdirección General de Planeación. México, Ciudad de México. Recuperado de http://201.116.60.25/publicaciones/AAM_2016.pdf
- Cruz, F.A., Ramírez, H.J., Vázquez, G.R., Nava, S.E.H., Troyo, D.E. y Fraga, P.H.C. (2013). Estimación de la recarga y balance hidrológico del acuífero de La Paz, BCS, México. Universidad y ciencia. Vol.29 no.1 Villahermosa. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792013000100009
- Diario Oficial de la Federación. (2016). Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Ixcaquixtla clave 2106, en el Estado de Puebla, Región Hidrológica Administrativa Balsas. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5424264&fecha=03/02/2016
- Fernández, R.D.S., Martínez, M.M.R., Tavarez, E.C.A., Castillo, V.R. y Salas, M.R. (2009). Estimación de las demandas de consumo de agua. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Subsecretaría de Desarrollo Rural. Dirección General de Apoyos para el Desarrollo Rural. Disponible en: Recuperado de http://www.sagarpa.gob.mx/desarrollorural/noticias/2012/documents/fichas%20tecnicas%20e%20instructivos%20nava/instructivo_demandas%20de%20agua.pdf
- Grecko, T. (2018). La era de la sed. Reportaje especial. Revista Proceso. Ed. 2156. Recuperado de <http://www.proceso.com.mx/524693/la-era-de-la-sed>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2011). Panorama sociodemográfico de Puebla. Tomo I. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags. México. Recuperado de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/poblacion/2010/panora_socio/pue/Panorama_Pue_T1.pdf
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2011). Panorama sociodemográfico de Puebla. Tomo II. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags. México. Recuperado de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/poblacion/2010/panora_socio/pue/Panorama_Pue_T2.pdf

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2016). Producto Interno Bruto por Entidad Federativa. Boletín de prensa no. 529/16. Aguascalientes, Ags. México. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/boletines/2016/especiales/especiales2016_12_02.pdf

Jiménez, M.A. (2018). Importancia del agua subterránea como fuente de abastecimiento. Blog del agua. Caminos de Andalucía y Melilla. Recuperado de <https://blogdelagua.com/actualidad/importancia-del-agua-subterranea-como-fuente-de-abastecimiento/>

Lesser, C.L.E., Lesser, I.J.M., Arellano, I.S. y González, P.D. (2011). Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital, México central. *Rev. mex. cienc. geol* vol. 28 no.3 México. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742011000300001

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2016). Avances de siembras y cosechas. Recuperado de <http://www.gob.mx/siap>

Organización de las Naciones Unidas. Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos. Organización Mundial de la Salud. (2011). El derecho al agua. Folleto informativo no. 35. Palais des Nations, 8-14 avenue de la Paix, CH-1211 Ginebra 10, Suiza. Recuperado de www.ohchr.org/documents/publications/factsheet35sp.pdf

Sahuquillo, H.A. (2009). La importancia de las aguas subterráneas. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. *Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)* Vol. 103, Nº. 1, pp 97-114, 2009 X Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica. Recuperado de <http://www.rac.es/ficheros/doc/00923.pdf>

Valis, D. (2017). La protección de acuíferos en México. CONACYT-Prensa. [Agua.org.mx](http://agua.org.mx). 17 de Agosto de 2017. Recuperado de <https://agua.org.mx/la-proteccion-acuiferos-en-mexico/>

Villarreal, M.L.A. (2016). Captación, almacenamiento, uso y conservación del agua en el traspatio. En J.F. Álvarez. (Ed.), *Lecciones sobre agricultura familiar y su contribución a la seguridad alimentaria* (pp. 159-181) México, Distrito Federal. Editorial La Aldea.