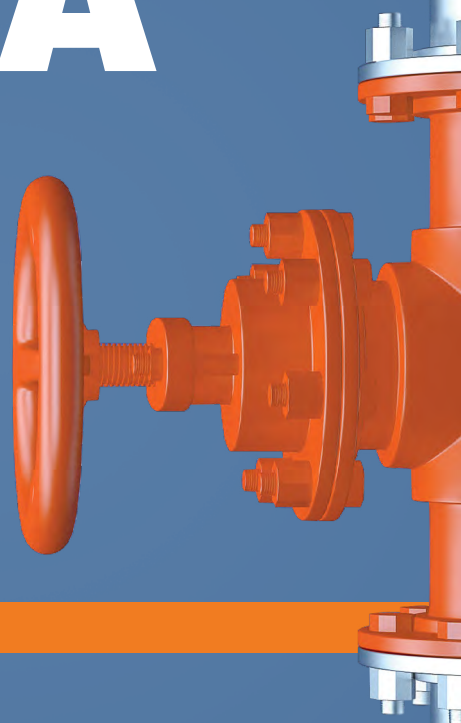


- Dynamic model of public-urban water demand in the Metropolitan Area of Puebla-Tlaxcala

48

UDLAP

Modelo dinámico de la

DEMANDA**DE AGUA****PÚBLICO-URBANA**en la zona metropolitana de
Puebla-TlaxcalaPor:  Pedro Andrés Sánchez Gutiérrez · Uxmal Rodríguez Morales **RESUMEN**

En 2015 México ocupó el octavo lugar mundial en población urbana total. Además, se espera que dicha población continúe incrementándose, al menos hasta el 2050. El país cuenta con 74 zonas metropolitanas y, entre ellas, la Zona Metropolitana Puebla-Tlaxcala (ZMPT). Ésta es la cuarta en magnitud, lo que genera presión sobre varios recursos, entre ellos el hídrico. En el presente estudio se construyó un modelo de simulación dinámica para observar y analizar la contribución de la eficiencia física del sistema operador, el aumento de la temperatura y la elasticidad-precio del agua

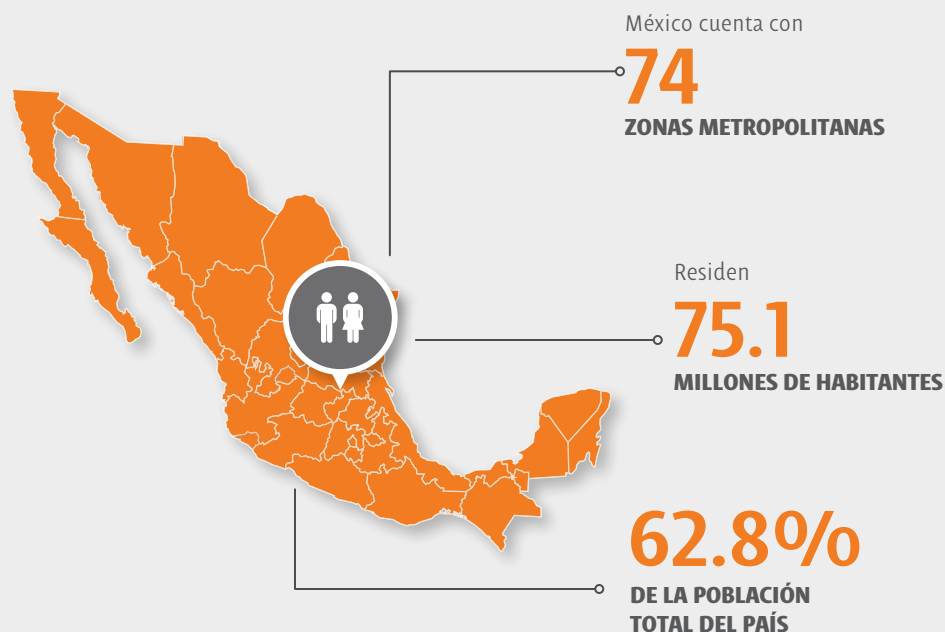
sobre la demanda de agua público-urbana en la ZMPT, entre las que la eficiencia del organismo operador resultó ser la más sensible ante moderados cambios (mejoras). Así, se considera que el presente modelo pueda ser instrumento de carácter inicial para la planeación de los tomadores de decisiones frente a diferentes escenarios tendenciales.

 PALABRAS CLAVE

Puebla-Tlaxcala · Demanda público-urbana · Eficiencia física · Cambio climático · Elasticidad precio-demanda



ZONAS METROPOLITANAS EN MÉXICO



49

ZONA METROPOLITANA PUEBLA-TLAXCALA

se define partir de la conurbación intermunicipal e interestatal.



◆ ABSTRACT

In 2015, Mexico ranked eighth in total urban population worldwide. In addition, it is expected that population will continue to increase, at least until year 2050. The country has 74 metropolitan areas, among them, the Puebla-Tlaxcala Metropolitan Area (zmpt). This is the fourth largest area, which generates pressure on several resources, including water. In the present study, a dynamic simulation model was constructed to observe and analyze the contribution of the physical efficiency of the operating system, the increase in temperature and the elasticity-price of water on the urban public water demand in the zmpt, among the which efficiency of the operator was the most sensitive to moderate changes (improvements). Thus, it is considered that the present model can be an initial instrument for the planning of decision-makers facing different trend scenarios.

◆ KEY WORDS

Puebla-Tlaxcala · Urban-public demand · Physical efficiency · Climate change · Price-demand elasticity

◆ INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población urbana a nivel mundial se aceleró en los últimos años y ya en 2015 la proporción de ésta llegaba al 54.83 % (WBG, 2018). México, en 2015, ocupó a nivel mundial el décimo lugar en cuanto a población total, y el octavo respecto a proporción de población viviendo en las ciudades (SEDATU, CONAPO e INEGI, 2018). Esta urbanización se ve acompañada, casi siempre, del crecimiento de núcleos urbanos ya establecidos, que en su expansión terminan uniéndose físicamente con núcleos poblacionales vecinos, formando

EN 2015

MÉXICO OCUPÓ A NIVEL MUNDIAL

EL 10º LUGAR

EN CUANTO A POBLACIÓN TOTAL, Y EL OCTAVO CON RESPECTO A PROPORCIÓN DE POBLACIÓN VIVIENDO EN LAS CIUDADES.

así, zonas metropolitanas. Esta unión física no siempre respeta delimitaciones territoriales (tanto municipales como estatales en el caso de México) y termina demandando más recursos, y sobrecargando la infraestructura de la zona central, que es el área usualmente más desarrollada, con más recursos y donde hay más acceso a servicios y oportunidades. El proceso también demanda cambios en la estructura urbana, en el uso de suelo y en las relaciones funcionales entre las distintas localidades que la conforman.

Actualmente México cuenta (con base en datos del 2015) con 74 zonas metropolitanas donde residen 75.1 millones de habitantes, lo que constituye el 62.8% de la población del país (SEDATU, CONAPO e INEGI, 2018). La delimitación y el estudio de la situación actual y de prospección de estas zonas metropolitanas es



de gran importancia ya que permite destinar la cantidad de recursos necesarios para mantener, modificar y crear determinados niveles de servicios e infraestructuras.

La ZMPT está localizada en la región central del país, entre los 18° 50' y 19° 25' de latitud norte, y los 97° 55' y 98° 40' de longitud oeste. Está ubicada en el valle de Puebla-Tlaxcala, rodeada por montes y montañas del Eje Neovolcánico Transversal. Unos 40 km al poniente del centro de la capital poblana se ubican los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl; y 20 km al nororiente se encuentra el volcán La Malinche; hacia el norte colinda con la zona metropolitana Tlaxcala-Apizaco, hacia el sur con la Sierra del Tentzo y el Valle de Atlixco; en el lado este con el Valle Tepeaca-Tecamachalco; y al oeste con la Sierra Nevada (López-Zamora y Montalvo-Vargas, 2015).

La zona metropolitana Puebla-Tlaxcala (ZMPT) se define como tal a partir de la conurbación intermunicipal e interestatal. Desde el 2010 se le considera integrada por 39 municipios, 19 en el estado de Puebla y 20 en Tlaxcala. De estos, 29 se clasifican como centrales, dos se integran por la distancia que los separa de la ciudad, su integración funcional y su carácter urbano; los otros diez se incluyen conforme a la política de planeación urbana (SEDATU, CONAPO e INEGI, 2018).

En 2015 la ZMPT contaba con una población de 2,941,988 habitantes en una extensión de 2392.4 km² y una densidad media urbana de 76.6 habitantes/hectárea. Por estas características ocupa el cuarto lugar en importancia dentro del sistema nacional urbano. Los cinco municipios más poblados son Puebla, San Martín Texmelucan, San Pedro Cholula, Amozoc y Hue-

jotzingo; todos pertenecientes al estado de Puebla. Cabe destacar que, aunque el municipio de Puebla ha ido disminuyendo el porcentaje de población con respecto al total de la ZMPT, aún sigue siendo el municipio con mayor porcentaje de población: 53.6% en 2015 (SEDATU, CONAPO e INEGI 2018).

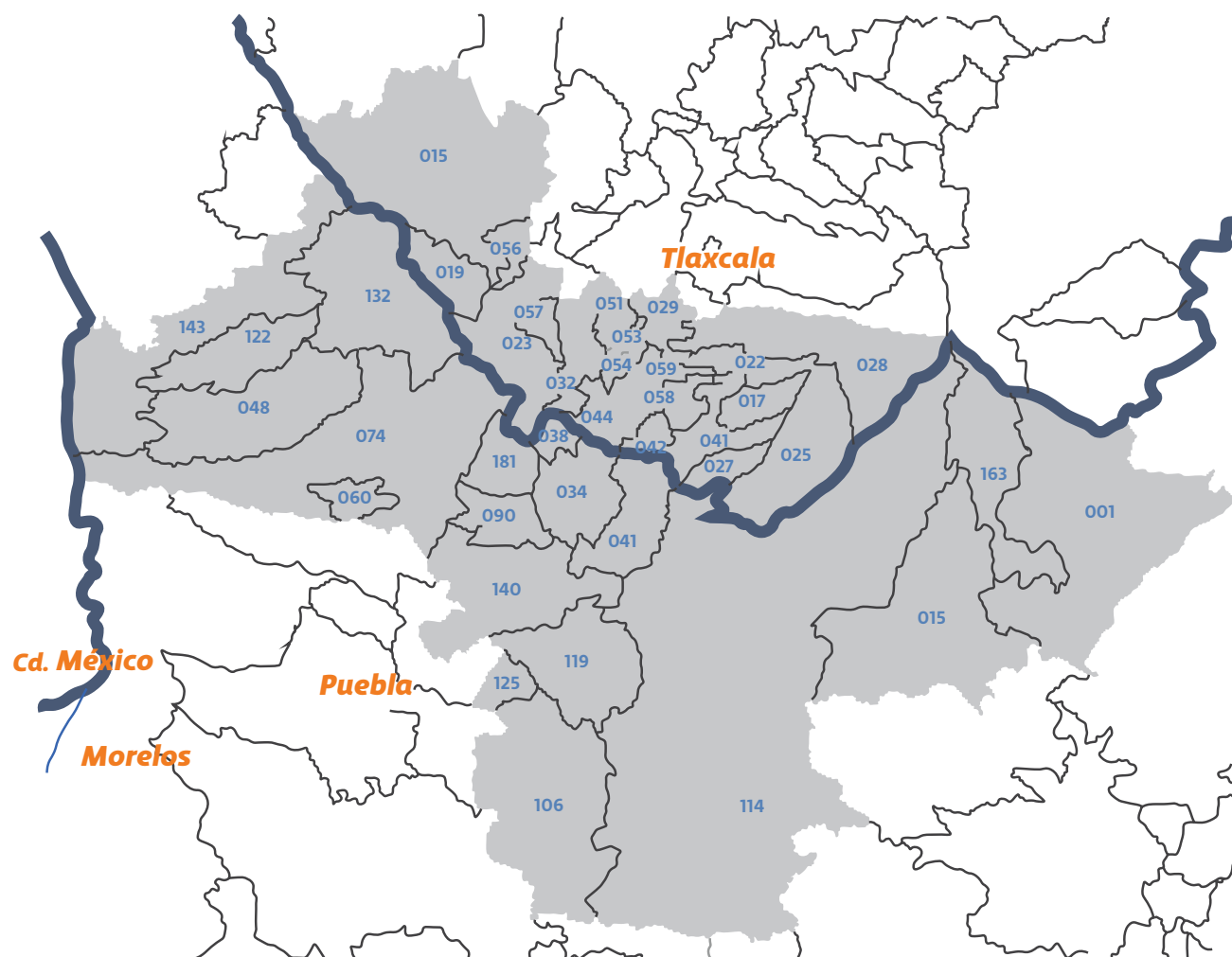
El clima existente en el valle es templado subhúmedo, con verano suave y canícula, e invierno seco. En los municipios más cercanos a las zonas de los volcanes las temperaturas son más frías, las precipitaciones varían entre los 800 y los 1000 milímetros y la altura media sobre el nivel del mar es de 2,135 m (CONABIO, 2012; López-Zamora y Montalvo-Vargas, 2015).

Sus principales actividades económicas están representadas por la industria automotriz, petroquímica, textil, química farmacéutica y alimentaria, agropecuaria y, recientemente, se ha convertido en un área proveedora de servicios profesionales, financieros y de educación superior (López-Zamora y Montalvo-Vargas, 2015).

Este proceso de urbanización y metropolización genera cambios que ejercen presión sobre los recursos empleados para satisfacer las demandas básicas de los pobladores en dichas zonas. Uno de los recursos fundamentales es el agua, y por tal motivo es necesario estimar su demanda. Tomar medidas que faciliten y mejoren la gestión del agua y los servicios relacionados con ésta, contribuirá al cumplimiento de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU, 2017). Para una adecuada planeación del desarrollo de las zonas metropolitanas es imprescindible contar con información suficiente y confiable, y además con metodologías y herramientas que permi-



EL PROCESO DE URBANIZACIÓN Y METROPOLIZACIÓN GENERA CAMBIOS QUE EJERCEN PRESIÓN SOBRE LOS RECURSOS EMPLEADOS PARA SATISFACER LAS DEMANDAS BÁSICAS DE LOS POBLADORES.



PUEBLA

Clave Municipio

001	Acajete
015	Amozoc
034	Coronango
041	Cuautlancingo
048	Chiautzingo
060	Domingo Arenas
074	Huejotzingo
090	Juan C. Bonilla
106	Ocoyucan
114	Puebla
119	San Andrés Cholula
122	San Felipe Teotlalcingo
125	San Gregorio Atzompa
132	San Martín Texmelucan
136	San Miguel Xoxtla
140	San Pedro Cholula
143	San Salvador el Verde
163	Tepatlatxco de Hidalgo
181	Tlaltenango

TLAXCALA

Clave Municipio

015	Ixtacuixtla de Mariano Matamoros
017	Mazatecochco de José María Morelos
019	Tepetitla de Lardizábal
022	Acuamanala de Miguel Hidalgo
023	Nativitas
025	San Pablo del Monte
027	Tenancingo
028	Teolochoolco
029	Tepeyanco
032	Tetlatlahuca
041	Papalotla de Xicohtencatl
042	Xicohtzinco
044	Zacatelco
051	San Jerónimo Zacualpan
053	San Juan Huactzinco
054	San Lorenzo Axocomanitla
056	Santa Ana Nopalucan
057	Santa Apolonia Teacalco
058	Santa Catarina Ayometla
059	Santa Cruz Quilehtlaa

Figura 1. Municipios que conforman la ZMPT

Tomada de http://planeader.puebla.gob.mx/images/zonas/ZM_Puebla-Tlaxcala.png

tan llevar a cabo estudios prospectivos que hagan posible medir determinados indicadores que sirvan para crear escenarios tendenciales que ayuden en la toma de decisiones.

◆ OBJETIVOS

El crecimiento de la demanda de agua en una zona metropolitana es un problema de la complejidad. En este sentido, no es factible un análisis determinístico, por lo que la metodología de sistemas dinámicos es una de las más convenientes. De esta manera, el propósito de la investigación que se reporta es desarrollar un modelo de simulación dinámica que permita visualizar la evolución de la demanda público-urbana de agua en la ZMPT en el periodo de 2030 al 2050, bajo diversos escenarios.

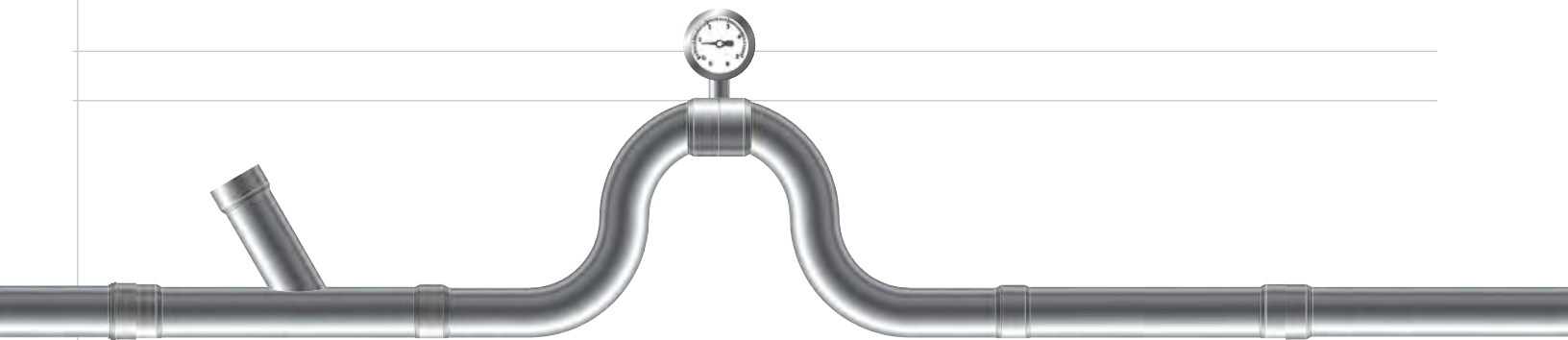
Con el modelo apropiado es posible analizar la contribución y la importancia de las variables determinantes del sistema, como el crecimiento poblacional, el cambio climático, la eficiencia física de los organismos operadores y la elasticidad de la demanda en la evolución de la demanda público-urbana de agua en la ZMPT, en el periodo de análisis.

◆ METODOLOGÍA

Los sistemas complejos están sujetos a una elevada incertidumbre, por lo que una de las técnicas más empleadas para su modelación son los simuladores dinámicos, que permiten estudiar y prever el comportamiento del sistema bajo diversos escenarios. Existen varios programas diseñados específicamente para la simula-



Figura 2. Diagrama causal que permite observar las dos variables principales de las cuales depende la demanda público urbana. A su vez, también se observan las relaciones con otras variables que determinan la dotación total y la población.



LA ÚLTIMA VARIABLE QUE INCIDE DIRECTAMENTE EN LA DOTACIÓN TOTAL ES EL FACTOR DE TEMPERATURA, QUE REPRESENTA EL AUMENTO EN EL CONSUMO DE AGUA POR HABITANTE AL AÑO, PRODUCIDO POR EL INCREMENTO DE TEMPERATURA POR CAMBIO CLIMÁTICO.

ción de sistemas. En este trabajo se usará Vensim, que es uno de los de más amplio uso en modelación de sistemas complejos en general y en recursos hídricos en particular (Goncalves y Giorgetti, 2013; Abadi Khalegh, Shamsai y Goharnejad, 2015).

Con Vensim es posible representar la interacción entre las variables o componentes de un sistema dinámico y permite calcular tendencias en distintos escenarios y realizar análisis de sensibilidad. La principal variable final utilizada fue la demanda público-urbana, que se define como la multiplicación de la dotación por habitante y la cantidad total de habitantes de la ZMPT. Esta variable se trató de manera simplificada por razones prácticas ya que los organismos operadores reportan la dotación total entre el número de habitante y no reportan indistintamente otros usos como el industrial (industria no autoabastecida), comercial o público (PIGOO, 2018).

La demanda por uso público urbano se calcula como el uso total en la ciudad por habitante y, por tanto, en el modelo planteado, depende de la dotación total y de la población (ver figuras 2 y 3). La variable «población» se trató como una variable condicional y su cálculo es función del tiempo. En el modelo, la variable «población1» cuenta con datos de los censos y conteos correspondientes del 2000 al 2015 (INEGI, 2000; 2005; 2011; 2011a; 2016; 2016a); del 2016 al 2030, se emplearon datos de proyecciones de población por municipio (CONAVI, 2016). La variable «población2» contiene las tasas de crecimiento global estatales –Puebla y Tlaxcala– (CONAPO, 2018), correspondientes al periodo 2030-2049, las cuales se emplearon en el cálculo de la población anual por municipio, del periodo 2031 a 2050. Así, la variable población toma en cuenta los datos de «población1» del 2000 al 2030, y de «población2» del 2031 al 2050 y es la resultante de la suma de las poblaciones individuales de los municipios que componen la ZMPT.

LA DEMANDA POR USO PÚBLICO URBANO SE CALCULA COMO EL USO TOTAL EN LA CIUDAD POR HABITANTE Y, POR TANTO, EN EL MODELO PLANTEADO, DEPENDE DE LA DOTACIÓN TOTAL Y DE LA POBLACIÓN.

La variable «Dotación total» depende del consumo, la eficiencia física y del factor de temperatura (ver figura 2). Este último factor permite estimar los efectos del cambio climático, al hacerla cambiar conforme a los escenarios de calentamiento global.

Para calcular el consumo se utilizó un valor promedio de $39 \text{ m}^3/(\text{habitante año})$, obtenido de información publicada en la prensa (Torres, 2015) sobre el organismo operador «Agua de Puebla», en vez de los datos reportados en el sistema PIGOO (2018). Una variable que pocas veces se toma en cuenta es la elasticidad de la demanda, y con la finalidad de incluirla, se consideró el cambio en el precio del metro cúbico de agua como un aumento gradual y lineal que alcanza el orden de magnitud de 50% al final del periodo de análisis. El valor empleado para la elasticidad, de -0.33, fue adoptado del amplio estudio desarrollado por Salazar Adams y Pineda Pablos (2010).

Para la eficiencia física se utilizó el valor de 0.608, que representa el promedio de los valores reportados por tres organismos operadores pertenecientes a la ZMPT: Puebla, San Pedro Cholula y San Martín Texmelucan (PIGOO, 2018), que son los de mayor peso poblacional de la zona metropolitana, y que es cercano al valor utilizado por Martínez-Austria y Vargas-Hidalgo (2016) para la ciudad de Puebla.

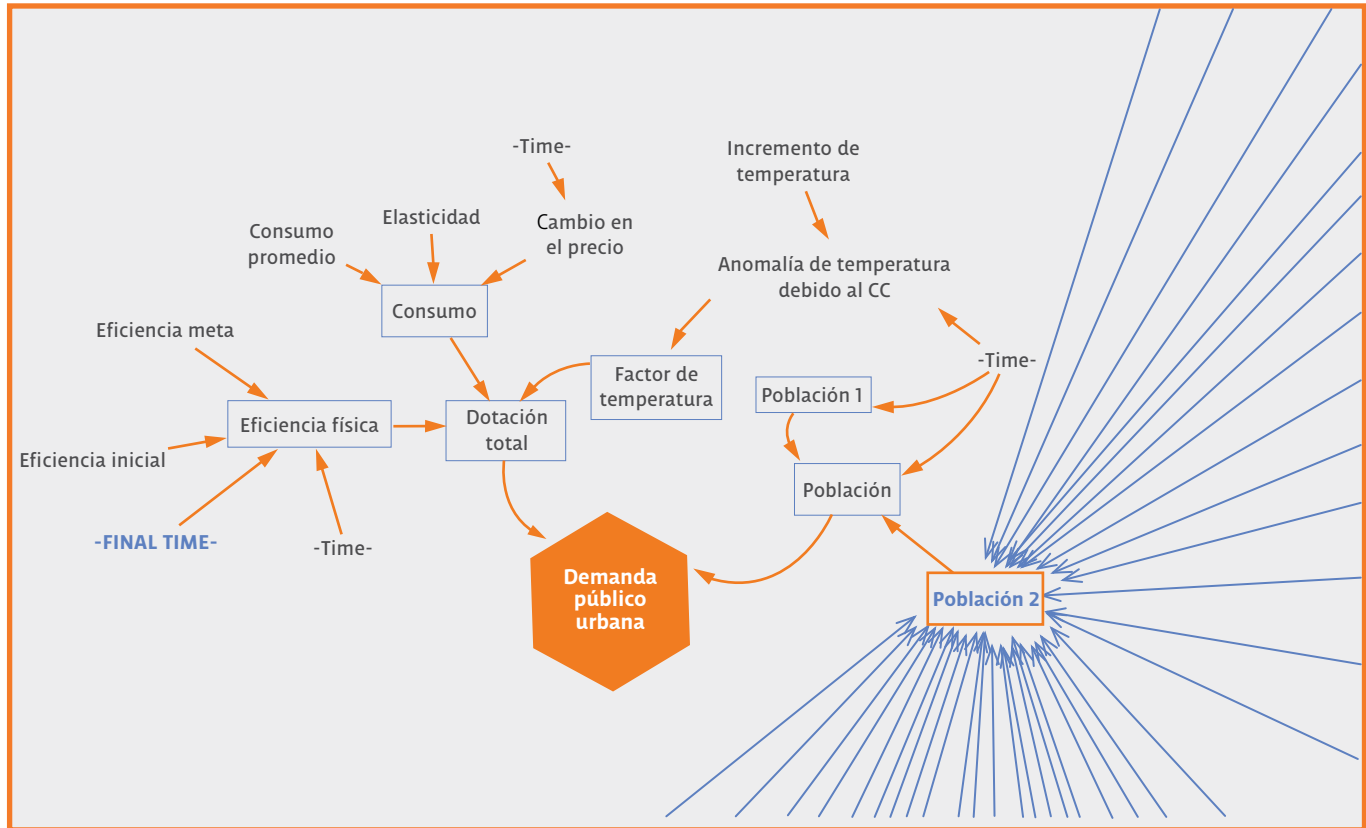


Figura 3. Modelo en Vensim utilizado para calcular la demanda total a partir de la demanda pública urbana. Aquí se observan mejor casi todas las variables y sus relaciones causales. Debido al tamaño del modelo no aparecen en la figura las variables que representan a los municipios de la ZMPT sino solo las flechas que conectan a la variable Población2 con la mayoría de las entidades municipales. El resto del modelo es similar, considerando todos los municipios, pero en la esquina inferior derecha pueden observarse las flechas que conectan a la variable «población2» con cada una de las entidades municipales.

Asimismo, se considera que la eficiencia física mejorará en el tiempo y le fue asignado un valor de 0.8 a la eficiencia final (o meta), que es el benchmark de los organismos de agua potable y saneamiento en México, simulando dicho aumento gradual; lo anterior, como se sabe, requerirá de obras e inversiones en los activos y/o patrimonio de los organismos operadores correspondientes.

La última variable que incide directamente en la dotación total es el factor de temperatura, que representa el aumento en el consumo de

agua por habitante al año, por cada grado Celsius que aumente la temperatura media. Para su estimación se emplearon los volúmenes que debe asignársele a un habitante de clase socioeconómica media para cada tipo general de clima clasificados según su temperatura media (CONAGUA; 2007). La anomalía de temperatura se supuso como un incremento de forma lineal y gradual, en función del aumento total durante el periodo de análisis: 0.9 °C para el año 2030 y 1.6 °C al año 2050 -que corresponden al escenario de cambio climático RCP 6.0-

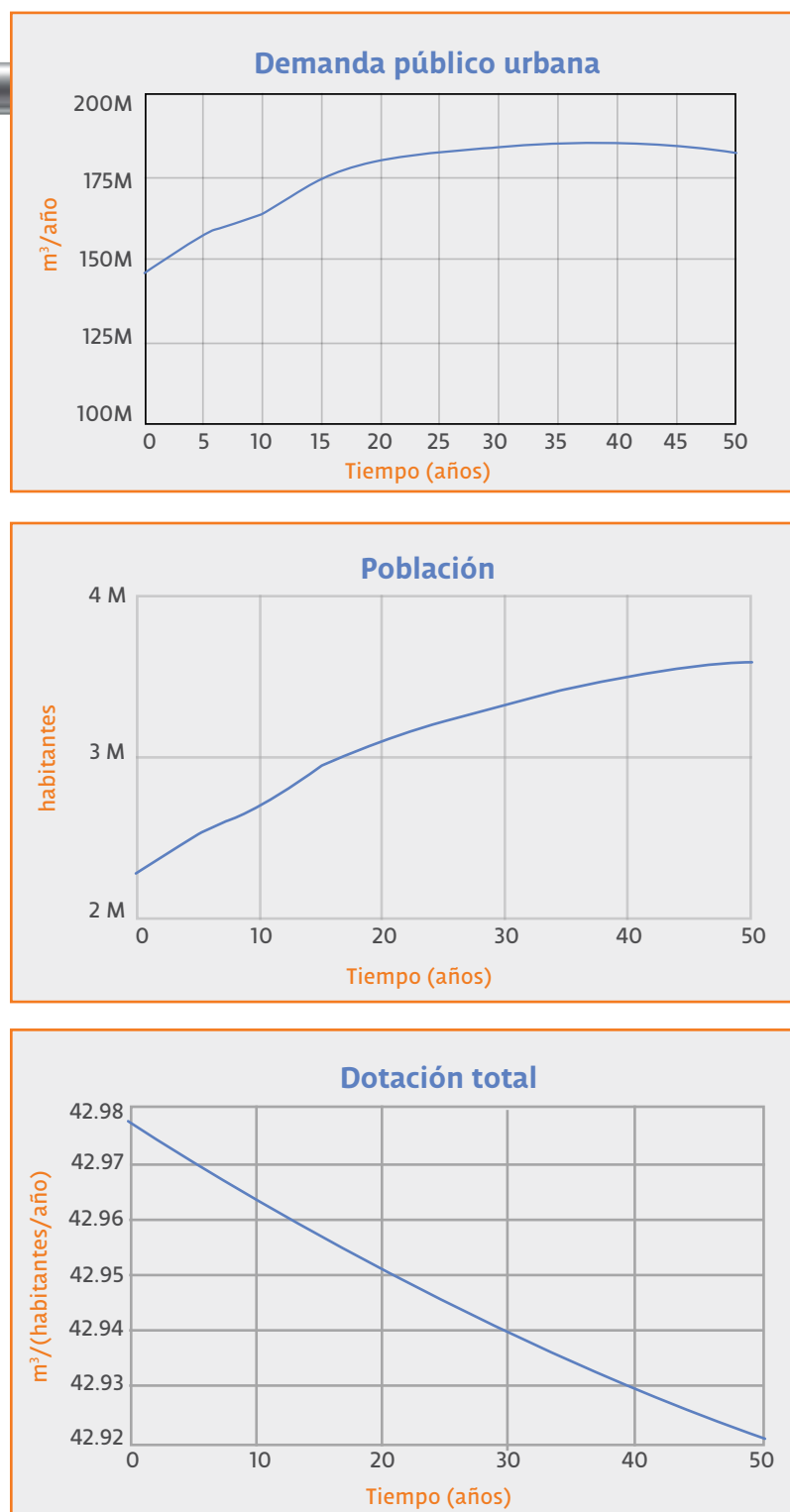


Figura 4. Valores de la demanda público urbana y de las dos variables directas que la afectan (Población y Dotación total) en las condiciones especificadas (incremento de la eficiencia física de 0.6 a 0.8 y aumento de la temperatura media de 1.6 °C a causa del cambio climático antropogénico, durante el periodo modelado (2000-2050).

(Salinas-Prieto, Colorado-Ruiz y Maya-Magaña, 2015). Se escogió este escenario porque es el intermedio y muestra un futuro posible no extremo: ni demasiado optimista ni catastrófico. En la figura 3 se observa el modelo construido en Vensim y pueden notarse mejor las relaciones entre todas las variables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al ser ejecutado el modelo con las condiciones descritas de crecimiento poblacional, aumento paulatino de la eficiencia por mejoras del sistema y el incremento de la temperatura media debido al cambio climático, se obtienen los resultados mostrados en la figura 4 y en la parte superior de la tabla 1. Como se observa, la demanda total de agua aumenta ligeramente en el periodo 2020-2035, luego tiende a mantenerse y, posteriormente, comienza a disminuir suavemente.

El rápido aumento de la demanda pública urbana, entre el periodo del 2000 al 2015, se debe al incremento poblacional y la expansión por la ZMPT durante dicho intervalo por diversas causas socioeconómicas (López-Zamora y Montalvo-Vargas, 2015) y, en menor grado, al aumento del consumo asociado al incremento de la temperatura. La estabilización de la variable principal puede explicarse como el efecto combinado de la disminución paulatina de las tasas de crecimiento poblacional estatales al final del periodo aunado al incremento en la eficiencia del sistema. La disminución posterior es causada por la reducción de la dotación, debido al efecto del aumento gradual de la eficiencia física y su predominio sobre el crecimiento poblacional, que va en desaceleración (ver tabla 1 y figura 4).

Una ventaja de la simulación dinámica es que se puede modificar fácilmente el escenario base, para determinar el efecto de variables secundarias, según el árbol causal, sobre la variable principal y también realizar análisis de sensibilidad. Con tal fin se analizó el efecto del aumento de la temperatura, de la eficiencia física y la elasticidad de la demanda.

Escenario base (1.606 °C de aumento al 2050 y aumento de la eficiencia de 0.6 a 0.8)

Año	Dotación total [m ³ /(hab. año)]	Demanda público urbana [hm ³ /año]
2030	55.40	183.7
2050	50.96	182.4

Escenario sin cambio climático y mejorando la eficiencia física

2030	48.59	161.1
2050	40.71	145.7

Escenario con cambio climático sin mejorar la eficiencia

2030	65.89	218.5
2050	67.06	240

Tabla 1. Volúmenes principales en distintos escenarios.

EL RÁPIDO AUMENTO DE LA DEMANDA PÚBLICA URBANA, SE DEBE AL INCREMENTO POBLACIONAL Y LA EXPANSIÓN POR LA ZMPT DURANTE DICHO INTERVALO POR DIVERSAS CAUSAS SOCIOECONÓMICAS.

En la figura 5 y la tabla 1 se muestran los resultados principales. La línea del medio en color negro muestra la tendencia de la demanda de agua público urbana en la ZMPT en las condiciones del escenario base, donde se consideran el aumento de temperatura debido al cambio climático y también un aumento moderado de la eficiencia física. Si se compara esta línea con el escenario hipotético que representa la demanda de agua en el caso de que no aumentara la temperatura (en naranja), puede notarse como, en este último caso, la demanda co-

mienza a disminuir antes del 2030 ya que el efecto de la temperatura es nulo y predomina el efecto benéfico del aumento de la eficiencia física sobre el incremento poblacional.

El segundo escenario hipotético hace referencia al aumento de la temperatura, pero sin incremento en la eficiencia física y se representa con la línea punteada en la figura 5. Como se aprecia, la elevación en el valor de la demanda es mayor y en ningún momento del periodo de análisis disminuye. Esto es debido a que el efecto del crecimiento poblacional es potenciado por el no mejoramiento de la eficiencia física. Como se observa, el incremento en la demanda causado por la elevación de la temperatura es menor al ocasionado por el no cambio de la eficiencia física. Este resultado indica que la eficiencia física es la variable que influye más en el sistema según las condiciones y las relaciones utilizadas para modelar este caso. De aquí puede deducirse que prestar atención al mejoramiento de la eficiencia física de los organismos operadores es esencial en los planes que se implementen como medida de adapta-



UNA VENTAJA DE LA SIMULACIÓN DINÁMICA ES QUE SE PUEDE MODIFICAR FÁCILMENTE EL ESCENARIO BASE, PARA DETERMINAR EL EFECTO DE VARIABLES SECUNDARIAS.

Demanda público urbana

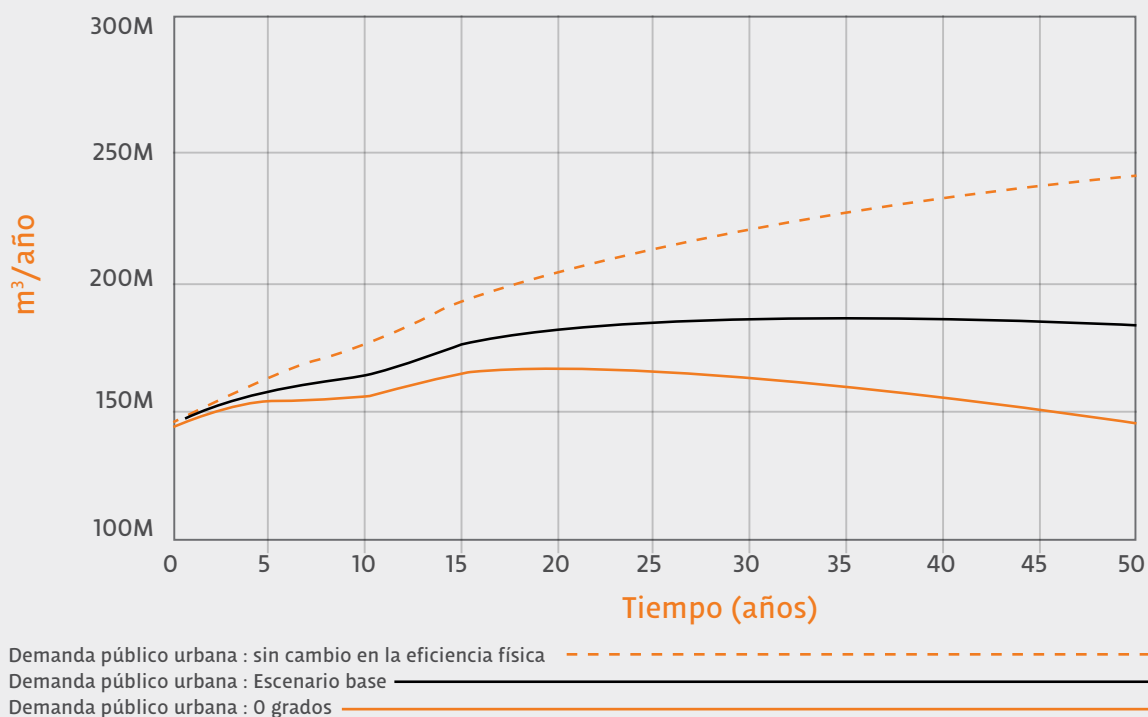


Figura 5. Comparación entre las trayectorias de la demanda pública urbana en las condiciones especificadas (en negro), sin cambio de la temperatura pero con aumento de la eficiencia física (en naranja continua), y sin cambio en la eficiencia física, pero sí con aumento de la temperatura media (en naranja discontinua).

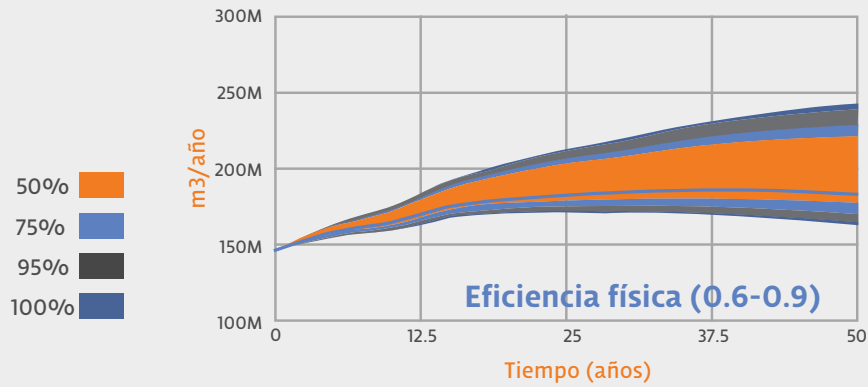


EL AGUA ES UN BIEN IMPRESCINDIBLE, SU ELASTICIDAD ES MUY BAJA LO QUE EN MICROECONOMÍA ES CONOCIDO TAMBIÉN COMO UNA DEMANDA INELÁSTICA O DE MUY BAJA ELASTICIDAD.

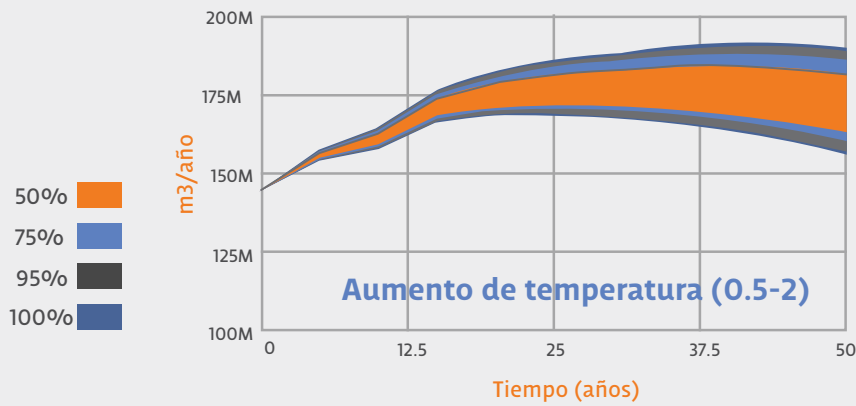
ción a las condiciones esperadas e inevitables de los incrementos de la población, a causa de la urbanización; e incrementos de temperatura generados por el cambio climático (Martínez-Austria y Vargas-Hidalgo, 2016).

Para corroborar la mayor influencia de la eficiencia física sobre el sistema modelado en las condiciones especificadas se realizó un análisis de sensibilidad de la variable de salida teniendo en cuenta tres variables secundarias, la eficiencia física, la elevación de la temperatura y la elasticidad de la demanda. Este procedimiento, de manera breve, consiste en calcular varias veces la variable principal del sistema durante un periodo de estudio, pero variando de manera aleatoria el valor de las variables secundarias que son constantes. En este caso uti-

Demanda público urbano



Demanda público urbano



Demanda público urbano

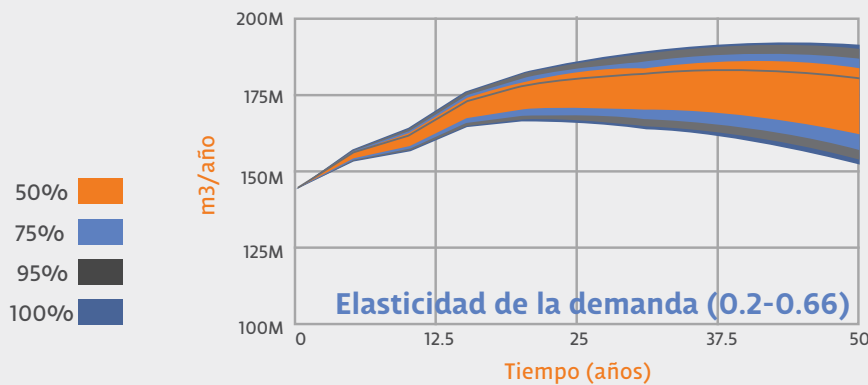


Figura 6. Resultado gráfico de los análisis de sensibilidad univariantes. En cada gráfico se especifica cuál parámetro se tuvo en cuenta y los intervalos de prueba que se escogieron. A las tres variables se les asignó distribución normal. Como puede observarse la variable que más influye en la demanda de agua es la eficiencia física.

«

**EL MODELO
CONSTRUIDO ES
ÚTIL EN EL PROCESO
DE PLANEACIÓN
Y TOMA DE
DECISIONES, COMO
INSTRUMENTO
INICIAL Y
MEJORABLE PARA
VALORAR LA
DEMANDA DE AGUA
DE USO PÚBLICO
URBANO EN
LA ZMPT.**

liza el método de Montecarlo, con generación de números aleatorios con distribución uniforme. Esto permite obtener un intervalo de valores finales de la variable de salida y observar así cual parámetro puede tener mayor influencia en el sistema. En la figura 6 se observa el resultado gráfico de dichos análisis. Como puede notarse, la eficiencia física es la variable que más influye en la demanda de agua público urbana ya que es la que genera una mayor variabilidad en la demanda de agua. La siguen en orden de importancia, la elasticidad de la demanda de agua y el aumento de la temperatura.

La elasticidad precio-demanda o la elasticidad-precio es una medición porcentual del efecto en la demanda ante los cambios del precio. Como es conocido, siendo el agua un bien imprescindible, su elasticidad es muy baja lo que en microeconomía es conocido también como una demanda inelástica o de muy baja elasticidad.

En este caso se empleó un valor de 0.33 negativo como valor promedio reportado en México (Salazar-Adams y Pineda-Pablos, 2010). La menor influencia de este parámetro en la demanda de agua, a pesar de que se empleó un rango que duplica al valor empleado, puede deberse al aumento modesto del precio que se aplicó, de sólo un 50 % en 50 años. Esto refleja los precios relativamente bajos que tiene el servicio de agua potable en muchos lugares del país y que no ayudan a recuperar los costos de operación de muchos organismos operadores. La baja elasticidad de la demanda y los bajos precios podrían ser explicados por la interacción compleja de fenómenos de carácter social, político y económico, aunque como lo muestran los datos, el aumento de los precios del servicio de agua, con determinadas restricciones, puede ser un mecanismo para disminuir la demanda frente a la disminución de la disponibilidad del recurso en los sectores que pudieran hacer un uso excesivo y donde el aumento de los precios no se convierta en un problema social, ni amenace el derecho humano al agua (Salazar-Adams y Pineda-Pablos, 2010).

La influencia menos notoria del aumento de temperatura en la demanda de agua podría deberse al método empleado para calcular esta relación. Como se explicó anteriormente, se empleó un método simplificado por falta de datos concretos y también porque es el método oficial utilizado para determinar las asignaciones en el ámbito doméstico (CONAGUA, 2007). Son necesarias mejores metodologías para cuantificar esta relación entre la demanda de agua y la temperatura, pero cabe destacar que este problema es complejo y requiere una investigación costosa. Dicha relación depende de muchos factores y la influencia de las condiciones meteorológicas resulta bastante compleja, condicionada y no lineal (Maidment y Miaou, 1986; Salazar-Adams y Pineda-Pablos, 2010); incluso, el análisis estadístico en algunos casos puede resultar no significativo (De Souza *et al.*, 2015).

◆ CONCLUSIONES

El modelo construido es útil en el proceso de planeación y toma de decisiones, como instrumento inicial y mejorable para valorar la demanda de agua de uso público urbano en la ZMPT frente a varios escenarios tendenciales que involucran crecimiento urbano y variabilidad climática.

En el escenario base, que funciona con las tendencias previsibles, al principio aumentará la demanda de agua en la ZMPT, aunque al final del periodo de estudio disminuirá levemente.

Es importante mostrar atención a los problemas de eficiencia física en el sector público urbano ya que es el elemento al cual el sistema (con estas estructuras y relaciones) es más sensible. Mejorando este parámetro –en el presente caso, en el orden de un 33%– se pueden compensar satisfactoriamente los aumentos de la demanda generados por el cambio climático y el aumento de la población.

El cambio climático (con estas estructuras y relaciones) sí afecta la demanda total pero no como se esperaba a priori. No se descarta el hecho de que se requieran estudios más precisos del efecto del cambio de temperatura en el consumo.