

# Análisis de las condiciones del bioclima humano en ciudades mexicanas ante escenarios de cambio climático para los horizontes temporales en los que se alcance un incremento de 1°C, 1.5°C y 2.0°C en la temperatura media global

## Informe Final



#### Derechos Reservados © 2018

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

Montes Urales 440, Colonia Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, CP.11000, Ciudad de México.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209, Colonia Jardines en la Montaña, Delegación Tlalpan, CP. 14210, Ciudad de México.

Todos los derechos están reservados. Ni esta publicación ni partes de ella pueden ser reproducidas, almacenadas mediante cualquier sistema o transmitidas, en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, de fotocopiado, de grabado o de otro tipo, sin el permiso previo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

El análisis y las conclusiones aquí expresadas no reflejan necesariamente las opiniones del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, de su Junta Ejecutiva, de sus Estados Miembros, o del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

Documento generado a partir de los resultados de la consultoría realizada por: **Adalberto Tejeda Martínez**, Número de contrato: IC-2017-011

Para mayor información sobre este estudio, consultar con la Coordinación General de Adaptación al Cambio Climático del INECC.

Citar como:

INECC-PNUD México. 2017. *Análisis de las condiciones del bioclima humano en ciudades mexicanas ante escenarios de cambio climático para los horizontes temporales en los que se alcance un incremento de 1<sup>o</sup>C, 1.5<sup>o</sup>C y 2.0<sup>o</sup>C en la temperatura media global*. Proyecto 85488 "Sexta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", Adalberto Tejeda Martínez. 49 pp México

## Contenido

Resumen .....	7
1. Introducción .....	8
2. Datos y método .....	10
<b>2.1 Datos .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Selección de índice(s) bioclimático(s).....</b>	<b>13</b>
<b>2.3 Generación de datos higrotérmicos horarios .....</b>	<b>14</b>
<b>2.4 Condiciones bioclimáticas base y futuras .....</b>	<b>15</b>
<b>2.5 Consumos eléctricos .....</b>	<b>17</b>
3. Resultados .....	20
<b>3.1 Necesidades de enfriamiento .....</b>	<b>20</b>
<b>3.2 Necesidades de calefacción .....</b>	<b>28</b>
4. Discusión .....	40
5. Recomendaciones.....	42
<b>5.1 Confort bioclimático y edificación .....</b>	<b>42</b>
<b>5.2 Urbanización .....</b>	<b>43</b>
<b>5.3 Conocimiento .....</b>	<b>44</b>
Glosario de términos .....	45
Bibliografía .....	47

## Lista de Tablas

Tabla 1. Zonas metropolitanas con más de medio millón de habitantes al 2010 (INEGI, 2010) -Entre paréntesis se anotan los acrónimos usuales en mapas o gráficas de este informe, cuando faltó espacio para los nombres completos-.....	11
Tabla 2. Número de días con golpes de calor o frío para las 30 zonas metropolitanas con población mayor a medio millón de habitantes, calculados con el procedimiento propuesto por el ETCCDI, periodo 1979-2012 (s/d significa sin datos suficientes para el cálculo).....	12
Tabla 3. Valores de los parámetros en las ecuaciones 5 y 6.....	14

Tabla 4. Población en las zonas metropolitanas proyectada al año 2030 .....	16
Tabla 5. Equivalencias de HGF en kWh-usuario .....	17
Tabla 6. Tarifas eléctricas de uso doméstico y su equivalencia promedio para las zonas metropolitanas.....	19
Tabla 7. Incremento de consumos para enfriamiento (%) para el $\Delta T=2.0^{\circ}\text{C}$ con respecto al periodo base (datos climatológicos 1979-2012 y población 2010), para zonas metropolitanas cálidas o semicálidas.....	28
Tabla 8. Decremento de necesidades para calefacción (%) para el $\Delta T=2.0^{\circ}\text{C}$ con respecto al periodo base (datos climatológicos 1979-2012 y población 2010) .....	37
Tabla 9. Periodos probables en que se alcanzará el incremento en la temperatura promedio global (Consultoría Rangos de incertidumbre..., 2017) .....	38
Tabla 10. Forma de estimación de consumos eléctricos decadales para enfriamiento en total de población de cada zona metropolitana (el dato de la segunda columna se multiplicó por la población respectiva). .....	38
Tabla 11. Zonas metropolitanas que incrementarán sus necesidades de enfriamiento por habitante en más de 100 kWh (intervalos esperados redondeados a decenas. Su representación gráfica corresponde a la figura 2). .....	40
Tabla 12. Zonas metropolitanas que incrementarán sus necesidades de enfriamiento por cada zona en más de 100 GWh (intervalos esperados redondeados a decenas. Su representación gráfica corresponde a la figura 5). .....	41

## Lista de Figuras

Figura 1. Necesidades anuales de enfriamiento en Horas Grado Frío (HGF) para el periodo base (datos climáticos 1979-2012 y población 2010). .....	21
Figura 2. Incremento de consumo anual para enfriamiento (kWh/habitante) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.0, 1.5$ y $2.0^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global, a) sin IUC y b) con IUC.....	21
Figura 3. Incremento de consumo para enfriamiento (verano, kWh/habitante) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.0, 1.5$ y $2.0^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global, a) sin IUC y b) con IUC..	21
Figura 4. Incremento de consumo para enfriamiento (invierno, kWh/habitante) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.0, 1.5$ y $2.0^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global, a) sin IUC y b) con IUC.	22
Figura 5. Incremento de consumo anual para enfriamiento (GWh/población) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.0, 1.5$ y $2.0^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global, a) sin IUC y b) con IUC.....	22
Figura 6. Incremento de consumo para enfriamiento (verano, GWh/población) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.0, 1.5$ y $2.0^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global, a) sin IUC y b) con IUC..	22
Figura 7. Incremento de consumo para enfriamiento (invierno, GWh/población) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.0, 1.5$ y $2.0^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global, a) sin IUC y b) con IUC. ....	23
Figura 8. Incremento de consumos anuales para enfriamiento (kWh/habitante) para el horizonte en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.0^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC. ....	23

Figura 9. Incremento de consumos para enfriamiento (verano, kWh/habitante) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.0^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC. ....	23
Figura 10. Incremento de consumos para enfriamiento (invierno, kWh/habitante) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.0^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC. ....	24
Figura 11. Incremento de consumos anuales para enfriamiento (kWh/habitante) para el horizonte en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.5^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC. ....	24
Figura 12. Incremento de consumos para enfriamiento (verano, kWh/habitante) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.5^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC. ....	25
Figura 13. Incremento de consumos para enfriamiento (invierno, kWh/habitante) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.5^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC. ....	25
Figura 14. Incremento de consumos anuales para enfriamiento (kWh/habitante) para el horizonte en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=2.0^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC. ....	26
Figura 15. Incremento de consumos para enfriamiento (verano, kWh/habitante) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=2.0^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC. ....	26
Figura 16. Incremento de consumos para enfriamiento (invierno, kWh/habitante) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=2.0^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC. ....	27
Figura 17. Necesidades anuales de calefacción en Horas Grado Calor (HGC) para el periodo base (datos climatológicos 1979-2012 y población 2010). ....	29
Figura 18. Decremento de necesidades anuales de calefacción (%) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.0, 1.5$ y $2.0^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global, a) sin IUC y b) con IUC. ....	29
Figura 19. Decremento de necesidades de calefacción (verano, %) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.0, 1.5$ y $2.0^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global, a) sin IUC y b) con IUC. ....	30
Figura 20. Decremento de necesidades de calefacción (invierno, %) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.0, 1.5$ y $2.0^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global a) sin IUC y b) con IUC. ....	30
Figura 21. Decremento de necesidades anuales de calefacción (%), para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.0^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC. ....	31
Figura 22. Decremento de necesidades de calefacción (verano, %), para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.0^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC. ....	31
Figura 23. Decremento de necesidades de calefacción (invierno, %) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.0^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC. ....	32
Figura 24. Decremento de necesidades anuales de calefacción (%), para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un $\Delta T=1.5^{\circ}\text{C}$ sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC. ....	32

Figura 25. Decremento de necesidades de calefacción (verano, %) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.5^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC. .... 33

Figura 26. Decremento de necesidades de calefacción (invierno, %) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.5^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC. .... 33

Figura 27. Decremento de necesidades anuales de calefacción (%), para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=2.0^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC. .... 34

Figura 28. Decremento de necesidades de calefacción (verano, %) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=2.0^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC (%); derecha, con IUC (%).  
..... 34

Figura 29. Decremento de necesidades de calefacción (invierno, %), para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=2.0^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC. .... 35

Figura 30. Ejemplos de las tendencias decadales de consumos para cuatro zonas metropolitanas. .... 39

## Resumen

Este trabajo se desarrolló en el marco del Proyecto PNUD 85488 Sexta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, y su objetivo fue analizar las condiciones bioclimáticas humanas ante escenarios de cambio climático para los horizontes de tiempo en los que se alcance un incremento en la temperatura media global de 1°C, 1.5°C y 2°C y sus implicaciones en el consumo eléctrico doméstico para climatización de viviendas para ciudades o conurbaciones de México que en 2010 tuvieron un millón o más de habitantes, así como las que han presentado alta frecuencia de casos de golpes de calor y/o de ondas gélidas en los últimos 15 años y que contaron con al menos medio millón de habitantes en 2010.

De manera paralela a ese análisis se encontró que las zonas que han presentado alta frecuencia de casos de golpes de calor en los últimos 15 años son Poza Rica, Celaya, Cuernavaca, Pachuca y Mexicali, y las que presentaron mayor número de eventos de golpes de frío fueron Oaxaca, Guadalajara, Monterrey, Querétaro y Valle de México. El incremento de consumo para enfriamiento se espera sea mayor para Mexicali, Reynosa-Río Bravo, Cancún, Villahermosa, Veracruz, Tampico, Monterrey, Mérida y Ciudad Juárez, seguidas de Tuxtla Gutiérrez, Acapulco y Poza Rica. Las zonas urbanas que en el periodo base no o casi no requerirían energía para enfriamiento y que sí lo requerirán a mediados de siglo, son Toluca, Pachuca (de 0 a 1 GWh), Xalapa (de 1 pasa a 9 GWh); SLP (de 2 a 17GWh) y Puebla-Tlaxcala (de 2 a 29 GWh). Las zonas metropolitanas analizadas muestran un incremento en sus temperaturas tanto mínimas como máximas por lo que disminuirán sus necesidades de calefacción y se incrementarán las de enfriamiento.

**Palabras clave:** bioclima humano, cambio climático, necesidades de consumo de energía, zonas metropolitanas.

# 1. Introducción

Para analizar las condiciones bioclimáticas humanas en México ante escenarios de cambio climático –en particular para los horizontes de tiempo en los que se alcance un incremento en la temperatura media global ( $\Delta T$ ) de 1°C, 1.5°C y 2°C- así como sus implicaciones en el consumo eléctrico doméstico para climatización de viviendas, se presenta este estudio para las zonas metropolitanas que en el año 2010 tuvieron medio millón o más de habitantes (ver tabla 1 en el apartado **2. Datos y método**).

A las consecuencias térmicas del cambio climático global sobre los asentamientos urbanos, se agrega el efecto del calentamiento debido a la urbanización, la llamada isla urbana de calor (IUC). Por ambos efectos se espera un incremento en la demanda de consumos energéticos por el uso de aire acondicionado para enfriar espacios cerrados, mientras que algunas ciudades que a la fecha pueden prescindir de estos sistemas tendrán que irlos incorporando. Las necesidades de calefacción disminuirán en las urbes de climas fríos o templados en el verano y, desde luego, en todas en el invierno.

Hay varios antecedentes para México de estimaciones de las probables modificaciones de las condiciones del bioclima humano ante escenarios de cambio climático. Jáuregui y Tejeda (2001) usaron, para la Ciudad de México, un método similar al que se aplicará en esta consultoría y compararon los incrementos del valor de un índice bioclimático (la Temperatura Efectiva, que se presentará más adelante) con tendencias observadas y escenarios futuros, concluyendo que el procedimiento adoptado es una aproximación adecuada para este tipo de ejercicios. Varios años después, con el mismo índice y también para la Ciudad de México, Luyando (2016) evaluó las modificaciones bioclimáticas para la segunda mitad de este siglo XXI, por cambio climático global y urbano, y concluyó que los periodos cálidos se incrementarán y se presentarán eventualmente situaciones cálidas extremas.

Tejeda y Rivas (2003) partieron de las condiciones base de 1990 y estimaron un escenario para el sureste de México cuando ocurra una duplicación de CO<sub>2</sub> atmosférico. Según sus resultados, Acapulco incrementaría en 60% sus necesidades de enfriamiento, Veracruz en un 200% y dichas necesidades aparecerían regularmente para Xalapa; los requerimientos de calefacción prácticamente desaparecerían para Acapulco y Veracruz, y se minimizarán para Xalapa. Tómense en cuenta que estos incrementos son relativos a cada ciudad y no son comparables entre ellos.

Los mismos procedimientos utilizaron Rodríguez, Tejeda y Utrera (2004) y García y Tejeda (2008) para el total el estado de Veracruz. Calcularon un incremento de demandas energéticas para enfriamiento de viviendas de 1416.3 GWh/usuario/año para el último tercio del siglo XXI.

García, Santillán, Tejeda, Ojeda y Bojórquez (2010) aplicaron algoritmos similares para tres ciudades del noroeste mexicano. Concluyeron que de 2010 a 2020 Mexicali duplicaría sus necesidades de enfriamiento, en Tijuana y Ensenada aparecerían esporádicamente, para las tres ciudades los requerimientos de calefacción disminuirán entre un 10 y 20%.

Luyando y Tejeda (2010) se ocuparon del bioclima esperado para cinco conurbaciones del centro del país. Proyectaron una disminución de las condiciones frías del 56 al 38% del tiempo para la Ciudad de México y Puebla, del 82 al 67% para Pachuca y Toluca, y de 42 al 6% para Cuernavaca. En las cinco conurbaciones los periodos de confort térmico se mantienen entre un 20 y 30%, pero las condiciones cálidas de Ciudad de México y Puebla pasan de 16 a 32%; de 3 a 8% en Pachuca y Toluca, y de 34 a 67 % en Cuernavaca.

Tejeda, Luyando y Jáuregui (2011) se concentraron en zonas urbanas con más de un millón de habitantes, para obtener las condiciones de estrés térmico medias hacia la última década del siglo XX, y estimaron las correspondientes a las décadas centradas en los años 2030 y 2050. Para la década de 2030 su prospectiva es que las necesidades de enfriamiento en Veracruz y Acapulco se incrementen, por cada habitante, aproximadamente en un 40% (o 60% para 2050); entre 15 y 20% (o entre 30 y 40% para 2050) en Monterrey, León, La Laguna y Juárez; y 5 a 10% (o de 10 a 20% en la década de 2050) en Toluca, Tijuana, Valle de México y Puebla-Tlaxcala.

Dicho trabajo es una síntesis del estudio que produjo la figura IV.2.2 (p. 167) de la *Cuarta Comunicación Nacional Mexicana sobre Cambio Climático* (SEMARNAT-INE, 2010), que muestra estimaciones de consumos eléctricos por usuario en la primera década del siglo XXI y proyectadas para los horizontes 2020, 2050 y 2080, pero en 27 ciudades del país y no sólo en 10. En la sección de Resultados del presente informe, se hará una comparación de los obtenidos en esta consultoría y los dos últimos trabajos citados (Tejeda, Luyando y Jáuregui, 2011 y la *Cuarta comunicación...*).

Aquí se parte del concepto de confort térmico propuesto por la *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineer*, que lo define como el conjunto de condiciones en que la mente expresa satisfacción con el ambiente térmico (Berglund, Breckenridge, y Yoshida, 1997).

Una manera indirecta y común de evaluar la sensación térmica es a través de los índices de confort bioclimático, los cuales dependen de variables comúnmente medidas o de fácil medición. Estudios de bioclima humano durante el siglo XX, coinciden en que la temperatura ambiente, la humedad atmosférica, la radiación solar más la emitida por los alrededores y el viento, son los principales elementos ambientales en la sensación térmica humana (Auliciems y De Dear, 1998). Dado que al interior de una edificación tanto el viento como la radiación solar pueden controlarse, son suficientemente útiles índices que dependan únicamente de la temperatura y la humedad del aire, como la Temperatura Aparente, la Temperatura Efectiva y el índice Humidex. Aquí se recurrió a los dos últimos, cuyas definiciones se presentarán más adelante.

## 2. Datos y método

### 2.1 Datos

Se utilizaron datos climáticos diarios observados de la base de CLICOM y de reanálisis de Livneh et al (2015) para el periodo 1980-2009, y a partir de éstos se calcularon medias mensuales y normales climatológicas.

Se consideró como primera opción la base de datos climatológica nacional del sistema CLICOM administrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), la cual agrupa las estaciones climáticas superficiales de México y corresponde a datos observados directamente en las zonas metropolitanas. El sistema CLICOM no aplica ningún control de calidad a los datos. Para estos datos se determinó el porcentaje de registros y no se tomaron en cuenta las estaciones con menos de 80% de ellos, se consideraron validos aquellos valores dentro del rango observado de las variables utilizadas, y que no presentaran incongruencias como que el valor diario de temperatura máxima sea menor que el de mínima o que la el de mínima fuese mayor que el de máxima. Se obtuvieron datos diarios de temperaturas máximas y mínimas de la base CLICOM, a través de la plataforma web del CICESE (<http://clicom-mex.cicese.mx>).

Como base de datos alterna se eligió la del reanálisis de Livneh et al. (2015)<sup>1</sup>, que está construida a partir de observaciones diarias de precipitación y temperaturas máxima y mínima interpolados en una malla de 1/16º (~6 km), cubre el periodo 1950-2013 espacialmente sobre México, Estados Unidos de Norteamérica y Canadá. Esta base de datos está conformada por estaciones que tienen al menos 50% de información válida y utiliza latitud, longitud y altitud como predictores, el método de validación se encuentra explicado en Livneh et al (2015). Se seleccionó esta base de datos como segunda opción debido al espaciamiento de su malla. De las 30 zonas metropolitanas analizadas, se usaron datos de reanálisis sólo para Chihuahua, Reynosa-Río Bravo y Pachuca.

Los escenarios de cambio climático utilizados corresponden a las bases de datos de la consultoría “Estimación de rangos de incertidumbre en las fechas para alcanzar los valores de incremento en la temperatura promedio global 1, 1.5 y 2.0°C y las implicaciones para la República Mexicana como producto de la Sexta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático” (abreviada, “Consultoría Rangos de incertidumbre...”). Se utilizaron las salidas de los modelos GFDL-CM3 y HADGEM2-ES con los forzamientos radiativos RCP4.5 y RCP8.5 para los tres horizontes temporales mencionados.

---

<sup>1</sup> Dataset. doi:10.7289/V5QZ27ZG [access date] ([ftp://gdo-dcp.ucllnl.org/pub/dcp/archive/OBS/livneh2014.1\\_16deg/gridding.codes.livneh.2015/](ftp://gdo-dcp.ucllnl.org/pub/dcp/archive/OBS/livneh2014.1_16deg/gridding.codes.livneh.2015/))

De acuerdo con los términos de la presente consultoría se evaluaron el número de días con ondas de calor y frío para las 30 zonas metropolitanas de la tabla 1.

Tabla 1. Zonas metropolitanas con más de medio millón de habitantes al 2010 (INEGI, 2010) -Entre paréntesis se anotan los acrónimos usuales en mapas o gráficas de este informe, cuando faltó espacio para los nombres completos-

Zona metropolitana	Entidad(es) federativa(s)	Población (miles)	Zona metropolitana	Entidad(es) federativa(s)	Población (miles)
Valle de México (VMx)	Distrito Federal <sup>2</sup> - Hidalgo-México	20 117	Acapulco (Acap)	Guerrero	863
Guadalajara (Gdl)	Jalisco	4 435	Tampico (Tamp)	Tamaulipas-	859
Monterrey (Mty)	Nuevo León	4 106	Chihuahua (Chih)	Chihuahua	852
Puebla-Tlaxcala (Pue-Tlax)	Puebla-Tlaxcala	2 729	Morelia (Mor)	Michoacán	830
Toluca (Tol)	México	1 936	Saltillo (Salt)	Coahuila	823
Tijuana (Tij)	Baja California	1 751	Veracruz (Ver)	Veracruz	812
León (León)	Guanajuato	1 610	Villahermosa (Vhsa)	Tabasco	755
Juárez (Jrez)	Chihuahua	1 332	Reynosa-Río Bravo (Reyn)	Tamaulipas	727
La Laguna (Lag)	Coahuila -Durango	1 216	Tuxtla Gutiérrez (TuxtlaG)	Chiapas	684
Querétaro (Qro)	Querétaro	1 097	Cancún (Ckun)	Quintana Roo	677
San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez (SLP)	San Luis Potosí	1 040	Xalapa (Xal)	Veracruz	666
Mérida (Mérida)	Yucatán	973	Oaxaca (Oax)	Oaxaca	608
Mexicali (Mxli)	Baja California	937	Celaya (Clya)	Guanajuato	602
Aguascalientes (Ags)	Aguascalientes	932	Poza Rica (PRic)	Veracruz	514
Cuernavaca (Cuer)	Morelos	925	Pachuca (Pach)	Hidalgo	512

Para el cálculo de golpes de calor y frío se siguió el procedimiento propuesto por el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI, <https://www.wcrp-climate.org/data-etccdi>) con datos de Livneh et al (2015). En la tabla 2 se muestra el resultado de los días con golpes de calor y frío para el periodo de 1979-2012. Se decidió realizar el estudio

<sup>2</sup> Así llamado en 2010, actualmente Ciudad de México.

para las 30 zonas metropolitanas debido a que la diferencia en el número de ondas de calor o frío entre ellas es mínimo.

De las zonas urbanas estudiadas, se encontró que en los últimos 15 años Poza Rica, Celaya, Cuernavaca, Pachuca y Mexicali han presentado alta frecuencia de casos de golpes de calor (se consideran tres o más días consecutivos en que la temperatura máxima rebasa el percentil 90); y las que presentaron mayor número de eventos de golpes de frío (tres o más días consecutivos en que la temperatura mínima no alcance el percentil 10) son Oaxaca, Guadalajara, Monterrey, Querétaro y Valle de México.

*Tabla 2. Número de días con golpes de calor o frío para las 30 zonas metropolitanas con población mayor a medio millón de habitantes, calculados con el procedimiento propuesto por el ETCCDI, periodo 1979-2012 (s/d significa sin datos suficientes para el cálculo)*

Zona metropolitana	Días con golpe de calor	Días con golpe de frío	Zona metropolitana	Días con golpe de calor	Días con golpe de frío
Valle de México	804	519	Acapulco	s/d	s/d
Guadalajara	750	509	Tampico	s/d	s/d
Monterrey	560	693	Chihuahua	553	428
Puebla-	464	665	Morelia	545	654
Toluca	431	544	Saltillo	532	579
Tijuana	541	515	Veracruz	s/d	s/d
León	558	696	Villahermosa	489	469
Juárez	415	593	Reynosa-Río	477	542
La Laguna	418	464	Tuxtla Gutiérrez	s/d	445
Querétaro	776	566	Cancún	s/d	s/d
San Luis Potosí	526	698	Xalapa	479	406
Mérida	512	445	Oaxaca	821	542
Mexicali	567	655	Celaya	513	717
Aguascalientes	550	523	Poza Rica	614	721
Cuernavaca	545	695	Pachuca	515	760

Los datos socioeconómicos requeridos incluyeron: promedio de personas por familia al 2010, datos de proyección de población al 2030, proyección de promedio de personas por familia 2010-2030, proyecciones de la población por municipio y localidades del Consejo Nacional de Población (CONAPO) hacia el 2030 para determinar escenarios futuros de crecimiento poblacional de las 30

zonas metropolitanas; usuarios y consumos eléctricos al 2010 por las necesidades de enfriamiento y su proyección al año 2030.

El CONAPO es la instancia gubernamental federal encargada de la planeación demográfica del país. Sus proyecciones deben tomarse con reservas ya que, por ejemplo, el CONAPO proyectó para el 2010 una población nacional de 108.4 millones de mexicano, mientras que el Censo de Población y Vivienda del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de ese mismo año arrojó una población de 112.3, es decir cuatro millones más. Se entendería que el CONAPO ha realizado los ajustes necesarios a la metodología de la dinámica demográfica, ya que para el 2015 proyectaba una tasa de crecimiento promedio anual 2010-2015 de 1.2 mientras que la Encuesta Intercensal 2015 arrojó 1.4. Es decir, se observa que los datos proyectados subestima los datos observados (INEGI, 2015).

## 2.2 Selección de índice(s) bioclimático(s)

Después de un análisis amplio sobre los índices bioclimáticos se decidió usar el Humidex y la Temperatura Efectiva.

El Humidex fue desarrollado en Canadá en 1965 y modificado por Masterton y Richardson (1979). Su expresión algebraica es:

$$H = T + 5/9(e - 10) \quad \text{Ec. 1}$$

donde  $T$  es la temperatura ambiente en °C y  $e$  es la presión de vapor del agua en hPa.

La Temperatura Efectiva ( $TE$ ) tiene la expresión (Missenard, 1933):

$$TE = T - 0.4(T-10)(1 - HR) \quad \text{Ec. 2}$$

Aquí la humedad relativa ( $HR$ ) está dada en décimas

La antigüedad de ambos índices no los descalifica, pues se han utilizado en estudios recientes como lo muestran multitud de publicaciones, como se indicó en la segunda entrega de esta consultoría y que sería prolijo citar ahora. El Humidex destaca porque en la actualidad se ha seguido utilizando en estudios de bioclima humano, cambio climático, ondas de calor, ambientes urbanos y en el sector eléctrico.

Al convertirlos en necesidades de enfriamiento en unidades de energía (kW-usuario al año, por ejemplo), se observó que los resultados no varían significativamente ya sea que fueran obtenidos a partir de cualquiera de ambos índices usados por lo que se decidió conservar únicamente el primero.

## 2.3 Generación de datos higrotérmicos horarios

La comparación entre las condiciones bioclimáticas de 2010 y futuras, requiere de estimaciones de datos horarios de temperatura y humedad relativa, que se realizaron a partir de las normales climatológicas 1980-2009 de temperaturas máxima y mínima, las cuales se generaron a partir de datos de CLICOM y, en los casos en que no estuvieron disponibles los datos en CLICOM, mediante reanálisis (Livneh et al, 2015).

La humedad relativa media mensual se calculó como el cociente de la presión de vapor  $e$  (en hPa) y la presión de vapor de saturación  $e_s$  (hPa) medias mensuales. Puesto que los datos de humedad atmosférica no son del todo comunes en las redes de estaciones meteorológicas, la  $e$  fue estimada con el polinomio propuesto por Tejeda y Rivas (2003) dependiente de la temperatura mínima media mensual  $T_m$ :

$$e = 7.5 + 8.5 \times 10^{-2} T_m + 3.7 \times 10^{-2} T_m^2 + 1.710^{-3} T_m^3 + 1.9 \times 10^{-4} T_m^4 - 5.0 \times 10^{-6} T_m^5 \quad \text{Ec. 3}$$

La  $e_s$  fue calculada con la ecuación propuesta por Adem (1967), a partir de la temperatura media mensual  $T$ :

$$e_s = 6.115 + 0.42915T + 1.4206 \times 10^{-2} T^2 + 3.046 \times 10^{-4} T^3 + 3.2 \times 10^{-6} T^4 \quad \text{Ec. 4}$$

La humedad relativa media mensual mínima ( $HR_{min}$ ) se obtuvo al combinar la  $e$  media mensual con la  $e_s$  en función la temperatura máxima ( $e_{stmax}$ ) y la humedad relativa media mensual máxima ( $HR_{max}$ ) con la  $e$  media mensual y la  $e_s$  en función la temperatura mínima ( $e_{stmin}$ ):

$$HR_{min} = e / e_{stmax} \text{ y } HR_{max} = e / e_{stmin}$$

Los datos horarios medios mensuales se obtuvieron de las ecuaciones propuestas y usadas por Tejeda (1991) y Tejeda y Rivas (2003):

$$T_{hor} = T_{min} + (at^b e^{ct})(T_{max} - T_{min}) \quad \text{Ec. 5}$$

$$HR_{hor} = HR_{min} + (1 - at^b e^{ct})(HR_{max} - HR_{min}) \quad \text{Ec. 6}$$

donde  $T_{hor}$  y  $HR_{hor}$  son la temperatura y humedad relativa horarias ( $^{\circ}\text{C}$  y %, respetivamente),  $z$ ,  $b$ , y  $c$  adquieren los valores de la tabla 3,  $t$  es la hora del día a partir del amanecer,  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ,  $HR_{max}$  y  $HR_{min}$  son las temperaturas y humedades relativas máximas y mínimas medias mensuales del periodo 1980-2009 de las ciudades seleccionadas en este estudio.

Tabla 3. Valores de los parámetros en las ecuaciones 5 y 6

Mes	Latitud	$a$	$b$	$c$
Marzo a octubre	$\geq 23.5^{\circ}\text{N}$	0.026	3.190	-0.375
Noviembre a febrero	$\geq 23.5^{\circ}\text{N}$	0.023	3.436	-0.421
Enero a diciembre	$< 23.5^{\circ}\text{N}$	0.096	2.422	-0.339

De esta manera se obtuvieron datos horarios medios mensuales (normales) de temperatura, humedad relativa y presión de vapor (la cual se mantuvo invariante a lo largo de la marcha diurna), para generar así valores medios mensuales (“normales”), de Humidex (Ec. 1) y de  $TE$  (Ec. 2). Como ya se mencionó, al derivar los valores de estos índices a necesidades de enfriamiento o de calefacción, los resultados de ambos fueron similares, por lo que se optó por mostrar en este informe final sólo los de Humidex.

## 2.4 Condiciones bioclimáticas base y futuras

Se analizaron condiciones del confort térmico (mensual, estacional y anual) de las 30 Zonas Metropolitanas para las que se elaboró el estudio, para los periodos base (1980-2009) y para escenarios de cambio climático.

Las ecuaciones 5 y 6 se sustituyeron en las ecuaciones de los índices bioclimáticos seleccionados para generar el periodo base 1980-2009 de la sensación higrótérmica. Para este cálculo es necesario conocer la temperatura neutra, de confort, preferente o termopreferendum ( $T_p$ ), que indica la preferencia térmica de los habitantes aclimatados a un sitio en particular. Para estimar este valor existen diferentes modelos como los que reportan García y Tejeda (2008) y Martínez, Alcántara, Bojórquez, y Gómez (2017); en este estudio se utilizó la ecuación más usada para latitudes tropicales:

$$T_p = 0.31 T + 17.6 \quad \text{Ec. 7}$$

Donde  $T$  es la temperatura media mensual en °C.

Con  $T_p$  y  $HR = 50\%$  se obtuvieron los valores mensuales preferentes de cada índice de confort, y el intervalo de confort se estableció con centro en este valor  $\pm 1.5^\circ\text{C}$ .

A los valores mensuales medios horarios del periodo base 1980-2009 se le sumaron los incrementos de temperatura por cambio climático. Para ello se utilizaron –como ya se dijo– los resultados de los estudios de la consultoría “Estimación de rangos de incertidumbre en las fechas para alcanzar los valores de incremento en la temperatura promedio global 1.0, 1.5 y 2.0°C)” y así se obtuvo el *escenario bioclimático preferente con cambio climático*.

Como ya se ha afirmado, a las consecuencias térmicas del cambio climático global sobre los asentamientos urbanos, hay que agregar el efecto del calentamiento debido a la urbanización (la llamada isla urbana de calor, IUC). Según Jáuregui (1986) la intensidad máxima ( $IC_{max}$ ) de la isla urbana de calor en ciudades tropicales, en °C, se estima a partir del número de habitantes de la zona urbana ( $P$ ) como:

$$IC_{max} = 2 \log_{10} P - 8^\circ\text{C} \quad \text{Ec. 8}$$

Como lo consideraron Tejeda, Luyando y Jáuregui (2011), aquí también se reconoce que la isla no se presenta en toda la zona urbana, sino que del centro se va diluyendo hacia la periferia, de modo

que el promedio espacial se puede estimar dividiendo  $IC_{max}$  entre 2. Para obtener un promedio temporal, considerando su variación diaria y en el ciclo anual, la intensidad media se divide entre 3, de modo que la intensidad media de la IUC se estimará como:

$$IC_{media} = \frac{IC_{max}}{2 \times 3} = \frac{2 \log_{10} P - 8^{\circ}C}{6} \quad \text{Ec. 9}$$

La ecuación 9 es congruente para la zona metropolitana de la Ciudad de México con el resultado de Luyando (2016), quien estimó la intensidad de la isla urbana de calor por cada área geográfica básica del INEGI y obtuvo un valor promedio para toda la zona de 1.1°C, igual a la estimación que resulta al aplicar la ecuación 9 a una población de 20 millones de habitantes.

Con la ecuación 9 se estimó el incremento de temperatura para la IUC para cada una de las estaciones meteorológicas localizadas en las zonas metropolitanas y para cada uno de los escenarios estudiados. En el caso de los escenarios futuros se utilizó como número de habitantes de la zona urbana ( $P$ ) la proyección poblacional para la década de 2030, ver tabla 4 (aproximadamente cuando se cumpla el horizonte temporal de 1°C de calentamiento medio planetario) y se mantuvo invariante considerando que el CONAPO proyecta que a partir del 2030 la población nacional tendrá un crecimiento casi nulo hasta el año 2042 cuando empezará ligeramente a decrecer (CONAPO, 2006).

Tabla 4. Población en las zonas metropolitanas proyectada al año 2030

Zona metropolitana	Población 2030 (CONAPO, 2006)	Zona metropolitana	Población 2030 (CONAPO, 2006)
Valle de México	23 247 131	Acapulco	958 783
Guadalajara	5 514 718	Tampico	1 036 044
Monterrey	5 362 187	Chihuahua	1 058 345
Puebla-Tlaxcala	3 315 464	Morelia	958 103
Toluca	2 652 181	Saltillo	1 052 523
Tijuana	2 335 372	Veracruz	925 654
León	1 887 801	Villahermosa	925 904
Juárez	1 616 344	Reynosa-Río Bravo	959 789
La Laguna	1 501 567	Tuxtla Gutiérrez	872 637
Querétaro	1 449 614	Cancún	1 128 618
San Luis Potosí	1 259 400	Xalapa	787 797
Mérida	1 245 960	Oaxaca	702 617
Mexicali	1 210 211	Celaya	699 188
Aguascalientes	1 187 586	Poza Rica	580 924
Cuernavaca	1 149 814	Pachuca	664 028

## 2.5 Consumos eléctricos

Se calcularon las horas grado frío (HGF) correspondiente a las necesidades de enfriamiento y horas grado calor (HGC) o necesidades de calefacción, como:

$$HGC = \sum_{i=1}^n (hum_{i1} - R_{max}) \quad \text{Si } hum_i > R_{max}$$

$$HGF = \sum_{i=1}^n (R_{min} - hum_{i2}) \quad \text{Si } hum_i < R_{min}$$

$R_{min}$  es el límite inferior y  $R_{max}$  es el límite superior del intervalo de confort del Humidex, cuyos valores horarios medios mensuales son  $hum_i$ .

Para su conversión a necesidades energéticas (en kilowatts-hora, kWh, por usuario de servicio eléctrico), se usaron los resultados del trabajo de De Buen (2017), quien a las distintas tarifas eléctricas domésticas les asigna consumos anuales de electricidad por confort (ver tabla 5). Se clasificaron las 30 zonas metropolitanas de acuerdo a su tarifa eléctrica, y se obtuvo la media de HGF de todas aquellas que tuvieran la misma tarifa (1, 1A, 1B, 1C, 1D, 1E o 1F). Las equivalencias se muestran en la última columna de la tabla 5. Debe aclararse que a falta de dato del consumo en la segunda columna de la tabla 5, a las localidades de las tarifas 1 y 1A se les asignaron los mismo equivalentes de la tarifa 1B.

Tabla 5. Equivalencias de HGF en kWh-usuario

Tarifa eléctrica doméstica	Consumo promedio anual por confort (kWh-usuario en 2012, según De Buen, 2017)	Número de zonas metropolitanas por cada tarifa	Equivalente promedio kWh-usuario por cada HGF calculada con Humidex
<b>1</b>	Sin dato	16	0.0055
<b>1A</b>	Sin dato	0	0.0055
<b>1B</b>	310	4	0.0055
<b>1C</b>	772	7	0.0153
<b>1D</b>	936	1	0.0145
<b>1E</b>	1459	1	0.0477
<b>1F</b>	2845	1	0.0829

Como hipótesis de trabajo se aceptó que el consumo aumentará no sólo por el incremento de las HGF por cambio climático global y local, sino también porque cada vez los sistemas de aire

acondicionado, ventiladores, refrigeradores, etc. tienen precios más accesibles, como sugieren los incrementos de consumos de 2012 a 2016 en el documento de De Buen (2017). No obstante, la tecnología de estos equipos tiende a ser más eficiente y cada vez se incorporan más técnicas pasivas de climatización a las viviendas. De modo que el incremento de uso por mayor accesibilidad a equipos de aire acondicionado y su disminución por mejor tecnología es de esperarse que se anulen, por lo que es razonable suponer que la equivalencia de HGF contra consumos eléctricos del periodo base se mantendrá en el futuro. También debe tomarse en cuenta que en los cálculos de *HGF* está incorporada la aclimatación de los sujetos a través del termopreferendum o temperatura preferente.

En suma, para obtener el consumo de energía eléctrica para necesidades de enfriamiento por usuario de cada zona metropolitana se multiplicaron las HGF por su equivalencia promedio. Es importante aclarar que en el trabajo de De Buen (2017), el término “usuario” no se refiere a una “persona” sino al “medidor del servicio eléctrico” o a la “casa habitación con medidor del servicio eléctrico”. Por lo tanto, para poder obtener el consumo para enfriamiento por habitante se tiene que dividir entre el número de personas promedio que conforman una familia en casa reportada por el INEGI para el periodo base (2010) y los proyectados por el CONAPO para los escenarios  $\Delta T=1.0^{\circ}\text{C}$  (2030),  $\Delta T=1.5$  y  $2.0^{\circ}\text{C}$  (2050). Para el periodo base, se dividió entre 3.19 (es decir, 3.19 personas que conforman una familia); el horizonte  $\Delta T=1.0^{\circ}\text{C}$  entre 3.17 y los  $\Delta T=1.5$  y  $2.0^{\circ}\text{C}$  entre 3.01. Así es como se obtuvo el consumo de enfriamiento en kWh mensual por habitante y sus respectivos valores trimestrales, semestrales y anuales.

También se evaluó el consumo total de cada zona metropolitana (y no por habitante) para el periodo base y para el año 2030 (ver Tabla 6). A partir de ese año el CONAPO tiene proyectado un crecimiento poblacional casi nulo hasta el 2050 cuando empezará a decrecer.

En cuanto a la esperada disminución de las necesidades de calefacción (*HGC*), no se encontró en la literatura una equivalencia energética, por lo que se reportan simplemente las reducciones porcentuales. Buscar una equivalencia energética para México requeriría de trabajo experimental prolongado y costoso.

Tabla 6. Tarifas eléctricas de uso doméstico y su equivalencia promedio para las zonas metropolitanas

Zona metropolitana	Tarifa eléctrica doméstica	Equivalencia promedio kWh-usuario por cada HGF	Zona metropolitana	Tarifa eléctrica doméstica	Equivalencia promedio kWh-usuario por cada HGF
Valle de México	1	0.0055	Acapulco	1B	0.0055
Guadalajara	1	0.0055	Tampico	1C	0.0153
Monterrey	1C	0.0153	Chihuahua	1B	0.0055
Puebla-Tlaxcala	1	0.0055	Morelia	1	0.0055
Toluca	1	0.0055	Saltillo	1	0.0055
Tijuana	1	0.0055	Veracruz	1C	0.0153
León	1	0.0055	Villahermosa	1D	0.0145
Juárez	1C	0.0153	Reynosa-Río Bravo	1E	0.0477
La Laguna	1C	0.0153	Tuxtla Gutiérrez	1B	0.0055
Querétaro	1	0.0055	Cancún	1C	0.0153
San Luis Potosí	1	0.0055	Xalapa	1	0.0055
Mérida	1C	0.0153	Oaxaca	1	0.0055
Mexicali	1F	0.0829	Celava	1	0.0055
Aguascalientes	1	0.0055	Poza Rica	1B	0.0055
Cuernavaca	1	0.0055	Pachuca	1	0.0055

### 3. Resultados

Se realizó el análisis de las necesidades de climatización estimadas a partir del Humidex, con los resultados de los modelos GFDL-CM3 y HADGEM2-ES y a su vez con dos forzamientos radiativos (4.5 y 8.5 Wm<sup>-2</sup>), y se compararon entre sí encontrando que no existe una diferencia significativa entre ellos. En razón de lo anterior, los resultados que se muestran en este documento sólo corresponden a la combinación del Humidex con HADGEM2-ES y un forzamiento de 8.5 Wm<sup>-2</sup>. Se eligió dicha combinación debido a que el HADGEM2-ES mostró mayor sensibilidad, mientras que el forzamiento de 8.5 Wm<sup>-2</sup>, para necesidades de enfriamiento futuro, tiene un sentido precautorio.

Si bien las estimaciones de incrementos en los consumos fueron obtenidas por cada “usuario” del servicio eléctrico, después fueron trasladados a valores por cada habitante, y por último se integraron para la población total de cada zona metropolitana; estas dos últimas categorías serán las presentadas más adelante.

Los incrementos térmicos por IUC –que fueron estimados con la expresión logarítmica de la Ec. 9- van de 1.1°C, para la zona metropolitana del Valle de México, a 0.6 para Poza Rica; de modo que su impacto es menor sensiblemente que los horizontes de cambio climático (1.0, 1.5 y 2.0 °C).

En general, los métodos y los resultados de este trabajo sobre la disminución de las necesidades de calefacción y el aumento de las necesidades de enfriamiento bajo condiciones de cambio climático, son consecuentes con lo publicado por Petri y Caldeira (2015) para 25 ciudades de los Estados Unidos; Mourshed (2011) para Dhaka, Bangladesh, y Christenson, Manz y Gyalistras (2006) para cuatro ciudades de Suiza.

#### 3.1 Necesidades de enfriamiento

En la figura 1 se muestra el periodo base correspondiente a las necesidades anuales de enfriamiento en Horas Grado Frío (HGF). Respecto a este escenario se obtienen los incrementos mostrados en las figuras 2 a la 4, correspondientes al consumo para enfriamiento por habitante en los horizontes  $\Delta T=1.0, 1.5$  y  $2.0^{\circ}\text{C}$ , con isla y sin isla urbana de calor para los periodos anual y semestrales. Las figuras 5 a la 7 muestran la misma información que las figuras 2 a la 4, pero para la población total de cada zona metropolitana de acuerdo a la tabla 4, en (GWh/población).



Figura 1. Necesidades anuales de enfriamiento en Horas Grado Frío (HGF) para el periodo base (datos climáticos 1979-2012 y población 2010).

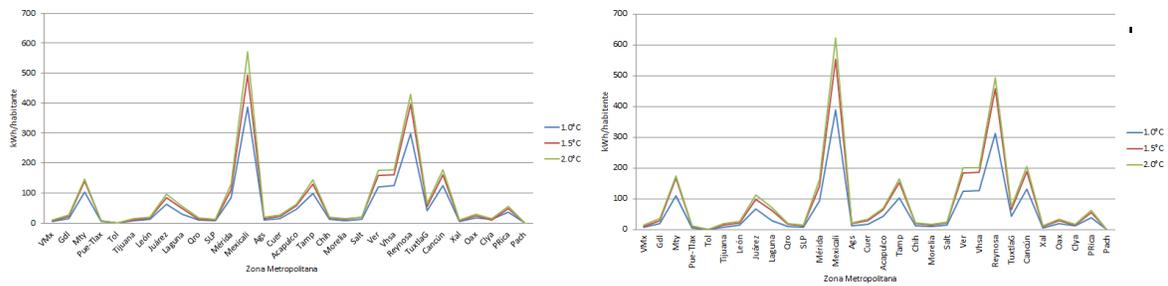


Figura 2. Incremento de consumo anual para enfriamiento (kWh/habitante) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.0, 1.5$  y  $2.0^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global, a) sin IUC y b) con IUC.

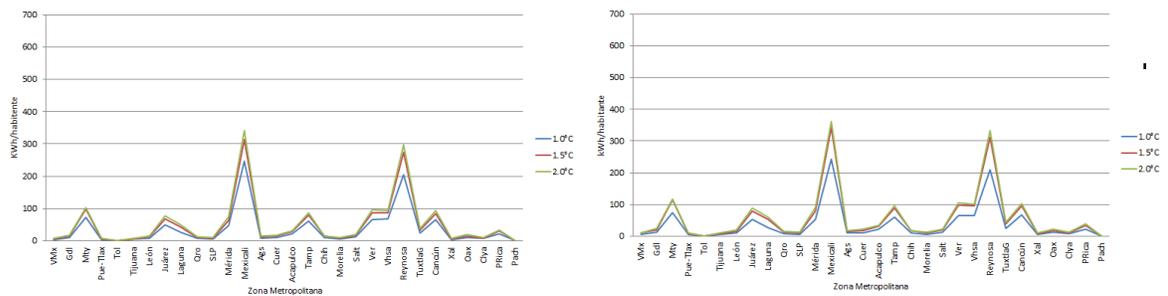


Figura 3. Incremento de consumo para enfriamiento (verano, kWh/habitante) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.0, 1.5$  y  $2.0^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global, a) sin IUC y b) con IUC.

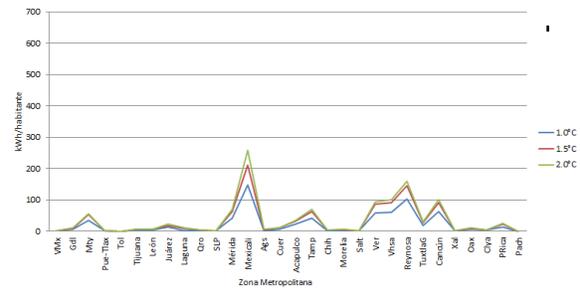
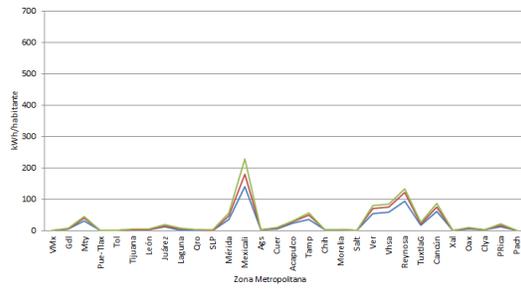


Figura 4. Incremento de consumo para enfriamiento (invierno, kWh/habitante) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.0, 1.5$  y  $2.0^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global, a) sin IUC y b) con IUC.

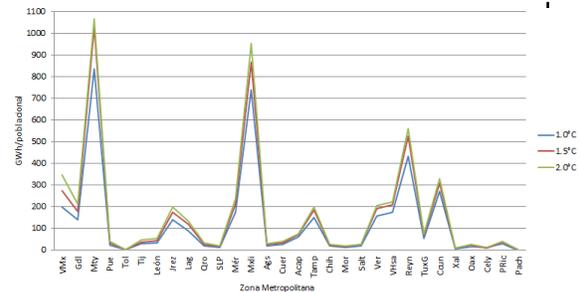
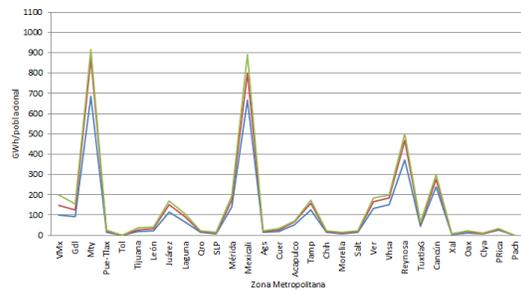


Figura 5. Incremento de consumo anual para enfriamiento (GWh/población) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.0, 1.5$  y  $2.0^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global, a) sin IUC y b) con IUC.

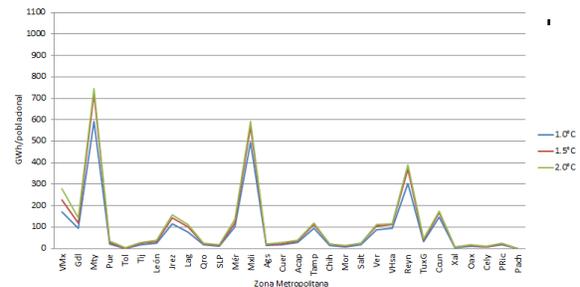
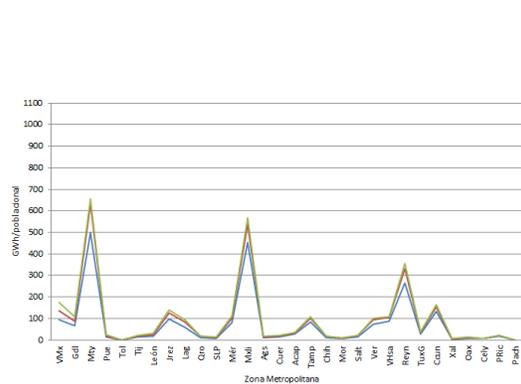


Figura 6. Incremento de consumo para enfriamiento (verano, GWh/población) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.0, 1.5$  y  $2.0^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global, a) sin IUC y b) con IUC.

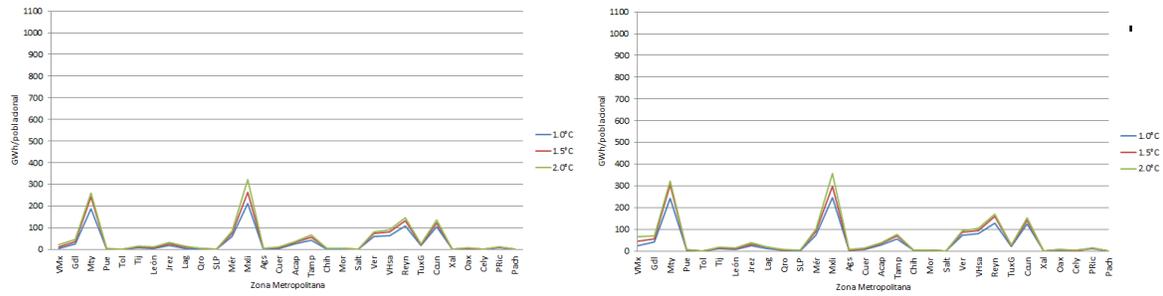


Figura 7. Incremento de consumo para enfriamiento (invierno, GWh/población) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.0, 1.5$  y  $2.0^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global, a) sin IUC y b) con IUC.

Los resultados anteriores también se muestran en las figuras 8 a 16 en forma de mapas.

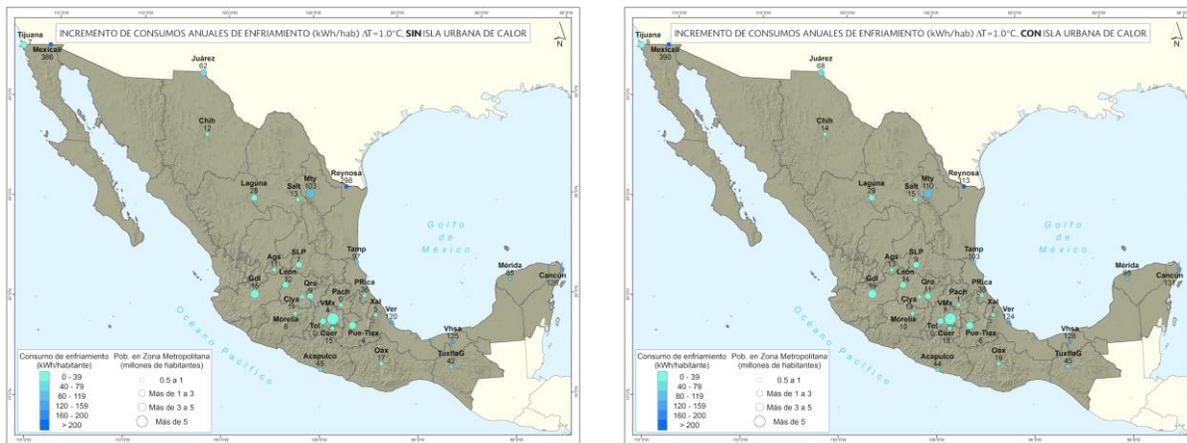


Figura 8. Incremento de consumos anuales para enfriamiento (kWh/habitante) para el horizonte en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.0^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC.

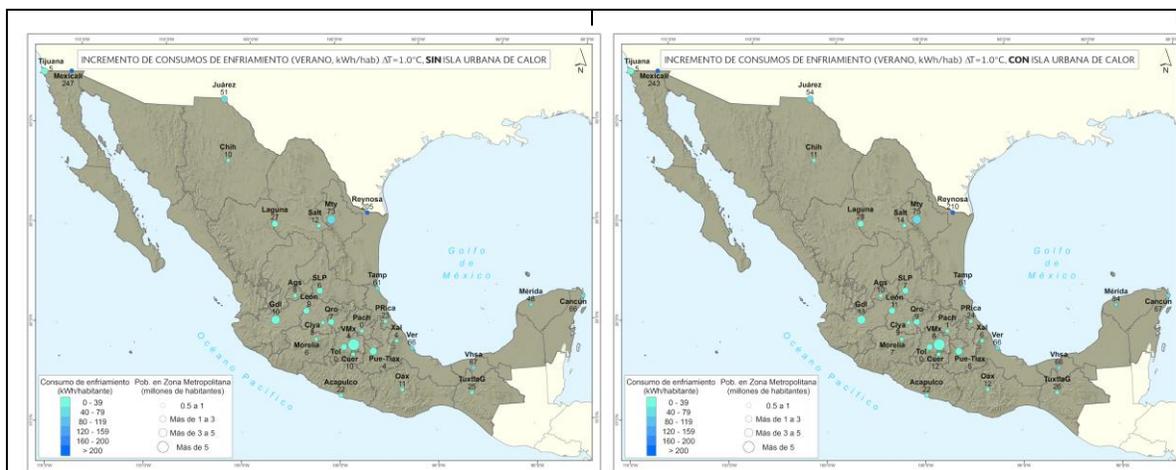


Figura 9. Incremento de consumos para enfriamiento (verano, kWh/habitante) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.0^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC.

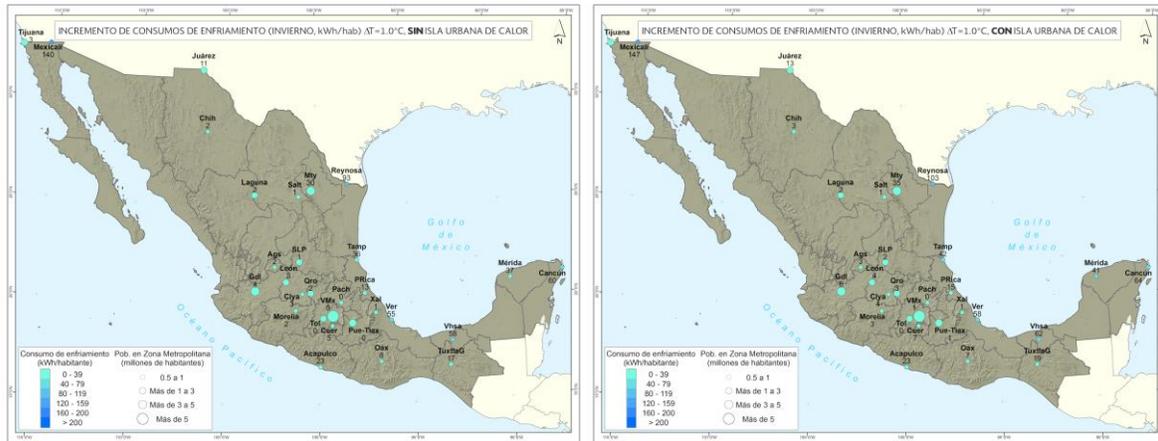


Figura 10. Incremento de consumos para enfriamiento (invierno, kWh/habitante) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.0^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC.

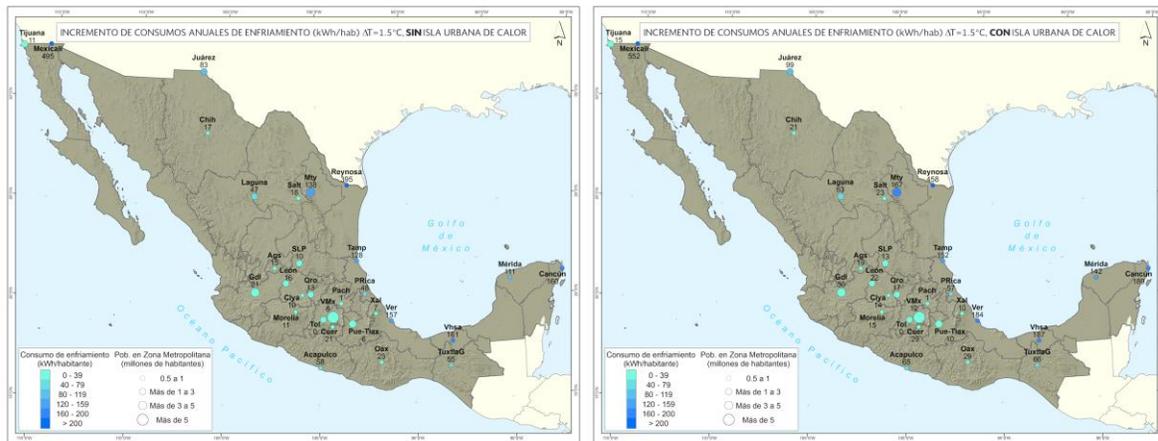


Figura 11. Incremento de consumos anuales para enfriamiento (kWh/habitante) para el horizonte en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.5^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC.

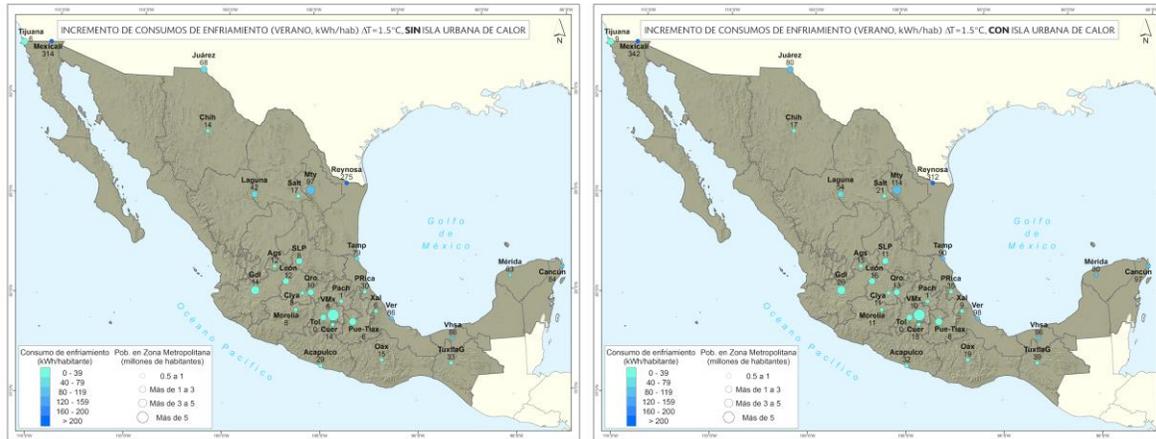


Figura 12. Incremento de consumos para enfriamiento (verano, kWh/habitante) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.5^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC.

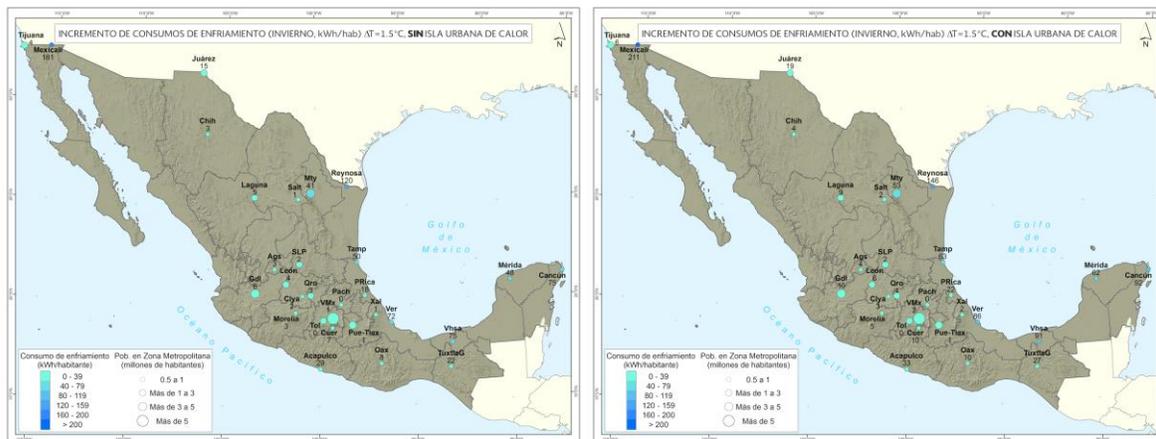


Figura 13. Incremento de consumos para enfriamiento (invierno, kWh/habitante) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.5^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC.

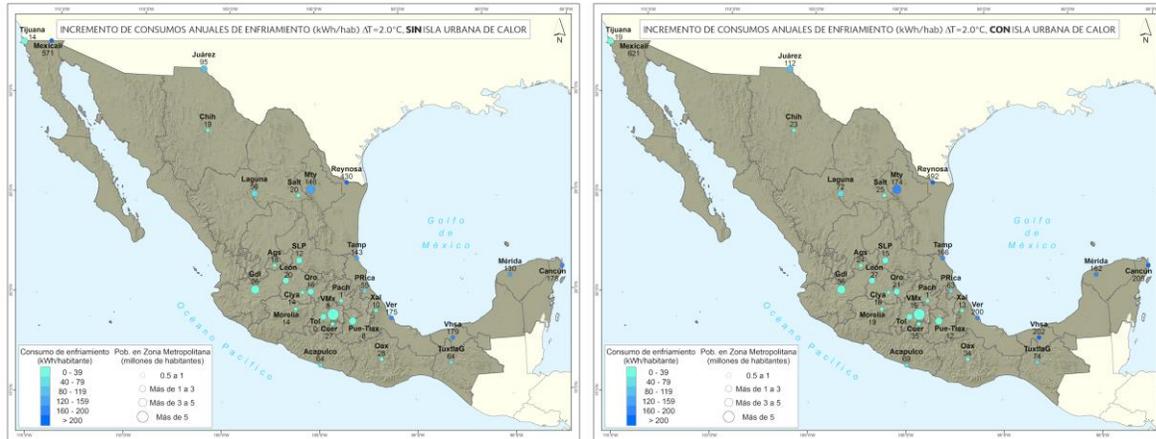


Figura 14. Incremento de consumos anuales para enfriamiento (kWh/habitante) para el horizonte en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=2.0^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC.

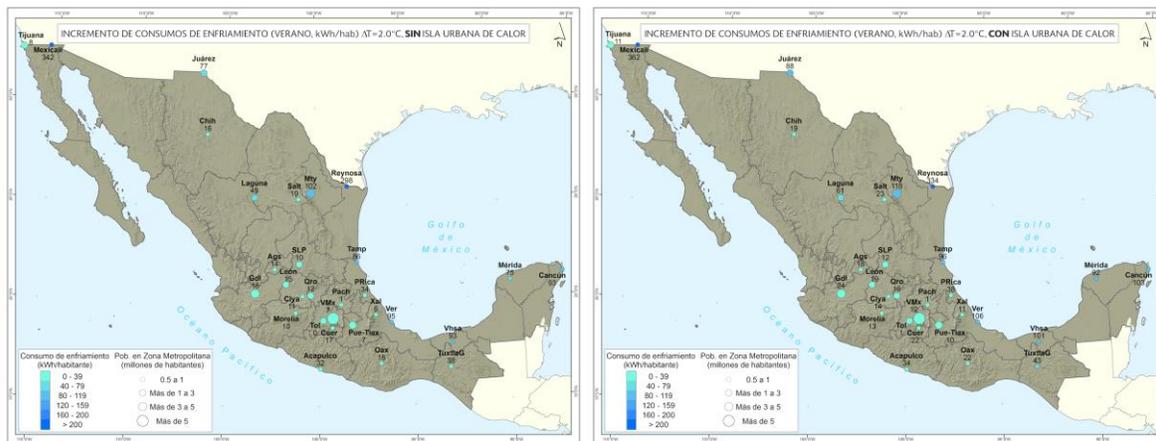


Figura 15. Incremento de consumos para enfriamiento (verano, kWh/habitante) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=2.0^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC.

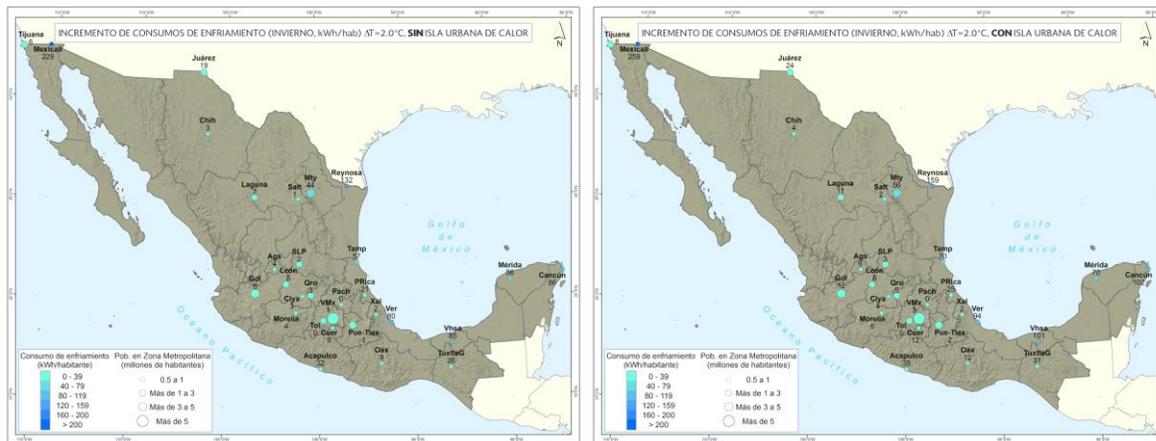


Figura 16. Incremento de consumos para enfriamiento (invierno, kWh/habitante) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=2.0^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC.

Las gráficas 2 a la 7 y los mapas mostrados en las figuras 8 a la 16, señalan que el incremento de consumo para enfriamiento se espera mayor para las zonas metropolitanas de Mexicali, Reynosa-Río Bravo, Cancún, Villahermosa, Veracruz, Tampico, Monterrey, Mérida y Ciudad Juárez. Esta última se localiza a mayor altitud (1120 m.s.n.m.), mientras que el resto está por debajo de los 1000 m.s.n.m. Las zonas metropolitanas que continúan a la lista de futuros requerimientos de consumo para enfriamiento son Tuxtla Gutiérrez, Acapulco y Poza Rica, las cuales al igual que las ya mencionadas se localizan por debajo de los 1000 m.s.n.m. En esta lista de mayores requerimientos de energía para enfriamiento se encuentran las zonas metropolitanas analizadas, cercanas o localizadas en la costa mexicana del Golfo de México y el Mar Caribe.

Se observa que el incremento de consumo para enfriamiento es mayor conforme se avanza de uno a otro horizonte temporal  $\Delta T$  y que éstos se esperarían aún mayores en presencia de IUC. Estos serían más altos en los meses de marzo a agosto (verano) y ligeramente menores en los meses de septiembre a febrero (invierno).

Las necesidades de enfriamiento para las zonas metropolitanas localizadas en la región central de México, no aumentarían o lo harían de forma mínima. En ninguna de ellas se prevé una disminución de consumo para enfriamiento.

Resalta de las figuras 5 a la 7 el requerimiento para enfriamiento en la zona metropolitana de Monterrey, que debido a su población, muestra un incremento mayor que el de las demás zonas metropolitanas. En la tabla 7 se presenta el porcentaje de incremento de necesidades de consumo para enfriamiento para el  $\Delta T=2.0^{\circ}\text{C}$  con respecto al periodo base de las zonas metropolitanas cálidas o semicálidas. Nótese que estos incrementos porcentuales son, en términos generales, coincidentes en orden de magnitud con los reportados por la literatura mencionada en la Introducción, si se toma en cuenta que distintos trabajos partieron de condiciones base diferentes, la mayoría aplicó el índice la Temperatura Efectiva y no el Humidex, y sus intervalos de confort tuvieron una extensión

de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  del índice respectivo y no de  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ , como se aplicó en estas consultoría en busca de obtener escenarios más estrictos privilegiando un punto de vista precautorio. Adicionalmente las comparaciones no se pueden efectuar de forma detallada porque distintos trabajos se enfocaron a distintas ciudades o regiones –ninguno a zonas metropolitanas como tales- y algunos tradujeron sus resultados a unidades de energía y otros sólo a escalas bioclimáticas.

*Tabla 7. Incremento de consumos para enfriamiento (%) para el  $\Delta T=2.0^{\circ}\text{C}$  con respecto al periodo base (datos climatológicos 1979-2012 y población 2010), para zonas metropolitanas cálidas o semicálidas.*

Zona metropolitana	Incremento de consumos para enfriamiento (%)					
	Sin IUC			Con IUC		
	Anual	Invierno	Verano	Anual	Invierno	Verano
Monterrey	212	336	185	247	417	210
La Laguna	107	85	112	132	122	134
Mérida	163	172	156	196	210	186
Mexicali	130	210	107	139	234	112
Cuernavaca	447	>1000	346	573	>1000	432
Acapulco	84	90	79	90	98	83
Tampico	140	218	115	159	264	126
Veracruz	117	139	103	132	161	114
Villahermosa	130	176	107	144	204	114
Reynosa-Río Bravo	184	254	165	206	298	181
Tuxtla Gutiérrez	192	221	176	219	259	197
Cancún	205	235	186	226	266	200
Poza Rica	136	192	116	155	228	130

## 3.2 Necesidades de calefacción

El mapa de la figura 17, se muestra el periodo base de necesidades anuales para calefacción en Horas Grado Calor (*HGC*) a partir del cual se hacen las comparaciones para obtener las figuras 18 a la 29.

Como ya se mencionó, dado que no se encontró en la literatura una equivalencia energética para las *HGC*, únicamente se reportan las reducciones porcentuales de necesidades de calentamiento para los tres horizontes ( $\Delta T=1.0, 1.5$  y  $2.0^{\circ}\text{C}$ ) con respecto al periodo base. Los resultados se muestran en las figuras 18 a la 20.



Figura 17. Necesidades anuales de calefacción en Horas Grado Calor (HGC) para el periodo base (datos climatológicos 1979-2012 y población 2010).

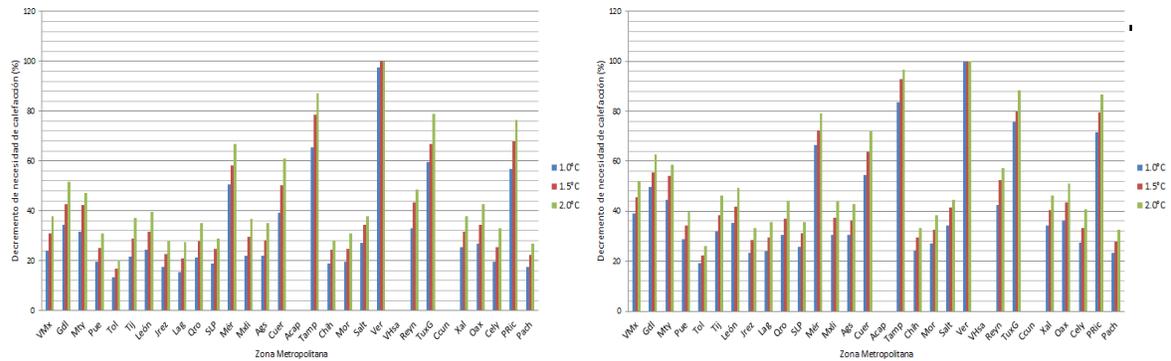


Figura 18. Decremento de necesidades anuales de calefacción (%) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.0, 1.5$  y  $2.0^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global, a) sin IUC y b) con IUC.

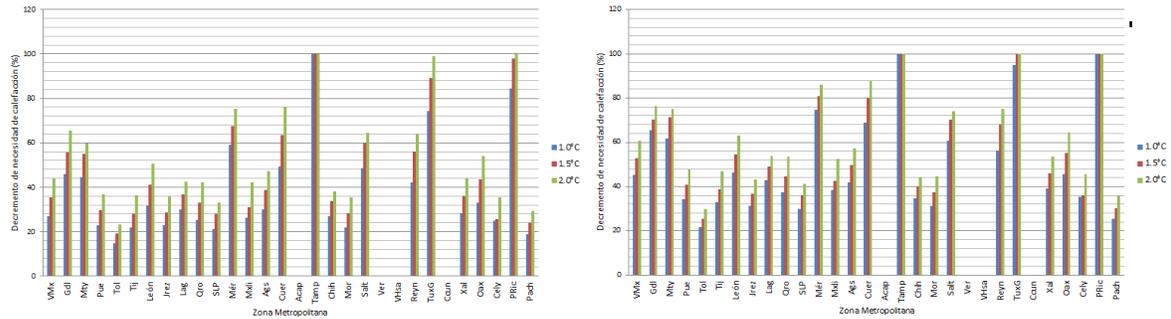


Figura 19. Decremento de necesidades de calefacción (verano, %) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.0, 1.5$  y  $2.0^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global, a) sin IUC y b) con IUC.

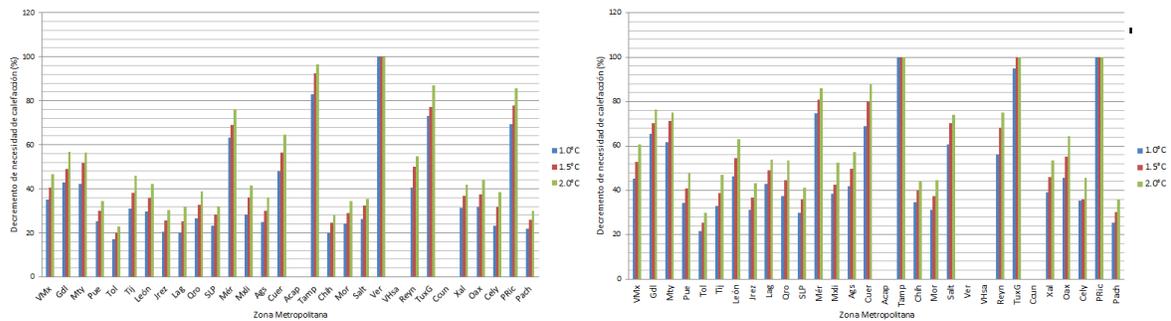


Figura 20. Decremento de necesidades de calefacción (invierno, %) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.0, 1.5$  y  $2.0^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global a) sin IUC y b) con IUC.

También se presentan los mapas correspondientes al decremento de necesidades de calefacción anuales y semestrales (septiembre-febrero o invierno y marzo-agosto o verano) para los horizontes  $\Delta T=1.0, 1.5$  y  $2.0^{\circ}\text{C}$ , con y sin IUC en las figuras 21 a la 29.

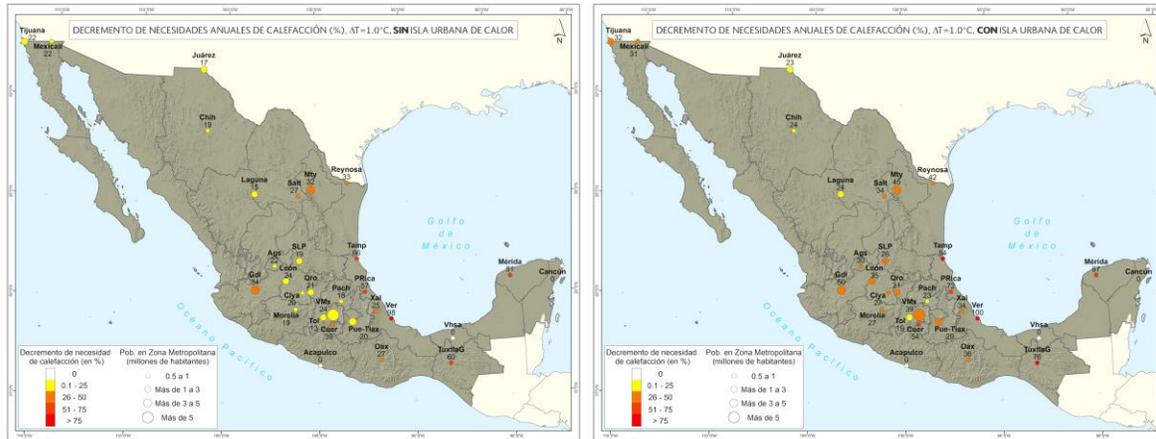


Figura 21. Decremento de necesidades anuales de calefacción (%), para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.0^{\circ}C$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC.

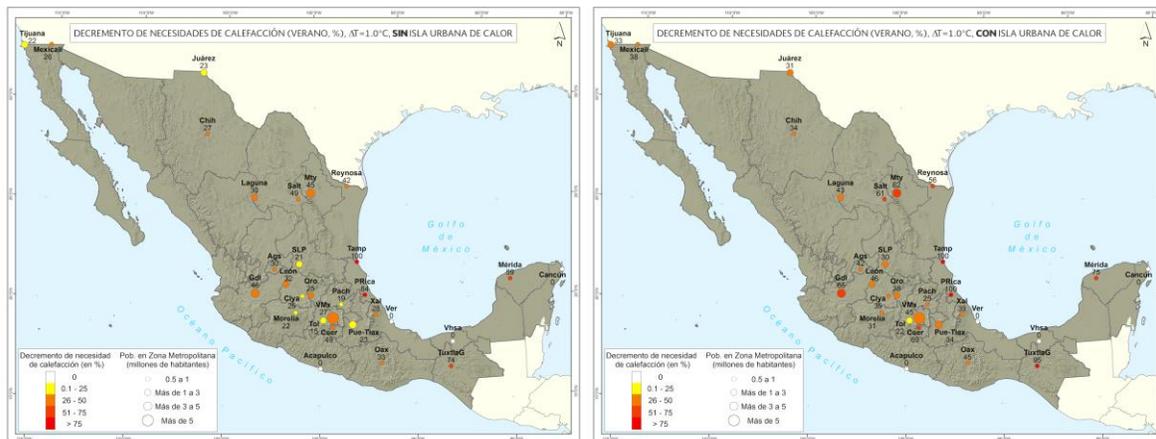


Figura 22. Decremento de necesidades de calefacción (verano, %), para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.0^{\circ}C$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC.

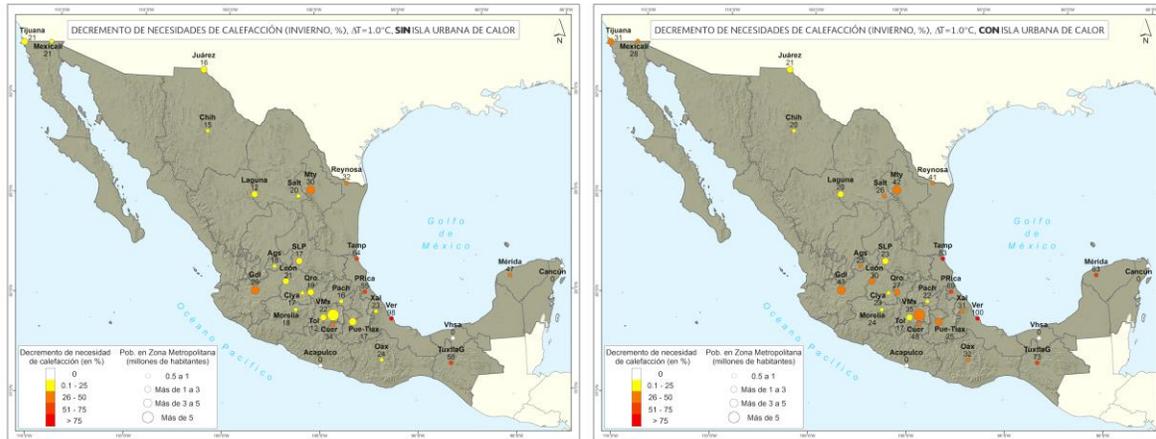


Figura 23. Decremento de necesidades de calefacción (invierno, %) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.0^{\circ}C$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC.

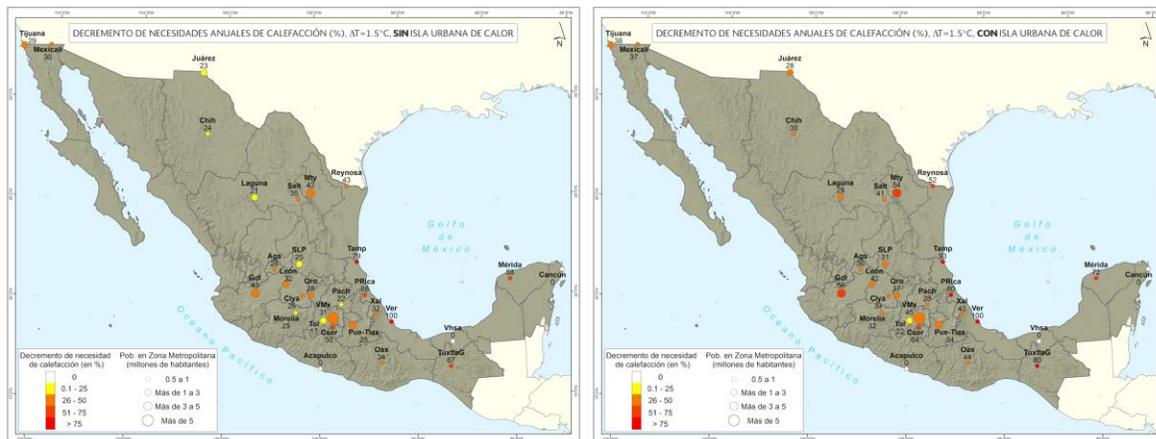


Figura 24. Decremento de necesidades anuales de calefacción (%), para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.5^{\circ}C$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC.

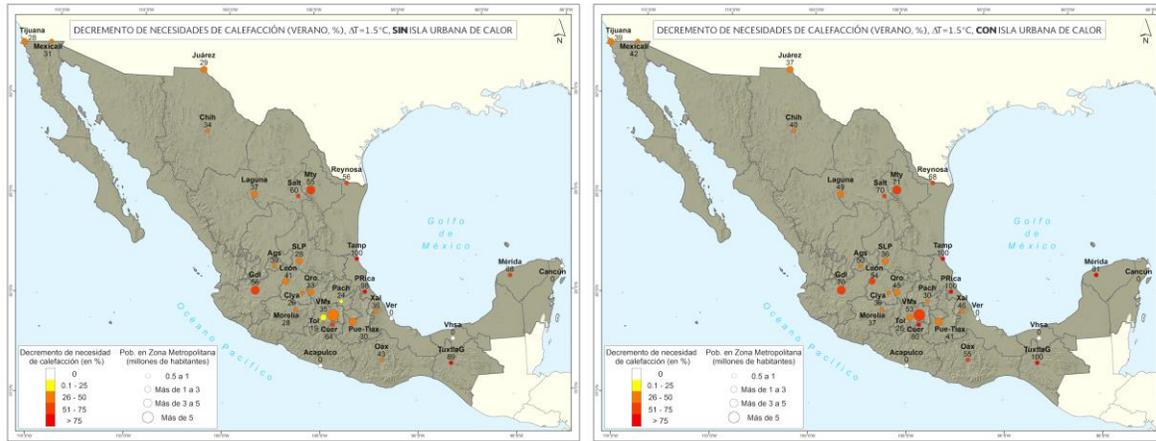


Figura 25. Decremento de necesidades de calefacción (verano, %) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.5^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC.

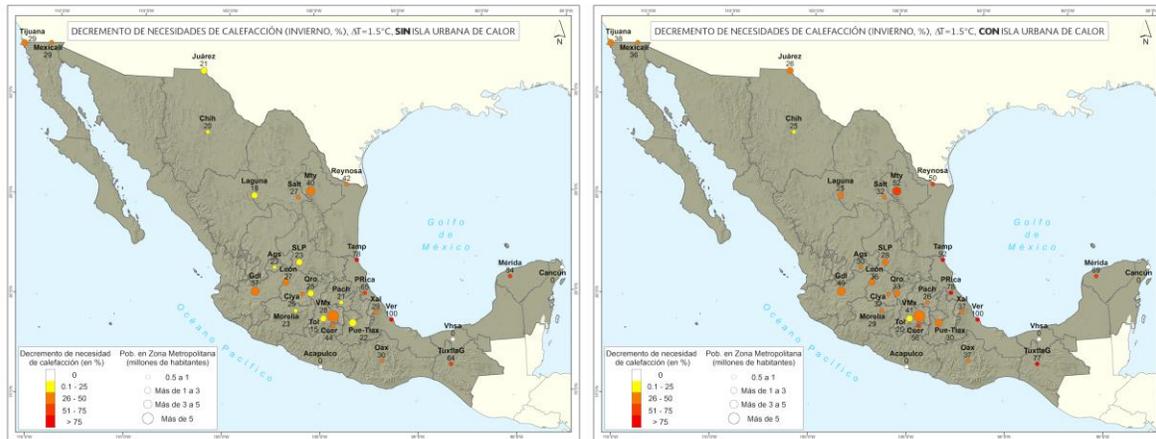


Figura 26. Decremento de necesidades de calefacción (invierno, %) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=1.5^{\circ}\text{C}$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC.

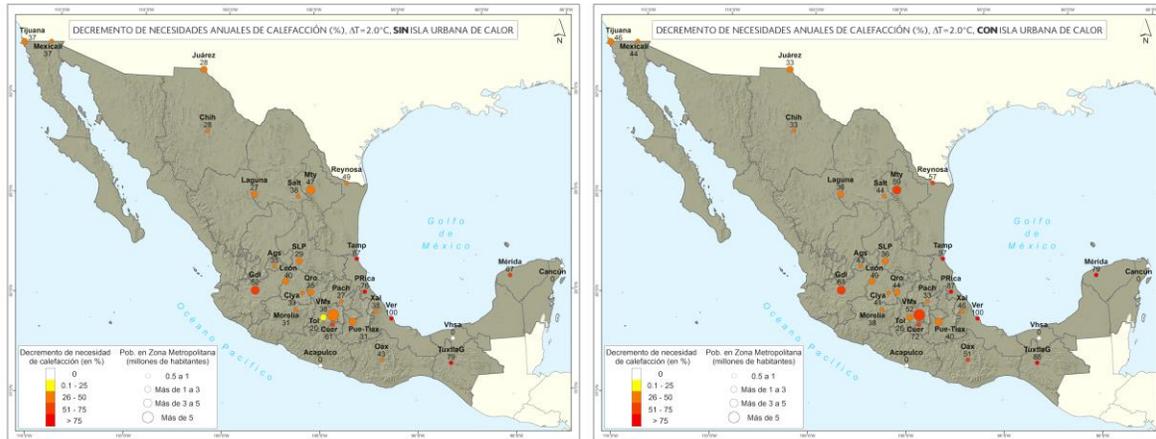


Figura 27. Decremento de necesidades anuales de calefacción (%), para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=2.0^{\circ}C$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC.

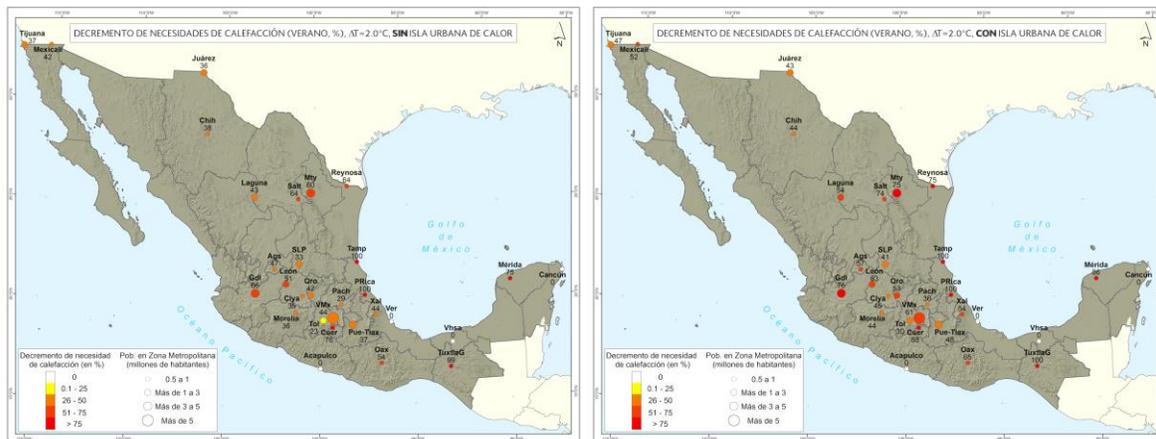


Figura 28. Decremento de necesidades de calefacción (verano, %) para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=2.0^{\circ}C$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC (%); derecha, con IUC (%).

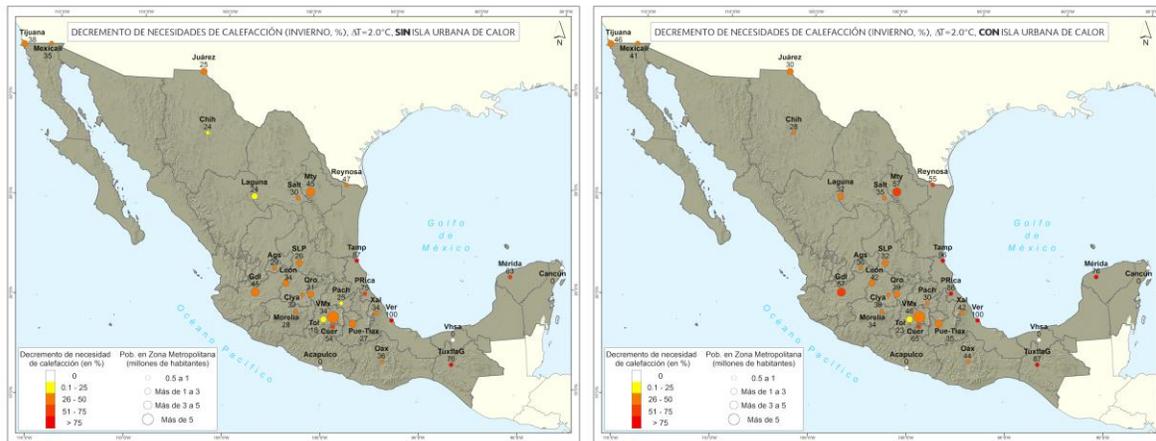


Figura 29. Decremento de necesidades de calefacción (invierno, %), para el horizonte temporal en el que la Tierra alcanza un  $\Delta T=2.0^{\circ}C$  sobre su temperatura media global. Izquierda, sin IUC; derecha, con IUC.

De las figuras 18 a 20 en combinación con los mapas (figuras 21 a 29) se observa que Acapulco, Villahermosa y Cancún no presentan decremento de necesidad de calefacción, debido que estos sitios no requirieron de ella durante el periodo base y lo mismo sucede para Veracruz en los meses de verano (marzo-agosto). El decremento de las necesidades de calefacción aumenta conforme se avanza en los horizontes temporales ( $\Delta T=1.0, 1.5$  y  $2.0^{\circ}C$ ).

El mayor decremento de necesidades de calefacción en todas las zonas metropolitanas analizadas, se proyecta para el verano incluyendo la IUC. Las zonas metropolitanas de Tampico y Poza Rica muestran un decremento de 100% en su necesidad de calefacción desde el horizonte temporal  $\Delta T=1.0^{\circ}C$  para el verano con IUC y Tuxtla Gutiérrez alcanza este mismo decremento a partir del horizonte  $\Delta T=1.5^{\circ}C$ , es decir, que las mínimas necesidades de calefacción en las madrugadas del verano –usualmente resueltas con arropamiento o por la inercia térmica de las edificaciones– desaparecerán por completo durante el verano. Estos resultados son similares para las zonas de Valle de México, Guadalajara, Monterrey, León, Mérida, Cuernavaca, Saltillo, Reynosa y Oaxaca, para las que se proyecta un importante decremento paulatino de necesidades de calefacción hasta alcanzar o sobrepasar 60% para el horizonte  $\Delta T=2.0^{\circ}C$  con IUC; decremento que, en términos prácticos, se traduce en menores necesidades de abrigo en las madrugadas frescas.

Para el caso del invierno todas las zonas metropolitanas analizadas muestran un decremento de al menos 15% en necesidades de calefacción sin IUC y estos aumentan con IUC.

Combinando la información de requerimiento de incremento de enfriamiento y decremento de calefacción, las zonas metropolitanas en las que se presentan ambas circunstancias son Reynosa, Monterrey, Tampico, Mérida, Veracruz, Poza Rica y Tuxtla Gutiérrez, principalmente en el verano y

considerando IUC. Se puede concluir que todas las zonas metropolitanas analizadas en este trabajo tienden a un incremento de temperaturas tanto mínimas como máximas, por lo que se espera un mayor requerimiento de enfriamiento y una menor necesidad de calefacción.

En la tabla 8 se muestra el decremento en las necesidades de calefacción para el  $\Delta T=2.0^{\circ}\text{C}$  con respecto al periodo base. Las zonas metropolitanas que en el periodo base no tuvieron necesidades de calefacción, su decremento es 0%, aquellas cuyo decremento es 100% o cercano, paulatinamente podrán prescindir de los sistemas de calefacción.

Finalmente se calcularon las tendencias decadales del consumo eléctrico anual para enfriamiento. Es decir, se pasan de resultados de horizontes térmicos a horizontes temporales.

Los horizontes temporales en los que se alcance un incremento en la temperatura media global ( $\Delta T$ ) de  $1^{\circ}\text{C}$ ,  $1.5^{\circ}\text{C}$  y  $2^{\circ}\text{C}$  utilizados en este trabajo corresponde a los resultados de la “Consultoría *Rangos de incertidumbre...*” (ver sección **2. Datos y métodos** en este informe), y se presentan en la tabla 9.

Los cálculos de consumos decadales generados a partir del incremento en la temperatura promedio global se muestran en la tabla 10. Se propone calcular en el punto intermedio de los rangos decadales, por ejemplo, 2015, 2025 hasta el 2065.

Tabla 8. Decremento de necesidades para calefacción (%) para el  $\Delta T=2.0^{\circ}\text{C}$  con respecto al periodo base (datos climatológicos 1979-2012 y población 2010)

Zona metropolitana	Decremento de necesidades de calefacción (%)					
	Sin isla urbana de calor			Con isla urbana de calor		
	Anual	Invierno	Verano	Anual	Invierno	Verano
Valle de México	38	34	44	52	46	61
Guadalajara	52	45	66	63	57	76
Monterrey	47	45	60	59	57	75
Puebla-Tlaxcala	31	27	37	40	35	48
Toluca	20	18	23	26	23	30
Tijuana	37	38	37	46	46	47
León	40	34	51	49	42	63
Juárez	28	25	36	33	30	43
La Laguna	27	24	43	36	32	54
Querétaro	35	31	42	44	39	53
San Luis Potosí	29	26	33	36	32	41
Mérida	67	63	75	79	76	86
Mexicali	37	35	42	44	41	52
Aguascalientes	35	29	47	43	36	57
Cuernavaca	61	54	76	72	65	88
Acapulco	0	0	0	0	0	0
Tampico	87	87	100	97	96	100
Chihuahua	28	24	38	33	28	44
Morelia	31	28	36	38	34	44
Saltillo	38	30	64	44	35	74
Veracruz	100	100	0	100	100	0
Villahermosa	0	0	0	0	0	0
Reynosa-Río Bravo	49	47	64	57	55	75
Tuxtla Gutiérrez	79	76	99	88	87	100
Cancún	0	0	0	0	0	0
Xalapa	38	34	44	46	42	54
Oaxaca	43	36	54	51	44	65
Celaya	33	32	35	41	38	45
Poza Rica	76	75	100	87	86	100
Pachuca	27	25	29	33	30	36

Tabla 9. Periodos probables en que se alcanzará el incremento en la temperatura promedio global (Consultoría Rangos de incertidumbre..., 2017)

Incremento en la temperatura promedio global ( $\Delta T$ )	Periodo probable
1.0°C	2030-2048
1.5°C	2041-2066
2.0°C	2051-2100

Tabla 10. Forma de estimación de consumos eléctricos decadales para enfriamiento en total de población de cada zona metropolitana (el dato de la segunda columna se multiplicó por la población respectiva).

Año	Consumo generado a partir del:
2010	Consumo base
2015	Consumo base
2025	(Consumo base + consumo con $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ )/2
2035	Consumo con $\Delta T = 1.0^\circ\text{C}$
2045	Consumo con $\Delta T = 1.5^\circ\text{C}$
2055	(Consumo con $\Delta T = 1.5^\circ\text{C}$ + consumo con $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ )/2
2065	Consumo con $\Delta T = 2.0^\circ\text{C}$

En la figura 30 se muestran cuatro ejemplos de tendencias decadales, con patrones más o menos diferenciados. Nótese que, acorde al tamaño de sus poblaciones, las escalas en el eje Y pueden variar hasta en dos órdenes de magnitud. En todas se ve el efecto de la urbanización tanto en las tendencias mismas como en la separación que se da, a partir de 2015, de las estimaciones con y sin isla urbana de calor, que puede representar entre un 10 y hasta 50% de diferencia. Desde luego, las tendencias están determinadas sustancialmente por las proyecciones demográficas.

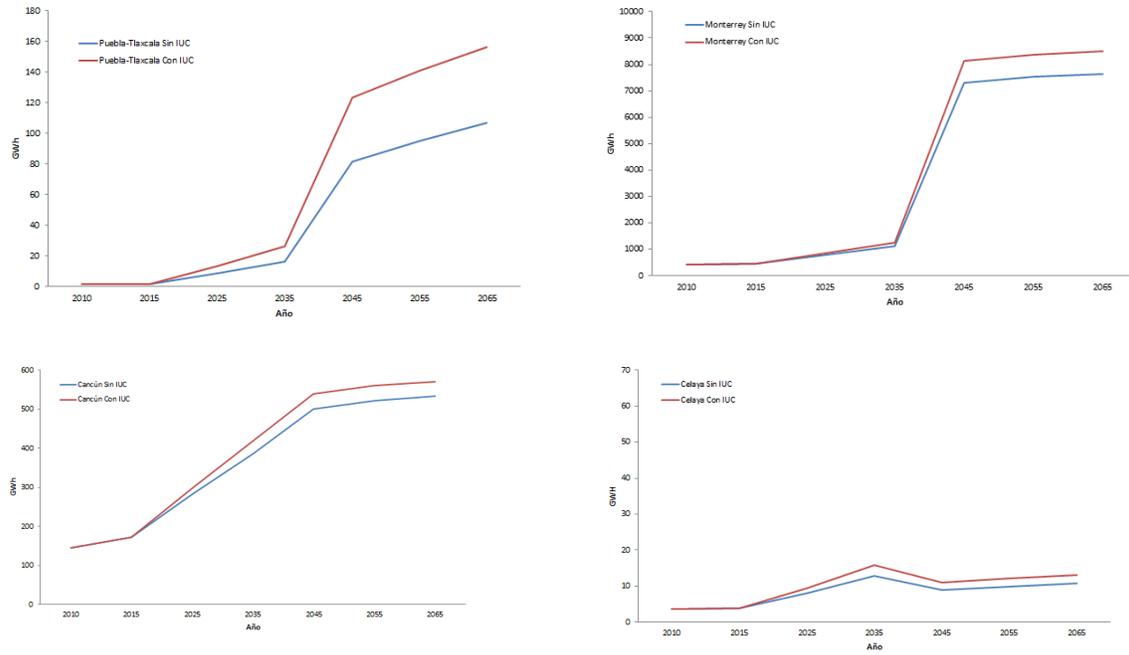


Figura 30. Ejemplos de las tendencias decadales de consumos para cuatro zonas metropolitanas.

## 4. Discusión

En orden de magnitud la tabla 11 proporciona los intervalos de incrementos en consumos eléctricos por habitante para enfriamiento esperados en las zonas metropolitanas que rebasarán los 100 kWh por habitante. La cota menor corresponde a un calentamiento global de 1°C sin isla urbana de calor, y la mayor a un calentamiento global de 2°C más isla urbana de calor. Los mayores incrementos se darán en el norte del país y en las zonas urbanas costeras de la costa del Golfo de México y Caribe. Como se dijo al comentar la tabla 7, en términos porcentuales los resultados de la literatura citada en la Introducción y los de esta consultoría son, en términos generales, coincidentes en orden de magnitud en cuando a consumos por habitante.

Tabla 11. Zonas metropolitanas que incrementarán sus necesidades de enfriamiento por habitante en más de 100 kWh (intervalos esperados redondeados a decenas. Su representación gráfica corresponde a la figura 2).

Zona metropolitana	$\Delta T = 1^\circ\text{C}$ sin IUC	$\Delta T = 2^\circ\text{C}$ con IUC
<b>Mexicali</b>	390 kWh/habitante	610 kWh/habitante
<b>Reynosa</b>	300	500
<b>Villahermosa</b>	110	200
<b>Cancún</b>	120	200
<b>Veracruz</b>	110	200
<b>Monterrey</b>	100	180
<b>Tampico</b>	100	170
<b>Mérida</b>	90	150
<b>Juárez</b>	60	105

La tabla 12 discrepa en el orden en que se presentan las zonas metropolitanas, pues la magnitud de los incrementos esperados es dominada por el crecimiento poblacional. Sus valores están en el orden de magnitud de los mostrados en la figura IV.2.2 (p. 167) de la *Cuarta Comunicación Nacional Mexicana sobre Cambio Climático* (SEMARNAT-INE, 2010), salvo que en esta última las unidades usadas son MGh/año y no en GW y su valores corresponden a ciudades y no a zonas metropolitanas. No obstante, las variaciones de los resultados son consecuentes entre un estudio y otro.

La citada figura IV.2.2 de la *Cuarta Comunicación...* corresponde a consumos de 27 ciudades, todas contenidas entre las 30 zonas metropolitanas estudiadas en esta consultoría, a partir de una base de población 2000 y normales climatológicas 1971-2000, y escenarios para las décadas de 2020, 2050 y 2080. Las variaciones temporales son similares a las mostradas por la figura 30 de este informe. En esta última, la zona Puebla-Tlaxcala presenta un comportamiento similar a otras zonas

templadas como Toluca, León, Morelia, San Luis Potosí, Aguascalientes, Querétaro, Tijuana e incluso el Valle de México, salvo las magnitudes propias de la población de cada una de ellas. Otro conjunto de patrones, aquí representado por Monterrey, es de zonas norteñas cálidas en verano, como Mexicali, Ciudad Juárez, La Laguna, Saltillo y Reynosa, donde las necesidades de enfriamiento casi no se diferencian con y sin isla urbana de calor, situación que es similar para las del trópico húmedo como Cancún, Veracruz, Tampico, Acapulco, Tuxtla Gutiérrez, Mérida y Villahermosa. Una excepción la conforman tres zonas para las cuales el CONAPO estima descensos poblacionales antes de alcanzar la primera mitad de este siglo: Poza Rica, Pachuca y Celaya.

Tabla 12. Zonas metropolitanas que incrementarán sus necesidades de enfriamiento por cada zona en más de 100 GWh (intervalos esperados redondeados a decenas. Su representación gráfica corresponde a la figura 5).

Zona metropolitana	$\Delta T = 1^\circ\text{C}$ sin IUC	$\Delta T = 2^\circ\text{C}$ con IUC
<b>Monterrey</b>	690 GWh	1060 GWh
<b>Mexicali</b>	660	950
<b>Reynosa</b>	380	560
<b>Cancún</b>	220	310
<b>Mérida</b>	150	210
<b>Villahermosa</b>	130	210
<b>Veracruz</b>	120	200
<b>Tampico</b>	110	200
<b>Juárez</b>	100	200
<b>La Laguna</b>	60	110

Desde luego es de esperarse que los requerimientos de calefacción disminuyan ante escenarios de calentamiento planetario y local debido a la urbanización. Los resultados de este trabajo indican que estas reducciones, en términos porcentuales, serán mayores en lugares cálidos (superiores al 50%), como Mérida, Tampico, Veracruz, Tuxtla Gutiérrez y Poza Rica; Acapulco y Cancún de por sí presentaban requerimientos nulos en el periodo base. Las zonas frías como Toluca, Pachuca y Tijuana disminuirán en un 15 a 30%, si se considera la isla urbana de calor; para el resto el decremento estarán entre 25 y 60%. No obstante debe considerarse que es muy probable que se sigan presentando las ondas frías en los sitios que detectó este estudio, entre ellas tres altamente pobladas: Guadalajara, Monterrey y Valle de México.

## 5. Recomendaciones

Debe tomarse en cuenta que en verano algunas regiones del país ya han tenido fallas en el suministro eléctrico por el exceso de demanda derivada de los consumos por el uso de sistemas de aire acondicionado, lo que se agravará en el futuro según se desprende este estudio. Considerando, además, que incluso zonas urbanas frías como Toluca, Pachuca y Tijuana han sido impactadas por olas de calor, las recomendaciones que se desprenden del presente análisis, van en la dirección de mitigar el consumo energético para climatización con acciones al interior de los edificios, en su entorno urbano, y la necesidad de generación y difusión de conocimiento al respecto, por lo que esas recomendaciones se dividen en tres rubros.

### 5.1 Confort bioclimático y edificación

En México existe un código de construcción sostenible para el sector de vivienda (CONAVI, 2010) pero no es de observancia obligatoria. También existen dos Normas Oficiales Mexicanas emitidas con el propósito de reducir los consumos de energía para climatización de edificios: la NOM-018-ENER-2011 (Aislantes térmicos para edificaciones. Características y métodos de prueba), y la NOM-020-ENER-2011 (Eficiencia energética en edificaciones. Envoltorio de edificios para uso habitacional). No obstante que ambas son de carácter obligatorio, en la realidad no se vigila su cumplimiento. Están además algunas Normas Técnicas Mexicanas de carácter voluntario (NMX-AA-164-SCF1-2013, Edificación Sustentable- criterios y requerimientos ambientales mínimos; NMX-AA-171-SCFI-2014, Requisitos y Especificaciones de desempeño ambiental de establecimientos de hospedaje; NMX-AA-SCFI-157-2012 de Requisitos y especificaciones de sustentabilidad para la selección del sitio, diseño, construcción, operación y abandono de sitios de desarrollos inmobiliarios turísticos en la zona costera de la Península de Yucatán).

De lo anterior se desprende la necesidad de que, en el ámbito de su competencia, autoridades locales coadyuven con la autoridad estatal o federal respectiva, para impulsar la aplicación de las normas señaladas. Particularmente se sugiere que los prestadores del servicio eléctrico (la Comisión Federal de Electricidad, principalmente) sean los responsables del cumplimiento de las normas oficiales NOM-018 y NOM-020, para que la conexión a la red eléctrica de inmuebles nuevos o renovados se condicione al cumplimiento de dichas normas.

Se han realizado algunos intentos importantes, por ejemplo desde hace una década el Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT) ha impulsado el Programa de Hipoteca Verde que consiste en otorgar a los derechohabientes un crédito adicional para la adquisición de ecotecnologías para el ahorro de agua, luz y gas, entre ellas los calentadores solares, aislamientos térmicos, iluminación ahorradora, etc. Por su parte el Consejo Nacional de Vivienda (CONAVI) lanzó el Programa “Esta es tu casa” donde se condicionaba la entrega del subsidio a una serie de criterios que garantizaban la sustentabilidad de la vivienda.

Por su parte, el gobierno de la Ciudad de México (antes Distrito Federal) emitió en 2008 un Programa de certificación de edificaciones sustentables (PCES), que establece un estándar para calificar los edificios habitacionales y comerciales mediante incentivos fiscales o financieros. Sin embargo, el mayor número de edificios que se han sometido a estas certificaciones corresponden a estándares internacionales, en especial el conocido como LEED (Leadership in Energy and Environmental Design, 1998). Por lo general son edificios desarrollados por holdings con presupuestos elevados. Este y otros etiquetados similares corresponden a países con características socioeconómicas, culturales y tecnológicas diferentes a las de México, por lo que su aplicación no puede ser generalizada.

Por tanto, para las 30 zonas metropolitanas analizadas en este estudio, se recomienda impulsar el desarrollo de códigos normativos por zona metropolitana, integrados a los reglamentos de desarrollo urbano que sujeten las licencias de construcción al cumplimiento de las medidas de eficiencia energética y construcción sostenible. Por ejemplo, se podría incluir entre los requisitos de la licencia de construcción y/o de rehabilitación de edificios, el cálculo de cargas térmicas del inmueble o bien su simulación energética, similar al Certificado Energético de Edificios que se le exigen a los constructores en la Unión Europea.

Para lo anterior es necesario el trabajo conjunto de autoridades municipales, centros de investigación, colegios de profesionistas y las cámaras industriales de la construcción y de la vivienda.

## 5.2 Urbanización

La mitigación de la isla urbana de calor requiere de una mayor densidad de áreas verdes. La ya mencionada norma NMX-AA-164-SCF1-2013 (Edificación Sustentable...) establece que el porcentaje de áreas libres debe ser mayor al valor mínimo establecido por la regulación local en un 10%, sin contar áreas de estacionamiento; que deben ser comunes a usuarios y visitantes, y permitir la infiltración de agua.

También debe propiciarse la ventilación, que sobre todo en ciudades costeras suele impedirse por cortinas de edificios altos a la orilla del mar, que perturban el régimen local de brisas, por lo que en nuevos desarrollos inmobiliarios los diseños deben considerar corredores de vientos frescos que induzcan la ventilación de zonas habitacionales. No obstante, debe considerarse que en climas húmedos agregar más humedad al ambiente puede incrementar la intensidad o duración de los momentos de incomodidad higrotérmica, y por lo tanto induzca al uso de sistemas de aire acondicionado.

Esa mitigación de la intensidad de la isla urbana de calor, sobre todo en los entornos urbanos en los que se dificulta la ventilación, tendría un efecto no sólo en el ahorro energético sino en la atenuación

de la intensidad de olas de calor, las cuales suelen incrementar la morbilidad y la mortalidad de niños y personas de edad avanzada.

## 5.3 Conocimiento

La generación y difusión de conocimientos va en distintos aspectos como la elaboración de recomendaciones regionales de vivienda sustentable acordes con la geografía propia; la detección y el uso de materiales térmicos adecuados y disponibles localmente; el comportamiento de los microclimas (intensidad y duración de la isla urbana de calor, p.e.); la asociación de mortalidad y morbilidad a patrones climáticos y de calidad del aire; la generación de bases de datos validadas de consumos energéticos a nivel mensual, para distintos sectores geográficos y diferentes estratos socioeconómicos de cada zona metropolitana, y campañas de difusión sobre el uso adecuado de sistemas de aire acondicionado tanto en espacios públicos –centros hospitalarios, educativos, comerciales y recreativos- como al interior de las viviendas.

Por otra parte, es necesario establecer umbrales para la ocurrencia de olas de calor y de frío para cada zona metropolitana, en función de la relación estadística de temperaturas y datos de mortalidad o morbilidad. Esos umbrales pueden servir para diseñar un semáforo de alerta que, a partir de los pronósticos meteorológicos, prevenga a la población y a las autoridades sanitarias.

## Glosario de términos

**Bioclima humano:** condiciones del clima que se traducen en comodidad, malestar o incluso riesgo a la salud, de los humanos.

**Confort bioclimático:** conjunto de condiciones en que la mente expresa satisfacción con el ambiente térmico.

**Forzamiento radiativo:** cambio en el balance de radiación solar que eventualmente puede afectar al sistema climático.

**GFDL-CM3:** modelo de circulación general creado por la Geophysical Fluid Dynamics Laboratory de los Estados Unidos.

**HADGEM2-ES:** modelo de circulación general creado por el Met Office Hadley Centre for Climate Change del Reino Unido.

**Hora Grado Calor (HGC):** “grados de calor” necesarios para acercarse al nivel de confort cuando los valores se situaron por debajo del límite inferior.

**Hora Grado Frío (HGF):** “grados de frío” necesarios para acercarse al nivel de confort cuando los valores se situaron por arriba del límite superior.

**Humedad relativa:** la razón o el porcentaje de la cantidad de vapor que hay en un volumen de aire, en relación al vapor necesario para saturar dicho volumen.

**Humidex:** índice bioclimático que combina la temperatura ambiente y la presión de vapor de agua.

**Índice de confort o índice bioclimático:** combinación de variables atmosféricas y eventualmente fisiológicas y de vestimenta, que se utiliza para evaluar la sensación de confort térmico; en este estudio, de los humanos, pero podría ser de otros animales homeotermos.

**Isla Urbana de Calor (IUC):** efecto de calentamiento debido a la urbanización; suele presentarse en centro de la zona urbana y diluirse hacia la periferia.

**Onda de calor:** tres o más días consecutivos en que la temperatura máxima rebase el percentil 90.

**Onda de frío:** tres o más días consecutivos en que la temperatura mínima está por debajo del percentil 10.

**Presión de vapor:** en la mezcla de gases que es la atmósfera, es la presión que ejerce el vapor de agua.

**Presión de vapor de saturación:** es la presión que ejerce el vapor cuando la atmósfera se satura de dicho gas.

**Sistema climático:** sistema conformado por la atmósfera, la hidrósfera, la litósfera, la criósfera y la biósfera, que intercambian entre sí materia, energía y momento mecánico, y cuya dinámica se alimenta energéticamente de la radiación proveniente del Sol.

*RCP*: Trayectorias Representativas de Concentración (*RCP*, por sus siglas en inglés). Representan el forzamiento radiativo total calculado para el año 2100 respecto a 1750.

*RCP4.5*: Escenario de estabilización hacia el año 2100 sin sobrepasar un forzamiento radiativo de  $4.5 \text{ Wm}^{-2}$ , que corresponde a una concentración media global aproximada de 538 ppm de  $\text{CO}_2$ .

*RCP8.5*: lo mismo para un forzamiento radiativo de  $8.5 \text{ Wm}^{-2}$ , equivalente a un nivel de  $\text{CO}_2$  de 936ppm.

*Temperatura ambiente*: la temperatura del aire medida de acuerdo a las normas meteorológicas (a la sombra, con una ventilación mínima, preferentemente a sobre césped a una altura de 1.m; pero en general, la temperatura del aire que es representativa de un ambiente en particular.

*Temperatura Efectiva*: índice bioclimático que combina la temperatura ambiente y la humedad relativa.

*Usuario* (de servicio eléctrico): Es un grupo de personas que se beneficia de una conexión que le brinda la Comisión Federal de Electricidad; en este estudio, el conjunto de habitantes que recibe la energía eléctrica en una toma doméstica. El promedio nacional está entre 3 y 4 personas por usuario.

*Zona metropolitana*: El conjunto de dos o más municipios donde se localiza una ciudad de 50 mil o más habitantes, cuyas funciones y actividades rebasan el límite del municipio que originalmente la contenía, incorporando como parte de sí misma o de su área de influencia directa a municipios vecinos predominantes urbanos, con los que mantiene un alto grado de integración socioeconómico

## Bibliografía

- Adem, J. (1967). Parametrization of atmospheric humidity using cloudiness and temperature. *Mon. Wea. Rev.*, 95:83-88.
- Auliciems, A., & De Dear, R. (1998). Thermal adaptation and variable indoor climate control. En A. (. Auliciems, *Advances in bioclimatology 5. Human bioclimatology* (págs. 61-86). Berlin: Springer-Verlag .
- Berglund, L., Breckenridge, J., & Yoshida, J. (1997). Chapter 8. Thermal Comfort. En R. Parsons, *ASHRAE Fundamentals Handbook* (págs. 8.1-8.28). Atlanta: ASHRAE.
- Christenson, M., Manz, H., & Gyalistras, D. (2006). Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland. *Energy Conversion and Management*, 47:671-686.
- CONAPO. (2006). *Proyecciones de la población de México 2005-2050*. Distrito Federal: Consejo Nacional de Población.
- De Buen, O. (2017). Análisis de los consumos unitarios y estacionales por usuarios en tarifas residenciales entre 2012 y 2016 para identificar evolución de la demanda por aire acondicionado. Cuadernos de la CONUEE No. 5. Ciudad de México: SENER-CONUEE. 4 p.
- García , G., & Tejeda, A. (2008). Consumos eléctricos para climatización de viviendas ante escenarios de cambio climático en el estado de Veracruz, México. *PALAPA*, 3(2):39-45.
- García, O., Santillán, N., Tejeda, A., Ojeda, S., & Bojórquez, G. (2010). Escenarios comparativos del confort térmico en tres ciudades del noroeste de México bajo condiciones actuales y de cambio climático. En F. Fernández , E. Galán, & R. Cañada, *Clima, salud y ecosistemas*. Madrid, España: Ediciones del Serbal.
- INEGI. (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
- INEGI. (2015). *Principales resultados de la Encuesta Intercensal 2015*. Distrito Federal : Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Jáuregui, E. (1986). Tropical urban climate of Mexico City. En T. Oke, *Proceedings WHO Technical Conference on Urban Climatology and its Applications with Special Regard to Tropical Areas* (págs. 63-86p.). Geneva: WMO.
- Jáuregui, E., & Tejeda, A. (2001). A scenario of human thermal comfort in Mexico city for 2CO2 conditions. *Atmósfera*, 14:125-138.
- Livneh, B., Bohn, T. J., Pierce, D. W., Muñoz-Arriola, F., Nijssen, B., Vose, R., y otros. (2015). A spatially comprehensive, hydrologic model-based data set for Mexico, the U.S, and southern Canada, 1950-2013. *Nature*.

- Luyando, E. (2016). Efectos de las temperaturas y precipitaciones extremas en el bioclima humano de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México por cambio climático local y global. Tesis de Doctorado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. 177p.
- Luyando, E., & Tejeda, A. (2010). Escenarios de bioclima humano en la megalópolis del centro de México ante cambio climático. En F. Fernández, E. Galán, & R. Cañada, Clima, ciudad y ecosistemas. Madrid, España: Ediciones del Serbal.
- Martínez, K., Alcántara, A., Bojórquez, G., & Gómez, L. (2017). Preferencia y sensación térmica en viviendas naturalmente ventiladas en Manzanillo, Colima. Cuadernos de Arquitectura , 7 (7):87-97.
- Masterson, J., & Richardson, F. (1979). Humidex, a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity. Downsview, Ontario: Environment Canada, Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario, CLI 1-79.
- Missenard, F. (1933). Température effective d'une atmosphère généralisation température résultante d'un milie. En F. Missnarad, Étude physiologique et technique de la ventilation (págs. 131-185). León: Librairie de l'Enseignement Technique.
- Mourshed, M. (2011). The impact of the projected changes in temperature on heating and cooling requirements in buildings in Dhaka, Bangladesh. Applied Energy, 3737-3746.
- Petri, Y., & Caldeira, K. (2015). Impacts of global warming on residential heating and cooling degree-days in the United States. Scientific Reports, 5:12427.
- Rodríguez, L., Tejeda, A., & Utrera, G. (2004). Demanda eléctrica para enfriamiento residencial en el estado de Veracruz ante la duplicación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. En M. R. (Compilador), Estudios de Arquitectura Bioclimática. Anuario 2004 (págs. 325-338). Distrito Federal: UAM-LIMUSA.
- SEMARNAT-INE. (2010). IV. Programas que comprenden medidas de adaptación al cambio climático (impactos, vulnerabilidad y adaptación). En SEMARNAT-INE, México. Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (págs. 119-174). México, D.F.: Solar, Servicios Editoriales, S.A. de C.V.
- Tejeda, A. (1991). An exponential model of the curve of mean monthly hourly air temperature. *Atmósfera*, 4:139-144.
- Tejeda, A., & Rivas, D. (2003). El bioclima humano en urbes del sur de México para condiciones de duplicación de CO<sub>2</sub> atmosférico. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía*, 51:37-52.
- Tejeda, A., Luyando, E., & Jáuregui, E. (2011). Average conditions of thermal stress in Mexican cities with more than one million inhabitants in the face of climatic change. *Atmósfera*, 24:15-30.

Derechos Reservados © 2018

## **Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)**

Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209, Colonia Jardines en la Montaña,  
Delegación Tlalpan, CP. 14210, Ciudad de México.

## **Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)**

Montes Urales 440, Colonia Lomas de Chapultepec,  
Delegación Miguel Hidalgo, CP.11000, Ciudad de México.

Este trabajo se realizó con financiamiento del Fondo para el Medio Ambiente Mundial a través del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo para la Sexta comunicación Nacional ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

