



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

---

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA**

**POTENCIAL ESTIMADO DE ENFRIAMIENTO  
EVAPORATIVO PARA LA CLIMATIZACIÓN PASIVA DE  
EDIFICIOS EN MÉXICO.**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA**

CAMPO DE CONOCIMIENTO - ENERGÍA

P R E S E N T A :

**ENRIQUE ARTURO PÉREZ FLORES**

TUTOR:

**DAVID MORILLÓN GÁLVEZ**

2012



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Dr. Arturo G. Reinking Cejudo

**Secretario:** Dr. David Morillón Gálvez

**Vocal:** Dr. José Diego Morales

**1<sup>er.</sup> Suplente:** Dr. Víctor Hernández

**2<sup>do.</sup> Suplente:** Ing. Augusto Sánchez Cifuentes



Facultad de Ingeniería. UNAM.

Ciudad Universitaria, México

## **TUTOR DE TESIS:**

Dr. David Morillón Gálvez

---

**FIRMA**

"Una sociedad crece bien cuando las personas plantan árboles  
cuya sombra saben que nunca disfrutarán"

Proverbio Griego

## Agradecimientos:

La presente Tesis es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias personas leyendo, opinando, corrigiendo, teniéndome paciencia, dando ánimo, acompañando en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad.

A mi Ma, por ser mi ejemplo de coraje y amor. Por preocuparse por mi tanto, por su apoyo incondicional y cariño de siempre. Por enseñarme a hacer las cosas bien con el ejemplo. Por tu entrega y apoyo. Te quiero con todo mi corazón “Flowers”.

A mi Pa, porque detrás de este logro estás tú, por todo tu apoyo y cariño irrestricto. Por siempre ser mi ejemplo de entrega y trabajo. Porque te debía un documento de tesis. Por confiar en mí, y apoyarme a hacer lo que quiero y por ser como soy. Te adoro mi “Arquí”.

A mi queridísima hermana Jahzeel por ser mi amiga y cómplice. Por tantas risas y dolores compartidos.

A Tuto(+), Pita y la Tía Cho por su ejemplo de vida.

Homero, Osvaldo por su amistad que va más allá de su apoyo y compañía, por momentos tan simpáticos y agradables que hemos vivido.

A Malena, por tu compañía y amistad al compartir la maestría.

A todos los profesores que ahora hacen de mí una mejor persona, y a los que alentaron mi curiosidad científica y me inculcaron el amor a la “energía”.

A mis compañeros que le dieron un toque especial a esta travesía.

Al CONACYT por su apoyo en la realización de mi maestría, por mi beca, y por todo el apoyo recibido. Y por su invaluable aportación al país, en la formación de capital humano.

Agradezco al Dr. Morillón por haber confiado en mi persona, por la paciencia y por la dirección de este trabajo.

A mis amigos, primos, tíos, y todas aquellas personas que sin esperar nada a cambio compartieron pláticas, conocimiento y diversión, y me han formado como persona.

## Resumen

El objetivo del presente trabajo es el estimar el potencial de enfriamiento evaporativo adiabático (PEEA) como alternativa climática de edificios en las distintas regiones de la República Mexicana en busca del confort térmico, evitando o disminuyendo el uso de equipos de aire acondicionado convencionales de elevados consumos de energía eléctrica, y alta emisión de gases de efecto invernadero asociados a la producción de esta. Los sistemas convencionales de aire acondicionado emplean CFC's como refrigerantes, el enfriamiento evaporativo (EE) emplea agua; empleando el calor latente de vaporización para enfriar el ambiente, la energía empleada para evaporar agua proviene de la energía interna del aire, disminuyendo entonces la temperatura. El proceso se basa en el flujo y temperatura de entrada de agua al sistema, y principalmente de la temperatura de bulbo húmedo presente en el ambiente. La tecnología que emplea el enfriamiento evaporativo es simple, funcional y con muchas aplicaciones en el sector residencial y comercial brindando enfriamiento y ventilación, con menores consumos de energía que los sistemas convencionales de aire acondicionado, brindando aire fresco a diferencia del aire viciado que proveen los AC.

**El estudio analizó el potencial promedio diario mensual de 200 ciudades de todo el país considerando únicamente el horario diurno comprendido de 8 a 21 horas, con un incremento del 32% del PEEA, sobre considerar las 24 horas del día.** Planteando una metodología para la obtención de la temperatura de bulbo húmedo, a partir de la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa, información relativamente fácil de obtener mediante los datos reportados en las Normales Climatológicas del sistema meteorológico nacional, Tomando como base el modelo matemático de Jensen, et.al (1990); logrando predecir e identificar sitios, temporadas y horarios propicios para el uso de esta estrategia de enfriamiento en busca del confort en edificios. Diseñadores y usuarios pueden evaluar entonces el potencial de cualquier sitio del país con una gran aproximación.

El enfriamiento evaporativo trabaja mejor en climas cálidos y secos, pero puede ser empleado también en climas húmedos. En México el clima está determinado por factores como la altitud sobre el nivel del mar, la latitud geográfica, y diversos fenómenos especiales y geográficos existentes de tierra y agua. El país cuenta con una diversidad de climas, englobadas por temperatura en cálidos y templados; y por la humedad existente en húmedos, subhúmedos y secos. Donde el 49% del territorio se encuentra comprendido por regiones donde predomina el clima seco y muy seco, condiciones que favorecen el enfriamiento evaporativo como estrategia de climatización.

Los resultados mostraron que el enfriamiento evaporativo es una gran alternativa de ahorro de energía. Se encontró en promedio un potencial nacional de 4.04°C de temperatura abatible durante todo el año, de 6.22°C considerando un lapso de trece horas (8am-21pm), jornada de incidencia solar y donde se realizan la mayoría de las actividades comerciales y laborales. Se detecta durante el periodo de la primavera, el mayor potencial de enfriamiento con la posibilidad de abatir 7.35°C en promedio nacional.

Determinando este potencial se realizó un análisis de la información climática que condujo a un mapeo del enfriamiento evaporativo nacional mensual, utilizando el programa ArcGis versión 9.3; sirviendo este como guía para constructores, diseñadores, ingenieros para emplear diseño bioclimático para la climatización pasiva o activa de espacios a partir de este potencial, buscando disminuir el impacto ambiental del sector.

El PEEA como estrategia de climatización en edificios es muy alta, ahora la tarea es concatenar el potencial de enfriamiento evaporativo, con la disponibilidad del recurso hídrico en cada localidad, aunado a la generación de una normatividad que regule las tecnologías en el consumo de agua por °C abatido de temperatura en equipos mecánicos.

## Abstract

The goal of this work is evaluate the evaporative air-conditioning potential (EAC) as an application for environmentally friendly cooling of buildings on the different regions of the Mexican Republic to achieve thermal comfort. The major interest is to avoid or decrease the use of conventional vapor compression air-conditioning (VAC), to reduce the energy consume, and the harmful environmental effects of greenhouse gases. Whereas conventional vapor compression air-conditioning (VAC) uses CFC's as cooling liquids, EAC uses water. The evaporative cooling provide a low-cost, low-technology alternative to refrigerated air conditioning, by combining a natural process, water evaporation with a simple reliable air-moving system. Fresh outside air is pulled through moist pads where it is cooled by evaporation and circulated through a house or building by a large blower. Evaporative coolers can work wonderfully well, providing fresh air. As the humidity increases, however the ability for them to cool the air effectively decreases. Simply put, evaporative coolers were not designed to work in wet conditions, but there they have periods when they can work properly.

The study analyze the daily monthly average potential of 200 cities around all the Mexican territory, with the restriction to considerate just the time between the 8 to 21hrs in the day, wining a 32% of evaporative air-conditioning potential, against consider all the 24 hours of the day. We sought a mechanism for obtaining the wet bulb temperature, from the dry bulb temperature and relative humidity, relatively easy to obtain this information using the data reported in the climatological average of the national meteorological system, based on the mathematical model of Jensen, et.al (1990), achieving predict and identify sites, seasons and adequate times to use of this strategy in search of comfort cooling in buildings. With so, users can evaluate the potential of any site in the country with a great approximation.

The results showed that evaporative cooling es a great energy saving alternative. It was found a national average of 4°C temperature swing all year, 6.22°C considering a period of twelve hours (8am-8pm), period with solar incidence and where the commercial and employment activities are conducted. Detected also during the spring the largest cooling potential with the possibility of knocking down 7.35°C on average.

On the last part of the study, determining the potential the study of climate information led to a national mapping of the monthly evaporative cooling potential, using ArcGIS version 9.3 software, serving as a guide for builders, designers, and engineers for bioclimatic design and instead the use of passive or active cooling of spaces from this potential, seeking to reduce the environmental impact of the sector.

The evaporative air conditioning as a strategy for climate control in buildings is very high, is such a technology, the task now is to concatenate the potential with the availability of water resources in each locality. Also we need to develop official regulations about the volume of water consumed per degree of cooling temperature.

<i>Resumen</i>	v
<i>Abstract</i>	vi
<b>Introducción</b>	9
<b>Capítulo I. Antecedentes</b>	12
<b>Capítulo II</b>	24
<b>Climatización de Edificios y el Enfriamiento Evaporativo</b>	
2.1 Introducción a la climatización	25
2.2 El sector edilicio en México	26
2.2.1 Aire acondicionado	29
2.2.2 Ahorros de energía en calefacción y refrigeración.	
Requerimientos de enfriamiento en edificios	31
2.2.3 Gases de efecto invernadero	32
<b>Capítulo III</b>	33
<b>Principios y conceptos del enfriamiento evaporativo</b>	
3.1 El aire seco	34
3.2 El aire húmedo	34
3.3 Presión de vapor	35
3.4 Psicrometría	36
3.5 El Diagrama Psicrometrico	43
3.6 Calentamiento o enfriamiento sensible	45
3.7 Calor o enfriamiento latente	46
3.8 Entalpía Potencial	47
3.9 Humidificación y Enfriamiento	50
3.10 Enfriamiento evaporativo adiabático	53
3.10.1 Dispositivos del enfriamiento evaporativo adiabático	54
Rociadores de agua fría	55
Climatizadores evaporativos de "Placas"	56
<b>Capítulo IV</b>	58
<b>Metodología para la evaluación del</b>	
<b>Potencial del Enfriamiento Evaporativo Adiabático (PEA)</b>	
4.1 Potencial del Enfriamiento Adiabático – PEA	59
4.2 Adquisición de datos	63
4.3 Determinación de energía máxima extraíble al aire	64
4.4 Metodología para calcular el factor de ahorro energético	
con el uso del enfriamiento evaporativo	69
<b>Capítulo V</b>	71
<b>Caso de estudio (Morelia, Michoacán)</b>	



<b>Capítulo VI</b>	79
<b>Mapas del potencial de ahorro de energía por aprovechamiento del enfriamiento evaporativo de la República Mexicana</b>	
<b>Capítulo VII</b>	92
<b>Resultados, beneficios ambientales y energéticos</b>	
<b>7.1 Potencial de Enfriamiento Adiabático en la República Mexicana (PEA)</b>	93
<b>7.2 Beneficios energéticos</b>	100
<b>7.3 Beneficio ambiental</b>	101
<b>Capítulo VIII</b>	102
<b>Conclusiones</b>	
<b>Bibliografía</b>	106

#### **Apéndice I**

Temperatura de bulbo húmedo y potencial de abatimiento de temperatura por enfriamiento evaporativo de principales ciudades del país

#### **Apéndice II**

Mapas de horas de calor presentes en el país

#### **Apéndice III**

Horas de calor y confort contabilizadas en principales ciudades de México

## Introducción

La frescura que uno percibe al lado del mar o de un río, la sensación que se siente cuando el aire caliente sopla sobre el agua del mar se debe a la evaporación natural del agua con lo que disminuye la temperatura presente. El agua que se evapora y absorbe el calor del aire convirtiéndolo entonces en una refrescante brisa. Aquí nace el principio de la climatización evaporativa.

El despreciar principios básicos de la naturaleza, cegados por un boom energético mal entendido, nos condujo a un irracional derroche energético que hoy ante la alerta de un cambio climático nos lleva a pensar de nuevo la forma en que nos transportamos, vivimos, alimentamos, nos desarrollamos. El proceso lógico tendría que ser el de trabajar con las fuerzas de la naturaleza y no en contra de ellas aprovechando sus potencialidades para crear condiciones adecuadas de vida. Para el caso de la vivienda o espacios de trabajo, la evaluación bioclimática es el punto de partida para cualquier proyecto arquitectónico que aspire a proporcionar un entorno climático balanceado. Requerimos generar construcciones “Climaticamente equilibradas”; perfecta estabilidad que rara vez puede alcanzarse bajo condiciones ambientales excepcionales, pero que bien puede conseguirse realizar edificaciones muy confortables, con bajo costo energético y de mantenimiento, reduciendo la necesidad de acondicionamiento mecánico.

Esta tesis busca de manera sencilla determinar el potencial que tiene el territorio Mexicano con sus diversos climas, determinando cuándo es posible el empleo del “**Enfriamiento Evaporativo Adiabático**” (EEA) como una viable **alternativa de climatización** para sustituir acondicionadores de aire convencionales en beneficio de la población, como resultado de menores consumo de energía, menores costo en las facturas y un menor impacto ambiental con el ahorro de recursos naturales y liberándose importantes recursos económicos por parte del gobierno en el rubro de generación eléctrica. Significando por último en **importantes emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas, sin comprometer el confort térmico dentro de las edificaciones.**

El confort térmico es uno de los indicadores arquitectónicos bioclimáticos más trascendentes al diseñar edificios, sin embargo en ciertos sitios es imposible alcanzar las condiciones térmicas adecuadas empleando únicamente ventilación natural, o protección solar. Este hecho aunado a laxas regulaciones y a una ausencia de normatividad referente a consumo energético en edificios, han generado un importante incremento en el uso de sistemas mecánicos de aire acondicionado (A/C). Auspiciado en gran medida por los bajos costos en energía subsidiada generalizada en México. La factura eléctrica residencial recibe importantes subsidios hasta por arriba del 50% dependiendo el consumo de cada usuario, con la atenuante para usuarios ubicados en zonas calurosas del país que reciben mayores aportaciones por los altos consumos que requieren para generar condiciones adecuadas para su desarrollo. Sin embargo el consumo en estas regiones se encuentra segmentado a partir del ingreso económico, son los ciudadanos de mayores ingresos los que pueden climatizar de mejor forma sus viviendas, la gente de bajos recursos sufre entonces las altas temperaturas. Por lo que la demanda de los sistemas de acondicionamiento de aire convencionales que en promedio manejan una demanda energética de 2950W<sup>1</sup> varía a partir del nivel socioeconómico del hogar. Ante ello la urgencia de mecanismos de bajo consumo energético, que representen un gasto económico bajo en su operación y adquisición facilitando su acceso, pues mejorando el acceso de las familias el (A/C) es de los primeros equipos adquiridos.

La creciente demanda por aires acondicionados, particularmente en climas cálidos y húmedos, ha generado un significativo incremento en la demanda de recursos energéticos primarios. El 2009 el sector doméstico represento el 18% del uso final de la energía. El consumo de energía por acondicionamiento de aire en las

---

<sup>1</sup> CONUEE 2010

edificaciones concentran el 12% de esta.<sup>2</sup> Las plantas de generación eléctrica tienen precisamente sus picos de demanda máxima dentro de los días más calientes de la primavera y verano, demanda energética cumplida regularmente mediante fuentes fósiles, con la emisión de diversos contaminantes y grandes cantidades de CO<sub>2</sub>, gas de efecto invernadero. México según la Convención Global del Banco Mundial es uno de los países más vulnerables al tener 15% de su territorio, y al 68% de su población expuesta a sufrir consecuencias adversas en caso de que el clima presente variaciones,<sup>3</sup> o por simple ahorro de reservas energéticas nacionales deben buscarse alternativas para mitigar emisiones y reducir consumo de combustibles sin desprestigiar sectores por pequeños que parezcan.

Por ello se ha presentado un renovado interés en los sistemas pasivos para acondicionamiento de aire en búsqueda de confort térmico. La posibilidad de proveer refrigeración o aire acondicionado bajo fuentes pasivas o mediante energía solar ha llamado la atención del hombre desde los inicios del desarrollo de la tecnología solar. En contraste con otras aplicaciones solares como el calentamiento de agua, la mayor demanda de refrigeración ocurre cuando la radiación solar es más intensa durante el día. Por ello la necesidad de contar con mejores condiciones térmicas en las zonas calientes del planeta es un reto que invita a la búsqueda de nuevas alternativas en beneficio de la población y en cuidado del ambiente.

El objetivo de este trabajo es el estimar el potencial enfriamiento evaporativo (adiabático) que existe dentro del territorio de la República Mexicana como mecanismo para acondicionar térmicamente espacios residenciales, públicos y comerciales como recurso para lograr el confort humano mediante bajos consumos energéticos. Con el enfriamiento evaporativo se logra renovar el aire en estos espacios, con los beneficios en salud asociados a un espacio bien ventilado; a diferencia de los sistemas de aire acondicionado convencionales (A/C, sus siglas en inglés) que recirculan y vician el mismo aire, pues una renovación de aire en estos sistemas significa mayores pérdidas energéticas.

El Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable 2009-2012 de la secretaría de energía habla de aproximadamente 34TWh consumidos anualmente por acondicionamiento de ambiente en edificaciones, teniendo fuerte impacto ambiental con la emisión de 17.83 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. El consumo se concentra en el sector residencial, que representa el 81% del uso de energía para acondicionamiento de ambiente, mientras el 19% restante se debe principalmente a edificaciones comerciales y del sector público<sup>4</sup>. El programa a pesar de indicar un incremento del 1% anual de penetración de equipos mecánicos de alto consumo para adecuación climática de viviendas, tiene la meta de reducción al 2030 de 93.2 TWh acumulados por mejoras en el acondicionamiento de ambiente, reduciendo la demanda de energía por este sector en aproximadamente un 16%. Tendencia que este estudio busca atenuar promoviendo la alternativa del enfriamiento evaporativo, reduciendo la temperatura dentro de los espacios construidos, manejando bajos consumos de energía, que satisfagan la necesidad sin comprometer la viabilidad del medio.

El territorio de la República Mexicana presenta dos terceras partes cubiertas por climas cálidos secos, propicios para la mayor efectividad en el uso de este tipo de enfriamiento del ambiente. El trabajo de investigación consiste en crear un mapeo de todo el territorio nacional y desarrollar una metodología que

---

<sup>2</sup> Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable 2009-2012. Secretaría de Energía

<sup>3</sup> SEMARNAT (<http://www.cambioclimatico.gob.mx>)

<sup>4</sup> CONUEE. Estimación con base en información del IMP, Encuesta SIGMA de electrodomésticos y ENIGH

permita conocer el potencial de enfriamiento evaporativo adiabático a partir de las condiciones de temperatura y de humedad relativa presentes en cualquier región del país, incluyendo ciudades y poblaciones no consideradas dentro de este estudio, pero que sean del interés de quien lee este trabajo.

En esta tesis se suministra la metodología necesaria para desarrollar una cuantificación del potencial de enfriamiento evaporativo para todo horario, de cualquier lugar. El mecanismo generado parte del conocimiento de temperaturas medias, mínimas y máximas obtenidas a partir de datos medidos proporcionados por las normales climatológicas del Sistema Meteorológico Nacional y la presión atmosférica derivada de la altitud media sobre el nivel del mar propia de cada sitio. El método emplea datos de temperatura y humedad relativa horaria generada mediante simulaciones, y aunque dichos datos horarios calculados presentan variaciones respecto a valores reportados en otras bibliografías, estas son relativamente pequeñas generando resultados que brindan una clara visión del potencial de enfriamiento evaporativo que existe en cada lugar, permitiendo detectar temporadas o sitios donde la propuesta de climatización por enfriamiento evaporativo de bajo consumo energético es viable.

Mediante sistemas de información geográficos se desarrolló un mapeo mensual de la totalidad del territorio del país, indicando sitios y temporadas más propicias para el empleo de esta estrategia de climatización. El manejo de dicha información permite a diseñadores, arquitectos, ingenieros y constructores implementar esta estrategia de climatización, ya sea mediante soluciones pasivas o por medio de dispositivos mecánicos de bajo consumo energético, en todo conjunto arquitectónico desarrollado. El aprovechamiento del potencial del enfriamiento evaporativo adiabático en el territorio Mexicano como posible solución para el acondicionamiento térmico de espacios arquitectónicos, podría abatir en promedio el 50% respecto del porcentaje que actualmente se emplea en equipos mecánicos de aire acondicionado que representa el 4.5% del consumo eléctrico nacional, oportunidad para mitigar emisiones de efecto invernadero y consumo de combustibles fósiles con los beneficios económicos asociados.

En lo particular esta tesis después de esta introducción, describe cronológicamente dentro del segundo capítulo investigaciones y trabajos relevantes que se han publicado en materia del enfriamiento evaporativo. Dentro del tercer capítulo se analiza el consumo y tendencia actual de energía eléctrica por acondicionamiento de edificios. Se profundiza en los principios físicos en que se basa el enfriamiento evaporativo, realizándose un detallado análisis de conceptos y definiciones de las variables psicométricas involucradas, y el modo en que se aprovecha el enfriamiento latente a partir de la vaporización de un líquido (agua) obteniendo la energía para lograr dicho fenómeno del aire. El cuarto sintetiza el método empleado para determinar el potencial de refrigeración disponible en cualquier sitio analizado, determinando las herramientas empleadas y desarrolladas con un caso de estudio para la ciudad de Morelia, Michoacán. Por último se muestra los resultados y la información de los mapas del potencial generados que muestran los grados de temperatura promedio mensual que pueden ser abatidos mediante el enfriamiento evaporativo en la República Mexicana.



## Capítulo I. Antecedentes.

La climatización de edificios por mecanismos evaporativos al igual que otros sistemas pasivos no es una idea nueva, se cree que su uso se desarrolló por primera vez en Persia (hoy Irán). Los “bagdirs” o “barjeels” son torres que atrapan el viento y lo hacen pasar a través de un embudo por un cuerpo de agua, una laguna y una fuente de agua en la base de la torre, introduciendo luego aire dentro del edificio. El aire caliente al pasar por el agua se enfría a sí mismo por evaporación. Además estos edificios se equipaban con patios con mucha cantidad de agua, de modo que cuando no hubiera viento, la acción natural del aire caliente al elevarse evaporaba el agua del patio, impulsando el aire frío a través del edificio expulsándolo a través de la torre<sup>5</sup>. Hay que señalar que como control térmico para la construcción de edificios en la antigüedad se tomaba en cuenta el uso de techos altos y paredes muy gruesas, condiciones que se tornan muy complicadas de aplicar hoy por las restricciones inherentes de espacio y presupuesto.

Los mecanismos evaporativos siempre fueron empleados, como lo vemos en Persia, o en el mismo México de las casonas, los monasterios con patios centrales acondicionados por una gran fuente, elemento que humidificaba y refrescaba todo el ambiente del sitio. Sin embargo ante el hallazgo de enormes reservas de petróleo y gas, el hombre cayó en una borrachera de energía, de la que pensaba nunca salir. Por lo que la mayoría de los mecanismos fueron olvidados y sustituidos por elementos mecánicos, fuertemente consumidores de energía. Sin embargo, ante la actual caída en la producción de petróleo, con su invariable alza en los costos de energía, y los oscuros pronósticos ante el calentamiento global, el hombre se acercado nuevamente al perfeccionamiento de mecanismos pasivos que le garanticen el confort deseado.

Los mecanismos evaporativos fueron abandonados durante mucho tiempo, sin embargo por los grandes beneficios que ofrece ha sido retomado en el trabajo de diversos autores. Así en los últimos años se ha incrementado el estudio del potencial que tiene el enfriamiento evaporativo, creando nuevos dispositivos, tratando de mejorar empaques, modelaje computacional y otra serie de trabajos en busca de su óptimo aprovechamiento. A continuación se describen cronológicamente estudios en enfriamiento evaporativo que se han llevado al cabo, sus aportaciones y relación con este trabajo.

### Psicrometría y enfriamiento evaporativo como técnica bioclimática.

En 1976, el experto israelí Dr. Baruch **Givoni**, destacado por su arquitectura climatológica en el mundo incorpora el “diagrama de Givoni” herramienta sencilla que ayuda de manera aproximada a conocer de mejor forma las situaciones climáticas de un lugar concreto a lo largo del año y saber qué tipo de estrategias deben tenerse en cuenta para proyectar un edificio. El diagrama de Givoni es básicamente un diagrama psicrométrico considerando la humedad y temperatura para evaluar la sensación térmica y de confort. El cual no da resultados exactos puesto que cada individuo tiene su propio estado de confort, pero sí es una buena aproximación en términos generales.

La herramienta desarrollada por Givoni brinda la posibilidad de detectar la solución bioclimática más adecuada dependiendo de las condiciones climáticas presentes en cada mes para acercarnos a la zona de confort. La presente tesis busca detectar todos aquellos momentos y lugares donde la humidificación, y el enfriamiento por evaporación podría resolver las necesidades de confort climático, manteniendo un buen clima al interior, como debería ofrecer un edificio a nivel bioclimático.

---

<sup>5</sup> Pinazo Ojer, José Manuel. *Manual de Climatización. Tomo I. Universidad Politécnica de Valencia. 1995.*

## **Sistemas Pasivos de Climatización.**

**En 1993, (Morillón, D.)** presenta un documento sobre sistemas pasivos de climatización donde mediante ingeniosas alternativas el autor nos brinda posibilidades para humidificar y enfriar espacios, involucrando la descarga de energía por mecanismos naturales, sin la adición de energía externa. Algunas de estas opciones ya han sido generadas, como los sistemas chimenea o de termosifón, que se basan en la circulación del aire por convección natural forzándolo a pasar por estanques de agua que le elevan su humedad relativa disminuyendo su temperatura. Torres de viento, que intentan suministrar flujos de aire directamente hacia una superficie de enfriamiento por evaporación, o la construcción de ductos subterráneos en contacto con jarras de agua que lo refrescan bajo el mismo principio. Los elementos pasivos que presenta no se basan en un solo principio, buscan aprovechar las condiciones presentes en cada sitio. Aprovechar el viento, y en caso de tener poco recurso forzarlo a entrar a las edificaciones. El documento señala sistemas de deshumidificación solar pasiva para zonas cálido-húmedas, mediante ventilación y acondicionamiento del aire busca el confort del espacio. El aire es deshumidificado por material desecante, para luego pasar a un humidificador que hace ingresar aire fresco. El sistema es regenerado por radiación solar. Sin embargo también indica lo limitado, y poco estudiado de estos sistemas.

El documento brinda muchas ideas y posibles soluciones para adecuación térmica, sin embargo muchos de los bocetos que presenta simplemente han sido concebidos a partir de creatividad, pero deben ser construidos para estudiar realmente la eficiencia de estos. En el presente trabajo no se profundiza en los elementos arquitectónicos pasivos que ayudan a renovar y humidificar el aire, ni al aporte estético que brindan a la edificación, por lo que el documento de Morillón es valioso una vez conocido el potencial de enfriamiento disponible en cada sitio.

## **Enfriamiento Evaporativo.**

**En 1997 Jan Bom Gert, et al.** presento un estudio del banco mundial donde describe los principios básicos del enfriamiento evaporativo adiabático de forma directa e indirecta mediante equipos mecánicos "Coolers". Destaca las virtudes y desventajas de los equipos "indirectos" que enfrían el aire que va a entrar mediante una corriente secundaria de aire en flujo cambiado. Los equipos indirectos logran disminuir la temperatura del aire 3.5°C más que de la forma directa, pero representan un mayor costo de inversión en el equipo, cercana al doble de los equipos "directos", pero el documento indica que los costos de consumo de energía son del 50% que el que representan los sistemas tradicionales de compresión de vapor de mismas capacidades.

Trabajan sobre la factibilidad de ensamblar equipos de enfriamiento evaporativo con paneles fotovoltaicos para la obtención de su energía. Dándole autonomía a los equipos para ser colocados en regiones del mundo alejadas de la red eléctrica. El trabajo describe los bajos mantenimientos que requieren los equipos mecánicos, considerando la calidad del agua que estos utilicen como refrigerante. Además de que el documento provee una valiosa lista de proveedores, especificaciones y recomendaciones técnicas para la adquisición y mantenimiento de los equipos mecánicos.

Consideran un mapeo a nivel mundial, mostrando por continentes zonas que pudieran ser idóneas para la aplicación del enfriamiento evaporativo adiabático. Sin embargo estas zonas están indicadas únicamente relacionando y traslapando mapas de las zonas de clima cálido del mundo, sin estudiar a diferencia de el presente trabajo a profundidad las condiciones climáticas locales. No considera la temperatura y humedad relativa horaria, simplemente toma en cuenta el promedio de temperatura anual, por lo que esa referencia se considera que se queda corta para identificar áreas de oportunidad de esta estrategia de enfriamiento.

## Enfriamiento con desecantes.

En el año 2000 **Alpuche et.al.**, estudian el enfriamiento con desecantes. Analizan el desarrollo de los sistemas de enfriamiento y deshumidificación aplicando desecantes sólidos y líquidos. Los materiales desecantes reducen la cantidad de humedad relativa presente en el aire, aumentando la posibilidad de disminuir la temperatura del ambiente. El reducir la humedad del ambiente abre la puerta a enfriadores evaporativos en sitios de humedad alta, donde su eficiencia se ve reducida. Estudian materiales desecantes comerciales que pueden contener entre 10 y 1100% de su peso seco en vapor de agua<sup>6</sup> al tomar del medio la humedad hasta que se saturan; dicha humedad puede ser removida del desecante mediante calentamiento entre 50 y 260°C.<sup>7</sup> El desecante se enfría y puede volver a absorber humedad, reiniciando el ciclo.

El control de humedad importante factor para mantener ambientes confortables, se dificulta en el sureste de la República Mexicana donde predominan los climas cálidos-húmedos. En el presente trabajo no se evalúa el uso de desecantes, al estimar el potencial de enfriamiento evaporativo existente únicamente a partir de las temperaturas y humedades horarias presentes, buscando no incluir el proceso de regeneración de los desecantes, lo cual incrementa los costos de inversión y operación de los equipos

Sin embargo los sistemas de enfriamiento por desecantes potencializan el uso del enfriamiento evaporativo generar ahorros significativos de energía en sitios donde ahora se emplea aire acondicionado convencional. Tienen la ventaja de no emplear fluorocarbonos, pueden mejorar la calidad del aire interior de espacios debido a la capacidad de los desecantes para remover partículas contaminantes y patógenas. El trabajo de Alpuche et.al. calcula la eficiencia de estos equipos al dividir el calor removido por la energía térmica requerida para regenerar el desecante. Sin embargo, a pesar de las investigaciones efectuadas, se concluye que en México y Latinoamérica, territorios con gran presencia de climas cálidos-húmedos, la investigación en este tema ha sido poco desarrollada a pesar del alto impacto que tendría.

## Consumo de energía por climatización en Mexicali.

En el año 2000, **Romero Moreno Ramona A., et.al.** presentan un documento donde desglosan el consumo de energía eléctrica del sector residencial más alto del país que se da en Mexicali, ciudad del árido noroeste Mexicano que presenta temporada de lluvia en invierno y temperaturas medias muy extremosas con máximas promedio de 41.8°C en julio. El trabajo de Romero motivo a la generación de esta tesis, por la posibilidad de utilizar enfriamiento pasivo en climas cálidos llegando a prescindir del aire acondicionado (con refrigeración mecánica se entiende). El comportamiento de los usuarios residenciales describe que consumen *3.5 veces más energía eléctrica que el promedio nacional* por consumos en equipos de aire acondicionado. Mientras que un usuario a nivel nacional consume 4,236kWh/día en Mexicali requiere en promedio 14,712kWh de consumo eléctrico diario en promedio para satisfacer sus necesidades en condiciones de confort.

El consumo de energía para acondicionamiento de ambiente en México es bajo en relación con el observado en otros países, por factores económicos. El potencial de crecimiento en el consumo de equipos de aire acondicionado es muy grande, con la alta demanda eléctrica y emisión de gases de efecto invernadero que

---

<sup>6</sup> ASHRAE (1989), *Fundamentals Handbook SI Edition*, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, Ga.

<sup>7</sup> Waugaman, D.g. Kini, 1993.



esto traería consigo, por ello la motivación de realizar esta tesis. Con relación a sistemas de aire acondicionado, el documento menciona que dos terceras partes utilizan enfriadores evaporativos (coolers) y una tercera parte aparatos de refrigeración de tipo “paquete o ventana” de alta demanda. En el sector residencial es tan significativo el impacto energético de equipos tradicionales de aire acondicionado por su alto consumo, como las viviendas que cuentan con enfriador evaporativo por la cantidad de equipos existentes.

El estudio desglosa a los consumidores a partir de rangos de consumo, desnudando que el 60% de los usuarios que tienen menores recursos consumen el 44% en rangos de 301-1200kWh; mientras el 18% de usuarios con mayores ingresos en rangos de consumo de 1201-2500kWh consumen el 40% del total para el mes de agosto. El estudio concluye que el clima extremoso de Mexicali es determinante en los altos consumos eléctricos, sin embargo no es el único factor. Los consumos eléctricos tienen una relación con el nivel de ingresos, a mayor nivel de ingreso, mayor consumo eléctrico. Por lo que deben realizarse evaluaciones por cada grupo de la población para la correcta implementación de políticas que fomenten el uso racional de la energía. Este trabajo busca aportar información adecuada para el uso de equipos de enfriamiento evaporativo en otros sitios del país donde la demanda de equipos de refrigeración mecánica empieza a ser ampliamente utilizados. Sin embargo, el enfriamiento evaporativo como indica esta tesis es parte de la solución, se requiere un marcado cambio en la cultura térmica de los usuarios, la mayoría de las viviendas presentan problemas de adecuación térmica que deben ser corregidos, mejorar los sistemas constructivos, ser más prudente en las construcciones, darle mayor masa con una orientación inadecuada y mejorar el aislamiento térmico, entre otras completan la ecuación de eficiencia energética en la vivienda con adecuado confort.

#### **Enfriamiento evaporativo en la vivienda.**

**En 2002, Sámano T., Diego A.** revisan el Enfriamiento Evaporativo aplicado a la vivienda. Describe claramente la constitución de la mezcla de aire con vapor de agua, los conceptos requeridos para la comprensión de la psicometría y el principio con el que se logra la transferencia de masa y energía en mezclas “aire-agua” con el objeto de disminuir la temperatura ambiente a partir de condiciones de temperatura y humedad presentes. Estos conceptos son retomados a lo largo del capítulo 2 de esta tesis, donde se explica detalladamente el fenómeno como se lleva al cabo el enfriamiento evaporativo sin adición de energía externa, adiabático.

El trabajo de Sámano recomienda utilizar primero sistemas pasivos incorporados a la arquitectura de los edificios, como saltos de agua o espejos de agua y únicamente completar los requerimientos de enfriamiento con sistemas mecánicos que también describe cuando no exista otra opción. Busca promover espacios de menor impacto ambiental y por tanto más sustentable. El trabajo de Sámano describe el sistema mecánico básico para equipos de enfriamiento evaporativo directo y algunas medidas pasivas adaptadas al espacio arquitectónico que benefician la reducción de temperatura, sin llegar a indicar algún método para analizar la efectividad que tendrían estos sistemas, adecuándolos a condiciones térmicas particulares. No considera como lo hace esta tesis, horarios y temporadas adecuadas para la aplicación de esta estrategia.

### **Empaques para intercambiadores de enfriamiento evaporativo.**

Durante el 2004 **Gea M, et.al.** en la Universidad de Salta **enfocaron su estudio en mejorar la eficiencia energética de los sistemas de enfriamiento evaporativo** utilizando nuevos materiales y distintas geometrías en los empaques húmedos donde se llevan al cabo las transferencias de masa y energía, como alternativa en Argentina, donde el potencial de enfriamiento evaporativo es muy grande, sin embargo el costo de equipos de relleno estructurado es muy elevado al tener que importarlos.

En el trabajo Gea probó distintas opciones como empaque para la construcción de equipos mecánicos de enfriamiento evaporativo utilizando relleno de paja, arcilla expandida, estructurado de chapas onduladas plásticas, y telas verticales; analizándose las ventajas y desventajas de los distintos tipos de intercambiadores. La importancia de este trabajo es el desarrollo de nuevos materiales fácilmente obtenibles en Latinoamérica, haciendo mucho menos vulnerable a los usuarios para la compra de equipos ante cambios externos. Aun el trabajo se ha quedado corto, y no se ha podido desarrollar aun un sistema que tenga la eficiencia de los sistemas comerciales. Sin embargo, por ahora ya han despreciado ciertas geometrías y continua en la búsqueda de un sistema optimo que presenten bajos costos, baja caída de presión y bajas demandas de caudal de agua, para poderlo desarrollar localmente. Nuestro trabajo no se desarrolla experimentalmente, pero para trabajos futuros resulta interesante adoptar estas tecnologías al potencial encontrado en diversos sitios de México.

### **Enfriamiento evaporativo en clima árido.**

**En 2006, Gallegos, R. et. Al.,** mostraron un relevante estudio de las limitantes del uso de enfriamiento evaporativo en el clima árido de Mexicali, ciudad que presentan las óptimas condiciones ambientales para el uso del enfriamiento evaporativo para en el clima cálido seco de Mexicali. El estudio al igual que nuestro documento empleo datos meteorológicos horarios generados a partir de datos medidos por el sistema nacional para el periodo 2001-2005, el nuestro lo ha hecho con datos medidos de 1970 al año 2000. Con esos datos Gallegos construye un periodo típico de doce meses en Mexicali en condiciones de temperatura y de humedad relativa.

Hacen un modelo a escala donde se empleó el software TRNSY 16 para simular un sistema mecánico de enfriamiento evaporativo sometido a la ganancia térmica de una casa típica de Mexicali de 32m<sup>2</sup> con eficiencia del 60%, previendo que los usuarios de este tipo de casas regularmente no les dan un buen mantenimiento a los equipos. Este trabajo tras simulaciones horarias, de Mayo a Octubre mostró eficiencias por arriba del 60% para lograr confort aun con los equipos más ineficientes, y detecto caída del 50% de la eficiencia para el enfriamiento evaporativo, cuando se da el incremento en la humedad relativa en Mexicali. Este trabajo sirvió de referencia para el Capitulo dos, al contar datos medidos experimentalmente en el que se evalúa el potencial del enfriamiento evaporativo. Desafortunadamente este trabajo se limita a Mexicali a diferencia del nuestro que piensa estimar el potencial nacional.

Sugiere que los sistemas de enfriamiento evaporativo pueden ser mejorados adaptándoles sistemas desecantes, que retiren humedad al aire, buscando mantener bajos los consumos de energía eléctrica, pudiendo emplear un sólido desecante acoplado a un equipo de enfriamiento evaporativo que emplea energía térmica solar para regenerar el desecante. Considerando los altos niveles de radiación solar presentes en Mexicali, el sistema parece muy optimo sin embargo no se ha estudiado mas esta posible opción. En el presente trabajo, al plantear el uso de enfriamiento evaporativo, se analizará su comportamiento y las condiciones para su óptimo desempeño, donde lógicamente en ambientes menos húmedos es más eficiente.

### **Enfriamiento evaporativo en clima cálido-húmedo.**

**Durante el mismo año Torres Campos, et Al.** Analizan la posibilidad de llevar el enfriamiento evaporativo a la región cálida y húmeda de Maringá, Oeste de Paraná, Brasil. El proyecto evaluó el potencial de reducción de la temperatura del clima cálido-húmedo dentro de una región agrícola. Enfatizaron en la necesidad de utilizar el clima, por encima de mecanismos convencionales, por los bajos recursos de la gente que vive en la región.

El aporte de este trabajo emplea un modelo basado en datos meteorológicos recabados a lo largo de 13 años por la estación climatológica de Maringá, relacionan el modelo, la temperatura ambiente, la humedad relativa y el potencial de reducción de temperatura por medios evaporativos. El trabajo determinó el mayor potencial de reducción de temperatura de Agosto a Noviembre, contrario a la etapa del verano Brasileño de diciembre a marzo donde los valores de humedad se elevan notablemente. A diferencia de este caso nuestra tesis ocupa datos medidos por las estaciones meteorológicas de México, con las cuales se generan temperaturas y humedades relativas horarias, brindando una muy buena aproximación, mientras que en Maringá evalúan únicamente los promedios de temperatura medidos por ellos.

El trabajo de Torres Campos confirma que una vez que ocurre el enfriamiento evaporativo implicando reducción en temperatura de bulbo seco, se da un aumento en la humedad relativa del ambiente limitándose la captación de vapor por la saturación del aire. *Por lo que este sistema es mucho más eficiente en regiones de climas cálidos y secos. Sin embargo el estudio rescata que en las regiones húmedas, la hora más caliente del día, viene acompañada por una disminución en la humedad relativa del ambiente, posibilitando el uso de los sistemas de enfriamiento evaporativo adiabático en las horas de mayor estrés calórico en la región.* Para el crítico horario de mayor temperatura e incidencia solar comprendido entre las 13 y 18hrs, el trabajo documenta un potencial de reducción de 4°C para todos los meses, independientemente de la estación del año y humedad relativa. Esta evidencia experimentalmente comprobada, motiva nuestro trabajo a realizar el análisis de todo el territorio, aun en aquellas zonas muy húmedas del sureste de la República Mexicana.

El trabajo de Mandingá presenta un modelo basado en determinar la menor temperatura que se puede alcanzar mediante enfriamiento evaporativo a partir de ecuaciones que determinan la presión parcial del vapor a partir de la temperatura de bulbo húmedo lo cual complica el modelo. En el Capítulo 3 de esta tesis describe el modelo que hemos empleado para determinar el potencial de enfriamiento a partir de determinar la temperatura de bulbo húmedo.

### **Estudio del potencial de enfriamiento evaporativo.**

**En 2007, Correa, de Rosa y Lesino** evalúan el potencial de enfriamiento evaporativo adiabático dentro del área metropolitana de Mendoza, Argentina para el acondicionamiento térmico de espacios arquitectónicos, buscando ahorros que permitan mitigar el impacto en el sector edilicio por parte de sistemas de aire acondicionado convencionales que llegan a representar hasta 75% de la energía total consumida en aquel sitio. El trabajo presenta un modelo generado a partir de datos medidos a lo largo de un gran número de unidades instaladas a lo largo de Mendoza. Se hallaron valores que oscilan entre 5.7°C y 8.9°C. Presentándose las áreas de mayor densidad edilicia y con porcentajes de sellamiento del suelo como las áreas de mayor potencial de enfriamiento. Llegando a alcanzar hasta 12°C. La evaluación se hizo anual, siendo enero el mes más propicio al enfriamiento, oscila entre 8.5°C y 11°C, con máximos medios de 14°C. En contra

parte, Junio, mes más húmedo en Argentina se fue con 3.6°C y 5.5°C y máximos medios de 7°C. Datos que resaltan al compararse con los obtenidos del trabajo realizado en la humedad Brasileña.

El modelo que hemos tomado, ha sido tomado de este trabajo. Pero a diferencia del estudio de Mendoza, que se realiza dentro de una ciudad, nuestro estudio utiliza datos medidos por estaciones uncias instaladas a lo largo de todo el país, de las cuales se obtienen mediante simulación temperaturas y humedades relativas horarias para cada sitio. El trabajo de Correa ha validado con datos experimentalmente el modelo, brindando resultados satisfactorios. Por lo que la herramienta se vuelve muy poderosa, al poder ser empleada para evaluar cualquier sitio conociendo los datos de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica.

#### **Ventilación-deshumidificación.**

**En 2008**, Chávez Galán, Jesús; Morillón Gálvez, David presentan un documento donde proponen un sistema pasivo de ventilación-deshumidificación como estrategia bioclimática para aprovechar la frecuencia y velocidad de los vientos deshumidificando antes el aire para lograr el confort higrotérmico en bioclimas cálidos-húmedos, condiciones típicas del Caribe, costas de México y Centro América.

Determinan para el puerto de Veracruz, un sistema de captación de vientos hacia Noreste y Este, que se conduzcan subterráneamente por debajo de la casa hasta un serpentín que trabaje como intercambiador de calor, que aproveche la red de agua local que se encuentra a menor temperatura que el aire, para disminuir la temperatura y humedad del aire como intercambiador de calor. El aire fresco entonces entra al espacio que se busca enfriar.

Los autores realizaron a diferencia de nuestro trabajo simulaciones el software TRNSYS, encontrando posibles disminuciones térmicas de hasta 3°C durante el verano, y hasta de 12% de humedad relativa, lo cual se traduciría en mejorar las condiciones en las zonas costeras donde el desconfort térmico es muy abundante. La fabricación del serpentín e instalación se prevén sencillas y de costos bajos, para el beneficio que pudieran aportar. La presente tesis emplea simulaciones en hojas de calculo desarrolladas en su totalidad de manera propia.

#### **Ahorro de agua en equipos de enfriamiento evaporativo directo.**

**En el mismo año, Herrera Sosa, et.al.** realizaron un trabajo enfocado al ahorro de agua en equipos de enfriamiento evaporativo directo utilizados masivamente durante al menos 5 meses al año en viviendas en el Estado de Chihuahua, sitio de condiciones climáticas cálidas extremas, con temporada de lluvia muy escasa y de periodos de sequía frecuentes. Pusieron especial atención a diversas estrategias adicionales al enfriamiento evaporativo en busca de reducir los consumos de agua de estos equipos, complementando un paquete de alternativas para lograr el confort dentro de la vivienda de Chihuahua, con disminuciones en consumo de energía y agua.

Hacen un modelo a escala real de casas de interés social de la ciudad de Chihuahua realizando y mezclando distintas alternativas. Se mejoró el aislamiento en techos y en equipo de enfriamiento, se empleó protección solar en ventanas que aporto muy buenos resultados, se adiciona masa térmica en muros y aplica enfriamiento convectivo nocturno, que significaba el abrir las ventanas por la noche.

La eficiencia en el consumo de agua de cada estrategia aplicada se calculó relacionando el agua que consume el equipo de enfriamiento evaporativo directo con la reducción de temperaturas internas logradas por hora. Proponen un parámetro de medición llamado “Evaporación por trabajo”, medido en litros por grados Celsius. Las mediciones de Herrera mostraron que los equipos de evaporación en un inicio duplicaron los consumos agua marcados por los fabricantes, en un inicio entre 8 y 10 lt por hora (impco, 2000).

El trabajo concluye con la necesidad de generar normas oficiales para el consumo de agua de los equipos de enfriamiento evaporativo directo. Nuestro trabajo considera el potencial que existe a lo largo del país a partir de las condiciones ambientales, pero de igual forma nuestra postura se encuentra con las mismas características de sumar estrategias y no solo considerar a una sola. La combinación de las estrategias bioclimáticas aplicadas logró ahorros de agua entre 7 y 47 por ciento<sup>8</sup>, y en un país tan vulnerable como México con grandes zonas donde el recurso hídrico no abunda es vital para el éxito de esta estrategia.

### **Enfriamiento evaporativo por aspersión de agua sobre telas en clima semi húmedo.**

**Mismo año Figueiredo Roriz, et.al. hace una investigación sobre la** posible aplicación de sistemas de enfriamiento evaporativo por aspersión de agua sobre telas, como objetivo de aliviar la ganancia de calor en edificios sometidos a clima semi-húmedo en la ciudad de San Carlos, Brasil. Desarrolló un modelo teórico para calcular los flujos de calor sobre la superficie de contacto, identificando la capacidad de enfriamiento del sistema propuesto, cuantificando el consumo de agua relacionado a las reducciones de temperatura para el mismo clima con una tasa de evaporación de 0.7 L/m<sup>2</sup>h. Los autores indican de la ventaja de evaporar el agua sobre el empaque humedecido, pues no existe necesidad de un tratamiento previo, posibilitando la reutilización de agua doméstica, así como el aprovechamiento del agua de lluvia. Se podría hacer un estudio similar en México que complementara el actual trabajo, incrementando los usos finales de agua en el país. Actualmente México es de los países que menos usos les da al agua antes de regresarla a los cuerpos de agua de donde la extrae.

El modelo tuvo dos etapas, una teórica para el cálculo de reducción de temperatura mediante las telas propuestas, basado en ecuaciones clásicas de fenómenos de transporte considerando un balance de energía entre los diversos flujos que involucra el sistema, implementado bajo software. Y un modelo experimental que consistió en la fabricación de 2 mallas de fibrocemento, a una de estas se le montó un sistema de aspersión intermitente de agua, y sistemas de medición. Se involucra a todos los flujos de energía que participan en el sistema, estimando el flujo de calor por radiación solar en el sitio, y la descarga que se tendría bajo enfriamiento evaporativo al retirar el flujo de calor por evaporación del agua. A pesar de lo complejo del modelo, habla del gran potencial de aplicación para retirar calor del medio, y aporta una metodología para calcular el volumen medio de agua evaporada con tales relaciones, lo cual es sumamente importante si se considera que en los climas cálidos secos, el recurso hídrico es escaso. El trabajo no contempla diferencias de emplear el sistema en climas cálidos secos o húmedos. Este modelo no fue utilizado en particular en esta tesis, porque no se centra en el análisis de empaques en específico, si no que considera la evaluación del potencial para la aplicación de estos sistemas.

---

<sup>8</sup> Herrera Sosa, Luis Carlos; Gómez Azpeitia, Gabriel. Estrategias bioclimáticas y ahorro de agua en equipos de enfriamiento evaporativo directo. Palapa, vol.III, Pp55-61. Universidad de Colima, México. Octubre, 2008.

### **Enfriamiento evaporativo en construcciones agropecuarias.**

**Durante 1991, David Morillón Gálvez.** Estudio considera la aplicación de enfriamiento evaporativo en construcciones agropecuarias, centros de trabajo donde se trabaja con seres vivos, los cuales son afectados por los factores ambientales, de temperatura, humedad, radiación, viento. Los invernaderos, granjas avícolas, etc. tienen como propósito el control de las condiciones ambientales que requieran las especies vegetales y animales en explotación, para maximizar la productividad y las utilidades. Así como proporcionar condiciones higiénicas. No obstante el trabajo hace ver como a pesar de la importancia económica que representan las construcciones agropecuarias, tradicionalmente su diseño se multiplica sin considerar las condiciones del sitio en donde se van a edificar. Los animales pierden calor desde su cuerpo al ambiente por radiación, convección, conducción y por la evaporación de la humedad desde la superficie del cuerpo y el tracto respiratorio.

La cantidad de calor perdido al ambiente dependerá de los gradientes de temperatura y presión del vapor de agua entre el animal y el medio. En climas fríos, las pérdidas evaporativas serán mínimas, las no evaporativas (calor sensible) se incrementarán. En climas cálidos donde la temperatura del medio se aproxime a la interior las pérdidas de calor sensible declinan y las pérdidas por evaporación se incrementan para mantener constante la temperatura corporal, con lo que los animales pierden peso, y se pierde dinero para los productores. Por ello se debe tener consideraciones térmicas y de humedad, que garanticen que la especie utilice únicamente termorregulación física, su temperatura basal este controlada y los animales no pierdan peso. El documento habla de garantizar dichos sistemas, sin grandes inversiones en energía como lo significaría sistemas acondicionadores de aire mecánico. En su lugar decantarse por el uso de enfriadores evaporativos, buena ventilación, y buena protección solar.

### **Uso de vegetación como sistema de enfriamiento por evapotranspiración.**

En 2008, la Agencia Austriaca de Energía presenta una guía de tecnologías pasivas de enfriamiento, donde propone que la vegetación juegue el rol de dispositivo natural de enfriamiento evaporativo, considerando que árboles y otras plantas transpiran humedad con un considerable potencial de enfriamiento. Un árbol caducifolio de regular tamaño puede evaporar por arriba de 1460 kg de agua, lo cual genera un efecto de enfriamiento cercano a los 870MJ o 240kWh. Dicha energía no puede ser utilizada en su totalidad para enfriamiento de edificios adyacentes, sin embargo la evapotranspiración de acuerdo con el documento puede evitar entre 250 y 650 kWh de electricidad para aire acondicionado por año. Del mismo modo el potencial de enfriamiento de una hectárea de pastizales es de 50GJ ( $\approx 13.8$ MWh) en un día soleado. Lo que se traduce en 6-8°C de la temperatura abajo del promedio de un terreno arido. Se menciona a la capa vegetal como responsable de reducir la temperatura entre 2-3°C.

El documento propone una técnica arquitectónica basada en una torre de la que caiga agua, o que tenga empaques húmedos en la parte superior. El aire cálido del exterior entra a la torre y se enfría por evaporación, la torre realiza la función de una chimenea a la inversa. El aire que entra en lo alto se enfría y se pone pesado, cayendo a la parte inferior creando una presión negativa (succión) generando el motor del enfriamiento pasivo. Esta tesis, no propone ningún elemento en específico, pero la aplicación de las torres, las superficies húmedas y de áreas verdes son elementos que deben ser considerados por los diseñadores en todo momento.

## **Reducción de temperaturas mediante sistemas de refrigeración pasivos. Enfriamiento directo o indirecto.**

En 2009, Baruch Givoni realiza un estudio detallado de las técnicas bioclimáticas para la reducción de interna de temperatura de edificaciones mediante el uso de sistemas pasivos. Monitorea el comportamiento de tres tipos de torres de enfriamiento para generar una corriente de aire frío que se introduce a los edificios, reduciendo el calor que existe dentro de estos. Considera una torre basada en empaques húmedos, una torre de enfriamiento típica, que emplea el principio de una regadera que el modelo (Givonni 1994), y una torre desarrollada en multietapas de evaporación con la que se han alcanzado las mejores eficiencias en velocidad de viento y temperaturas más cercanas al bulbo húmedo. La valiosa contribución del trabajo de Givoni, es que experimentalmente analiza la eficiencia de estos tres equipos, definiendo que los equipos de enfriamiento evaporativo pueden acercarse únicamente entre 70% y ahora 90% a la temperatura de bulbo húmedo, con lo que eficiencia de los equipos ha mejorado notablemente.

Dentro de esta tesis, hemos evaluado el potencial de enfriamiento en caso de que se pudiera obtener aire a la salida de los equipos, con la temperatura de bulbo húmedo presente, sin embargo también hemos evaluado el potencial a un 70% y 80% de la temperatura de bulbo húmedo como lo recomienda Givoni.

Givoni también propone el método de enfriamiento evaporativo indirecto, con lo que un edificio puede ser enfriado mediante método directo o indirecto, en el método indirecto no se eleva la humedad relativa del ambiente interior. El método se basa en enfriar mediante evaporación un elemento de la construcción en su cara exterior, el techo o un muro. Este elemento entonces funcionara como sumidero de calor y absorberá mediante su cara interior el calor absorbido del exterior o el generado dentro del espacio. Con estos sistemas la temperatura interior radiante y la del aire son reducidas sin elevar el contenido de humedad en el aire. A partir del año 2009, el sistema colectivo metropolitano (metro) de la Ciudad de México ha mostrado que el empleo de sistemas de **enfriamiento evaporativo** adiabático **únicamente para** la temporada de **primavera** si **es trascendente**. Se emplean sistemas de enfriamiento evaporativo para el refrescamiento de pasillos y andenes. Equipos basados en ventiladores con atomización de agua que funcionan únicamente durante los meses de marzo, abril, mayo. Durante otros tiempos se prioriza únicamente el funcionamiento del ventilador.

## **Saturación, consumo energético y emisión de CO<sub>2</sub> por empleo de electrodomésticos en México.**

**Año 2010, Rosas Flores et.al.** presentan un documento dentro de la revista “Energy & Buildings” con los consumos aproximados de equipos eléctricos de uso dentro de los hogares mexicanos, la saturación de estos en el ámbito urbano y rural, impacto ambiental por emisión de CO<sub>2</sub> muy puntual. Presentan datos de ahorros energéticos y la tendencia actual a partir de programas gubernamentales en busca de reducir los consumo de energía, liberando recursos económicos del gobierno al reducir energía en generación.

Rosas-Flores, presentan los números de equipos de aire acondicionado que existen en México; su tendencia, los ahorros tanto de emisiones de CO<sub>2</sub> como de energía que pueden lograrse por sustitución de equipos de baja eficiencia y mejora de aislantes. Presentando la metodología para realizar los cálculos y la comparación energética entre los consumos de los equipos de aire acondicionado confrontándolos contra los “coolers” (equipos a base de enfriamiento evaporativo). El enfriamiento evaporativo adiabático, es una técnica a que se está retomando por sus beneficios ambientales y económicos, los trabajos de investigación tienen bien estudiado el fenómeno, las aplicaciones de este. Sin embargo para México sitio ideal para la utilización de estos mecanismos, aun no se tiene plenamente identificado el potencial que existe para el enfriamiento de espacios bajo este principio. Este trabajo pretende encontrar los horarios y sitios en que se puede alcanzar

el confort térmico sin necesidad de requerir a sistemas mecánicos de aire acondicionado, simplemente empleando sistemas de enfriamiento evaporativo. En todos los estudios previos no se ha contabilizado la cantidad de energía que es posible ahorrar sustituyendo equipos mecánicos de aire acondicionado por equipos de enfriamiento evaporativo, como lo pretende contabilizar este estudio para la totalidad del territorio de la República Mexicana.

Tampoco se ha medido de manera puntual, los grados centígrados que se pueden reducir ni porque periodos, como esta tesis busca determinar, al igual de detectar aquellas regiones donde el enfriamiento evaporativo cuantitativa y cualitativamente no sea opción viable como estrategia bioclimática en búsqueda del confort térmico.



*Capítulo II*

*Climatización de Edificios y el Enfriamiento Evaporativo*



## Capítulo II

### Climatización de Edificios y el Enfriamiento Evaporativo

#### 2.1 Introducción a la climatización

El hombre es el único ser viviente con capacidad para transformar su entorno a la medida de sus necesidades, transformándolo de manera espectacular en la búsqueda de su propio bienestar, este proceso que aun continua evolucionando ante consecuencias negativas en el aspecto medioambiental, nos llevan a seguir buscando y perfeccionando la conquista de nuestro ámbito térmico.

El hombre ha tratado de adaptarse al medio que lo rodea, buscando condiciones de confort que le ayuden a mejorar sus condiciones de vida desde sus orígenes. El enfriamiento evaporativo, tiene sus orígenes cerca del año 2000 a.C. donde un desconocido babilonio ordenaba que las paredes y suelos de su casa fueran rociadas con agua, lo que le aliviaba el calor<sup>9</sup>. También ciertas pinturas funerarias muestran esclavos egipcios abanicando grandes vasijas de agua de barro poroso. Logrando que con la evaporación del líquido los cuartos permanecieran frescos. En el siglo II, Ateneo describe una práctica muy común en India, que consistía en poner agua en los tejados de las casas por la noche para mantenerlas frescas, al igual que se maneja el uso de alfombrillas de hierba colocadas sobre aberturas de la casa expuestas al viento, estas se humedecían y durante la noche producían una disminución de la temperatura.

#### Sensación de Confort térmico

La palabra confort proviene del idioma inglés pero de origen latino “con-fortaire” – dar fuerza, alentar. Derivando en que dicha palabra señala el bienestar físico del ser humano<sup>10</sup>. Habrá un confort total para cierto ambiente únicamente cuando se den ciertas condiciones en los factores luminosos, térmicos, acústicos, etc., independientemente de su origen natural o artificial. De todos estos factores este trabajo se encargara de un análisis del confort térmico exclusivamente, y de cómo lograrlo mediante equipos de aire de enfriamiento evaporativo adiabático.

El cuerpo humano tiende por sí mismo a auto regular su temperatura alrededor de los 37°C, disipando continuamente el calor generado por los procesos químicos que efectúa, como consecuencia de asimilación de alimentos, líquidos y oxígeno del aire. Para lograr dicho balance térmico se basa una serie de complejos procesos físicos y químicos, como la variación de la cantidad de sangre enviada a los miembros más periféricos, o modificando la cantidad de transpiración. Dichos procesos se realizan a expensas de la comodidad de la persona, compensando las variaciones térmicas del medio. El metabolismo es el proceso fundamental del cuerpo humano mediante el cual los alimentos compuestos en su mayoría por carbono e hidrógeno se combinan con el oxígeno absorbido durante el proceso de respiración en los pulmones, para producir el calor y la energía que el cuerpo demanda para sus funciones internas y trabajos externos.

La temperatura ideal del aire debe encontrarse entonces a mitad del camino, en la zona media comprendida por los 21°C entre los puntos que exigen un mayor gasto energético de adaptación al ambiente por parte del ser humano. Zona de confort entre el frío que no llega a ser incomodo, ni el calor que exija un esfuerzo excesivo por parte del sistema circulatorio, ni secreción de líquidos.

---

<sup>9</sup> Torrela Alcaraz Enrique et.al. Manual de climatización. Ed.Madrid. 2005.

<sup>10</sup> Quadri, Nestor Pedro. Instalaciones de aire acondicionado y calefacción. Librería y Editorial Alsina. 6ª ed. Argentina. 2002.

El estado de intercambio de calor del cuerpo afecta a los sensores responsables de producir las sensaciones que nos provocan confort, frío, calor o discomfort. Lo cual es complejo de describir, considerando que esto puede llegar a ser subjetivo. La temperatura de la piel oscila por lo general cercana a los 34°C, el calor “seco” del metabolismo es transferido al medioambiente por convección y radiación. Otra parte se pierde por evaporación en los pulmones. Sin embargo si la pérdida de calor seco no es suficiente para balancear el metabolismo se produce entonces sudor. Al evaporarse este sudor se elimina ese calor adicional. La relación de intercambio de calor dependerá de la radiación solar, la velocidad de viento, la temperatura ambiente, la ropa que se porte<sup>11</sup>. La humedad no afecta la tasa de sudor que generamos, simplemente a mayor humedad presente en el ambiente la capacidad de evaporar del ambiente disminuye, dado que se encuentra con un grado mayor de saturación y no puede aceptar más volumen de agua. Es en ese momento cuando se nos moja la frente o bien nos bañamos en sudor.

El cuerpo en reposo relaja su metabolismo emitiendo al medio aproximadamente 100kcal/h, mientras que al efectuar trabajos externos de gran demanda puede llegar a las 400kcal/h. Siendo factores determinantes de las sensaciones humanas de calor o frío, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del aire presente. Condiciones que definen al clima y características atmosféricas que afectan en forma de sensación térmica los sentidos de las personas. Sin embargo para la sensación del confort térmico no hay valores absolutos, todo es relativo a la sensación de cada individuo en particular. Si bien se pueden crear patrones de comportamiento o adecuación al clima, existen factores independientes del clima local, como la edad, el género, el tipo de ropas del individuo, grado de hidratación, estado de salud, su grado de fatiga, o ritmo de trabajo, su alimentación, o modos de vivir. Ante ello los sistemas de climatización artificial deben proveer de óptimas condiciones de bienestar para que el mecanismo de autorregulación de la temperatura del cuerpo humano funcione con el mínimo esfuerzo.

## 2.2 El sector edificio en México

En 2008 el sector doméstico constituyó el 16% del consumo final de energía en México. Un hogar típico en México consume alrededor de 8,735 kWh por año, el 70% del consumo en el sector residencial se concentra en estufas, calentadores de agua, refrigeradores y equipos de acondicionamiento de aire tipo cuarto. La figura 2.2 muestra el desglose del consumo promedio de energía en el hogar en México. Mientras el consumo eléctrico en el sector ha tenido un incremento del 49.74% (graf.2.3).

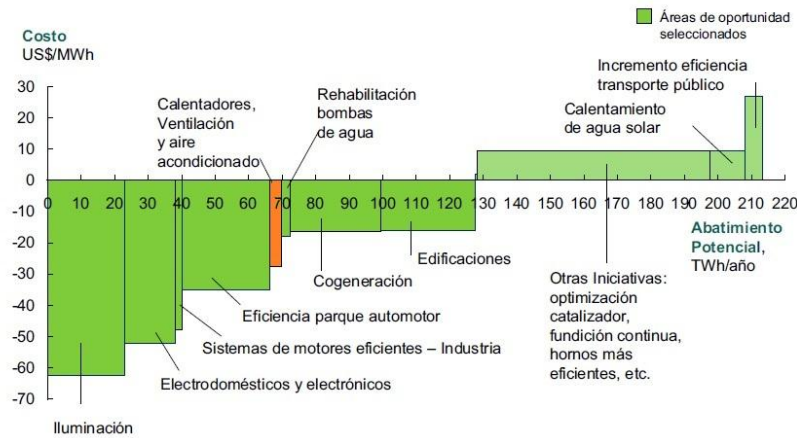
Existe una creciente demanda para enfriamiento de espacios en climas cálidos, las personas buscan elevar su calidad de vida y mejorar la productividad en su trabajo, resultando en un aumento de la demanda de energía durante el día. El consumo en el sector residencial en México es cada vez mayor, importantes factores contribuyen al aumento de este. Cambios en el tipo de construcciones, calefacción, refrigeración, calentamiento de agua entre otros aparatos con demanda eléctrica.

De acuerdo con el Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía en la actualidad existen diferencias notables entre las tecnologías que pueden utilizarse a lo largo de los sectores de consumo, concretas oportunidades para aumentar la eficiencia energética en el uso final de energía en el sector. Con apoyo de la Curva de Costos de Abatimiento de Gases de Efecto Invernadero, McKinsey y CONUEE identificaron las áreas de oportunidad costo-efectivas para aumentar la eficiencia energética en el mediano y largo plazo en el país con el objetivo de reducir el consumo de energía en dichos sectores. La Graf.2.1 muestra en color naranja el potencial que existe en relación USD/MWh al invertir en calentadores, ventilación y mejores sistemas de aire acondicionado.

---

<sup>11</sup> Givoni, Baruch. (1997) *Climate Considerations in Building and Urban Design*. New York. Van Nostrand Reinhold.

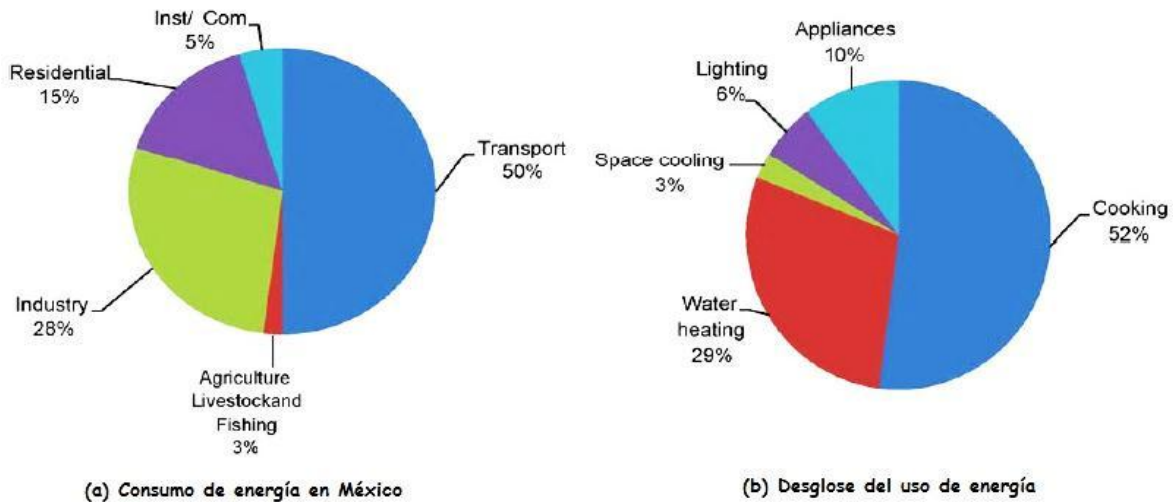
Áreas de oportunidad enfocadas en usos finales de energía



Graf.2.1 Áreas de oportunidad enfocadas en usos finales de energía.

Fuente: McKinsey GHG abatement cost curve V2.0, análisis CONUEE 2006.

Durante el año 2006, el uso final de energía en México representó 4,237PJ de los cuales el 50% correspondió al sector transporte; 28% al sector industrial, mientras que el 15% del uso final de la energía correspondió al sector residencial. Sector comprendido por una población de más de 105 millones de habitantes, repartidas en 26.5 millones de viviendas<sup>12</sup>.



Graf.2.2 Consumo de energía en México y desglose del uso de energía en el sector residencial

Fuente: Rosas et.al. 2010.

<sup>12</sup> J. Rosas et al. / Energy for Sustainable Development The structure of household energy consumption and related CO2 emissions by income group in Mexico 2010.



Graf.2.3 Progreso del consumo de electricidad en sector residencial  
Elaboración propia a partir de datos del Balance Nacional de Energía 2008

La energía utilizada en el sector residencial represento 463PJ, destinados para la cocción de alimentos y calentamiento de agua, por quema de gas natural o LP. Además de electricidad para iluminación y el funcionamiento de electrodomésticos; equipos que compuestos por refrigeradores con consumos de 616 kWh/año, lavadoras de 156 kWh/año (5%), televisores 153 kWh/año (15%), y 2042 kWh/año en equipos de aire acondicionado mecánicos<sup>13</sup>. La tabla 2.1, muestra el crecimiento en los consumos que han tenido los equipos de 1996 al 2006.

El estudio de Rosas et.al (2010) presenta la evolución a partir del ingreso económico de la población de la saturación de estos equipos en los hogares Mexicanos entre 1996 y el 2006. Dividiendo los hogares en 10 condiciones de acuerdo al ingreso (deciles) donde México paso de tener 20.5 a 26.5 millones de hogares, lo que aumento en parte el consumo de electrodomésticos.

La tabla 2.2 muestra el grado de saturación de equipos y su saturación en estos 10 años. Comparado con algunas regiones de Estados Unidos donde alcanzan el 95% de penetración, en México los equipos de acondicionamiento de aire se estima hoy en 16%, (en el decil de ingreso más alto el incremento fue del 18 al 34%). Indicativo del potencial tan fuerte que existe para el incremento en el consumo de energía por acondicionamiento de ambiente en edificaciones. El ingreso influye fuertemente.

Decile	Refrigerator		TV sets		Cloth washers		Air conditioners	
	1996	2006	1996	2006	1996	2006	1996	2006
I	16%	20%	34%	43%	7%	10%	1%	1%
II	30%	38%	56%	75%	16%	22%	1%	2%
III	47%	56%	78%	86%	23%	37%	2%	4%
IV	53%	66%	83%	106%	31%	44%	4%	7%
V	65%	82%	94%	99%	39%	60%	5%	9%
VI	73%	92%	105%	132%	42%	69%	6%	11%
VII	84%	104%	123%	153%	54%	88%	9%	16%
VIII	93%	113%	153%	166%	69%	99%	13%	25%
IX	101%	122%	174%	255%	79%	110%	18%	34%
X	108%	130%	217%	396%	88%	124%	34%	49%
Total	67%	82%	112%	151%	45%	66%	9%	16%
Gini coefficient	0.25	0.24	0.27	0.33	0.33	0.32	0.52	0.50

Tabla 2.1 Equipos electrónicos y saturación en hogares de acuerdo a decil de ingreso.  
Fuente: Rosas et.al. 2010. Basada en INEGI (1996-2006)

En México de 1984 a la fecha, el televisor es el aparato que mayor saturación ha tenido, incrementándose de 0.54 televisores por hogar, a 1.51 en el año 2006, lo que sugiere que apenas la vivienda es electrificada, el televisor es el primer aparato adquirido. Comparado con el equipo de aire acondicionado, caro en inversión y operación ha pasado del 2.2% al 15.8% en el mismo periodo de tiempo.<sup>14</sup> Sin embargo, a pesar

<sup>13</sup> Ibid

<sup>14</sup> J.A. Rosas-Flores, David Morillón / Energy Recent trends in Mexican residential energy use

de que la saturación de televisores sea del 151%, comparados contra el 16% estimado de hogares mexicanos que cuentan con equipos de aire acondicionado (A/C), los televisores representan el 4.8% de la energía consumida en los hogares, contra el 6.6% que representan los A/C. Mostrándose el alto consumo energético que demandan los A/C para su operación.

	1996		2006	
	PJ	%	PJ	%
<b>LPG</b>	<b>311.5</b>	<b>70.5%</b>	<b>272.3</b>	<b>58.7%</b>
Cocinar	240.2	54.4%	172.3	37.2%
Calentamiento de agua	59	13.4%	84	18.1%
Otros	12.4	2.8%	15.9	3.4%
<b>Gas natural</b>	<b>22.7</b>	<b>5.1%</b>	<b>29.6</b>	<b>6.4%</b>
Cocinar	17.5	4.0%	18.7	4.0%
Calentamiento de agua	4.3	1.0%	9.1	2.0%
Otros	0.9	0.2%	1.7	0.4%
<b>Electricidad</b>	<b>102.5</b>	<b>23.2%</b>	<b>160</b>	<b>34.5%</b>
Iluminación	21.3	4.8%	35.6	7.7%
TV	12.7	2.9%	22.1	4.8%
Refrigerador	38.9	8.8%	48.2	10.4%
Lavadora	5.1	1.2%	9.7	2.1%
<b>Aire acondicionado</b>	<b>15.2</b>	<b>3.4%</b>	<b>30.8</b>	<b>6.6%</b>
Otros	9.3	2.1%	13.6	2.9%
<b>Keroseno</b>	<b>4.84</b>	<b>1.1%</b>	<b>1.85</b>	<b>0.4%</b>
<b>Total</b>	<b>441.54</b>	<b>100.0%</b>	<b>463.75</b>	<b>100.0%</b>
Viviendas (millones)	20.5		26.5	
Poblacion (millones)	92.4		104.5	

Tabla 2.2 Estimación del consumo de energía final en el sector residencial.  
Fuente: Rosas et.al. 2010 y CONUEE

## 2.2.1 Aire acondicionado

Los sistemas de aire acondicionado estándar se están volviendo la norma para el enfriamiento de edificios. En áreas urbanas de climas cálidos en la mayoría de los países en desarrollo, caso de México, estos sistemas son de los primeros “electrodomésticos” que en caso de poder pagar los usuarios adquiere. Mientras en países industrializados que gozan largas temporadas del año de climas frescos y fríos donde no es necesario el uso de aire acondicionado, se está haciendo moda usarlos.

En México el uso de equipos de acondicionamiento de ambiente representa aproximadamente el 12% del uso de energía en la totalidad de edificios<sup>15</sup>. Intensidad de uso de energía para consumo final aun baja comparada con la intensidad de uso de otros países donde llega a representar hasta el 50%, parte por las condiciones ambientales y parte por las condiciones socioeconómicas del país. En la medida en que el ingreso per cápita aumente, el potencial de crecimiento del consumo de energía por acondicionamiento de ambiente es enorme. El consumo per cápita en países en desarrollo es aproximadamente 4 veces menor al comparado por los países desarrollados según información del “Environmental Energy Outlook 2030” de la OCDE.

EL uso de energía asociado a dispositivos eléctricos se estima asumiendo que la demanda de equipo es constante, lo que varía es el crecimiento del número de hogares, la penetración de dichos equipos y la demanda de acondicionamiento de ambiente. Los equipos de aire acondicionado y de coolers representan el 17% de la energía que se consume en los hogares (graf.3). La tasa de crecimiento a nivel nacional de equipos de aire acondicionado es de 8.24%, siendo la más alta de los electrodomésticos por encima de refrigeradores (5.75%), televisiones (4.72%) y lavadoras (6.72%)<sup>16</sup>.

<sup>15</sup> Análisis CONUEE con información de la ENIGH 2006 y de CFE

<sup>16</sup> J.A. Rosas-Flores, D.Morillón / Energy Recent trends in Mexican residential energy use. 2010

La mayoría de los equipos de aire acondicionado utilizados en México son individuales, del tipo paquete, de ventana o minisplits. Estos equipos al igual que los equipos de enfriamiento evaporativo conocidos en México como “Coolers” o lavadores de aire, son considerados por la CFE (2011)<sup>17</sup> de alto consumo. Por ello, aunque su saturación en los hogares no sea muy grande, cercano al 16%, su consumo es grande. El crecimiento que ha tenido del 8% en la última década, aunado al continuo crecimiento demográfico, al crecimiento del sector construcción, y una posible mejora en el ingreso económico, son factores que colocan a los equipos de aire acondicionado en una posición que debe ser tomada en cuenta por su impacto en emisiones y consumo energético.

En promedio para equipos de 1 tonelada de refrigeración antiguo es de 1850W, uno nuevo tiene consumos de 1200W; mientras que los “coolers” dependiendo su capacidad (catalogada por CFE en grande y mediana) tienen consumos de 400-600W.

En México, durante 2008 se consumieron **aproximadamente 34 TWh por acondicionamiento de ambiente en edificaciones**. Dicho consumo energético representa bajo la tasa de emisiones de CO<sub>2</sub> del parque de generación del sistema Mexicano, **17.83 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente**. Emisiones que pueden ser mitigadas mediante el uso de enfriamiento evaporativo en sustitución de acondicionadores convencionales de alto gasto energético.

Aparato	Potencia promedio	Tiempo uso al día (periodos típicos)	Tiempo de uso al mes	Consumo mensual kilovatios-hora (vatios/1000) x hora	Consumo anual 5 meses al año	Energía consumida vs cooler de similar capacidad
	Watts	hrs. diarias	horas	kWh	kWh	%
Aire lavado (cooler) grande	600	12	360	216	1080	100%
Aire lavado (cooler) mediano	400	12	360	144	720	100%
Aparato de ventana 1 ton. antiguo	1850	10	300	555	2775	385%
Aparato de ventana 1 ton. nuevo	1200	8	240	288	1440	200%
Aparato de ventana 1.5 ton. antiguo	2250	10	300	675	3375	313%
Aparato de ventana 1.5 ton. nuevo	1800	8	240	432	2160	200%
Aparato de ventana 2 ton. antiguo	3200	10	300	960	4800	444%
Aparato de ventana 2 ton. nuevo	2450	8	240	588	2940	272%
Aparato dividido 1ton. (minisplit)	1160	8	240	278	1390	193%
Aparato dividido 1.5ton. (minisplit)	1680	8	240	403	2015	187%
Aparato dividido 2ton. (minisplit)	2280	8	240	547	2735	253%

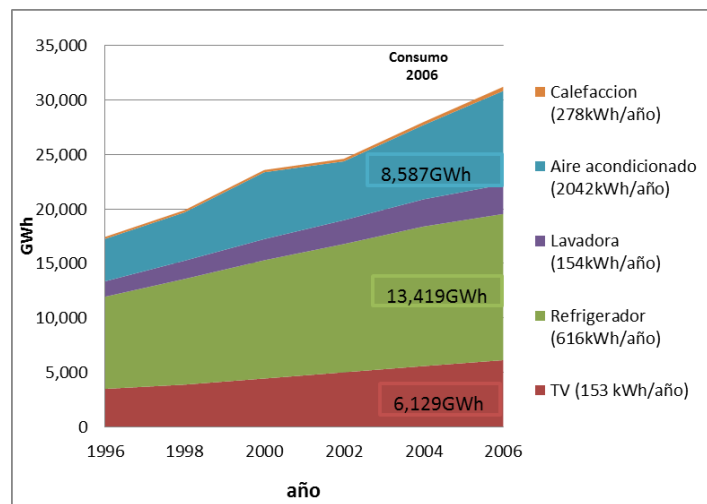
Tabla 2.3 Consumos eléctricos de equipos de refrigeración.  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CFE.

Considerando las horas de operación diarias reportadas en CFE por los usuarios, durante 5 meses de operación al año, se tienen consumos promedio para un equipo nuevo tipo ventana de 1 ton. de 1440 kWh/año, uno viejo tiene consumos de 2775kWh para la misma capacidad. Los equipos minisplits presentan como se ve en la tabla 2.3 de 1390kWh. Mientras que los equipos mecánicos de enfriamiento evaporativo, “coolers” demandan en promedio 50% menos energía que los A/C convencionales, estos varían su consumo entre 720kWh y 1080kWh dependiendo del tamaño del lavador de aire.

<sup>17</sup> CFE. Tabla de Consumo de Electrodomésticos. 2011.

La producción mundial de pequeños unidades de aire acondicionado creció de 1998 al 2001 en un 25%.<sup>18</sup> Las unidades de aire acondicionado varían en un rango muy amplio desde pequeñas unidades montables para cualquier habitación a través de la ventana o el muro, unidades tipo “Split” para una casa, hasta enormes unidades para abastecer de “frio” a centros comerciales, industrias o a todo un sector residencial. La eficiencia energética de cada equipo se mejora con el tamaño de estos. Un “chiller” será de dos a tres veces más eficiente que un acondicionador de aire de una habitación.

México en 2006 contaba con 3,803,108 equipos de aire acondicionado en el sector urbano, y 402,361 a nivel rural con una saturación de 0.18 y 0.068 equipos por casa respectivamente<sup>19</sup>. La graf.2.4 muestra el gran crecimiento en el consumo d estos equipos dado de 1996 al 2006. Equipos que emitieron 5.5 TgCO<sub>2</sub>. CONUEE estima ventas conforme a datos de fabricantes para el año 2018 ventas de 3,301,000 equipos de A/C adicionales.



**Graf. 2.4 Consumo de energía (GWh) por equipos eléctricos en hogares en (1996-2006)**  
Fuente: Rosas et.al.2011. basado en datos ENIGH.

### 2.2.2 Ahorros de energía en calefacción y refrigeración. Requerimientos de enfriamiento en edificios

Según estimaciones, la energía empleada para la construcción de un edificio es el 15-20% del total de la energía que requerirá dicho inmueble a lo largo de su vida útil. El enfriamiento dentro de las edificaciones se basa en la relación de la cantidad de calor que debe ser removida de dichos espacios para mantener el aire dentro la construcción en un rango de temperatura de confort. Y que los usuarios del edificio realicen sus actividades sin llegar a percibir la presencia de malas condiciones térmicas. El enfriamiento involucra la descarga de energía buscando que el flujo del de energía del sistema se dé por mecanismo natural, sin tener que adicionarle al sistema una carga de energía extra.

Las estrategias identificadas en este eje se enfocan a la reducción de la demanda de energía para calefacción y enfriamiento de ambiente en edificaciones mediante la aplicación de mejores prácticas de construcción. El enfriamiento evaporativo es una de las estrategias más efectivas, debido al enorme calor latente necesario para lograr la evaporación de agua. (Tang e Etzion, 2004) Para evaporar el agua absorbe cerca de 2400kJ por

<sup>18</sup> Metz, Bert. Controlling Climate Change. Cambridge 2010.

<sup>19</sup> Rosas.Flores Jorge Alberto, Rosas-Flores, Dionicio, Morillón David. Energy and Buildings. Saturation, energy consumption, CO2 emission and energy efficiency from urban and rural households appliances in Mexico. 2011



litro. Lo que es equivalente al calor producido por 7 lámparas incandescentes de 100W durante una hora. El enfriamiento evaporativo a partir de este punto de vista entonces pudiera ser considerado dentro del uso de fuentes renovables de energía, contemplado para mejorar la pérdida de calor en los edificios, sin afectar en ningún momento el bienestar social y confort.

### 2.2.3 Gases de efecto invernadero

Ante la problemática del posible cambio climático, el hombre debe enfrentar los retos de satisfacer sus necesidades variando y sustituyendo sus fuentes de energía y aumentando su eficiencia; hacer mucho más, con mucho menos. Los edificios grandes consumidores de energía desde los materiales con los que son construidos y consumen mayores cantidades para la calefacción, refrigeración, iluminación y la operación de equipos eléctricos.

Los edificios contribuyen con casi el 20% de la emisión de gases de efecto invernadero global considerando las emisiones de la electricidad que consumen<sup>20</sup>. Sin embargo la oportunidad de ahorros de energía en el sector y por consecuencia reducciones de emisiones de  $CO_{2eq}$  es tremenda. Debemos imaginar un futuro en el que se construyan edificios de “emisiones netas cero”. Hoy día ya existen múltiples técnicas que se pueden emplear para ir alcanzando dichos objetivos. Este trabajo busca investigar precisamente el potencial de una técnica largamente estudiada como lo es el enfriamiento evaporativo adiabático para el acondicionamiento de espacios arquitectónicos para la República Mexicana, los beneficios y posibilidades que tiene consigo y las desventajas que presenta.

El aire acondicionado de acuerdo al documento de Rosas et.al.(2010) impacta con el 12% de las emisiones de  $CO_2$  por consumo energético en los hogares por uso final de la energía en México, como lo muestra la siguiente tabla para el año 2006.

MtonCO2	2006	%
LPG	17	36%
Gas natural	1.7	4%
Electricidad	28.6	60%
Iluminación	6.4	14%
TV	4	8%
Refrigerador	8.6	18%
Lavadora	1.7	4%
Aire acondicionado	5.5	12%
Otros	2.4	5%
<b>Total</b>	<b>47.3</b>	<b>100%</b>
Viviendas (millones)	26.5	
Población (millones)	104.5	

Los equipos de aire acondicionado estándar, generalmente emplean como refrigerante compuestos halo-carbonados. Más del 90% de las instalaciones emplean HCFC-22. Dicho compuesto está pronto a salir del mercado en todo el planeta por el Protocolo de Montreal. Sin embargo, se ha estado sustituyendo por HFCs como refrigerante, un potente gas de efecto invernadero. Por lo que equipos de aire acondicionado, aportan al problema de cambio climático por las emisiones asociadas a la energía que consumen, y por fugas en instalaciones o durante reparaciones; con lo que impactan globalmente con 0.2GtCO<sub>2</sub>-eq por año<sup>21</sup> más por emisión de HFCs.

La problemática es compleja, ¿cómo reducir la cantidad de energía que utilizamos diariamente abatiendo las emisiones de gases de efecto invernadero sin comprometer el nivel de vida y confort al que se ha acostumbrado el ser humano? Se contemplan 5 soluciones, **reducir las necesidades** de energía, **emplear la energía eficientemente**, **cambiar las fuentes** de energía, **cambiar materiales** y evitando gases fluorinados y por último **cambiar nuestros hábitos**.

<sup>20</sup> Metz, Bert. Controlling Climate Change. Cambridge 2010.

<sup>21</sup> Metz, Bert. Controlling Climate Change. Cambridge 2010.

*Capítulo III*

*Principios y conceptos del enfriamiento evaporativo.*

## Capítulo III

### Principios y conceptos del enfriamiento evaporativo.

#### 3.1 El aire seco.

La capa gaseosa que envuelve a la tierra, se constituye por una mezcla de gases en composición constante excepto el vapor de agua. Prescindir de este componente nos conduce a tener un “aire seco”, disponible en la naturaleza únicamente a partir de unos 10 km de altura. Por lo anterior, la composición del aire húmedo se considera como la mezcla no homogénea de aire seco y agua.

La composición de aire seco se da por la composición de gases mostrada en la tabla 3.1 aproximadamente.

COMPONENTE		% Vol.	% Masa.
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	78.084	75.47
Oxígeno	O <sub>2</sub>	20.9476	28.19
Argón	Ar	0.934	1.29
CO <sub>2</sub> , CO, SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub>		0.03	0.05
Xenon, Kripton		trazas	trazas

Tabla 3.1 Composición del aire seco.

Pudiéndose definir una masa molar del aire seco a partir de sus componentes, considerando

$$M_{as} = 0.78084 * 28 \frac{kg}{kmol} N_2 + 0.209476 * 32 \frac{kg}{kmol} O_2 + 0.00934 * 39.9 \frac{kg}{kmol} Ar_2 + 0.0003 * 44.01 \frac{kg}{kmol} CO_2$$

$$Masa_{aire\ seco} = 28.9526 \frac{kg}{kmol}$$

El CO<sub>2</sub> se encuentra presente bajo emisión en procesos naturales o bien como producto de combustión de actividades humanas. A niveles adecuados este gas ayuda al efecto invernadero y a la posibilidad de la vida en el planeta, en exceso puede crear ambientes de alta temperatura siendo precursor del cambio climático que ponen en riesgo la viabilidad de la vida en el planeta.

El comportamiento del aire seco a la presión y temperatura a la que se encuentra en la atmósfera se puede considerar como un gas perfecto, ideal.

#### 3.2 El aire húmedo.

La *humedad* es el agua que se presenta en el aire como vapor de agua, como partículas de agua en estado sólido (hielo), o bien como gotas de agua líquida en suspensión dentro del aire (lluvia, bruma, niebla).

El vapor de agua a presiones muy bajas, de igual forma se comporta prácticamente como un gas ideal. Dichas condiciones corresponden a las presiones parciales del vapor de agua en el aire húmedo, por lo que asumiremos el comportamiento del vapor de agua como un gas ideal. A pesar de lo equivalente que pudieran ser los términos, vapor y gas no lo son. El gas en el sentido estricto da referencia a un estado físico de la materia, que en condiciones “críticas” de presión y temperatura no puede condensarse, no puede convertirse en líquido. Debajo de dichas condiciones extremas, el gas puede licuarse y por tanto evaporar. El vapor sería entonces la evaporación de un líquido.

El proceso de evaporación se alcanza cuando el fluido obtiene una cantidad de energía que le permite vencer las fuerzas internas de atracción que existen entre sus moléculas. Con lo que estas salen liberadas al

espacio que las rodean. La energía con la que el líquido fue capaz de vaporizar es nombrado calor de vaporización, que es la cantidad de calor que se tiene que aplicar al líquido a una temperatura determinada para convertirlo en vapor.<sup>22</sup>

### 3.3 Presión de vapor

Al calentar un líquido hasta su temperatura de ebullición, temperatura a la cual se convierte en vapor y se coloca en condiciones “adiabáticas”, aislado térmicamente, se tendrá a un número determinado de moléculas integrándose a la fase vapor, pero por choques entre las moléculas otro número de moléculas de vapor empezara a condensarse regresando al estado líquido. A lo largo del proceso de evaporación el número de moléculas de líquido presentes en el gas irá en aumento, al mantener temperaturas y presión constante se obtendrá un equilibrio, en el cual el número de moléculas que escapan de la fase líquida por evaporación será igual al número de moléculas que entran por condensación, lográndose un equilibrio dinámico. Equilibrio dado para cada temperatura y presión. El líquido que alcanza este equilibrio dinámico se le dice que se encuentra bajo condiciones de saturación, que es un “líquido saturado”, es decir que a ciertas condiciones de temperatura y presión tiene el máximo de moléculas de vapor que puede aceptar. La cantidad de moléculas de vapor en el gas puede medirse por la presión que ejercen a una temperatura determinada, a esta se le llama presión de vapor ( $P^0$ ).<sup>23</sup>

Está claro que el proceso de evaporación es fuertemente dependiente por la presión que ejerce el gas sobre el líquido. **Entre mayor sea la presión, mayor energía se requiere entonces para evaporar un líquido.** Este fenómeno se observa por la variación de temperaturas al variar la presión del gas. Por lo que la presión de vapor es función de la temperatura y la presión total. *Para los proceso de evaporación al ambiente, la presión total es igual a la atmosférica*, para efectos de diseño se considera que varía muy poco, que se mantiene constante. La presión atmosférica depende de la columna de aire presente, de la altitud del lugar.

Cuando nos referimos al termino humidificación, se habla de una mezcla gas-vapor. Si la mezcla obedece la ley de los gases ideales, entonces se puede aplicar la *ley de Dalton* de las presiones parciales, “la presión total ( $P_T$ ) de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones parciales ( $p$ ) a la que se encuentra cada una de los gases constituyentes”<sup>24</sup>

$$P_T = \bar{P}_A + \bar{P}_B + \dots + \bar{P}_N$$

Por lo que la presión parcial de cada componente de la mezcla de gases ideales, por tanto es igual al producto de la presión total por la concentración de dicho constituyente particular, en una mezcla vapor-gas

$$\bar{P}_v = X_v P_T$$

Por ello, al tener una masa de aire seco en contacto con agua, se generara una evaporación del líquido, hasta el punto en el que la mezcla encuentre su equilibrio termodinámico, y este corresponderá a la temperatura de la mezcla y a la presión parcial del vapor de agua, llamado punto de saturación.

### 3.4 Psicrometría

---

<sup>22</sup> Pilatowsky,2002

<sup>23</sup> Ibid

<sup>24</sup> Pilatowsky,2002

El término psicrometría ó sicrometría tiene sus orígenes en las raíces griegas “psykhos” – frío y “metron”- medida<sup>25</sup>. Concepto que engloba la caracterización del estado termo-higrométrico del aire húmedo que nos rodea. La Psicrometría es referente a la “medición del frío”, se encarga del estudio de las propiedades de las mezclas vapor-gas o gases húmedos. Propiedades que ayudan a la comprensión de los procesos que logran las distintas condiciones de bienestar en el cuerpo humano y las condiciones de conservación en procesos industriales.

### 3.4.1 Variables Psicrométricas

Conforme a la ley de Gibbs, para definir termodinámicamente el estado de la mezcla aire-vapor será necesario conocer:

$$\begin{aligned} N^{\circ} \text{ Variables Independientes} &= N^{\circ} \text{ Componentes} - N^{\circ} \text{ Fases} + 2 \\ N^{\circ} \text{ Componentes, (aire seco y vapor de agua)} &= 2 \\ N^{\circ} \text{ Fases, Gaseosa} &= 1 \\ N^{\circ} \text{VI} &= 2 - 1 + 2 = 3 \end{aligned}$$

Por Gibbs sabemos que para definir perfectamente el estado del aire húmedo debemos conocer tres variables, considerando que la presión total (atmosférica) se supone conocida, se reduciría a dos variables independientes, dos variables psicrométricas.<sup>26</sup>

### 3.4.2 Humedad absoluta (w)

La “**humedad absoluta**” es el vapor de agua contenido en el aire seco. En la idealidad, el aire seco presentaría unidades de masa de vapor de agua (g) por unidad de masa de aire seco (kg). Esta magnitud representa la masa de agua (m<sub>v</sub>) que existe por masa de aire seco(m<sub>as</sub>).

$$w = \frac{m_v}{m_{as}} \left[ \frac{kg_v}{kg_{as}} \right]$$

### 3.4.3 Humedad relativa “φ”

La humedad relativa se define como la relación entre la fracción molar de vapor de agua en el aire (X<sub>v</sub>) respecto de la fracción molar del vapor de agua en un aire saturado en vapor de agua a la misma temperatura y presión total (X<sub>vs</sub>), expresado en %.

$$\varphi = \left( \frac{X_v}{X_{vs}} \right)_{T^{cte}} 100 \%$$

X<sub>v</sub>, fracción molar de vapor de agua en el aire.

X<sub>vs</sub>, fracción molar de vapor de agua en un aire saturado de agua.

Considerando que la fracción molar es el número de moles de un componente respecto al número total de moles existentes, y aceptando su comportamiento de gases ideales, la expresión puede transformarse como la relación entre la presión parcial de vapor de agua en la mezcla de un aire húmedo (P<sub>v</sub>) a la presión parcial del vapor a las condiciones que se tendría en caso de saturación a la misma temperatura.

<sup>25</sup> Torrela Alcaraz Enrique et.al. Manual de climatización. Ed.Madrid. 2005.

<sup>26</sup> Pinazo Ojer, José Manuel. Manual de Climatización. Tomo I. Universidad Politecnica de Valencia.1995.

$$\varphi = \left( \frac{P_v}{P_{vs}} \right)_{T_s^{cte}} * 100 \%$$

### 3.4.4 Grado de saturación (GS)

Considerando que la saturación de un gas, en este caso “aire” se da cuando se encuentran en el equilibrio dinámico sus dos componentes (aire seco y vapor de agua), es decir que cuando un gas contiene la máxima cantidad posible de vapor se encuentra entonces “saturado” (fig. 3.1). La presión de vapor será igual a la presión parcial.

Entonces el grado de saturación es el cociente entre la cantidad de agua que presenta un aire a ciertas condiciones, respecto a la cantidad máxima que pondría tener a dicha temperatura en forma de vapor, *en la saturación*.

$$GS = \frac{W}{W_s} = \frac{P_v(P_T - P_{vs})}{P_{vs}(P_T - P_v)}$$

Decir que un aire está saturado, supone que lo está en vapor de agua, esto se refiere a que la presión parcial del vapor en la mezcla es igual a la de saturación correspondiente a la temperatura a la que se encuentre la mezcla. En este estado el vapor se encuentra sobre la línea de cambio de fase líquido-vapor, en la que la presión y temperatura no son independientes., para cada presión de vapor existirá una temperatura fija y viceversa,  $p_{vs} = f(T)$



Fig.3.1. Línea de Saturación.  
Fuente: Elaboración Propia

### 3.4.5 Temperatura de bulbo seco (Ts)

La temperatura de bulbo seco es aquella con la que convivimos todos los días, es la que suministra un termómetro de cualquier tipo, conocida como la “temperatura ambiente”. Es la temperatura del aire húmedo y por tanto del aire seco y la del vapor de agua (fig.3.2).

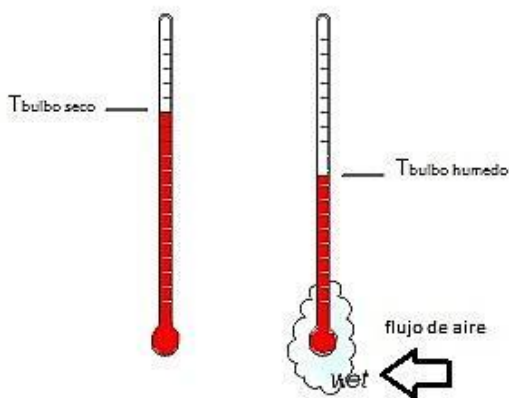


Fig. 3.2 Temperatura de bulbo seco (Ts) y Temperatura de bulbo húmedo (Th)  
Fuente: Manual de climatización. 2005.

### 3.4.6 Temperatura de rocío (Tr)

Si a una mezcla de aire seco – vapor de agua no saturada la enfriamos a presión parcial de vapor constante, llegará un punto en el que se alcanzara el punto de saturación, sin modificar su contenido de humedad; este punto se llama *punto de rocío*. Esto se debe a que el agua sólo se mantendrá en forma de pequeñas gotas en suspensión, que va generando una gota de mayor tamaño y precipita por fuerza de gravedad. Por lo tanto la temperatura de rocío sería la temperatura de una superficie que en contacto con el aire húmedo se produjera sobre esta la condensación de parte del vapor de agua contenido en el aire.<sup>27</sup>

La temperatura de rocío en °C puede ser determinada directamente con ayuda de la siguiente correlación;

$$T_r = -35.957 - 1.8726 \ln(p_v) + 1.1689[\ln(p_v)]^2$$

### 3.4.7 Entalpía del aire seco (h<sub>as</sub>)

La entalpía es la expresión que se da como valor cuantitativo de la energía interna de los cuerpos, para este caso sería la del aire seco, más el equivalente térmico del trabajo efectuado por el mismo cuerpo. La entalpía nos proporciona entonces el estado o nivel energético de un determinado cuerpo, sometido a una determinada presión atmosférica.<sup>28</sup>

$$h = U + pv$$

U=Energía interna del cuerpo

Pv= El producto entre el nivel de la presión barométrica referida y el peso en kg de la masa volumétrica tomada.

<sup>27</sup> Pinazo Ojer, José Manuel. Manual de Climatización. Tomo I. Universidad Politécnica de Valencia.1995.

<sup>28</sup> Godoy Francisco. Climatización, Instalaciones Termofrigoríficas. Ed. Paraninfo. Madrid 1994.

La entalpía específica de un fluido entonces se puede definir como la cantidad de calor que hay que transferirle a 1kg de dicho fluido para cambiar de unas determinadas condiciones de origen a otras cualesquiera.

La entalpía para el aire seco, considerando la presión constante y el origen establecido a 0°C, se puede calcular mediante la expresión

$$h_{as} = Cp_{as}(T_s - T_{sr})$$

$Cp_{as}$ - Calor específico del aire seco [1kJ/kg °C = 0.239 kcal/kg °C]

$T_s$ - Temperatura seca del aire (°C)

$T_{sr}$ -Temperatura de referencia = 0°C

Considerando el comportamiento ideal entonces podemos expresar su entalpía como,

$$h_{as} = Cp_{as} * T \left[ \frac{Kcal}{kg_{as}} \text{ ó } \frac{kJ}{kg_{as}} \right]$$

$$h_{as} = 0.24 \frac{Kcal}{h} * t \text{ (} ^\circ\text{C)}$$

### 3.4.8 Temperatura de bulbo húmedo (Th)

La temperatura de bulbo húmedo de una corriente de aire es aquella que marca un termómetro cuyo sensor está humedecido (psicrómetro). Teniendo en cuenta evitar posibles intercambios térmicos por conducción y radiación a o desde el termómetro<sup>29</sup>. Una vez suprimidas todas las inexactitudes de medida, el termómetro señala una temperatura que es realmente la del agua sobre el bulbo.

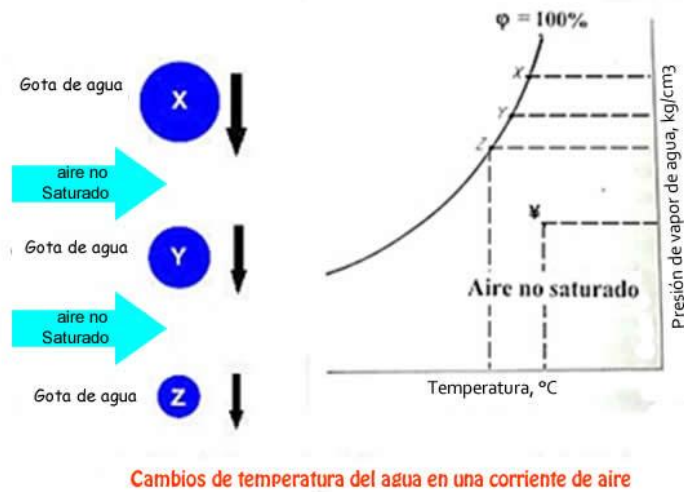


Fig.3.3. Proceso y representación en el diagrama psicrométrico de una gota de agua en una corriente de aire.

El agua, cuando está en contacto con aire no saturado, toma una temperatura distinta a la del aire. Considerando una gota de agua que cae a través de una corriente de aire como se muestra en la Fig. 3.3, la gota se va poniendo progresivamente en contacto con aire no saturado. Observándose en el diagrama psicrométrico de la misma figura, presión de vapor vs temperatura, la representación gráfica de los estados

<sup>29</sup> Torrela Alcaraz Enrique et.al. Manual de climatización. Ed.Madrid. 2005.



del aire (¥) y de la gota de agua, los puntos representativos del agua se encuentran localizados sobre la línea de saturación (x,y,z).

En el instante inicial cuando se ponen en contacto, el agua sobre el punto X y el aire sobre el punto ¥, el agua tiene una presión de vapor superior a la del aire húmedo, lo que provoca un desplazamiento de moléculas de agua desde la gota del líquido al aire húmedo por evaporación. La energía requerida y necesaria para esta vaporización puede provenir del aire húmedo por trasmisión de su **calor sensible** o bien del resto de la gotita de agua por descenso de su propia temperatura. Como la transmisión de calor se realiza con mayor facilidad desde el agua que desde el aire (por mayor diferencia de temperaturas), tendremos un descenso de la temperatura del agua hasta el nivel "Y", y una disminución en la masa del agua líquida.

El siguiente contacto agua/aire húmedo se realiza entre la gota de agua en el estado Y y el aire no saturado en el estado ¥. De nuevo la presión del vapor de la gota de agua es superior a la del aire, y una vez más se produce una evaporación. La mayor parte del calor para la evaporación procede ahora del aire, y una menor parte de la reducción de temperatura del agua, debido a que la diferencia de temperatura entre ¥ e Y es mayor que la existe entre ¥ y X.

Se llega a un equilibrio final en el que la temperatura del agua no desciende más, y **el calor para vaporizar el agua procede exclusivamente del calor sensible del aire.** Esta temperatura final del agua al salir del íntimo contacto es la temperatura de **bulbo húmedo**.<sup>30</sup>

En estas condiciones se tiene un equilibrio de energías entre el calor latente de vaporización del agua líquida y el sensible aportado por el aire. Por lo que analíticamente esta igualdad se puede expresar a partir del cálculo de calor necesario para lograr la vaporización:

$$q_1 = q_2 \rightarrow \alpha A(T_s - T_h) = KA(w_s - w_1)\lambda^*$$

Donde,

$\alpha$  = coeficiente de película o de trasmisión de calor por convección

$T_{bs}$  = Temperatura de bulbo seco

$T_{bh}$  = Temperatura de bulbo húmedo

$\lambda^*$  = calor latente de vaporización a la temperatura húmeda

$K$  = coef. de transferencia de masa a través de la película de aire  $\left(\frac{kg_v}{m^2h}\right)$

$A$  = superficie de contacto

$w_s$  = humedad bulbo seco

Despejando se puede obtener entonces la temperatura de bulbo húmedo,

$$T_{bh} = T_{bs} - \frac{K}{\alpha} \lambda^* (w_s - w_1)$$

Esta temperatura final que toma el agua es igual a la *temperatura de bulbo húmedo*, porque el agua sobre el bulbo de un termómetro con el bulbo húmedo se comporta de la misma manera que la gota de agua de la **fig.3.3**. Cuando el aire no saturado entra en contacto con el agua del bulbo, la temperatura del agua desciende, y el aire humedecido es barrido por otra masa de aire no saturado. El agua sobre el bulbo finalmente cae hasta una temperatura constante.

<sup>30</sup> Stoecker, W.F. Refrigeración y Acondicionamiento de Aire. McGraw-Hill. EUA. 1958.

La temperatura de bulbo húmedo estrictamente no es una propiedad del aire, sino que es una medida del efecto del aire sobre el agua cuando está en íntimo contacto con ella.

También la temperatura de bulbo húmedo puede obtenerse mediante la expresión:

$$P_{vs(T_h)} - P_v = B(T_{bh} - T)$$

Resultando,

$$T_{bh} = \frac{P_{vs(T_h)} - P_v}{B} + T$$

En la que T (temp. Seca) se encuentre entre 255.38 y 533.16K.

El valor de "B" viene dado por:

$$B = \frac{\left[1006.9254(p_{vs(T_h)} - p_T) \left(1 + 0.15577 \frac{p_v}{p_T}\right)\right]}{0.62194 \lambda_{T_h}}$$

$\lambda_{T_h}$  [J/kg]= Corresponde con el calor latente de vaporización del agua a la temperatura de bulbo húmedo.

$$\lambda_{T_h} \left(\frac{J}{kg}\right) = 2502535.259 - 2385.76424(T_h - 273.16); 273.16 \leq T_h \leq 338.72K$$

### 3.4.9 Temperatura de saturación adiabática.

Al proyectar el proceso elemental de la fig.3.3 en una mayor escala, se le denomina "saturación adiabática" fig.3.4. Podemos imaginar un túnel largo y adiabático (con nulo intercambio de calor con el exterior, aislado), en el que se introduce un aire húmedo al que se le somete a una ducha de agua pulverizada. La lluvia satura el aire.

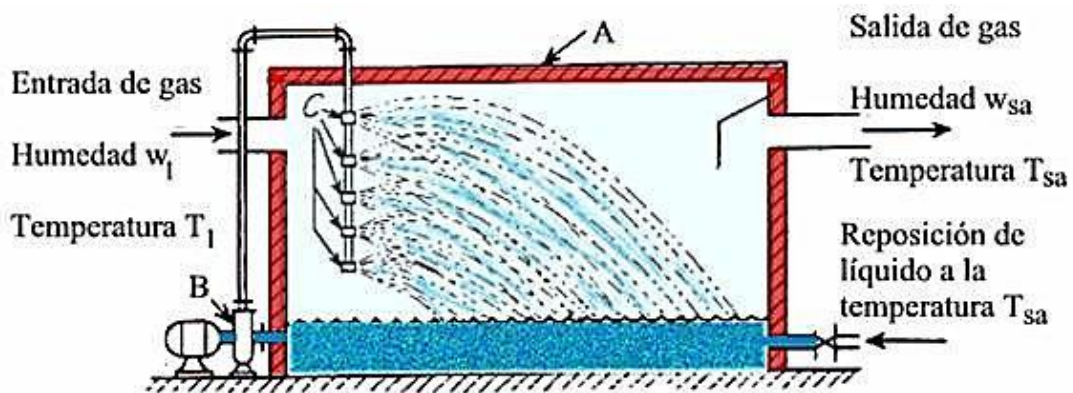
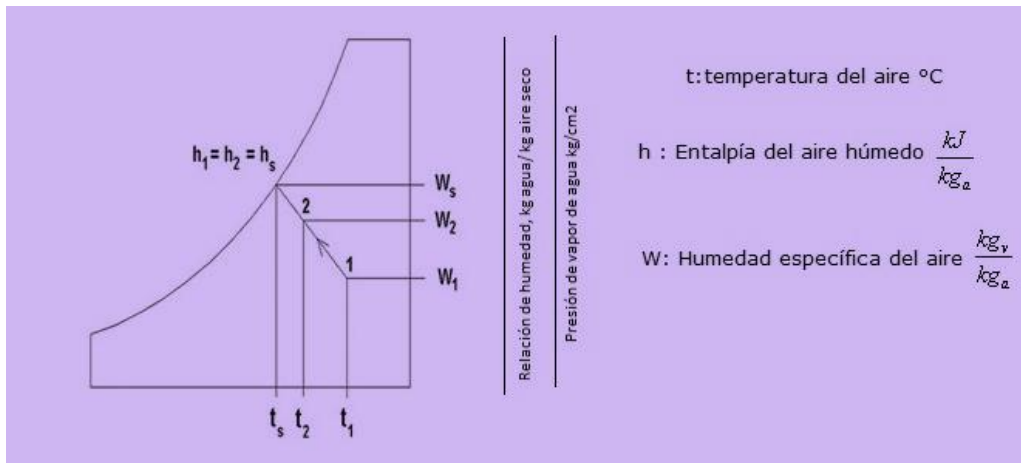


Fig.3.4. Túnel de saturación adiabática.  
fuente: Manual de Climatización. Pinazo, José Manuel.

La “temperatura de saturación adiabática” o temperatura termodinámica de bulbo húmedo es la temperatura que alcanza el aire en el equilibrio a la salida del túnel cuando se le aporta agua que se evapora a dicha temperatura de saturación, la cámara está térmicamente aislada, de forma que el proceso es esencialmente adiabático. El aire que pasa a través de la cámara se enfría y humidifica.

Siempre que el gas que entra en la cámara no esté saturado, la temperatura de saturación adiabática es menor que la temperatura del gas a la entrada. La temperatura de bulbo húmedo del aire que entra en el estado 1 ( $w_1, t_1$ ) puede medirse sumergiendo un termómetro en el agua del sumidero de la **fig.3.4**. porque cuando se alcanza el estado estacionario, la temperatura del aire que sale del “saturador adiabático” se considera igual a la temperatura del bulbo húmedo del aire. Lewis<sup>31</sup> comprobó que en atmósferas de aire y para otros vapores distintos del vapor de agua, la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura del aire después de la saturación no son necesariamente idénticas. Sin embargo para el caso de las mezclas aire-vapor de agua es una coincidencia que **la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura después de la saturación adiabática sean casi iguales**. Por lo que se le considerara igual dentro de este trabajo.



El proceso de saturación adiabática es un proceso de temperatura de bulbo húmedo constante (fig.3.5) Estas líneas de temperatura de bulbo húmedo graficadas sobre una carta psicrométrica pudieran coincidir con las de entalpía constante. Lo que significaría que el proceso de saturación adiabático es un proceso isoentálpico. Sin embargo esto no es exactamente cierto, dado a que el balance térmico para 1kg de aire seco dentro del saturador adiabático nos daría,

$$h_1 + (W_2 - W_1)h_w = h_2$$

Donde  $h_w$  sería la entalpía del agua de reposición a la misma temperatura que el agua del sumidero. Por lo que al final del proceso se tendría una desviación de la entalpía. La entalpía que sale supera a la del aire que entra en la cantidad de  $(W_2 - W_1)h_w$ .

<sup>31</sup> Lewis, W.K. The evaporation of a Liquid into a Gas, ASME, vol.44 vol.55, p.1567.Septiembre, 1933.

### 3.5 El Diagrama Psicrométrico

El diagrama psicrométrico es la representación grafica de los cambios de estado de la mezcla aire-vapor de agua, obtenidos mediante balances de masa y energía resueltos por la termodinámica a presión atmosférica. Como se ha dicho, la mezcla aire húmedo (aire seco y agua), precisa para la completa caracterización de su estado tres variables (ver 2.2) lo cual complica su representación en un plano. Sin embargo considerando a una presión total normalizada, (a presión atmosférica, 1atm, 101.325KPa) ya solo resta representar únicamente dos variables independientes. El cálculo manual de las ecuaciones presentadas es complicado, razón por la que se han ideado una serie de diagramas del aire húmedo definidos para una presión total determinada, que pueden representar distintas condiciones y fases del agua en su mezcla con el aire seco que por medio de dos variables psicrométricas pueden obtenerse el resto.

#### Diagrama de Carrier (T-W)

Este diagrama es válido únicamente para mezclas homogéneas de agua y aire seco, es decir que el agua sólo participa en fase vapor. Las coordenadas del diagrama son la temperatura de la mezcla aire-vapor en el eje de las abscisas y la humedad específica (ó la presión de vapor) en las ordenadas. Calculada como humedad relativa al 100% marcando la curva de saturación, pudiéndose obtener la humedad del aire saturado en función de su temperatura.

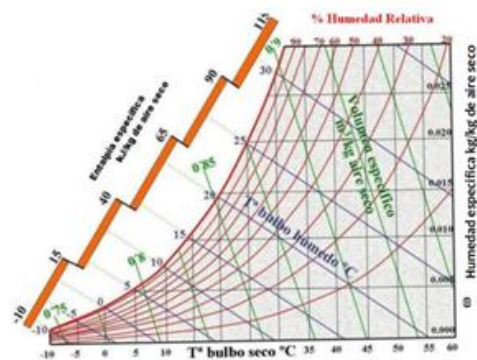
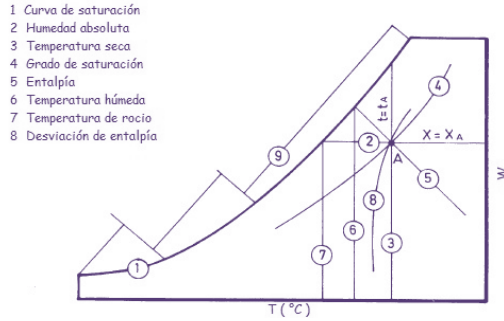


Fig 3.6 Diagrama y componentes de un diagrama Psicrométrico.

La línea de saturación se traza en la carta a partir de las tablas de vapor de agua. Los puntos que se localicen a la izquierda de la curva, indicaran mezclas de aire con agua en estado líquido al 100% de humedad relativa, y la aparición del punto de rocío. Los puntos ubicados a la derecha de la curva de saturación definirán una mejor mezcla de aire y vapor de agua en condiciones más estables. La figura 3.6 nos muestra los componentes que contiene un diagrama psicrométrico.

Si el vapor se enfría a presión constante, alcanzará entonces la línea de saturación llegando a la condensación. Se considera que la mezcla aire-vapor de agua se comporta de manera ideal, a una presión del vapor de agua dada, la cual es ahora su presión parcial en la mezcla, la condensación ocurre a la misma temperatura que ocurriría si estuviera presente el aire.<sup>32</sup> Cuando un punto de la carta psicrométrica que representa el estado del aire se encuentra sobre la línea de saturación, se dice que el aire esta “saturado” al 100%.

<sup>32</sup>Stoecker,W.F. Refrigeración y Acondicionamiento de Aire. McGraw-Hill. EUA. 1958.



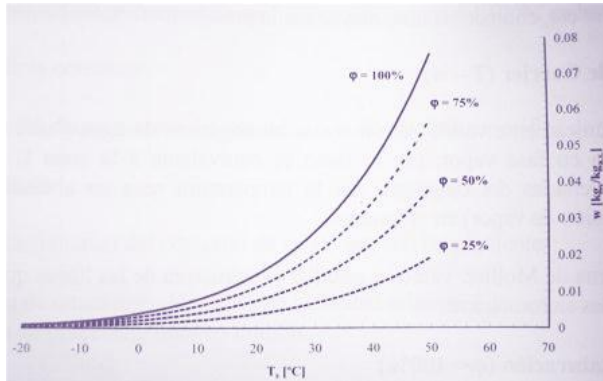
**fig.3.7** Diagrama Psicrométrico de "Carrier". Curva de Saturación. No.1 T (°C) vs W (kgv/kg.a.s.)  
 Fuente: Fuente: Manual de climatización. 2005.

### Líneas de humedad relativa constante

De la definición de humedad relativa,

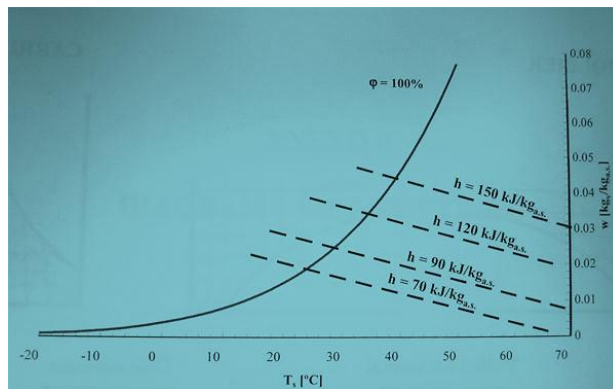
$$\varphi = \frac{\text{Presión parcial de vapor de agua en la mezcla}}{\text{Presión de saturación del agua pura a la misma temperatura}}$$

Las líneas de humedad relativa constante se trazan dentro de la carta dividiendo segmentos verticales comprendidos entre la línea de saturación y el eje de las abscisas.



**Fig.3.8** Líneas de humedad relativa constante. Temperatura seca (°C) vs W (kgv/kg.a.s.)  
 Fuente: Fuente: Manual de climatización. 2005.

### Líneas de entalpía constante



**Fig.3.9** Representación de las líneas Isoentálpicas.  
 Fuente: Fuente: Manual de climatización. 2005.

La entalpía toma la forma de,

$$h = C_{pa}T + w(\lambda + C_{pv}T)$$

Despreciándose el calor sensible del vapor frente al latente de vaporización ( $\lambda \gg C_{pv}T$ ), por lo que puede llevarse a cabo su simplificación,

$$h \approx C_{pa}T + w\lambda$$

Despejando la temperatura de bulbo seco;

$$T = \frac{h - w\lambda}{C_{pa}}$$

Esta expresión dentro del diagrama psicrométrico corresponde a una recta para entalpía constante<sup>33</sup>. Por lo que las líneas isoentálpicas son rectas de pendiente constante tal como se representan sobre la fig.3.9

La temperatura del punto de rocío depende únicamente de la presión parcial de vapor, por lo que se podría agregar una tercera escala en el eje de las ordenadas con la temperatura de rocío. Sin embargo por comodidad se representa dicha temperatura sobre la línea de saturación, es decir considerando humedad relativa = 100%. Dado a que con  $\phi = 100\%$  coinciden  $T_{bs} = T_r = T_{bh}$

### Procesos dentro del diagrama psicrométrico

Para una mejor comprensión, los procesos termodinámicos realizados por el aire se representan gráficamente en la carta psicrométrica 3.10 los cuatro procesos clásicos (enfriamiento y calentamiento con aumentos o reducciones en la humedad presente). Analizando los cambios en las propiedades, temperatura, relación de humedad y entalpía, para el cambio de estado dado.

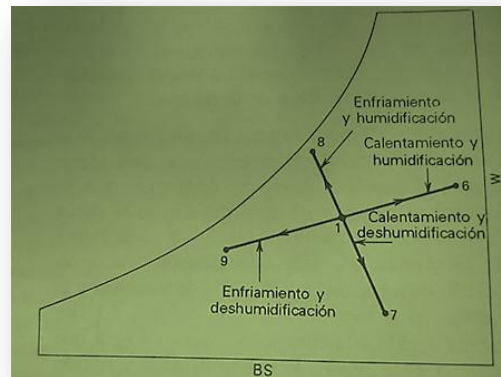


Fig.3.10 Procesos con variaciones de temperatura y humedad específica.

**3.6 Calentamiento o enfriamiento sensible.** Consiste en una variación de la temperatura de bulbo seco sin alterarse la relación de humedad. Es decir se corre a través de una línea de  $\phi$  constante. Para procesos de transferencia de calor, el **calor sensible** ( $Q_s$ ) se refiere a aquel que recibe o pierde un cuerpo, aumentándose o disminuyéndose su temperatura sin afectar su estructura molecular y por lo tanto su "estado". Este calor sensible depende directamente de la masa (M) y el calor específico (Cp) que es una propiedad de la materia que indica la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un grado referida a una masa específica de material; el calor sensible está representado por la relación:

$$Q_s = mC_p\Delta T$$

<sup>33</sup> Torrela Alcaraz Enrique et.al. Manual de climatización. Ed.Madrid. 2005.

En donde  $\Delta T$  es el incremento o decremento de la temperatura del cuerpo que sufre un cuerpo por la diferencia entre su temperatura final menos la temperatura original que tenía este. El subíndice “p” del calor específico indica que esta propiedad se da a presión constante.<sup>34</sup>

**3.7 Calor o enfriamiento latente.** Es el calor cedido o absorbido al evaporar o condensar la humedad del aire sin variación de temperatura. El **calor latente** es la energía “escondida” requerida para lograr un cambio de fase, de sólido a líquido (calor de fusión) o de líquido a gaseoso (calor de vaporización), o el liberado en dirección contraria donde se libera la misma cantidad de energía como en la condensación (vapor a líquido), en la solidificación (líquido-sólido), o bien durante sublimación (sólido-vapor), etc. Este calor es específico para cada sustancia, varía muy poco con la temperatura y se llevan a cabo a presión constante. Al calor latente se le representa con una  $\lambda$  y sus unidades son de calor por unidad de masa.

$$Q_L = m \lambda$$

$\lambda$  = calor latente de vaporización del agua =  $2.257 \times 10^6$  J/kg o bien 539 kcal/kg

$C_A$  = calor específico del agua =  $4.1813 \times 10^3$  J/kg°C

En el bulbo húmedo del psicrómetro, se establecen los dos flujos de calor claramente, el calor sensible entra al contacto con el aire y el otro latente hacia el exterior, provocado por la evaporación del líquido presente en la gasa. En un proceso continuo como sería el de la evaporación adiabática, todo el calor transferido hacia la gasa se utilizaría para vaporizar la masa del líquido.<sup>35</sup>

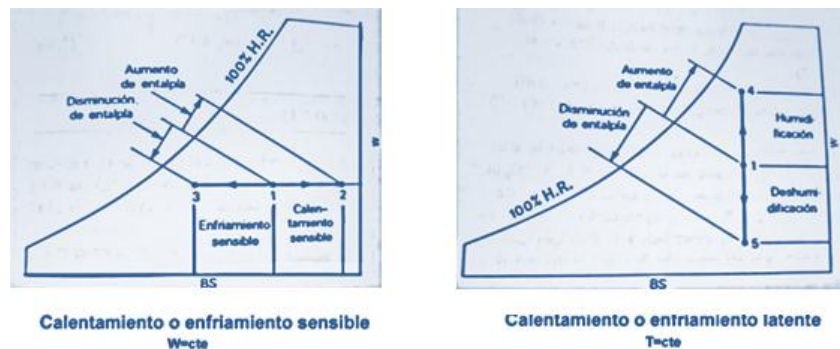


Fig.3.11. Variaciones de calor sensible vs latente

Fuente: Manual de climatización 2005

A la izquierda de la figura 3.11 se muestra los desplazamientos que se tienen durante un calentamiento o enfriamiento sensible, donde existe una variación de temperatura, y el punto en el que estamos se mueve a la izquierda o derecha dependiendo lo que demande el proceso. A la derecha se muestra un proceso de enfriamiento o calentamiento latente, donde no existe cambio de temperatura, por lo que la transformación se da a lo largo de una misma isoterma variando la humedad específica, en lo que pudiera existir cambios de fase.

**Humedecimiento adiabático o no adiabático.**

El humedecimiento puede ser adiabático como se muestra en la figura 3.12 siendo un proceso a

<sup>34</sup> Pilatowsky,2002

<sup>35</sup> Pilatowsky,2002

temperatura de bulbo húmedo constante de 1-2. Si el agua se calentara por medios externos, entonces resultaría en un proceso 1-3 no adiabático.

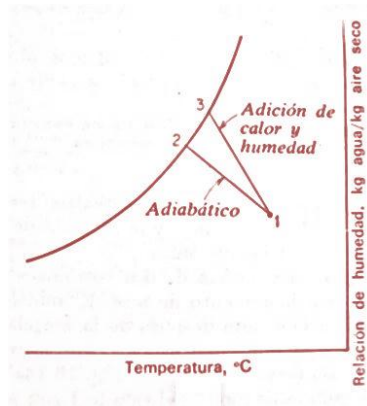


Figura 3.12. Enfriamiento por humedecimiento adiabático.

### 3.8 Entalpía Potencial

La “Entalpía potencial” es la fuerza impulsora que hace pasar al calor del aire no saturado a una superficie mojada. La entalpía potencial es la diferencia entre la entalpía del aire no saturado y la entalpía del aire saturado a la temperatura de la superficie mojada.

Dentro del intercambio energético que se produce en procesos con aire húmedo coexisten transferencias de calor y de masa de vapor de agua. Donde en el balance energético total se integran dos componentes, una sensible debido a la diferencia de temperaturas y otra latente de intercambio de masa de agua. La fuerza que hace pasar al calor sensible de un cuerpo a otro es la diferencia de temperaturas de bulbo seco. En la transmisión de calor entre el aire saturado y una superficie mojada está presente otra fuerza latente que se da por la diferencia de presiones del vapor que origina una transferencia de masas. La transferencia de masas se manifiesta entonces por la evaporación del líquido o por la condensación del vapor de agua del aire.<sup>36</sup>

Múltiples procesos de refrigeración y acondicionamiento de aire se realizan entre aire no saturado y una superficie mojada. Basados en la “entalpía potencial”. Torres de enfriamiento, condensadores evaporativos, lavadores de lluvia o de placa para calentamiento o enfriamiento de aire utilizan siempre este potencial basados en el contacto con una superficie mojada.

#### Calor total transmitido

La cantidad total de energía transmitida  $dQ_t$ , en Cal/hr, desde el aire no saturado hasta la superficie mojada, es la suma del calor sensible transmitido  $dQ_s$  y del calor latente transmitido  $dQ_l$ <sup>37</sup>

$$dQ_t = dQ_s + dQ_l$$

<sup>36</sup> Stoecker, W.F. Refrigeración y Acondicionamiento de Aire. McGraw-Hill. EUA. 1958.

<sup>37</sup> Mardomingo Jimeno, Antonio. Fundamentos de aire acondicionado. Biblioteca Técnica Universitaria. Madrid. 1998



### Calor sensible transmitido

La cantidad de calor sensible  $dQ_s$  que pasa a través de la película de aire es,

$$dQ_s = f_g(t - t_s)dA$$

$f_g$  = Coeficiente de transmisión de calor a través de la película de aire. Cal/h\*m<sup>2</sup>\* °C

t-t<sub>s</sub> = Diferencia entre la temperatura del aire no saturado t y la temperatura de la superficie mojada t<sub>s</sub>

dA = superficie, m<sup>2</sup>

### Calor latente transmitido

La cantidad de calor latente transmitido  $dQ_l$  se da por la ecuación,

$$dQ_l = h_{fg}(dw)$$

$h_{fg}$  = Entalpía de evaporación en Cal/kg a la temperatura de evaporación.

dw = Peso del agua condensada o evaporada en kg/hr.

$h_{fg}$  = Calor latente de vaporización a la temperatura de la superficie mojada,

(ya que el vapor de agua debe enfriarse a esta temperatura antes de que se condense).

Toda la humedad condensada o evaporada debe pasar a través de la película de aire por difusión, así

$$dw = k'(p - p_s)dA$$

$k'$  = Es la constante de difusión en kilogramos por hora por metro cuadrado (kg /hr\* m<sup>2</sup>) por kg /cm<sup>2</sup> de diferencia en la presión de vapor entre el aire y la superficie mojada.

$p$  = La presión de vapor del aire no saturado (kg /cm<sup>2</sup>)

$p_s$  = La presión de vapor de la superficie mojada.

Como la relación de humedad ( $W$ ) es proporcional a la presión del vapor de agua ( $p$ ) si la presión barométrica permanece constante, el término  $k'(p - p_s)$  puede bien remplazarse entonces por la expresión  $k(W - W_s)$ .

$k$  = Designa la constante de difusión en  $\frac{kg}{hr * m^2}$  y por unidad de diferencia de relaciones de humedad.

La relación de humedad del aire no saturado  $W$ , kg de humedad por kg de aire seco.

La relación de humedad del aire saturado a la temperatura de la superficie mojada  $W_s$ , kg de humedad por kg de aire seco.

Sintetizando se tiene que la ecuación de la transmisión de calor latente es, <sup>38</sup>

$$dQ_l = k(W - W_s)h_{fg}dA$$

Entonces el flujo energético total estaría dado por la suma de calor sensible y latente,

$$dQ_t = dQ_s + dQ_l = f_g(t - t_s) + k(W - W_s)h_{fg}$$

---

<sup>38</sup>Stoecker, W.F. Refrigeración y Acondicionamiento de Aire. McGraw-Hill. EUA. 1958.

La introducción de la relación de Lewis<sup>39</sup> permite considerar para el proceso de saturación adiabático que  $k$  es igual al coeficiente pelicular de transmisión de calor  $f_g$  dividido por el calor específico a presión constante del aire húmedo.

$$f_g = k C_p ; c_p = c_{pa} + w c_{pv}$$

Por lo que la expresión del flujo total se convierte en:

$$dQ_t = k [c_p(t - t_s) + (W - W_s)h_{fg}]$$

Para entender de mejor manera el concepto de entalpía potencial y el sentido en que fluye  $dQ_t$  en cualquier proceso se tiene la fig.3.13

A, sería el estado que guarda el aire. Temperatura de 30°C, con una humedad relativa del 45%.

Esa masa de aire, se hace pasar por una pared mojada como lo muestra la figura, humedeciéndolo hasta a entalpía constante.

El agua se encuentra sobre la línea de saturación a 100% HR. a una temperatura de 18°C.

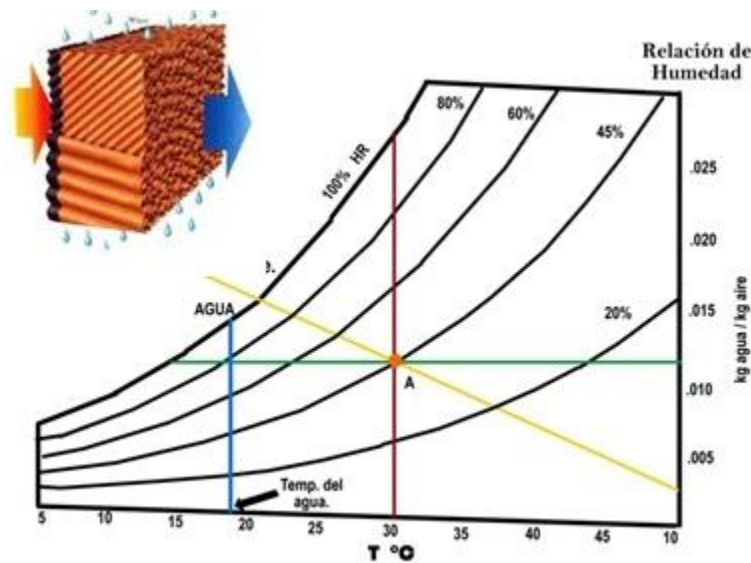


fig.3.13 Flujo de calor latente y calor sensible

$dQ_s \rightarrow$  El calor sensible pasaría del aire al agua. Porque  $t_{aire} > t_{agua}$

$dQ_l \rightarrow$  El calor latente fluiría del agua al aire. Porque  $W_{aire} < W_{agua}$

$dQ_t \rightarrow$  El calor total fluiría del aire al agua. Porque  $h_{aire} > h_{agua}$

y porque,

$$dQ_t = dQ_s + dQ_l$$

<sup>39</sup> Torrela Alcaraz Enrique et.al. Manual de climatización. Ed.Madrid. 2005.

### 3.9 Humidificación y Enfriamiento

La humedad como ya vimos, es la cantidad de vapor de agua presente en una unidad de masa o de volumen del aire (g/kg o g/m<sup>3</sup>). La humedad relativa es el modo más sencillo y útil de expresar la humedad, ya que nos da referencia de manera más clara a la capacidad de evaporación que tenemos en un medio. La máxima cantidad de humedad que el aire puede contener se da por su punto de saturación función de la temperatura a la que se encuentre.

El bienestar térmico, que implica una ausencia de cualquier sensación de incomodidad o malestar térmico es directamente dependiente del grado de humedad presente. El aire caliente y húmedo sofoca, comparado con el aire caliente y seco. Por ello es que el factor de humedad presente incide en el diseño de las edificaciones. En climas cálidos y húmedos se requiere de circulación de aire, al igual que la posibilidad de deshumidificar el aire. El secado de aire muy húmedo produce sensación de enfriamiento fisiológico, más que un efecto físico real. Esto se debe a que la alta humedad satura el medio e impide al hombre manejar su proceso natural de enfriamiento, el hombre ve impedida la posibilidad de la evaporación de su transpiración, con lo que el sudor se aloja sobre la piel y no evapora para enfriar el cuerpo, reduciéndose la tolerancia a soportar temperaturas más altas.<sup>40</sup>

Existen distintos métodos por medio de los cuales se puede humidificar el aire. Una masa de aire puede ponerse en contacto con líquidos, sólidos húmedos o bien con masas de aire húmedo. La mayoría de los métodos son bastante sencillos.

#### Humidificación por mezcla de gases

Se puede tener humidificación al mezclar masas de gases con distintos porcentajes de humedad. La condición final de la masa gaseosa resultante se puede evaluar a partir de las condiciones iniciales de sus componentes. En donde tendremos un balance de masa y humedad dado por:

$$W_A * M_A + W_B * M_B = W_C * M_C$$

Las condiciones del aire húmedo resultante se pueden encontrar en una recta dentro del diagrama psicrométrico y sería el resultado de la unión de dos puntos, un punto bajaría de temperatura y condiciones de humedad, y el otro aumentaría su temperatura y humedad llegando a un punto intermedio. Fig.3.13

#### Humidificación evaporativa por adición de un líquido.

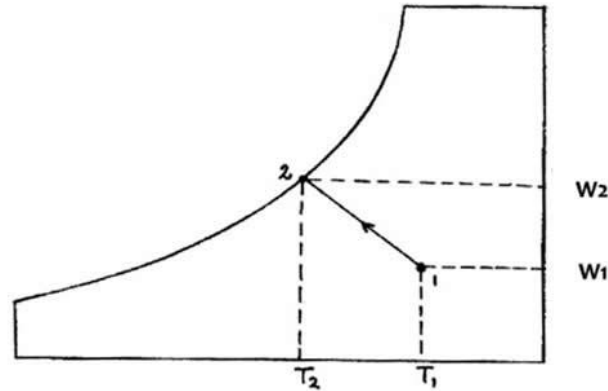
La adición de un líquido provoca que la masa gaseosa disminuya su temperatura, ya que el aire cede su calor sensible al líquido provocando su evaporación, por lo que se produce un enfriamiento. El abatimiento de la temperatura es mucho más rápido con el contacto de un líquido que con un vapor debido a la importante diferencia entre el calor latente de vaporización del líquido y el calor sensible del vapor. La ecuación que representa la transferencia de energía en una humidificación evaporativa:

$$h_1 + (W_2 - W_1)h_w = h_2$$

donde,  $W_2$  y  $h_2$  son la humedad y entalpía de la mezcla resultante

---

<sup>40</sup> Morillón, 2002



Representación de un proceso de humidificación adiabática.

Fig.3.14 Representación de un proceso de humidificación adiabática.

Fuente: Pilatowsky,2002

### Humidificación adiabática de una masa gaseosa por adición de un líquido.

La humidificación adiabática consiste en poner en contacto una masa gaseosa presente a cierta humedad con un líquido para alcanzar las condiciones de saturación adiabática (temperatura de bulbo húmedo). En este proceso se requiere de un calor latente que logre la evaporación del agua, este calor se obtiene aprovechando el calor sensible que pierde el aire, generando una disminución de la temperatura de bulbo seco.

La humidificación más efectiva se logra mediante un rociador, o haciendo pasar una corriente de aire por un medio que pudiera ser una película en constante hidratación. Como lo muestra la figura 3.14, si nos encontramos en el estado 1 con temperatura elevada y condiciones de humedad relativa baja, y lo queremos llevar a un estado 2, situado a una temperatura más baja pero a una condición de humedad mucho más saturada. Se tendría que hacer pasar el aire caliente por un humidificador adiabático que le ayude a alcanzar las condiciones de saturación al ponerse en contacto con un líquido a temperatura igual a la de saturación del aire. La adición del líquido provoca la disminución de la temperatura de la masa gaseosa, ya que el aire cede su calor sensible al líquido para provocar su evaporación, generándose el enfriamiento. Como ya vimos en la sección 2.4, existe transferencia de masa del líquido al aire, y el resto se mantiene en el humidificador a la temperatura de bulbo húmedo del aire.

### 3.10 Enfriamiento evaporativo adiabático.

El enfriamiento pasivo de edificios puede ser alcanzado de diversas maneras. Reducir los requerimientos de energía dentro del sector edilicio se logra desde la concepción y el diseño, considerando técnicas aplicadas al edificio que eviten o reduzcan su carga de refrigeración. Se debe favorecer el control solar, donde se asegure captación de luz natural pero minimizando las ganancias internas de calor mediante el sombreado de ventanas. Colores de fachada claros que reducen la capacidad de absorción de energía solar, aislar los muros de la construcción, etc. Una vez que se han tomado en cuenta estas técnicas bioclimáticas, y que aún no se alcanzan las condiciones de confort en los edificios, es entonces cuando el enfriamiento pasivo se presenta como estrategia en cualquier de sus sistemas; ventilación natural, ventilación nocturna, enfriamiento radiante, o bien el enfriamiento evaporativo directo o indirecto para alcanzar el confort de espacios arquitectónicos.

**El enfriamiento** es un proceso que involucra la descarga de energía en forma de calor de un cuerpo o un espacio, el cual puede ocurrir por medio de un abatimiento de la temperatura sin que el cuerpo sufra un cambio de estado físico a temperatura constante. Los posibles sumideros de calor del medio ambiente son el cielo, la atmósfera y el suelo. Existen tres tipos de enfriamientos:

**Enfriamiento radiativo**, la energía puede ser descargada a la atmósfera por diferencial de temperaturas.

**Enfriamiento conductivo**, la superficie y el espacio están expuestos directamente al medio de enfriamiento del ambiente.

**Enfriamiento convectivo**, transferencia de calor hacia una superficie que a su vez es enfriada por conducción directa al sumidero de energía.

**Enfriamiento evaporativo**, es el proceso de enfriamiento y humidificación, basado en rociar agua a una corriente de aire, el agua evaporada incrementa el contenido de vapor de agua en el aire, mientras que la no evaporada se recircula en los sistemas sin adicionar calor al exterior. La Temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ) del aire será más baja a la salida que a la entrada sin requerir alguna otra fuente externa de enfriamiento. Esto se debe al calor sensible cedido por el aire para lograr el proceso de vaporización, por lo que el calor latente para lograr la evaporación del agua se obtiene del aire disminuyendo la temperatura de este último. El proceso de enfriamiento evaporativo se lleva al cabo a entalpía constante, por lo que se le considera "adiabático", ya que a la mezcla gas-vapor no se le adiciona ni extrae calor. **El calor sensible del aire decrece y el calor latente del líquido aumenta en la misma medida.** Como lo muestra la figura 3.11.

El enfriamiento evaporativo adiabático es un fenómeno que está presente en todos los líquidos. A cualquier temperatura existe el fenómeno de evaporación y uno de sus efectos consiste en el enfriamiento del propio líquido durante este proceso. Todos hemos experimentado una sensación de "refresco" cuando después de alguna actividad física, decidimos "echarnos" aire con las manos o con una toalla. Aquí directamente estamos percibiendo el fenómeno en cuestión, ya que gran parte de nuestro sudor es agua y al dirigirle aire la estamos evaporando, lo que consigue refrescarnos.

El enfriamiento evaporativo se basa en el principio de pasar agua en estado líquido a la fase de vapor, creando una mezcla aire-agua. El aire que se encuentra por debajo del punto de saturación puede absorber humedad sólo en forma de vapor, provocando con ello un enfriamiento adiabático al ceder calor sensible al líquido para que este pueda evaporar. **Por lo tanto el límite de enfriamiento del aire lo fija la saturación, es decir el aire con 100% de humedad no tiene capacidad de enfriamiento; y el aire seco tiene la mayor**

**capacidad por unidad de masa de aire atmosférico.** En el diagrama psicrométrico nos desplazaríamos sobre una línea de **entalpía específica constante** hasta llegar a la línea de 100% de humedad, de acá el término **“adiabático”**.

**Este proceso de humidificación, invariablemente disminuye la temperatura.** Cuando el aire atmosférico (que contiene humedad) se calienta, el aire obtiene un estado de menor humedad relativa. Esto se representa en el diagrama psicrométrico (fig. 3.10) como una línea horizontal de humedad absoluta constante. Por el contrario, cuando el aire atmosférico se enfría, la humedad relativa se incrementa. Este proceso tiene un límite en el diagrama psicrométrico y es la línea de saturación. Si el aire se continúa enfriando, el vapor de agua que entra en desequilibrio en la mezcla, se condensa y forma rocío, y el proceso de enfriamiento de esta manera, implicará deshumidificación (pérdida de contenido de vapor de agua de la mezcla).

Las condiciones climáticas que presenta nuestro país demandan viviendas proyectadas de forma que permitan acondicionamiento térmico natural, adoptando medidas simples que deben ser elegidas y priorizadas antes de adoptar mecanismos artificiales. Una buena localización de la construcción, la elección de los materiales de construcción, las características arquitectónicas, el sombreado mediante elementos arquitectónicos ó mediante arboles, la ventilación natural y la forma como interactúa con su entorno son algunas de estas buenas medidas.

Sin embargo en ciertas regiones dichos medios naturales de acondicionamiento térmico puede que no sean suficientes para proporcionar el confort necesario, siendo necesario el empleo de medios “artificiales”. Es en este contexto donde los sistemas de enfriamiento por vía evaporativa pueden ser muy valiosos e importantes en regiones calientes para reducir la temperatura al interior de las construcciones. El sistema de enfriamiento evaporativo adiabático se obtiene mediante sistemas de nebulización, asociados a ventilación, haciendo pasar el aire en un material poroso humedecido (“padsystems”). Otro mecanismo se da mediante aire no saturado en contacto con una superficie líquida libremente expuesta, generándose el transporte simultaneo de calor y masa (sección 3.8).

### **3.10.1 Dispositivos del enfriamiento evaporativo adiabático**

El enfriamiento evaporativo es un proceso simple, y natural dado por mecanismos pasivos o activos que ofrece muchos beneficios. Dentro de los sistemas pasivos se requiere únicamente de estanques, fuentes o algún otro reservorio de agua al que se le ponga en contacto con masas de aire caliente.

Los sistemas activos del “Enfriamiento Evaporativo Adiabático” se basan en *climatizadores* que a diferencia de los acondicionadores de aire basados en ciclos de refrigeración (A/C), no emplean refrigerantes que pudieran llegar a ser dañinos para el medio ambiente. Ni tampoco consumen los elevados niveles de electricidad que demandan los A/C. Por ello, con el uso de estos equipos se obtienen importantes ahorros de energía, de recursos naturales, en la mayoría de los casos alcanzando el confort. Dependiendo de los equipos, se pueden alcanzar hasta un 80% de ahorros en costos relacionados con el funcionamiento y mantenimiento comparado contra acondicionadores de aire convencionales.

Beneficio adicional de los equipos de enfriamiento evaporativo, es la introducción y renovación de aire del exterior hacia los espacios que se busca refrescar, mejorando la temperatura, el contenido de humedad, la pureza y calidad del aire. Lográndose eliminar el calor, el CO<sub>2</sub> y cualquier otro contaminante generado por

las actividades que se llevan dentro del espacio. Este beneficio sustituye a la cíclica recirculación el mismo aire seco y viciado como lo hacen los A/C. Los climatizadores evaporativos filtran el aire y proveen un completo cambio de aire cada pocos minutos, lo cual sin duda es más saludable para los usuarios.

Los equipos empleados para abatir la temperatura mediante enfriamiento evaporativo adiabático pueden ser de tres formas:

- \*Nebulizadores
- \*Aspersores
- \*Placas evaporativas

Tanto los nebulizadores como los aspersores tienen como principio el rociar moléculas de agua en los espacios que se busca adecuar térmicamente, generándose el principio de evaporación adiabática por contacto, existiendo un cambio de fase y una caída en la temperatura del medio.

Por otro lado, los climatizadores evaporativos de “Placas” trabajan con un ventilador que impulsa aire del exterior del espacio a través de un empaque permeable, el cual es hidratado continuamente por una bomba, asegurándose que el proceso de evaporación del líquido y disminución de la temperatura en el sitio se lleven al cabo. Este tipo de equipos es el más común en el mercado, porque como no hay rociado de agua, no emplean pulverizadores, no hay riesgo de mojar superficies.

#### **Rociadores de agua fría.**

Un rociador de agua fría se basa en el mismo principio de los “coolers”, la diferencia radica en que el aire aspirado es rociado directamente por agua atomizada para lograr el efecto del descenso de la temperatura del aire seco. Además de bañar directamente al aire sin una película mojada a la que tenga que atravesar y mediante una placa que le separe las pequeñas gotitas que pudiera el aire arrastrar, los rociadores de agua se diferencian radicalmente en que el agua procedente de la bomba se enfría antes de que vuelva a las toberas de rociado. Si la temperatura del agua que se atomiza es inferior al punto de rocío del aire, se tiene además un desecado. Esta virtud los hace ideales para el acondicionamiento de aire de industrias donde el control de humedad es importante (plantas textiles, imprentas, etc.) La humedad puede ajustarse convenientemente variando la temperatura del agua de rociado. El inconveniente de estos equipos está en el gasto energético adicional para enfriar el agua.

Para predecir el funcionamiento de los lavadores de aire la mayoría de los fabricantes emplean un coeficiente de rendimiento. Un lavador de aire con un rendimiento del 100% es aquel capaz de entregar aire saturado a la temperatura del agua de salida.

$$\eta = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}$$

$\eta$  = Rendimiento del lavador de aire

$h_1$  = Entalpía del aire a la entrada del equipo, *Cal/kg*

$h_2$  = Entalpía del aire de salida, *Cal/kg*

$h_3$  = Entalpía del agua de salida, *Cal/kg*, considerando un rendimiento del 100%

### Climatizadores evaporativos de “Placas”

El enfriamiento evaporativo es un proceso en el cual el calor sensible de una corriente de aire es intercambiado por el calor latente de gotas de agua o superficies mojadas.

Los equipos de enfriamiento evaporativo de aire se clasifican en:

\* *Directos*, en los cuales la corriente de aire entra en contacto con agua líquida, incrementándose el contenido de humedad del aire.

\* *Indirectos*, en los cuales el aire es enfriado sin adición de humedad pasando a través de un intercambiador de calor, el cual usa una corriente secundaria de aire o agua que ha sido enfriada evaporativamente.

\* *Mixtos*, surgen de una combinación de las dos caracterizaciones anteriores.

La mayor parte de los equipos de refrescamiento evaporativo se clasifican propiamente como *híbridos*, debido a que se produce un enfriamiento considerable con el gasto de una cantidad relativamente pequeña de electricidad, que es utilizada para hacer funcionar pequeñas bombas que hidratan las superficies o atomizan el agua y ventiladores que forzan o inducen al aire a traspasar dichas húmedas barreras. Si bien el enfriamiento evaporativo es uno de los métodos más antiguos utilizados por el hombre para refrescar su entorno, este se abandonó y sustituyó durante mucho tiempo por sistemas de aire acondicionado convencionales, en la época actual este método se retoma ante el incremento en los costos energéticos y el problema de calentamiento global.<sup>41</sup>

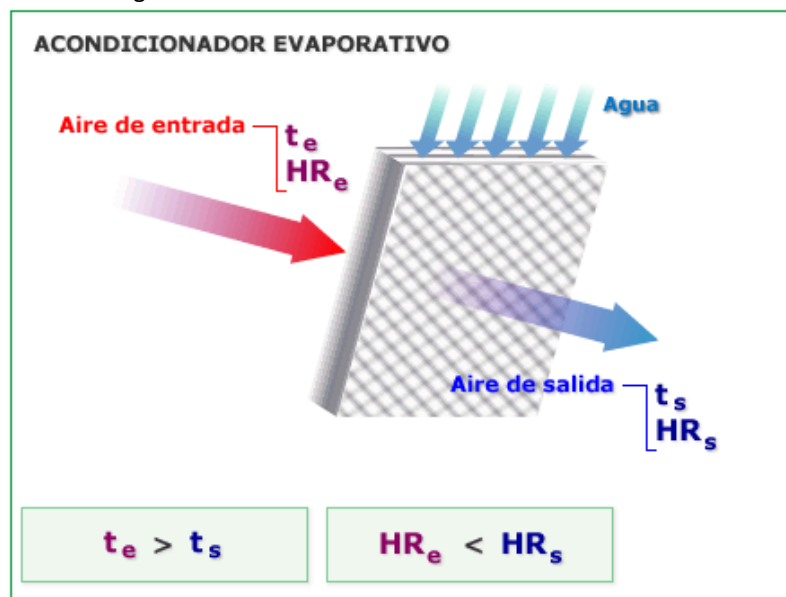


Fig. 3.15 Imagen de Superficie mojada por la que se hace pasar aire enfriándolo aumentando la humedad de este.

Los equipos evaporativos para el acondicionamiento de aire de “placas” denominados en algunas regiones como “coolers”, funcionan bajo el principio del enfriamiento adiabático dentro de un saturador de aire (ver sección 3.4.9). El aire “caliente” es forzado a circular por un ventilador que sopla o aspira aire a través del equipo, atravesando una “superficie mojada”. El aire a la salida del equipo se ha enfriado y si bien no arrastra gotitas de agua, tampoco se deseca, este ha ganado humedad. La figura 3.15 muestra la manera en que el proceso se lleva al cabo dentro de un diagrama psicrométrico. Este se da a temperatura de bulbo húmedo constante y es prácticamente isoentálpico, despreciando la desviación de entalpía (sección 3.4.9). El proceso que lleva al aire del estado 1 al 2, lo hace un proceso de humectación, donde la temperatura de

<sup>41</sup> World Bank Technical Paper. Energy Series. 1998



bulbo húmedo marca el límite de la temperatura más baja a la que se puede aspirar alcanzar. La gama de paneles humidificadores de celulosa tratada consta de dos tipos diferenciados por el rendimiento de enfriamiento y humidificación

La fig. 3.16 muestra un diagrama esquemático de un equipo de enfriamiento adiabático directo. El aire es forzado a entrar por el equipo mediante un ventilador, haciendo que el aire externo del lugar a acondicionar cruce una cortina húmeda, cediendo su calor sensible para evaporar el agua. A la salida del equipo el aire sale humedecido, y con una temperatura menor, pues esa energía se ha empleado para evaporar el agua y aumentar su HR%.

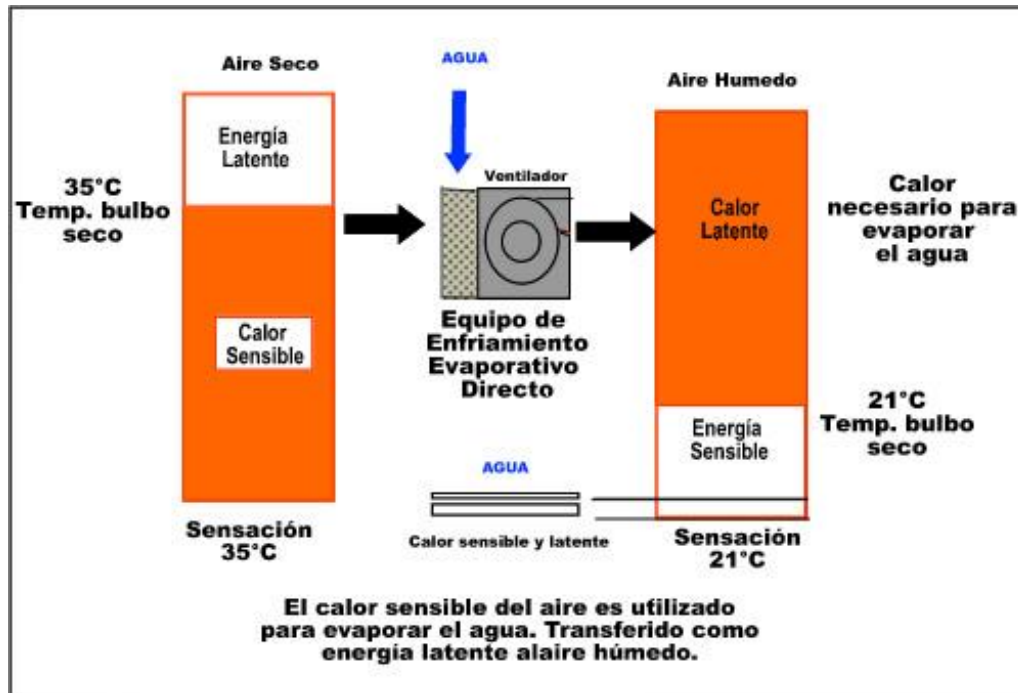


Fig. 3.16 Esquema de un equipo ("cooler") de enfriamiento evaporativo directo.

La capacidad de un "cooler" para saturar el aire es un indicador claro de su eficiencia. El término que define el rendimiento esta dado por la expresión,

$$\eta_h = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_s}$$

$\eta_h$  = Eficiencia para saturar el aire seco

$t_1$  = Temperatura de bulbo seco del aire a la entrada del equipo.

$t_2$  = Temperatura de bulbo seco del aire de salida.

$t_s$  = Temperatura de bulbo húmedo del aire

El potencial de reducción de temperatura presenta un comportamiento inversamente proporcional a los valores verificados para la humedad relativa (%HR), dado que entre mayor sean los valores de humedad relativa (%), más próximo se encontrara la saturación del ambiente, por tanto menores volúmenes de agua podrán ser absorbidos, reduciendo el potencial adiabático de decaimiento de la temperatura.

Los sistemas evaporativos utilizan como mecanismo de refrigeración la evaporación de parte del refrigerante, que toma el calor de cambio de estado (calor latente de vaporización) del resto de la masa, enfriándola. El agua, refrigerante evaporado se pierde en la atmósfera sin causar daños a personas incorporándose al medio ambiente cuya humedad relativa aumenta, siendo este su único impacto. Existe la limitante para estos sistemas en contados casos donde porcentajes altos de humedad resulten perniciosos para determinados procesos de trabajo.

Un humidificador es un aparato sencillo que cumple la función de aumentar el porcentaje de humedad de una habitación. Este aparato consta de un recipiente que se llena de agua y que a través de un sistema muy simple libera vapor, lo que permite humedecer los ambientes.

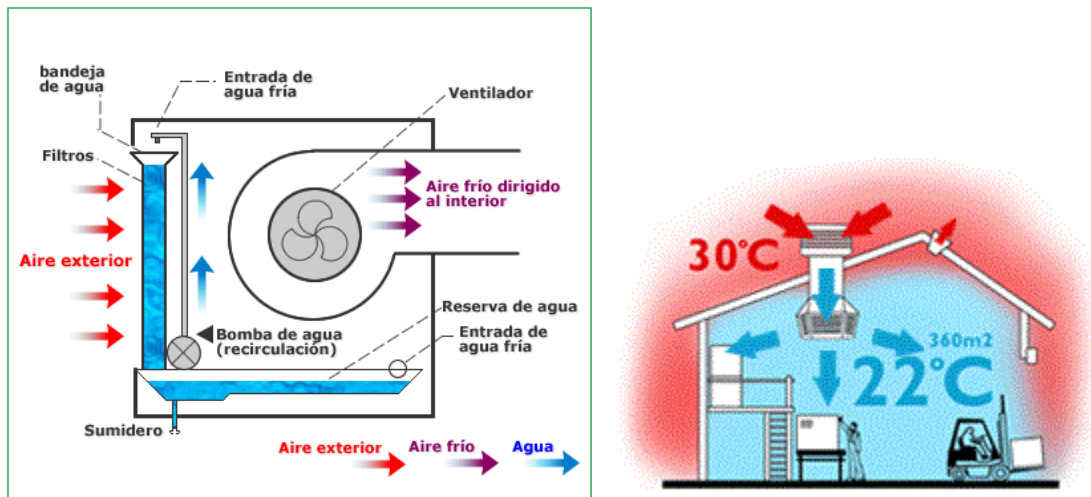


Fig. 3.17 Esquema de un equipo ("cooler") de enfriamiento evaporativo directo y su posible uso.  
fuente: <http://www.cleanair.co.uk/evaporative-cooling.php>

Los equipos de enfriamiento evaporativo adiabático proporcionan siempre aire fresco del exterior, condición que no se cumple con los equipos convencionales de aire acondicionado, además de generar enfriamientos a bajo costo, además de introducir para viviendas para el confort de los usuarios, en invernaderos o granjas de animales donde el control preciso de temperatura no es esencial, pero la disminución de temperatura ayuda a elevar la productividad de dichos proyectos. La compañía IMPCO estima consumos de agua para los equipos entre 6 y 452 litros por hora acorde a su capacidad, desde 3000 ft<sup>3</sup> hasta equipos de 42000 ft<sup>3</sup>.<sup>42</sup>

<sup>42</sup>IMPCO.Calculating evaporative cooler. <http://impc.com/>

*Capítulo IV*

*Metodología para la evaluación del Potencial del Enfriamiento Evaporativo Adiabático (PEA)*



## Capítulo IV

### Metodología para la evaluación del Potencial del Enfriamiento Evaporativo Adiabático (PEEA)

#### 4.1 Potencial del Enfriamiento Adiabático – PEA

Para obtener el Potencial de enfriamiento Evaporativo Adiabático (PEEA) para cualquier región, se calculó a partir de la ecuación utilizada por *Correa, De Rosa y Lesino (2007)*, que contempla la menor temperatura posible que se puede alcanzar mediante enfriamiento evaporativo adiabático, en búsqueda de alcanzar la sensación de confort para los usuarios de cierto espacio.

El potencial de enfriamiento evaporativo adiabático como vimos en la sección 3.3 es función de la presión de vapor del agua en el aire y este se incrementa notablemente cuando la diferencia entre la temperatura de bulbo seco y la de bulbo húmedo aumenta. Por lo que la eficacia de aplicación de un sistema de refrescamiento adiabático evaporativo depende fuertemente de la diferencia de estas temperaturas.

El Potencial de enfriamiento evaporativo adiabático (al que nos referiremos como PEEA) considerando una eficiencia del 100%, se obtiene entonces de la posible de reducción de temperatura del aire, equivalente a la diferencia entre la **Temperatura de bulbo seco** y la **Temperatura de Bulbo húmedo**. Ecuación 1.

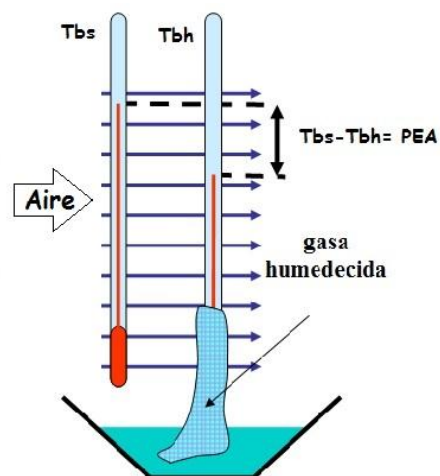
---

$$PEA = (T_{bs} - T_{bh}) \quad \text{ecuación 4.1}$$

Donde,

$T_{bs}$  = *Temperatura de bulbo seco.*

$T_{bh}$  = *Temperatura de bulbo húmedo.*



La temperatura de bulbo seco ha sido tomada a partir de datos medidos proporcionados por las “normales climatológicas” del Sistema Meteorológico Nacional del periodo 1961-1990.

Como estudiamos en la sección 3.4.8, existe la posibilidad de obtener la temperatura de bulbo húmedo, a partir de distintas variables.

Se puede obtener la temperatura de bulbo húmedo a partir de los coeficientes de transferencia de masa a través de la película de aire, considerando la trasmisión de calor por convección y el calor latente de vaporización para cada temperatura de humedad, lo cual complica un poco el cálculo.

$$T_{bh} = T_1 - \frac{K}{\alpha} \lambda^* (w_s - w_1)$$

Al no ser este un trabajo experimental, y tener como limitante que las “Normales meteorológicas” únicamente proporcionan la temperatura de bulbo seco, recurrimos para el cálculo de la temperatura de bulbo húmedo mediante la aplicación del método propuesto por Jensen, et.al (1990)<sup>43</sup>. El cual obtiene la temperatura de bulbo húmedo a partir de los datos de humedad relativa y temperatura de bulbo seco; Ecuación 2.

$$T_{bh} = (-5.806 + 0.672 * T_{bs} - 0.006 * T_{bs} * T_{bs} + (0.061 + 0.004 * T_{bs} + 0.000099 T_{bs} * T_{bs}) * HR + (-0.000033 - 0.000005 * T_{bs} - 0.0000001 * T_{bs} * T_{bs}) * HR * HR \quad (2)$$

$T_{bh}$  = Temperatura de bulbo húmedo

$T_{bs}$  = Temperatura de bulbo seco

$HR$  = Humedad Relativa (%)

El modelo fue probado en Mendoza, Argentina. Empleando datos de bulbo seco y humedad relativa medidos a través de unidades de monitoreo colocadas a lo largo de aquella ciudad. Generando datos modelados, con una aproximación del 98%.<sup>44</sup>

A partir de las “normales climatológicas” (1961-1990) utilizadas como valores de referencia del servicio meteorológico nacional de las más de 800 unidades se obtuvieron los datos de temperatura máxima y mínima media mensuales, y se conocieron los datos de mínimas y máximas extremos mensuales. Mediante el “Atlas del bioclima de México”<sup>45</sup>, y del modelo y software propuesto por Adalberto Tejeda se predijeron las propiedades psicrométricas, temperatura de bulbo seco, bulbo húmedo y humedad relativa horaria para los 12 meses del año.

<sup>43</sup> Jensen, et.al (1990)

<sup>44</sup> Correa et.al. 2007. Estudio del potencial de enfriamiento evaporativo adiabático dentro del área metropolitana de Mendoza, Argentina.

<sup>45</sup> David Morillón Gálvez. Atlas del bioclima de México. 2004.

El cálculo de la temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ), bulbo húmedo ( $T_{bh}$ ) y humedad relativa (HR %) para cada sitio estudiado de la República Mexicana ha sido desarrollado de manera horaria. De forma que los datos de PEA obtenidos se han procesado de igual forma para las 24 horas día; y de modo estadístico se ha dado una distribución media 200 localidades estudiadas.

El estudio presenta un periodo de tiempo de referencia comprendido por 13 horas, entre las 08:00hrs y 21:00hrs. Se consideró este horario por el interés de evaluar el potencial de enfriamiento durante el periodo con presencia de mayor incidencia solar. Por las noches la humedad se incrementa, disminuyendo la eficiencia de los sistemas de enfriamiento evaporativo, además de ocasionar efectos no deseados. Se evaluó para este periodo el potencial de enfriamiento que existe en las 4, 745 horas comprendidas en los 365 días del año para este periodo.

Se evaluó entonces para cada estación del año, los momentos de mayor efectividad que pudieran tener los dispositivos “coolers” que trabajan beneficiándose del Potencial Evaporativo Adiabático.

Cabe señalar que la temperatura de bulbo húmedo es el factor climático más importante a considerar en todos los sistemas evaporativos de enfriamiento. Esto debido a que la temperatura de bulbo húmedo ( $T_{bh}$ ) es la temperatura más baja a la que teóricamente es factible enfriar el aire mediante evaporación ( $T_{bs}-T_{bh}$ ) por método directo o indirecto.<sup>46</sup>

El Potencial Evaporativo Adiabático (PEA) que significa la diferencia entre la temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ) y la de bulbo húmedo ( $T_{bh}$ ) conocida también como “**depresión de bulbo húmedo**” ( $dT_{bh}$ ), es la cantidad **máxima teórica** factible a reducir la Temperatura de bulbos seco ( $T_{bs}$ ) mediante la aplicación del enfriamiento evaporativo adiabático. Ecuación 4.

$$T_{bs} - T_{bh} = dT_{bh} \quad (3)$$

En la realidad esta reducción teórica no se logra al cien por ciento, debido principalmente al diseño y la eficiencia de los dispositivos pasivos o activos que tienen la función de lograr el “Enfriamiento Evaporativo Adiabático”. No se tienen eficiencias altas por la relación de pared mojada que deben tener los empaques, o telas que empujan estos, y la caída de presión presente en el sistema. Givoni considera que la temperatura de salida de un dispositivo de enfriamiento evaporativo se encuentra entre el 20 y el 30 % de la diferencia de  $T_{bs}-T_{bh}$  por encima del  $T_{bh}$ .

Aunado a esta consideración, la temperatura del aire de salida del dispositivo (20-30% cercana a  $T_{bh}$ ) al mezclarse con la del aire interior de la edificación es elevada de 1 a 3 °C. Consecuentemente Givoni habla de que el enfriamiento evaporativo directo puede ser aplicado únicamente en regiones y/o temporadas, **donde la  $T_{bh}$  del ambiente no supere los 22°C.**

Por lo que si típicamente el enfriamiento evaporativo directo de una fase (single stage) opera a 20 o 30% de  $dT_{bh}$ , para el estudio hemos evaluado el teórico PEA máximo posible que se podría alcanzar al 100% y otro real dado por las limitantes existentes y el diseño de los equipos, que sería el enfriamiento alcanzado los

---

<sup>46</sup> Givoni, B.1994

mecanismos para lograr acercar la temperatura de bulbo seco a la de bulbo húmedo aproximadamente entre un 70 y 80% de la diferencia que hay entre ellas. Ecuación 4.

$$PE_{E1} = (0.2 * dT_{bh}) + T_{bh}$$
$$PE_{E2} = (0.3 * dT_{bh}) + T_{bh} \quad (4)$$

Por lo general la velocidad del aire cuando se requiere a ventilación natural debe llevarse al cabo a bajas velocidades para lograr el confort de los usuarios. Si la temperatura es alta y la humedad relativa (HR%) es baja nos sentiremos demasiado secos y calientes. La presión de vapor se mide por la cantidad de vapor de agua que contiene la atmosfera, se siente una sensación de opresión si la presión del vapor supera los 15mmHg. Se requiere aumentar en promedio 1km/hr por mmHg adicional a la presión de vapor, con la presencia de humedad relativa mayor a 70% se requieren vientos de 1.42 m/s para contrarrestar la presión de vapor<sup>47</sup>. En este caso los vientos no ayudan demasiado. El frío por evaporación es entonces el elemento adecuado para combatir las altas temperaturas.

En el enfriamiento evaporativo se reduce la temperatura del aire en un 70-80% sobre la depresión de la temperatura de bulbo húmedo y el contenido de vapor de agua es elevado. El enfriamiento evaporativo directo involucra altas tasas de flujo de aire del exterior, debido a la alta humedad del aire enfriado.

El promedio de la temperatura típica dentro de un edificio bien aislado se encontrara 1-2°C por arriba de la temperatura de salida de un enfriador evaporativo, por lo que los efectos contrarios al confort provocados por una elevada humedad dentro de espacios construidos y las altas velocidades asociadas al enfriamiento evaporativo directo llevan a la consideración hecha por Givoni, en el sentido de sugerir que el enfriamiento evaporativo es admisible solo cuando y donde la Temperatura de Bulbo Húmedo máxima sea de 22°C, 24°C para casas perfectamente aisladas y la temperatura de bulbo seco de 42°C-44°C . Incrementar la velocidad y los volúmenes de aire desplazados significaría aumentos en consumo de energía y dinero en deshumidificar el ambiente.

---

<sup>47</sup> Givoni, B. 1994. *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*.

## 4.2 Adquisición de datos.

Por etimología, “clima” se refiere a la inclinación de los rayos solares respecto a la superficie terrestre. Por ello se entiende que desde su origen, el concepto de clima se encuentra muy estrechamente ligado con el de “latitud”<sup>48</sup>.

Por lo que se denomina “clima” al proceso resultante de la interacción, en término de masa y/o energía, entre la superficie terrestre y la atmósfera, determinado por el reparto desigual de la energía solar que recibe nuestro planeta. El clima es uno de los factores que afectan directamente al confort del hombre, a sus condiciones de trabajo, de esparcimiento de descanso, impactando en la salud de este.

Es la meteorología la ciencia dedicada al estudio del cambio cotidiano de las condiciones atmosféricas, a partir de sus causas físicas. El interés de este trabajo fuera de medias estadísticas, busca centrarse en las condiciones climatológicas, y la forma como estas inciden directamente en el funcionamiento del individuo humano dentro de su desarrollo social.

México únicamente cuenta con 80 observatorios meteorológicos que cuentan con datos horarios de temperatura y humedad relativa (HR) o temperatura de bulbo húmedo. Son las estaciones climatológicas (cercas a mil) de las que se obtienen las normales climatológicas, las cuales se limitan a temperaturas extremas, precipitación pluvial y grado de evaporación. La base del presente trabajo se desarrolla a partir de las cerca de 800 estaciones meteorológicas del país, con información del periodo de 1961-1990, de donde se seleccionaron aleatoriamente 200 ciudades de las que se obtuvieron temperaturas máximas y mínimas medias mensuales, con el objetivo de obtener las humedades relativas y temperaturas horarias de bulbo húmedo y bulbo seco para obtener el posible potencial de enfriamiento evaporativo adiabático.

Las normales climatológicas para el periodo 1961-1990 generada por el servicio meteorológico nacional mediante estándares internacionalmente normados y estandarizados. Las normales climatológicas brindan la posibilidad de conocer de datos medidos:

\*Temperaturas: valores mínimos, medios y máximos, mensuales de las localidades que cuentan con monitoreo.

\*Precipitación: total, precipitación apreciable, evaporación total, días con tormentas eléctricas, presencia de granizo y días con niebla.

Las estaciones meteorológicas realizan mediciones de temperatura máxima, mínima y media, pero no de temperaturas horarias. Para determinar dicha evolución horaria a partir de los datos de temperatura máxima media y temperatura mínima media., se recurrió indirectamente mediante cálculo con nomogramas. Generando datos suficientemente precisos para el grueso del diseño bioclimático. Dichos datos presentan datos muy cercanos a los reportados por otras bibliografías. Se empleó al modelo de Adalberto Tejeda<sup>49</sup> para evaluar la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa a lo largo de las 24 horas del día, para todo el año, generados a partir de los datos promedio mensuales de máxima, media y mínima aportados por las normales climatológicas.

---

<sup>48</sup> Tudela.1983

<sup>49</sup> Tejeda, A. (1991). Simulación de la marcha diaria del confort higrotérmico en la República Mexicana. Memorias de I Encuentro Nacional de Diseño y Medio Ambiente Universidad de Colima-CFE pp167-172.



El modelo genera la evolución horaria de un día típico de cada mes a partir de los datos mensuales de máxima y mínima medias basándose en el nomograma propuesto por M Evans en 1980 (fig 4.1) con una buena aproximación a los datos reales.

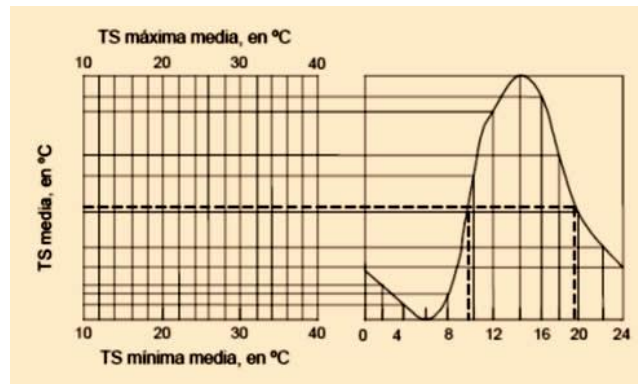


Fig. 4.1 Nomograma para interpolación de temperaturas horarias.  
Fuente: Nomograma propuesto por M.Evans (1980)

La información climática de este trabajo procede de las temperaturas y humedad relativa horarias obtenidas mediante el simulador del Atlas del Bioclima en México del Doctor Morillón y del software de Adalberto Tejeda. El modelo trabaja mediante el ingreso de las medias de los datos medidos de las normales climatológicas de temperatura máxima y mínima. Con un error de 0.8 °C a 98% de confiabilidad en temperatura y un error de 5% en HR a 95% de confiabilidad. Los datos generados fueron comparados contra el software Mardia, presentando diferencias muy pequeñas que nos permiten asegurar que la precisión de los resultados, hacen solvente su uso dentro del diseño bioclimático. El modelo y software permite tapar el vacío de información disponible en el país referente a información higrotermica horaria media mensual.

### 4.3 Determinación de energía máxima extraíble al aire.

El cálculo de la energía máxima extraíble a una corriente de aire identifica con mayor claridad el potencial de enfriamiento evaporativo adiabático. Este modelo lo emplea Torres Campos y su equipo de trabajo de Mandingá, Brasil. Esta energía se puede determinar mediante las presiones parciales del vapor para cada temperatura y la temperatura de bulbo húmedo, la cual es la máxima a la que puede descender la temperatura mediante esta técnica<sup>50</sup>.

Para calcular la cantidad de energía máxima extraíble del aire, se requiere conocer su temperatura de bulbo seco (TBS) y Humedad Relativa (%HR). La cantidad máxima a evaporar de agua implicaría que la humedad relativa llegara al 100%, por lo tanto, la energía requerida para llegar al punto de saturación mediante la evaporación de agua es la cantidad posible que se puede extraer de calor al aire.

<sup>50</sup> Torres Campos, Brasil 2009

Para calcular la cantidad de calor operativamente posible de extraer se considera que la presión de vapor de agua en saturación es la presión de vapor ejercida por el vapor de agua contenido en un volumen de aire saturado a la temperatura del aire contenido es ese volumen.<sup>51</sup>

Para el cálculo de calor latente de vaporización, se requiere el conocimiento de la relación de la presión de vapor en función de la temperatura. Dado que la termodinámica no impone ningún modelo de comportamiento material, tales relaciones son empíricas. La ecuación de Antoine, para el uso general puede ser muy conveniente. Sin embargo las constantes son válidas solo para determinado intervalo de temperaturas y no deben utilizarse fuera de este.

$$\ln P^{sat} = A - \frac{B}{T + C}$$

$P^{sat}$  = Presión en la saturación (Pa)

T= (K)

Constantes de Antoine para H<sub>2</sub>O.

**A=18.304**

**B=3816.4**

**C=-46.13**

bien puede emplearse para el intervalo de 0°C a 50°C la correlación propuesta por Hyland y Wexler, 1983.:

$$\text{Log}_{10} P_{sat} = \left( \frac{7.5 * T_{bs}}{T_{bs} + 237.3} \right) + 2.7858$$

$P_{sat}$  = hPa

T<sub>bs</sub>= Temperatura de bulbo seco °C

La relación de humedad contenida se obtiene mediante la siguiente ecuación;

$$w = \frac{m_v}{m_{as}} = \frac{p_v * R_{as}}{p_{as} * R_v} = 0.622 \frac{p_v}{p_{as}} =$$

$$w = 0.622 * \frac{P_v}{P_T - P_v}$$

$$w = 0.622 * \frac{P_{sat}}{P_T - P_{sat}}$$

---

51

La Presión de saturación, es la presión del vapor de agua en ausencia de aire a la temperatura dada. Es función solo de la temperatura.

$$HR = \frac{P}{P_{sat}} * 100$$

P = Presión de vapor.

Psat = presión parcial de vapor en saturación. (hPa)

El aire saturado cuando lo está en vapor de agua, esto es que la presión parcial del vapor en la mezcla es igual a la saturación correspondiente a la temperatura a que se encuentra la mezcla. La presión del vapor de agua depende del número de moléculas presentes en un determinado volumen, por lo tanto de la masa del vapor de agua por unidad de volumen y varía con la temperatura. Se mide en mm de Hg o en milibares (mb). 1mb = 0.75 mm de Hg. El valor más alto de la presión o tensión de vapor de agua se observa en las regiones tropicales cerca de la superficie del mar y es de aproximadamente 30 mb. Los aparatos que se usan para medirla son el espectrógrafo de masas y los radioisótopos (porque dan mediciones muy precisas).

Despejando la presión de vapor de agua:

$$Pv = (HR/100) * Psat$$

La Humedad absoluta o densidad del vapor de agua, es el número de gramos de vapor de agua contenido en un metro cúbico de aire a una temperatura y presión determinadas. Se expresa en g (de vapor de agua)/m<sup>3</sup> (de aire) a una presión y temperatura especificadas.

$$Ha = 216 Pv / T (^{\circ}K)$$

Donde:

$^{\circ}K = T^{\circ}C + 273.15$

Ha= Humedad Absoluta en g/m<sup>3</sup>

La máxima evaporación posible (MEP) en esta muestra de aire estará definida por la variación de la cantidad de gramos de vapor de agua por metro cubico de aire en la saturación contra los gramos de agua presentes en un metro cubico de aire a las condiciones presentes.

$$MEP = Ha_{sat} - Ha$$

El potencial máximo de enfriamiento (PMEE) evaporativo, se puede calcular entonces por la cantidad máxima a evaporar por el calor latente de vaporización a la temperatura de bulbo húmedo.

$$PMEE (kJ / m^3) = \lambda * MEP$$

la máxima evaporación posible en  $\text{gr}/\text{m}^3$   
 y donde  $\lambda_{\text{tbh}}$ , el calor latente esta dado en  $\text{kJ}/\text{Kg}$  a temperatura de bulbo húmedo <sup>52</sup>

$$\lambda[\text{J}/\text{kg}] = 2502535.259 - 2385.76424(T_h - 273.15); \quad 0^\circ\text{C} \leq T_h \leq 65.57^\circ\text{C}$$

La cantidad de calor máxima posible a extraer (CME) a la muestra de aire mediante enfriamiento evaporativo en una hora estará determinada por:

$$CME (\text{W hr} / \text{m}^3) = PMEE / 3600 \text{ seg}$$

Que también puede estar dado en  $\text{W día} / \text{m}^3$

El potencial operativo de enfriamiento evaporativo (POEE), como ya dijimos está considerado por la eficiencia de dispositivo (ED) entre los valores de 70 y 80 % de la cantidad máxima de calor posible de extraer. Por lo tanto:

$$POEE = ED * CME$$

Flujo de calor por evaporación del agua está dado en gran parte por el área de contacto que tengan los equipos mecánicos, o los sistemas pasivos. Para evaluar el calor que es posible evaporar se tiene la ecuación:

$$Q_{\text{evap}} = \lambda * A * mw$$

$\lambda$ = Calor latente de vaporización del agua ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ )

$A$ =Área de contacto sobre el plano ( $\text{m}^2$ )

$mw$ = Flujo de masa de agua evaporada ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )

A partir de esta ecuación es posible conocer entonces la cantidad de agua requerida para los sistemas, y vincularla con la disponibilidad en la zona. Asegurando el real potencial de enfriamiento evaporativo adiabático. Conociendo los grados de temperatura, el calor que se puede retirar y si se puede vincular con recurso hidráulico presente o no en la zona de estudio.

$\lambda$ =calor latente de vaporización del agua =  $2.257 \times 10^6 \text{ J}/\text{kg}$  o bien  $539\text{kcal}/\text{kg}$  @ $100^\circ\text{C}$

$C_A$  = calor específico del agua =  $4.1813 \times 10^3 \text{ J}/\text{kg}^\circ\text{C}$

---

<sup>52</sup> Torrella Alcaraz.2005.

En un edificio típico la calefacción o el enfriamiento se transportan por el aire ventilado. La energía transportada se da por la relación de aire ventilado, por lo que se requiere de un monto de aire mayor para transportar energía que el necesario para mantener las condiciones internas en un condición de confort. Esto se debe por la baja capacidad calorífica del aire ( $c_p=1 \text{ J/kg-K}$ ) y de una baja densidad ( $\rho = 1 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ ). Esta baja capacidad causa que la temperatura del aire pueda cambiar rápidamente. Cuando adicionamos agua al sistema, el aire mantiene limpio el ambiente y el agua es la que transporta la energía, al tener una capacidad calorífica de ( $4.200 \text{ [J/kg.K]}$ ) lo que le da 4.2 veces más capacidad de desplazar energía.

Para el cálculo del coeficiente de operación de los equipos de enfriamiento evaporativo (COP) se tiene que:

$$COP = \frac{Q_v * \rho_{H2O} * C_{p_{H2O}} * (T_{ent} - T_{sal})}{P_{ventilador} + P_{bomba\ de\ agua}}$$

Todos los cálculos se han basado en la suposición de que el calor latente es suministrado completamente por el aire.

#### 4.4 Metodología para calcular el factor de ahorro energético con el uso del enfriamiento evaporativo

Para la obtención del factor de uso del enfriamiento evaporativo en el país el cual se traduciría en considerable ahorro energético por sustitución de equipos de aire acondicionado convencionales de alto consumo, se tiene que diseñar un modelo que cuantifique la cantidad de calor que pueden retirar los equipos convencionales, y cuanto se lograría mediante enfriamiento evaporativo. Para este estudio se tomó el modelo matemático utilizado en Brasil<sup>53</sup> para ahorro de energía en edificios. Anteriormente adaptado a México para la evaluación del atlas de ventilación natural<sup>54</sup>. Mediante este modelo de acuerdo a las horas de calor que presentan 40 de las principales ciudades del país, se analizó el posible factor de uso del enfriamiento evaporativo con el fin de llevarlas a zona de confort considerando las limitaciones que esta estrategia tiene.

La eficiencia energética por enfriamiento evaporativo se tendría a partir del modelo de Labert (2007):

$$P_T = 0.30 * (Eq.NumDPI) + 0.40 * \left\{ \left[ EqNumCA * \frac{AC}{AU} \right] + \left[ \left( 1 - \frac{AC}{AU} \right) * 5 \right] \right\} + 0.30 * \left\{ \left[ EqNumCA * \frac{AC}{AU} \right] + \left[ \left( 1 - \frac{AC}{AU} \right) * 5 \right] \right\}$$

donde,

$P_T$  = sería el factor de ahorro energético por uso de enfriamiento evaporativo contra acondicionamiento convencional

EqNum = equivalente al nivel de eficiencia

AC/AU = relación de área acondicionada y utilizada

El primer término de la ecuación anterior se refiere al envolvente del edificio al que se le asigna un 30% de valor y el tercero al factor de iluminación. El segundo término es el que nos compete, al ser el que analiza la eficiencia energética del edificio con respecto a su climatización, el cual tiene un valor de 40%, (valores asignados por el autor). Al ser los tres términos independientes entre si, la eficiencia energética por concepto de uso de enfriamiento estará dada por

$$P_T = \left\{ \left[ EqNumCA * \frac{AC}{AU} \right] + \left[ \left( 1 - \frac{AC}{AU} \right) * 5 \right] \right\}$$

***Para el análisis se consideró analizar el factor de uso que se tendría del enfriamiento evaporativo poniendo énfasis en atacar las horas de calor presentes en cada ciudad. Horas que no pueden ser controladas mediante protección solar o ventilación. Sin embargo considerando la distracción normal de los usuarios se consideró calcular el factor de utilización en las horas de calor más las de confort. Considerando que dejen encendidos los equipos durante dichas horas que podrían ser acondicionadas simplemente mediante ventilación natural.***

La relación matemática indica que la eficiencia energética por concepto de utilizar enfriamiento evaporativo se daría por la diferencia de consumos entre un equipo convencional y el menor consumo que representan los “coolers” por el factor de uso. En caso de emplear enfriamiento evaporativo pasivo, la eficiencia sería entonces directamente el ahorro energético.

---

<sup>53</sup> Lamberts *et al*, 2007

<sup>54</sup> Morillón y Oropeza, 2009.

El modelo precisa el término AC/AU, que refiere al área acondicionada entre el área utilizada en el edificio. Dado que la relación de áreas son propios de cada edificio, realizando el análisis matemático se encuentra que dicha relación puede emplearse para las horas de calor y las horas utilizadas del edificio (en este caso las 13 horas del horario estudiado).

$$P = \left\{ \left[ \frac{\left(1 - \frac{hc}{hu}\right) + \left\{ \left[1 - \left(1 - \frac{hc}{hu}\right) * 5\right] \right\}}{10} \right] \right\} = \left\{ \left[ EqNumCA * \frac{AC}{AU} \right] + \left[ \left(1 - \frac{AC}{AU}\right) * 5 \right] \right\}^{55}$$

donde,

hc = horas de calor o (calor + confort)

hu = horario climatizado de 13 horas (8-21hrs.)

Este modelo trabajado y validado en Brasil, se acopla a México por la similitud de climas cálidos entre ambos países. La eficiencia por utilizar enfriamiento evaporativo será igual al ahorro energético por evitar usar durante dicho tiempo el aire acondicionado, para el caso de emplear enfriamiento evaporativo pasivo. Representando 100% de ahorro de energía, aunque la eficiencia de enfriamiento bajo esta técnica puede ser menor. Empleando coolers, considerando que los equipos de enfriamiento evaporativo utilizan el 33% de la energía que un equipo convencional de aire acondicionado, por el factor de uso para conocer el consumo de energía eléctrica por esta estrategia.

Hemos considerado las horas de calor, puesto que las horas de confort pueden ser mantenidas frescas mediante ventilación natural, protección solar u otras técnicas. No así las horas de calor, que requieren un tratamiento especial y es en el que este trabajo se enfoca. Sin embargo como se mencionó arriba, también se calculó el factor de uso que se tendría durante las horas de calor considerando también las horas de confort.

Para cualquier caso, las horas de uso del edificio cualquiera con climatización serían las 13 horas del periodo de 8 a 21 horas.

La diferencia del consumo de un equipo de aire acondicionado contra un equipo de enfriamiento evaporativo de similar capacidad por el factor de utilización nos generara el ahorro energético a lograr en kWh.

$$\text{Factor de utilización} * \text{consumo}(kWh) * 0.7 = \text{ahorro.de.energía}(kWh)$$

$$\text{Consumo de energía con ahorro por enfriamiento evaporativo}(kWh) = \text{consumo}(kWh) - \text{ahorro de.energía}(kWh)$$

La tabla 7.1 muestra las horas del día que presentan condiciones de calor dentro del horario estudiado conforme a los requerimientos bioclimáticos de las principales ciudades del país.

Como validación del uso de la metodología el apartado V muestra para la ciudad de Morelia, Michoacán las horas de calor encontradas para los doce meses del año. Y el factor de utilización que se tendría del enfriamiento evaporativo.

---

<sup>55</sup> Lamberts *et al*, 2007

*Capítulo V*

*Caso de estudio (Morelia, Michoacán)*





## Capítulo V

### Caso de estudio (Morelia, Michoacán)

Como validación de la metodología se propone a la ciudad de Morelia, Michoacán para evaluar el potencial de enfriamiento evaporativo y el factor de utilización que podría tener esta estrategia. Dicha ciudad presenta un clima cálido semiseco ideal para el uso del potencial de enfriamiento evaporativo adiabático. La tabla 5.1 muestra las temperaturas de bulbo seco obtenidas a partir de las “normales climatológicas”. Las temperaturas de bulbo húmedo para la ciudad de Morelia han sido generadas a partir de la ecuación 2.

**Tabla 5.1 Temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo promedio mensual de la ciudad de Morelia, Michoacán.**

	Tbs	Tbh
	°C	
ene	13.7	8.5
feb	14.9	9.2
mar	17.6	11.0
abr	20.1	13.1
may	21.5	14.8
jun	20.9	15.5
jul	19.3	14.9
ago	19.2	14.8
sep	19.0	14.5
oct	17.6	12.4
nov	15.8	10.2
dic	14.4	9.1

Aplicando la ecuación 4.1 a partir de la depresión de bulbo húmedo se obtiene el PEEA máximo con una efectividad del 100% por parte de los dispositivos empleados saturando en la totalidad el ambiente. Generalmente la eficiencia de los equipos de enfriamiento evaporativo varía entre 60-90%, tomándose para este trabajo una saturación típica en el mercado de eficiencia del 70% como lo muestra la tabla 5.2.

**Tabla 5.2 Potencial de Enfriamiento Evaporativo promedio mensual a lo largo de las 24 horas del día con eficiencias del 100%, 80% y 70% para la ciudad de Morelia, Michoacán .**

	PEA		
	100%	80%	70%
	°C		
ene	5.21	4.17	3.65
feb	5.77	4.62	4.04
mar	6.56	5.25	4.59
abr	7.01	5.61	4.91
may	6.68	5.35	4.68
jun	5.35	4.28	3.74
jul	4.48	3.59	3.14
ago	4.40	3.52	3.08
sep	4.44	3.55	3.11
oct	5.16	4.13	3.61
nov	5.59	4.47	3.91
dic	5.34	4.28	3.74
Promedio	5.50 °C	4.40 °C	3.85 °C

Bajo la consideración de evaluación del potencial evaporativo adiabático, durante el horario de mayor insolación, lapso con las más altas condiciones de temperatura alejadas del confort para el ser humano, se compara en la tabla 5.3 las temperaturas horarias de bulbo seco y húmedo para el periodo comprendido entre las 8 y las 21hrs. considerando el potencial de enfriamiento mensualmente a distintas eficiencias.

**Tabla 5.3 Temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo promedio mensual de la ciudad de Morelia, Michoacán y PEEA considerando el horario de 8 a 20hrs.**

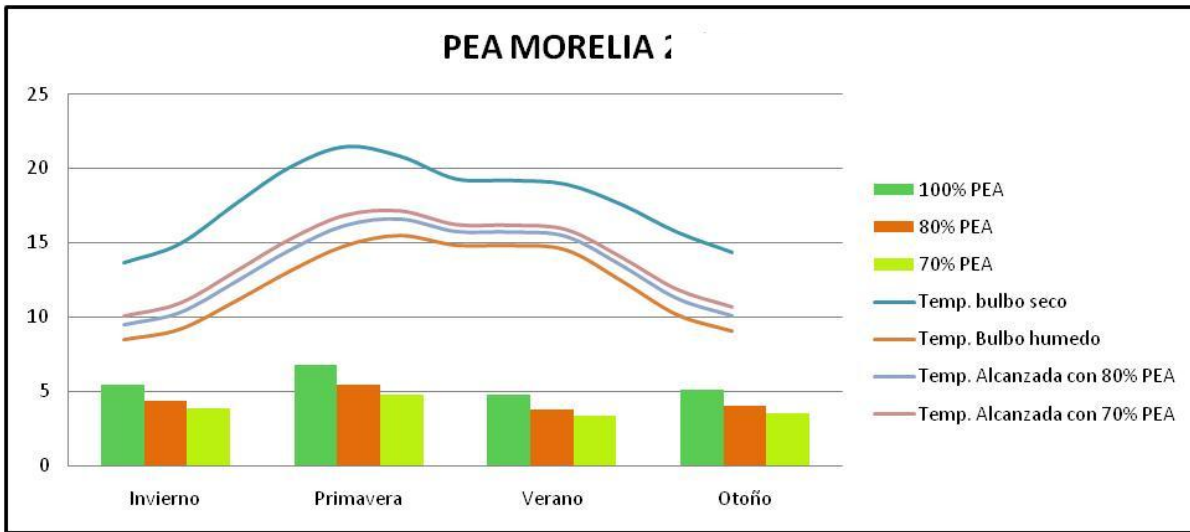
mes	24hrs.		8-20hrs.		PEA 8-20hrs.		
	°C				°C		
	T <sub>bs</sub>	T <sub>bh</sub>	T <sub>bs</sub>	T <sub>bh</sub>	100%	80%	70%
ene	13.7	8.5	18.4	10.9	7.5	6.0	5.2
feb	14.9	9.2	19.9	11.7	8.3	6.6	5.8
mar	17.6	11	22.8	13.4	9.4	7.5	6.5
abr	20.1	13.1	25.5	15.4	10.1	8.1	7.0
may	21.5	14.8	26.6	16.9	9.7	7.8	6.8
jun	20.9	15.5	25.1	17.2	7.9	6.3	5.5
jul	19.3	14.9	23	16.4	6.7	5.3	4.7
ago	19.2	14.8	22.8	16.3	6.5	5.2	4.6
sep	19.0	14.5	22.5	16	6.5	5.2	4.6
oct	17.6	12.4	21.6	14.2	7.4	5.9	5.2
nov	15.8	10.2	20.2	12.3	7.9	6.3	5.5
dic	14.4	9.1	18.9	11.3	7.6	6.1	5.3
Prom.	17.8	12.3	22.3	14.3	7.95	6.36	5.40

Para esta jornada de 13 horas, se tienen para 3 distintos porcentajes de eficiencia, el potencial de disminución por grados marcados en la tabla 5.3

El periodo de 8:00 a 21:00 hrs, horario con incidencia solar representa un aumento del 32% del potencial de enfriamiento contra el considerar las 24hrs del día. La razón para que esto suceda es el aumento de la humedad relativa durante la noche. Variable que disminuye fuertemente la capacidad del aire para absorber más vapor de agua, por lo que puede reducir su capacidad para ceder calor latente y lograr la vaporización del agua.

Con la consideración tomada de calcular el potencial de enfriamiento evaporativo para el horario con presencia solar, nos enfrentamos a mayores temperaturas de bulbo seco, y menores humedades relativas. El potencial de enfriamiento entonces se incrementa por el orden de un 28% para la ciudad de Morelia (ubicada geográficamente como lo muestra la fig. 5.1). Logrando que en primavera se tenga el potencial de 9.71 °C de abatimiento de la temperatura. Llegando a tener un máximo para abril de 14.3 °C contra los 7.01°C que se tienen en promedio considerando la totalidad del día, como lo muestra la grafica 5.1 y describe en promedios por estación meteorológica la tabla 5.4.

Grafica 5.1 Potencial de Enfriamiento Evaporativo promedio con eficiencias del 100%, 80% y 70% para la ciudad de Morelia, Michoacán de 8 a 21hrs.



PEA	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
100%	7.78 °C	9.71 °C	7.04 °C	7.28 °C
80%	6.2 °C	7.77 °C	5.63 °C	5.83 °C
70%	5.4 °C	6.80 °C	4.93 °C	5.10 °C

Tabla 5.4 Promedio del Potencial Evaporativo Adiabático para atenuación de temperatura para la ciudad de Morelia, Michoacan.

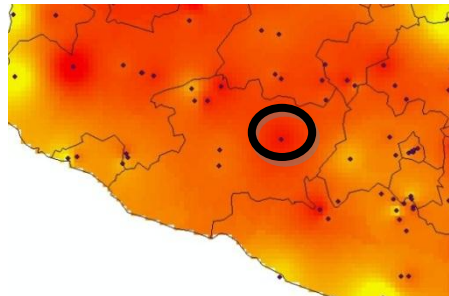


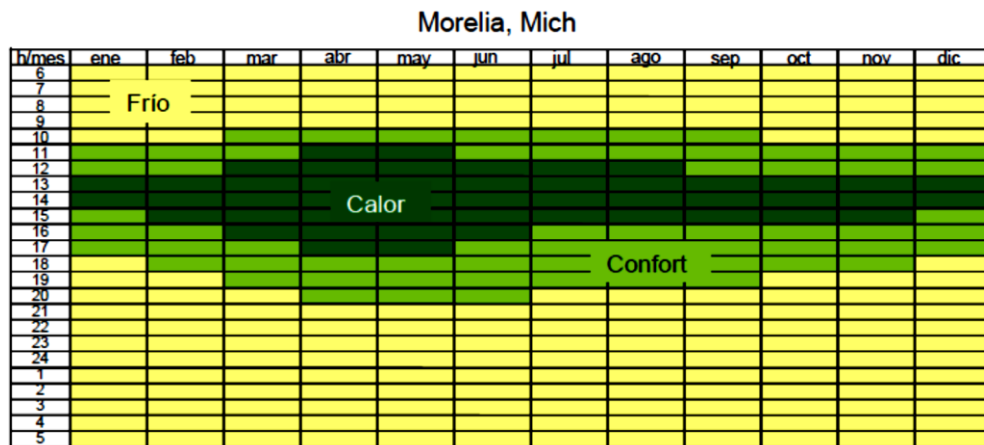
fig.5.1 Morelia, Michoacan

Tabla 5.5 Grados de temperatura que es posible abatir mediante enfriamiento evaporativo en la ciudad de Morelia, Michoacan.

Morelia	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Prm
00:00	2.8	3.1	3.5	3.7	3.3	2.5	2.1	2.1	2.2	2.8	3.1	3.0	2.85
01:00	2.5	2.8	3.2	3.4	3.0	2.2	1.8	1.8	1.9	2.5	2.8	2.7	2.56
02:00	2.3	2.5	3.0	3.1	2.8	2.0	1.6	1.6	1.7	2.3	2.6	2.4	2.33
03:00	2.1	2.4	2.8	2.9	2.6	1.9	1.5	1.5	1.6	2.1	2.4	2.2	2.15
04:00	1.9	2.2	2.6	2.7	2.4	1.7	1.4	1.4	1.5	2.0	2.2	2.1	2.01
05:00	1.8	2.1	2.5	2.6	2.3	1.6	1.3	1.3	1.4	1.9	2.1	1.9	1.90
06:00	1.7	2.0	2.4	2.2	2.0	1.4	1.1	1.0	1.0	1.8	2.0	1.9	1.69
07:00	1.5	1.8	2.4	2.8	2.8	2.2	1.8	1.5	1.3	1.7	1.8	1.6	1.93
08:00	2.1	2.7	3.6	4.4	4.7	4.0	3.2	2.8	2.5	2.6	2.5	2.2	3.11
09:00	3.6	4.4	5.7	6.9	7.3	6.2	5.2	4.7	4.2	4.2	4.1	3.6	5.01
10:00	5.7	6.8	8.4	9.8	10.1	8.5	7.1	6.6	6.1	6.3	6.2	5.7	7.28
11:00	7.9	9.2	10.9	12.3	12.4	10.3	8.6	8.2	7.8	8.4	8.5	8.0	9.37
12:00	9.8	11.1	12.7	13.9	13.6	11.2	9.4	9.1	9.0	9.8	10.3	9.9	10.81
13:00	10.9	12.0	13.4	14.3	13.8	11.2	9.4	9.3	9.4	10.5	11.3	11.0	11.38
14:00	11.0	12.0	13.2	13.8	13.1	10.6	9.0	8.9	9.1	10.4	11.4	11.2	11.15
15:00	10.4	11.2	12.2	12.7	11.9	9.6	8.1	8.2	8.5	9.8	10.8	10.6	10.35
16:00	9.4	10.1	10.9	11.2	10.5	8.4	7.1	7.2	7.5	8.8	9.8	9.6	9.23
17:00	8.2	8.8	9.5	9.7	9.0	7.2	6.2	6.2	6.6	7.7	8.6	8.5	8.03
18:00	7.1	7.5	8.2	8.4	7.7	6.1	5.2	5.3	5.6	6.7	7.4	7.3	6.87
19:00	6.0	6.4	7.0	7.1	6.6	5.2	4.4	4.5	4.8	5.7	6.4	6.2	5.85
20:00	5.1	5.4	6.0	6.1	5.6	4.4	3.7	3.8	4.0	4.9	5.4	5.3	4.98
21:00	4.3	4.6	5.1	5.3	4.8	3.8	3.2	3.2	3.4	4.2	4.7	4.5	4.26
22:00	3.7	4.0	4.5	4.6	4.2	3.2	2.7	2.8	2.9	3.6	4.0	3.9	3.68
23:00	3.2	3.5	4.0	4.1	3.7	2.8	2.4	2.4	2.5	3.2	3.5	3.4	3.22
	7.5	8.3	9.4	10.1	9.7	7.9	6.7	6.5	6.5	7.4	7.9	7.6	7.95
	Inviern 7.78	Primavera 9.71			Verano 7.04			Otoño 7.28					

Con apoyo del “Atlas del bioclima en México”<sup>56</sup> se conocen los requerimientos bioclimáticos de la ciudad de Morelia. Al considerar de la tabla 5.8 un día de mayo a las 11 horas se tiene una temperatura media para las once horas de 30°C, con humedad relativa del 33%. Como lo muestra la tabla 5.6 del Atlas del bioclima de México tenemos problemas de confort al presentarse condiciones de calor.

Tabla 5.6 Diagrama de isorrequerimiento de climatización para la ciudad de Morelia, Michoacán.  
Fuente: Atlas del bioclima de México, 2004



<sup>56</sup> David Morillón Gálvez. Atlas del bioclima de México. 2004.

Aplicando nuestra metodología para ese día de mayo, once horas, se tiene que el máximo potencial evaporativo sería una disminución de la temperatura de 12.4°C, pudiendo llegar de 30°C marcados como promedio de temperatura de bulbo seco hasta la temperatura de bulbo húmedo de 17.6°C.

Considerando eficiencias en los dispositivos del 80% y 70%, como lo muestra la tabla 5.7 entonces se lograría un abatimiento de la temperatura entre 9.9°C y 8.6°C, alcanzando temperaturas para ese horario de 20.1°C y 21.3°C. Temperaturas con las que se alcanza el confort dentro de cualquier edificio para los habitantes de Morelia, durante ese mes, ese horario, cumpliéndose satisfactoriamente el objetivo del enfriamiento evaporativo.

**Tabla 5.7 Promedio del Potencial Evaporativo Adiabático para atenuación de temperatura para la ciudad de Morelia, Michoacan en horario con incidencia solar (7-19hrs.)**

Mayo		PEA		PEA		PEA	
hr/día	T <sub>bs</sub>	100%	T <sub>bh</sub>	80%	T <sub>bh(PEA80%)</sub>	70%	T <sub>bh(PEA70%)</sub>
00:00	16.3	3.3	12.9	2.7	13.6	2.3	13.9
01:00	15.5	3.0	12.4	2.4	13.1	2.1	13.4
02:00	14.8	2.8	12.0	2.2	12.6	1.9	12.9
03:00	14.3	2.6	11.7	2.1	12.2	1.8	12.5
04:00	13.8	2.4	11.4	1.9	11.9	1.7	12.1
05:00	13.5	2.3	11.1	1.9	11.6	1.6	11.8
06:00	12.3	2.0	10.4	1.6	10.8	1.4	11.0
07:00	15.0	2.8	12.1	2.3	12.7	2.0	13.0
08:00	19.3	4.7	14.6	3.7	15.5	3.3	16.0
09:00	23.8	7.3	16.5	5.8	17.9	5.1	18.7
10:00	27.5	10.1	17.4	8.1	19.4	7.1	20.4
<b>11:00</b>	<b>30.0</b>	<b>12.4</b>	<b>17.6</b>	<b>9.9</b>	<b>20.1</b>	<b>8.6</b>	<b>21.3</b>
12:00	31.2	13.6	17.6	10.9	20.3	9.5	21.7
13:00	31.4	13.8	17.6	11.0	20.4	9.7	21.7
14:00	30.7	13.1	17.6	10.5	20.2	9.2	21.6
15:00	29.5	11.9	17.6	9.5	20.0	8.3	21.2
16:00	27.9	10.5	17.4	8.4	19.5	7.3	20.6
17:00	26.2	9.0	17.1	7.2	18.9	6.3	19.8
18:00	24.4	7.7	16.6	6.2	18.2	5.4	19.0
19:00	22.6	6.6	16.1	5.3	17.4	4.6	18.0
20:00	21.0	5.6	15.4	4.5	16.5	3.9	17.1
21:00	19.6	4.8	14.7	3.9	15.7	3.4	16.2
22:00	18.3	4.2	14.1	3.4	14.9	2.9	15.4
23:00	17.2	3.7	13.5	3.0	14.2	2.6	14.6

°C

La ciudad de Morelia, Michoacán en todo el año puede aplicarse enfriamiento evaporativo, dado que no cuenta con temperaturas de bulbo húmedo superiores a los 22°C. Cuenta con un potencial de enfriamiento evaporativo de 26.543 kWh/m<sup>3</sup>. Logrando el 100% del tiempo en que la ciudad presenta condiciones de calor abatirlas mediante la estrategia de enfriamiento evaporativo. La tabla 5.8 muestra las zonas que presentan calor en color verde oscuro, las cuales pueden llegar al confort mediante esta estrategia, logrando reducir a la temperatura que se muestra en la tabla 5.9, logrando llegar al confort en la totalidad de horas requeridas para Morelia mediante esta técnica.

Esta técnica representa una buena posibilidad para que los ciudadanos de este sitio prioricen equipos mecánicos de enfriamiento evaporativo, sobre equipos mecánicos convencionales de aire acondicionado, logrando reducir sus consumos en un 50% de energía eléctrica, con los ahorros económicos que trae consigo esto en la factura.

Tabla 5.8 Temperatura de bulbo seco para la ciudad de Morelia, indicando requerimientos bioclimáticos de frío, confort y calor.

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	
08:00	7.1	8.9	12.6	16.6	19.3	19.5	18.0	17.2	16.0	13.2	9.7	7.7	
09:00	11.5	13.6	17.5	21.5	23.8	23.2	21.2	20.5	19.3	16.9	13.9	11.9	
10:00	16.0	18.2	22.0	25.7	27.5	26.2	23.8	23.2	22.3	20.5	18.2	16.4	
11:00	19.7	21.9	25.4	28.6	30.0	28.1	25.6	25.1	24.5	23.3	21.7	20.1	
12:00	22.2	24.3	27.4	30.3	31.2	29.0	26.4	26.1	25.7	25.0	24.0	22.7	
13:00	23.5	25.3	28.2	30.7	31.4	29.1	26.5	26.3	26.2	25.8	25.2	24.0	
14:00	23.7	25.3	28.0	30.2	30.7	28.5	26.0	25.9	25.9	25.7	25.3	24.2	
15:00	23.0	24.5	26.9	29.0	29.5	27.4	25.1	25.1	25.2	25.0	24.6	23.6	
16:00	21.8	23.1	25.4	27.4	27.9	26.0	23.9	24.0	24.1	23.9	23.4	22.4	Frío
17:00	20.2	21.3	23.6	25.6	26.2	24.5	22.6	22.7	22.9	22.5	21.8	20.9	
18:00	18.4	19.5	21.7	23.6	24.4	23.1	21.3	21.5	21.6	21.0	20.1	19.1	Confort
19:00	16.6	17.6	19.8	21.8	22.6	21.6	20.1	20.2	20.3	19.5	18.4	17.3	
20:00	14.8	15.8	18.0	20.0	21.0	20.3	18.9	19.0	19.1	18.1	16.8	15.6	Calor

Tabla 5.9 Temperatura que se puede alcanzar para la ciudad de Morelia mediante enfriamiento evaporativo adiabático, alcanzando el confort durante todo el año en las zonas que antes presentaban condiciones de calor.

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	
08:00	5.6	7.0	10.1	13.5	16.0	16.7	15.7	15.2	14.3	11.4	7.9	6.2	
09:00	9.0	10.5	13.5	16.6	18.7	18.8	17.6	17.2	16.4	14.0	11.1	9.4	
10:00	12.0	13.5	16.1	18.8	20.4	20.2	18.9	18.6	18.0	16.1	13.8	12.4	
11:00	14.2	15.5	17.8	20.0	21.3	20.9	19.6	19.4	19.0	17.4	15.7	14.6	
12:00	15.4	16.5	18.6	20.6	21.7	21.2	19.9	19.7	19.4	18.2	16.8	15.8	
13:00	15.9	16.9	18.8	20.7	21.7	21.2	19.9	19.8	19.6	18.4	17.2	16.3	
14:00	16.0	16.9	18.7	20.5	21.6	21.0	19.7	19.7	19.5	18.4	17.3	16.4	
15:00	15.7	16.6	18.4	20.1	21.2	20.7	19.4	19.4	19.2	18.2	17.0	16.2	
16:00	15.2	16.0	17.8	19.5	20.6	20.1	18.9	18.9	18.8	17.7	16.5	15.7	Frío
17:00	14.4	15.2	16.9	18.7	19.8	19.5	18.3	18.4	18.3	17.1	15.8	14.9	
18:00	13.5	14.2	16.0	17.8	19.0	18.8	17.7	17.7	17.7	16.3	14.9	14.0	Confort
19:00	12.4	13.1	14.9	16.8	18.0	18.0	17.0	17.1	17.0	15.5	14.0	13.0	
20:00	11.3	12.0	13.8	15.7	17.1	17.2	16.3	16.4	16.3	14.7	13.0	11.9	Calor

Para la ciudad de Morelia, Michoacán las horas de calor para los doce meses del año se muestran en la tabla 5.10. En promedio se tienen 4 horas diarias de calor, con 5.25 horas promedio de confort, lapso que debe ser protegido para que se mantengan condiciones ideales y no caigan en disconfort térmico.

Morelia	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	Prom.
hrs. de calor	2	3	5	7	7	5	4	4	3	3	3	2	4
hrs. de confort	5	5	5	4	4	6	6	6	7	5	5	5	5.25
Factor de utilización	0.162	0.192	0.254	0.315	0.315	0.254	0.223	0.223	0.192	0.192	0.192	0.162	0.223
F.u. calor+confort	0.315	0.346	0.408	0.438	0.438	0.438	0.408	0.408	0.408	0.346	0.346	0.315	0.385

Tabla 5.10 Horas de calor y factor de utilización del enfriamiento evaporativo en la ciudad de Morelia, Michoacán.

Aplicando la ecuación de Lambert para el mes de mayo se tiene;

$$P = \frac{\left(1 - \frac{7}{13}\right) + \left\{\left[1 - \left(1 - \frac{7}{13}\right)\right] * 5\right\}}{10} = 0.315$$

Se tendría entonces un factor de utilización promedio anual de 0.223 en caso de aplicar esta estrategia para atenuar las horas de calor. Considerando también el enfriamiento evaporativo para mantener las horas de confort entonces este factor de utilización se elevaría a 0.385.

Para calcular los beneficios económicos que en un edificio de la ciudad de Morelia, se presenta el siguiente ejercicio.

Ciudad: Morelia, Mich.

Casa habitación.

Cuenta con un equipo de aire convencional de ventana nuevo de 1 tonelada de refrigeración (tabla 2.3)

Potencia : 1200 W

Uso: 8 horas diarias promedio.

Consumo mensual: 288 kWh

Tarifa eléctrica: 0.725 \$/kWh

*Factor de utilización \* consumo(kWh) = Consumo por enfriamiento evaporativo (kWh)*

*Ahorro de energía con ahorro por enfriamiento evaporativo(kWh) = consumoA/C (kWh) – Consumo cooler(kWh)*

Mes	Consumo promedio		P		Consumo		Ahorro	
	mensual (kWh)	hrs. Calor	hrs. Calor y confort		kWh		kWh	
enero	144	0.162	0.315		23.26	45.42	624.74	602.58
febrero	144	0.192	0.346		27.69	49.85	620.31	598.15
marzo	144	0.254	0.408		36.55	58.71	611.45	589.29
abril	144	0.315	0.438		45.42	63.14	602.58	584.86
mayo	144	0.315	0.438		45.42	63.14	602.58	584.86
junio	144	0.254	0.438		36.55	63.14	611.45	584.86
julio	144	0.223	0.408		32.12	58.71	615.88	589.29
agosto	144	0.223	0.408		32.12	58.71	615.88	589.29
septiembre	144	0.192	0.408		27.69	58.71	620.31	589.29
octubre	144	0.192	0.346		27.69	49.85	620.31	598.15
noviembre	144	0.192	0.346		27.69	49.85	620.31	598.15
diciembre	144	0.162	0.315		23.26	45.42	624.74	602.58
Prom.	144	0.223	0.385		32.12	55.38	615.88	592.62

*Capítulo VI*

*Mapas del potencial de ahorro de energía por aprovechamiento del enfriamiento evaporativo de la República Mexicana.*





## Mapas del potencial de ahorro de energía por aprovechamiento del enfriamiento evaporativo de la República Mexicana.

Se consideraron 200 ciudades ubicadas en los 31 estados de la República Mexicana más algunas zonas del Distrito Federal para identificar el PEA espacialmente en un mapa de los Estados Unidos Mexicanos. El potencial de enfriamiento evaporativo plasmado es para el horario con mayor existencia de incidencia solar (8-21hrs). Esta consideración elevó en 2.2°C el promedio nacional del PEA durante las horas más críticas del día contra considerar las 24 horas del día.

Se ha realizado una interpolación mediante el módulo “Kriging” del software ArcMap, del enfriamiento evaporativo de las zonas del país, mostrándose los grados de temperatura que es posible reducir mediante esta estrategia, determinándose las zonas de ahorro bajo, medio, alto y muy alto que el país en el año. La totalidad de los Estados Unidos Mexicanos tienen opción de disminuir la temperatura mediante enfriamiento evaporativo, sin embargo hay zonas del país con elevada humedad que a pesar de permitir reducción térmica, el flujo de aire a velocidades elevadas para lograr dicho efecto, y la sensación de bochorno por una elevada humedad relativa presente, con temperaturas de bulbo húmedo superiores a los 22°C hacen inviable esta estrategia para lograr confort humano. Quizás pueda ser viable para el manejo animal en granjas, rastros o en invernaderos.

Con la excepción del sureste, regiones costeras del golfo de México y en la zona costera del Pacífico durante ciertos meses, el territorio nacional tiene una gran oportunidad de ahorro de energía por concepto de aire acondicionado empleando enfriamiento evaporativo. Principalmente durante la temporada de primavera, etapa más calurosa y seca del año teniendo un potencial promedio de 7.38°C de abatimiento de la temperatura durante el periodo comprendido entre las 8 y 21 horas del día.

A partir del Atlas del Bioclima en México las horas del día en que las principales ciudades del país requieren alguna estrategia para lograr el confort y salir de la zona de calor, considerando el periodo de 13 horas de mayor incidencia solar, tomando como nulo su uso en las ciudades con presencia de temperatura de bulbo húmedo por encima de los 22°C, consideración hecha por Givonni<sup>57</sup>, se tuvo un factor de utilización nacional de 0.1873. Las horas de confort no fueron tomadas en cuenta para la evaluación del factor de utilización del potencial, ya que durante dichas horas pueden emplearse otras estrategias bioclimáticas pasivas como la ventilación, el control solar, un adecuado aislamiento de edificaciones, buena orientación, etc.

A partir de noviembre (fig.6.12), diciembre (fig.6.1) se observa los característicos inviernos secos mexicanos, con presencia de una fuerte amplitud térmica. Es la segunda temporada con mayor potencial para lograr refrigeración térmica mediante enfriamiento evaporativo. La región del centro, el bajío y occidente presentan hasta 9°C en promedio de potencial de enfriamiento, sin embargo es un potencial que no se requiere dado que la mayoría de las ciudades presentan condiciones de frío para sus habitantes. Es un mes en el que difícilmente se presentan horas de calor, a no ser por ciudades ubicadas en las costas del Pacífico, el Golfo, la región del Caribe. Regiones como Tabasco que llegan a tener durante las 12 horas elevadas temperaturas, se tiene un PEA de 8-9°C pero las temperaturas de bulbo húmedo durante ese horario se encuentran por encima de los 23°C, lo cual complica lograr el confort considerando la saturación del ambiente. La zona con bajo potencial de ahorro se mantiene a lo largo del país debido a las bajas temperaturas que se presentan, especialmente al norte del país.

***Los Mapas presentan un pequeño recuadro a la derecha con el potencial de enfriamiento evaporativo promedio mensual para algunas ciudades del país; de igual forma se muestra en la parte inferior izquierda de cada mapa la colorimetría empleada para identificar los grados de temperatura que pueden reducirse mediante esta estrategia. El potencial más bajo representado por colores sepia y marrón, mientras que el magenta, lilas y blanco indican los sitios con mayor potencial para acondicionamiento de espacios mediante refrigeración evaporativa por mayor depresión de bulbo húmedo.***

---

<sup>57</sup> Givonni, Baruch, 1994.

En enero se presentan problemas de frío no de calor (fig.6.2), la región norte sigue presentando un menor potencial comparado contra el centro y occidente, pero se presentan condiciones de frío durante este periodo. Ciudades como Colima, Oaxaca, Tuxtla Gutiérrez pueden emplear el enfriamiento evaporativo durante las horas de calor que presentan (entre 5 y 7 aproximadamente). Las ciudades del altiplano prácticamente ocupan protegerse del frío, ciudades como Toluca, Puebla, Pachuca, DF, prácticamente no presentan horas de confort durante este mes ante las bajas temperaturas, requieren ganancia térmica solar.

Febrero (fig. 6.3), las regiones norteñas siguen presentando sus etapas más húmedas, asociadas con temperaturas bajas, lo cual no hace necesario la utilización de mecanismos para abatir el calor. Regiones costeras y del sureste como Campeche, Mérida demandan medios para controlar las hasta 8 horas de calor que presentan como Acapulco y Colima. Colima presenta temperaturas de bulbo húmedo inferiores a los 20°C lo que hace viable el uso de esta estrategia durante esta temporada, Acapulco mantiene una alta humedad relativa, presenta temperaturas de bulbo húmedo por arriba de 25°C, una depresión de bulbo húmedo de 4.6°C en el mejor de los casos, considerando eficiencias del 80-70%, y pérdidas de calor por convección al interior de espacios, en esta zona es despreciable el enfriamiento evaporativo.

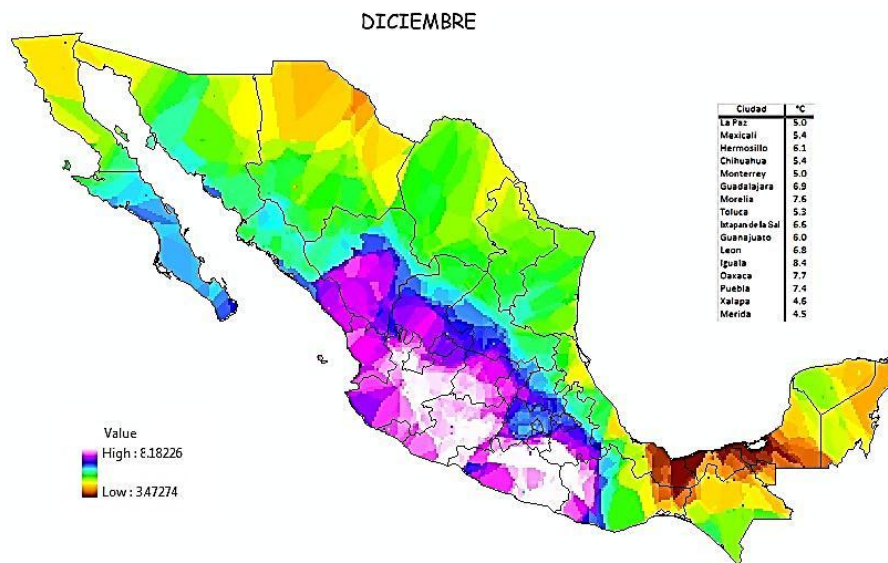


Fig 6.1 Potencial del enfriamiento evaporativo promedio mensual en diciembre de 8 a 21hrs.

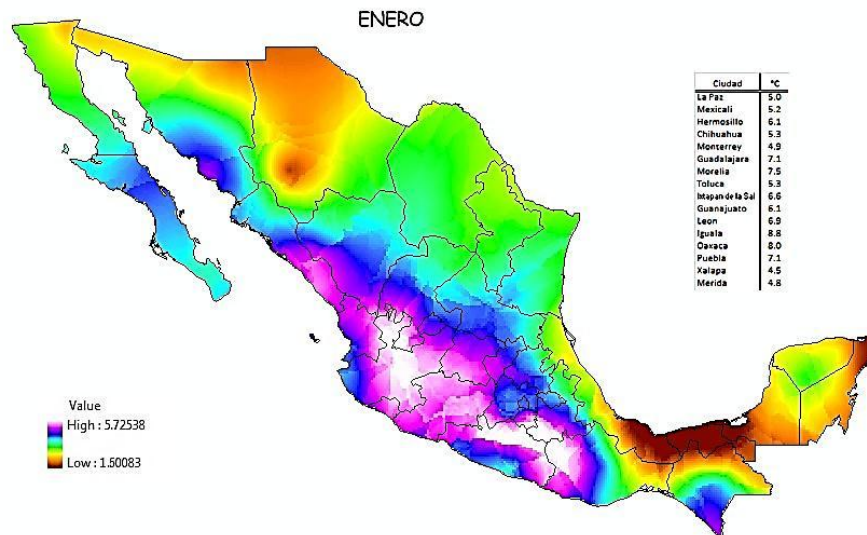


Fig 6.2 Potencial del enfriamiento evaporativo promedio mensual enero de 8 a 21hrs.

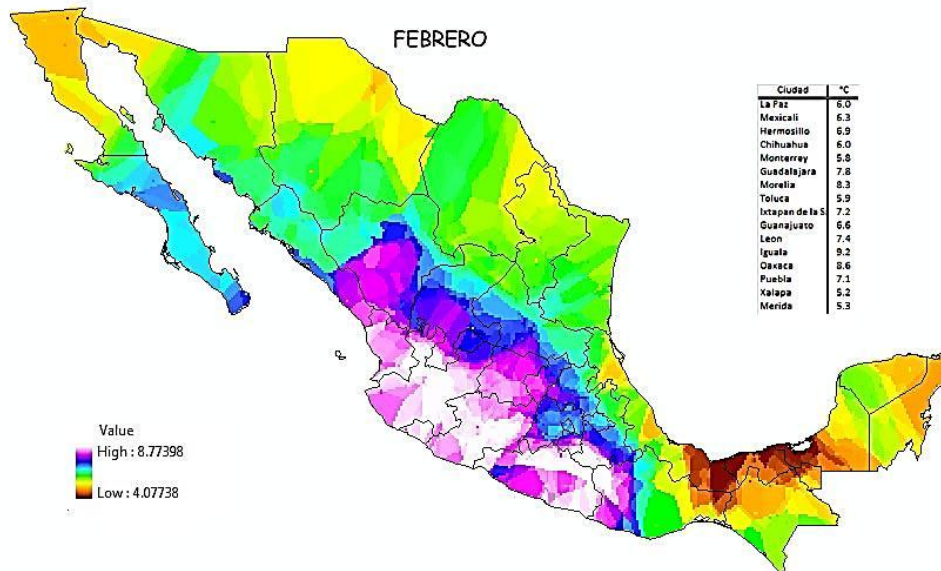


Fig 6.3 Potencial del enfriamiento evaporativo promedio mensual de 8 a 21hrs. en febrero.

Durante Marzo (fig.6.4) la temperatura se empieza a elevar a lo largo del país, zonas del centro, occidente y norte del país empiezan a marcar horas con presencia de calor que requieren adecuarse. El potencial de enfriamiento se dispara, el factor de utilización empieza a incrementarse a 0.2 en gran parte del territorio. Se dirige fuertemente al norte del país, manteniéndose en buen nivel en el altiplano. La región de menor potencial se limita a los estados de Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo y el norte de Chiapas. Regiones de Oaxaca, Jalisco, Michoacán, Durango, México, Nayarit, Sinaloa en promedio se tienen 5 horas del día con condiciones fuertes de calor, condiciones que pueden ser mejoradas sin problemas mediante enfriamiento evaporativo.

Abril (fig.6.5), alcanzamos hasta 0.37 de factor de utilización para el enfriamiento durante el horario estudiado. La época de mayor calor y menor humedad se hace presente en la mayor parte de la República Mexicana, el potencial es alto desde Chihuahua hasta Oaxaca. El sureste eleva la amplitud de la depresión de bulbo húmedo, Mérida llega a presentar hasta 7°C de depresión de bulbo húmedo, la temperatura de bulbo húmedo presenta es superior a los 22°C por lo que deben tomarse con sus precauciones. En promedio son 6.1 horas las que las principales 43 ciudades condiciones de calor, con un factor de utilización para el lapso de 13 horas de 0.24. Caso de Morelia presenta 7 horas en calor, un factor de utilización 0.315, las 4 horas que presenta en confort pueden ser mantenidas mediante ventilación. El confort para lograrse durante uno de los meses más calurosos del año puede lograrse sin necesidad de aire acondicionado.

En mayo (fig.6.6), el potencial de enfriamiento evaporativo nacional ronda los 7.3°C, los días calurosos aumentan, las regiones de potencial bajo se mantienen constantes en el sureste, limitadas por las elevadas temperaturas de bulbo húmedo que presentan. El factor de utilización ronda el 0.30, para las 7.4 horas que se requiere adecuar y sacar de zona de calor en todo el país. Sonora, Chihuahua, San Luis Potosí, Coahuila, Durango presentan la mayor depresión de bulbo húmedo, indicativo de los grados de temperatura que podrían reducirse al termómetro de temperatura de bulbo seco. La región del altiplano, ciudades como Puebla, Tehuacán, la Capital del país presentan 4, 5 horas en las que pueden reducir 11-12°C. Las elevadas temperaturas y bajas humedades relativas, hacen de la temporada de primavera la temporada óptima para la utilización de enfriamiento evaporativo en la zona centro del país.

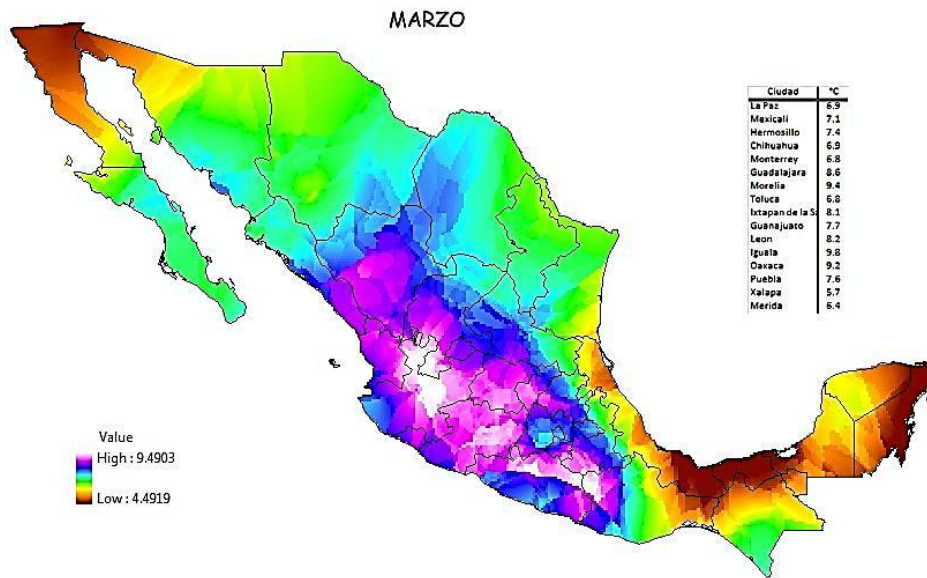


Fig.6.4 Potencial del enfriamiento evaporativo promedio mensual de 8 a 21hrs. marzo.

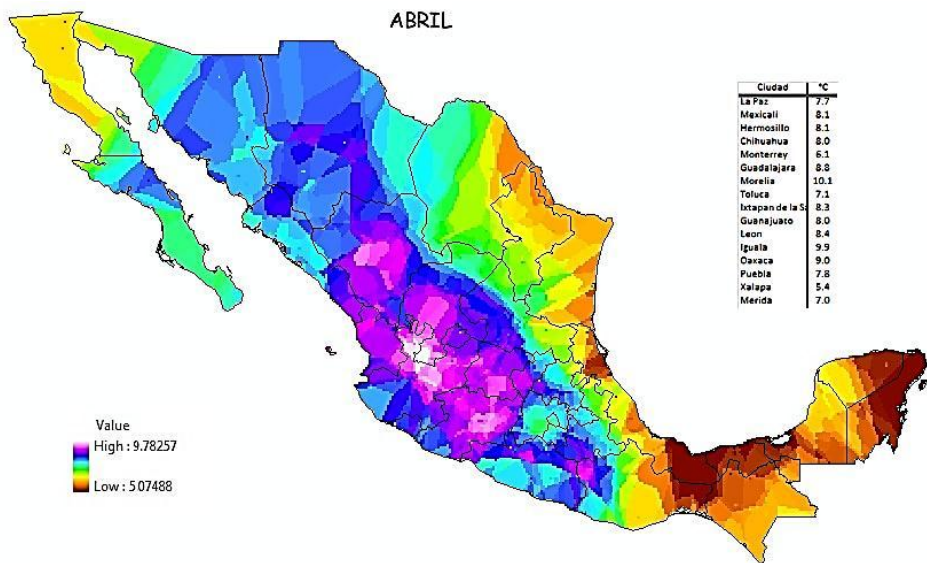


Fig 6.5 Potencial del enfriamiento evaporativo promedio mensual de 8 a 21hrs en abril.

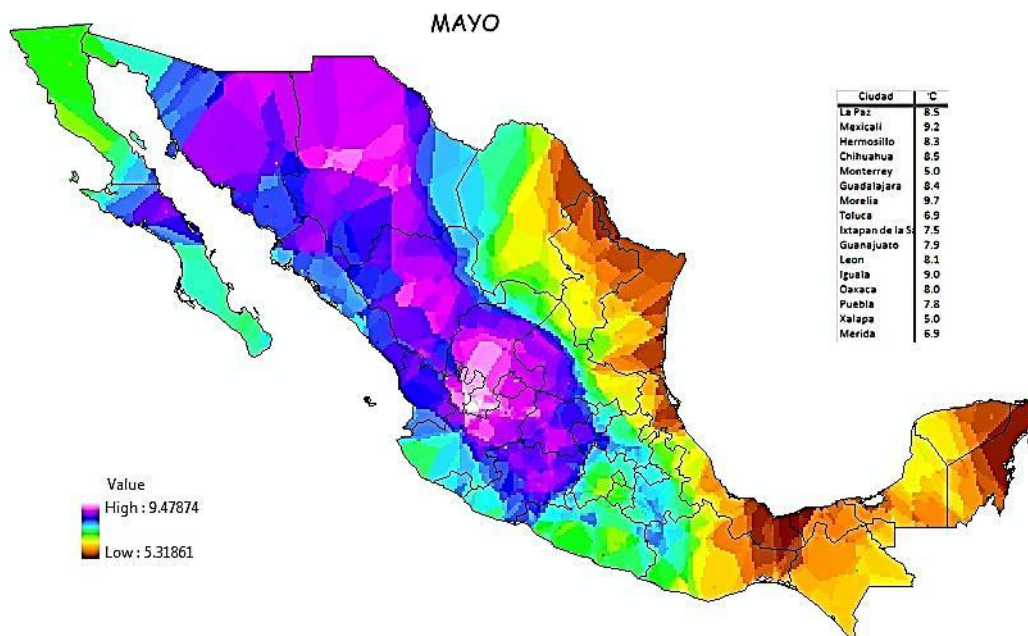


Fig 6.6 Potencial del enfriamiento evaporativo promedio mensual de 8 a 21hrs mayo.

En junio (fig. 6.7) el máximo potencial de enfriamiento evaporativo se coloca al norte del país, Mexicali es el ejemplo característico con temperaturas de bulbo seco por arriba de los 30°C y temperaturas de bulbo húmedo situadas en 20°C. El régimen de lluvias empieza a incrementarse en el centro, occidente y sureste Mexicano, lo que atenúa la amplitud térmica presente. El potencial enfriamiento se ve afectado por el aumento de la humedad relativa en estas zonas, sin embargo la aparición de las lluvias disminuye en el occidente, centro y sureste del país las horas de calor a 6. El Norte y Noroeste del país presenta un verano muy seco, prácticamente sin lluvias con temperaturas elevándose que propician a diferencia del resto del país que las horas de calor que requieran alguna estrategia bioclimática para su atenuación aumenten a 8 horas. Teniéndose un factor de utilización nacional de 0.24.

Julio (fig.6.8), presenta fuerte temporada de lluvias a lo largo del país, el aumento de la humedad es grande. El centro, occidente incluyendo Oaxaca presenta en promedio 3 horas de calor durante este mes, el sureste presenta al igual que el norte 7.8 horas de calor. La región Norte al igual que en Julio presenta la mayor depresión de bulbo húmedo, con condiciones críticas. Es durante el verano la temporada en que el enfriamiento evaporativo es más viable en la región norte. La región sur-este, no solo presenta temperaturas de bulbo húmedo por encima de los 22°C lo cual hace inviable esta estrategia, también presenta una atenuación fuerte de la depresión de bulbo húmedo por la elevada humedad relativa presente en el ambiente. Mientras regiones como Mexicali, Culiacán, Hermosillo presentan factor de utilización de 0.5, la región central presenta entre 0.1 y 0.2 su posibilidad de uso.

## JUNIO

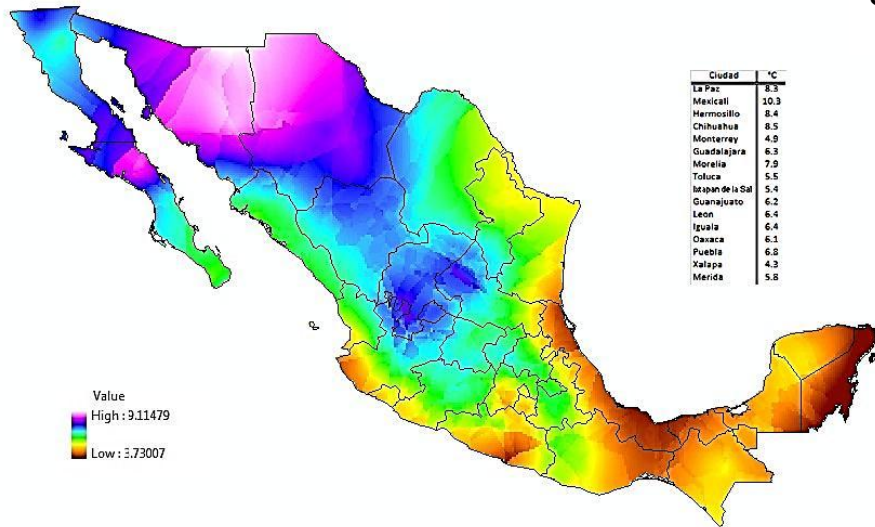


Fig 6.7 Potencial del enfriamiento evaporativo promedio mensual de 8 a 21hrs junio.

## JULIO

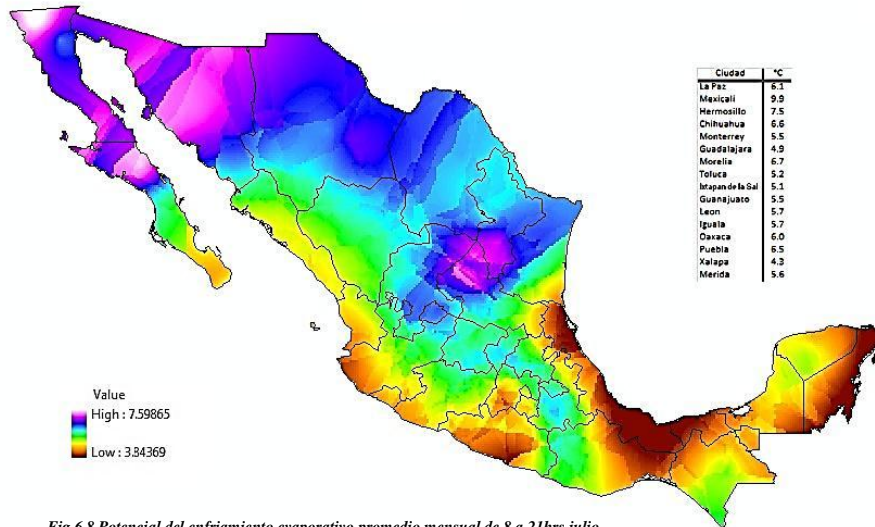


Fig 6.8 Potencial del enfriamiento evaporativo promedio mensual de 8 a 21hrs julio.

## AGOSTO

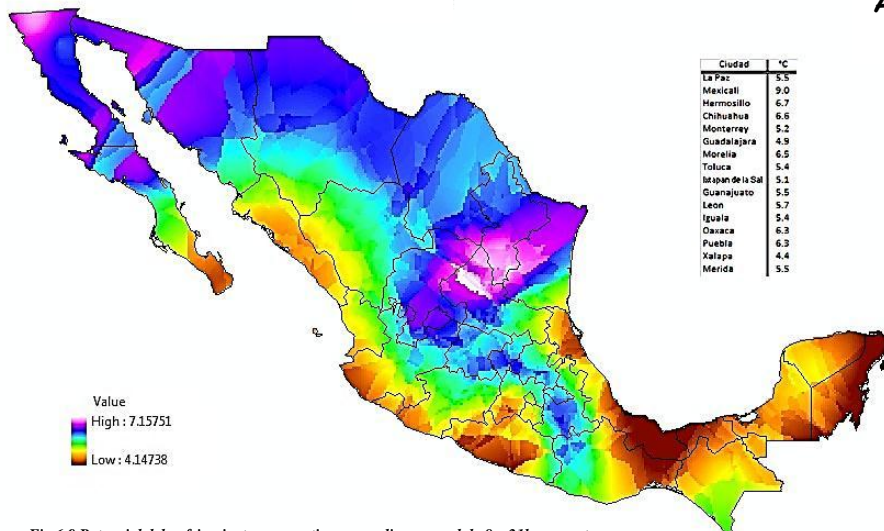
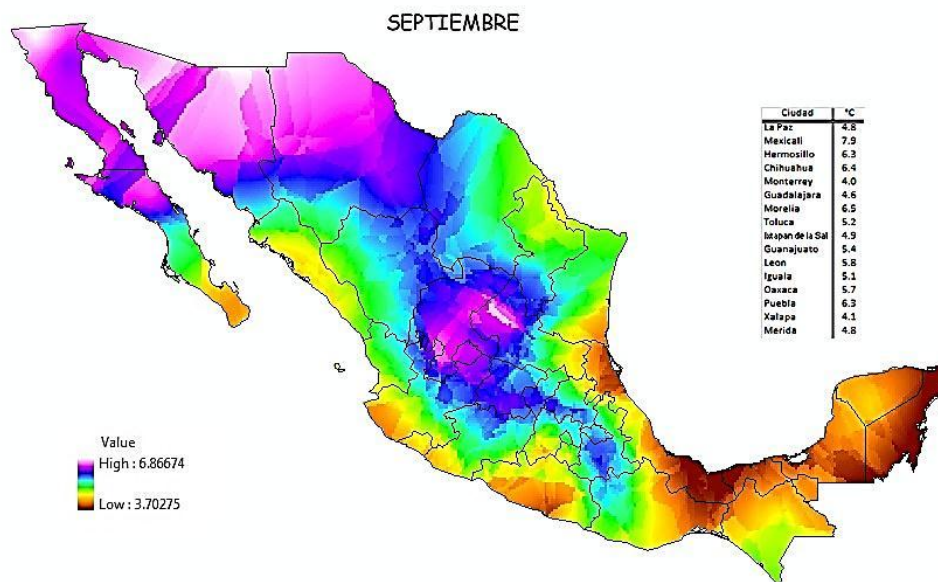


Fig 6.9 Potencial del enfriamiento evaporativo promedio mensual de 8 a 21hrs agosto.

Agosto (fig. 6.9), las bajas humedades presentes entre el Norte de Baja California, Sonora y Chihuahua, zonas desérticas muy secas elevan el factor de utilización de enfriamiento evaporativo entre 0.45 y 0.50. Mientras que en el centro y sur la humedad continua en aumento. Ciudades como Toluca, al elevar su humedad y tener presencia de lluvias generándose enfriamiento evaporativo en el ambiente, provocando que la sensación ya no sea de confort, sea de frío. Por lo que regiones de altiplano, no requieren de enfriamiento evaporativo, fuera de que promedien 2.7 horas de calor. El sureste presenta muchas horas fuera del confort, altas temperaturas de bulbo húmedo limitan a esta estrategia, sin embargo bien pudiera mediante materiales desecantes aumentar la depresión de bulbo húmedo, aumentando el potencial de enfriamiento evaporativo.

Septiembre (fig. 6.10), presenta el panorama característico del verano en México aunque este ya en su etapa final, el norte empieza a presentar menos horas de calor sin embargo se mantiene en un elevado número, 7.2hrs. Mantiene buen potencial de enfriamiento aunque la mayoría de las ciudades de esta región disminuye de 0.50 a 0.40 de utilización. A nivel nacional, el factor de utilización cae a 0.19. El centro y occidente presentan la mayor parte del tiempo condiciones de confort y se mantiene un sureste saturado en el ambiente, con un factor de utilización de 0.1. Continúan las lluvias en gran parte del país, la temporada de Huracanes presenta la mayor probabilidad de meteoros y riesgo en el sureste. Junto a Octubre estos son los meses de menor potencial de enfriamiento en el sureste, en caso de considerar su utilización.

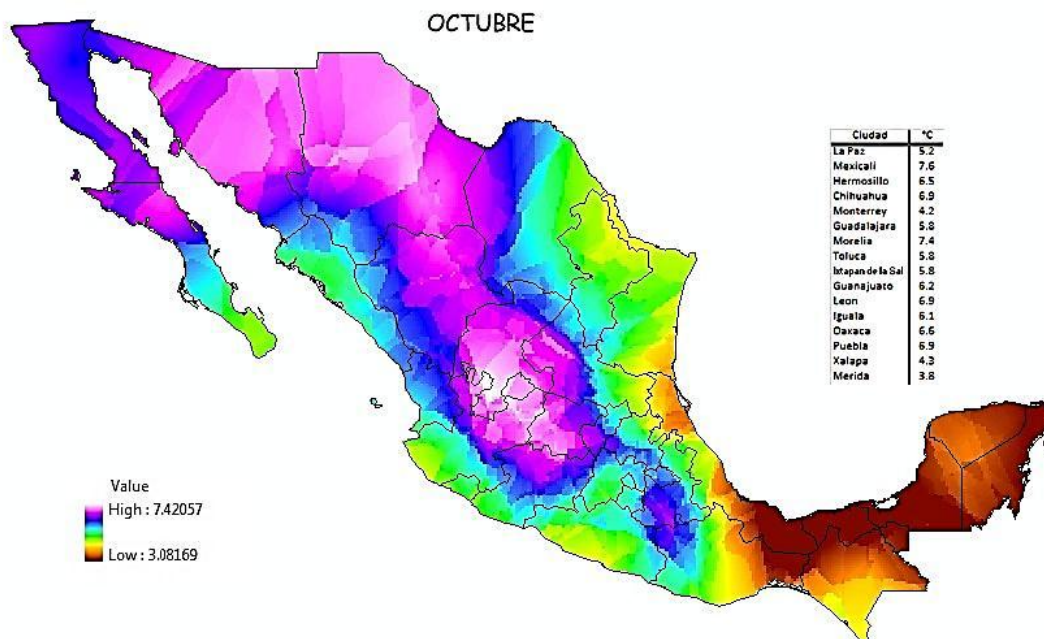


*Fig 6.10 Potencial del enfriamiento evaporativo promedio mensual de 8 a 21hrs en septiembre.*

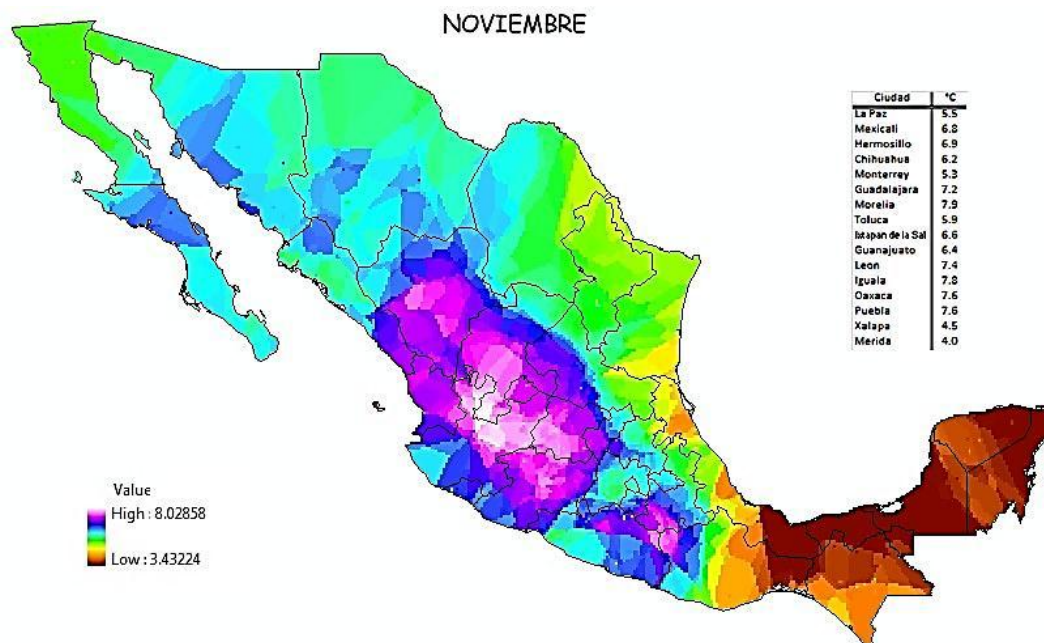
Octubre (fig.6.11), durante este mes, el centro de México empieza a elevar el potencial de enfriamiento evaporativo, sin embargo no se tienen pocas horas de calor a lo largo del mes, el factor de utilización cae a 0.172 en el país. Las ciudades norteadas presentan condiciones térmicas aun complicadas térmicamente, pero mantienen un 0.35 como factor de utilización. El otoño por lo general es fresco en occidente y el altiplano, y el enfriamiento evaporativo podría generar condiciones de frío. Sin embargo para ciertas aplicaciones en promedio tiene 6.29°C de potencial de abatimiento de temperatura de bulbo seco durante el periodo de 8 a 21hrs. El sureste en cambio presenta al igual que el otoño a nivel nacional, el más bajo rendimiento.

Noviembre (fig.6.12) , el final de la temporada otoñal trae una disminución de temperaturas a lo largo de la República Mexicana, el mayor potencial de enfriamiento adiabático, regresa al centro y occidente del país, dejando a un norte que aumenta su humedad y reduce su temperatura. Regiones como Hermosillo o Oaxaca llegan a marcar 0.25 su factor de utilización, la mayoría del país presenta condiciones de confort, difícilmente se ubican horas de calor fuera de zonas costeras o del sureste Mexicano.

Regiones como Colima, Hermosillo, La Paz, presentan factores de 0.25, mientras la mayoría del país presenta 0.15, factor de utilización apenas por encima del factor de invierno.



*Fig 6.11 Potencial del enfriamiento evaporativo promedio mensual de 8 a 21hrs octubre.*



*Fig 6.12 Potencial del enfriamiento evaporativo promedio mensual de 8 a 21hrs noviembre.*



El análisis del potencial con el que la República Mexicana cuenta en enfriamiento evaporativo llevado al cabo por estaciones del año nos muestra los momentos más importantes para su uso en determinadas zonas.

Durante el invierno se muestra el centro del país un estadio de baja humedad que lleva en algunos sitios del norte del país agravar sequías. La depresión de bulbo húmedo aumenta, creando condiciones adecuadas para enfriamiento, sin embargo por las bajas temperaturas no es requerido. Durante este periodo centro del la república Mexicana presenta condiciones de frío, no se presentan horas de calor ni en el centro ni al norte del país, tan solo en la siempre cálida península de Yucatán.

El aumento de humedad durante el invierno al centro de país, genera heladas, con posibilidad de nevadas en las partes altas del altiplano, en los volcanes y ciudades como Toluca, Pachuca, la zona del Ajusco en el Valle de México.

La primavera trae consigo un aumento de temperatura y una disminución de humedad considerable al centro y occidente del país. Es en esta temporada cuando el centro presenta mayores horas fuera del confort, dentro del calor. Se requieren estrategias bioclimáticas para aminorar en promedio 5 horas del día con presencia de calor al centro del país. Al norte y noroeste, si bien existe un buen potencial, las temperaturas aun no son tan extremas como en los meses por venir. El Sureste presenta en promedio durante esta temporada 8.1hrs. de calor que demandan climatización, sin embargo fuera de Oaxaca, la zona sur de Chiapas y algunos puntos de Yucatán, las elevadas temperaturas no pueden ser abatidas por enfriamiento evaporativo, se tienen temperaturas de bulbo húmedo superiores a los 22°C, se pone en riesgo el confort con un grado tan elevado de saturación del aire, y por el requerimiento de mayores velocidades en la ventilación.

El verano Mexicano eleva la humedad en el centro y sureste del país con el inicio de la temporada de lluvias. Este fenómeno meteorológico general de forma natural el enfriamiento evaporativo, y las elevadas temperaturas presentes en mayo, se tornan frescas en julio, agosto. Para el norte del país las condiciones térmicas llegan a sus niveles máximos, y la humedad a los mínimos. Se tienen condiciones extremas de calor, el promedio es de 8 horas de calor, pero durante esta temporada ciudades del norte del país llegan a presentar hasta 13horas.

Otoño, los meses de esta estación presentan un menor grado de humedad, el centro-occidente presenta condiciones frescas en promedio con 3horas de calor al día, mientras el norte y sureste aun presentan 7horas de calor. Otoño a nivel nacional presenta el menor potencial, sin embargo durante esta estación el enfriamiento evaporativo se recupera en centro y occidente del país al perder humedad.

*Nota: Los Mapas presentan un pequeño recuadro con el potencial de enfriamiento evaporativo promedio de a lo largo de los tres meses de duración de cada estación para algunas ciudades del país; la barra de colores ubicada en la parte inferior izquierda de cada mapa identifica el potencial alto con color rojo y ocre, y potencial bajo identificado con azul marino.*

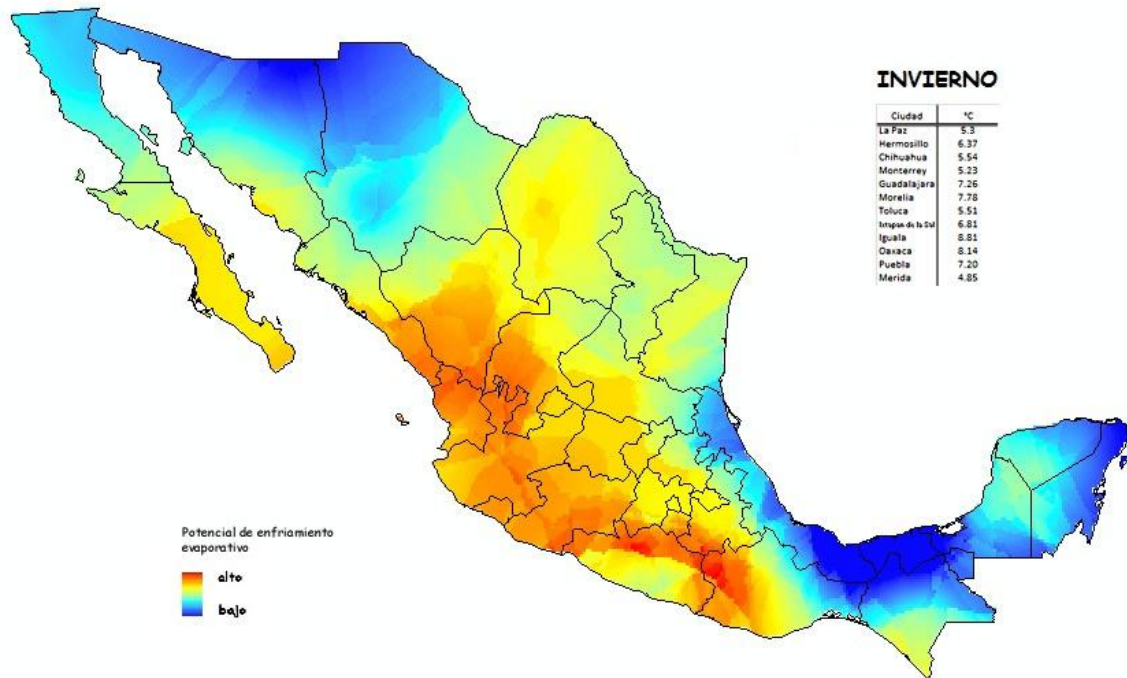


Fig 6.13 Potencial del enfriamiento evaporativo promedio durante la estación de invierno.

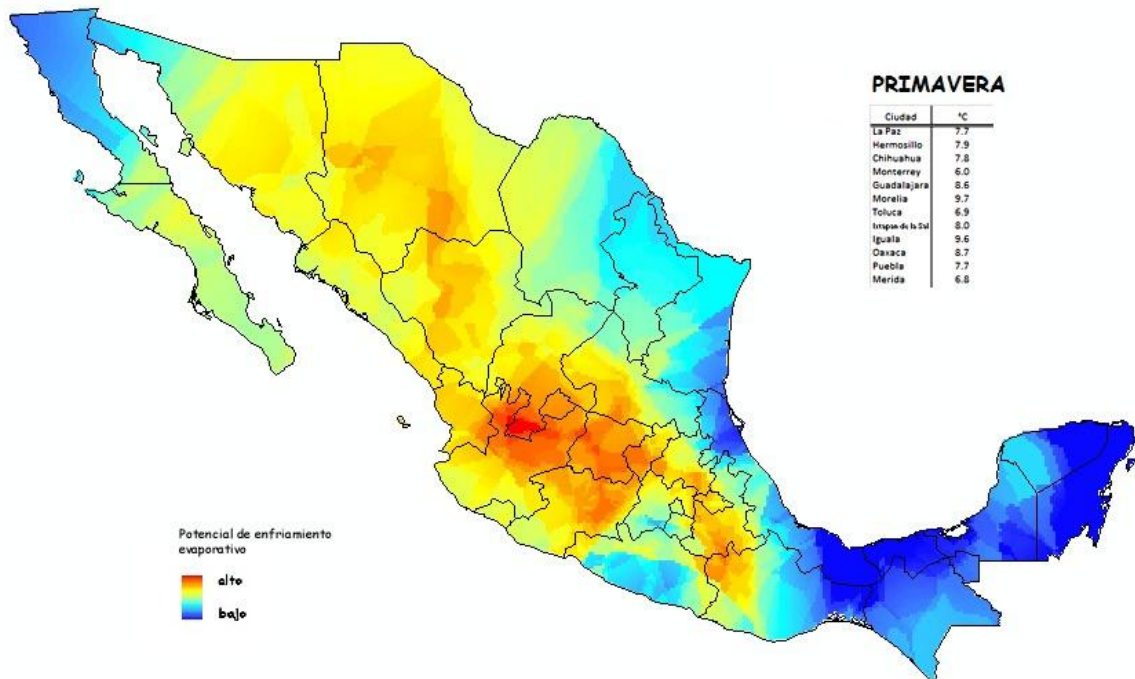


Fig 6.14 Potencial del enfriamiento evaporativo promedio durante la primavera.

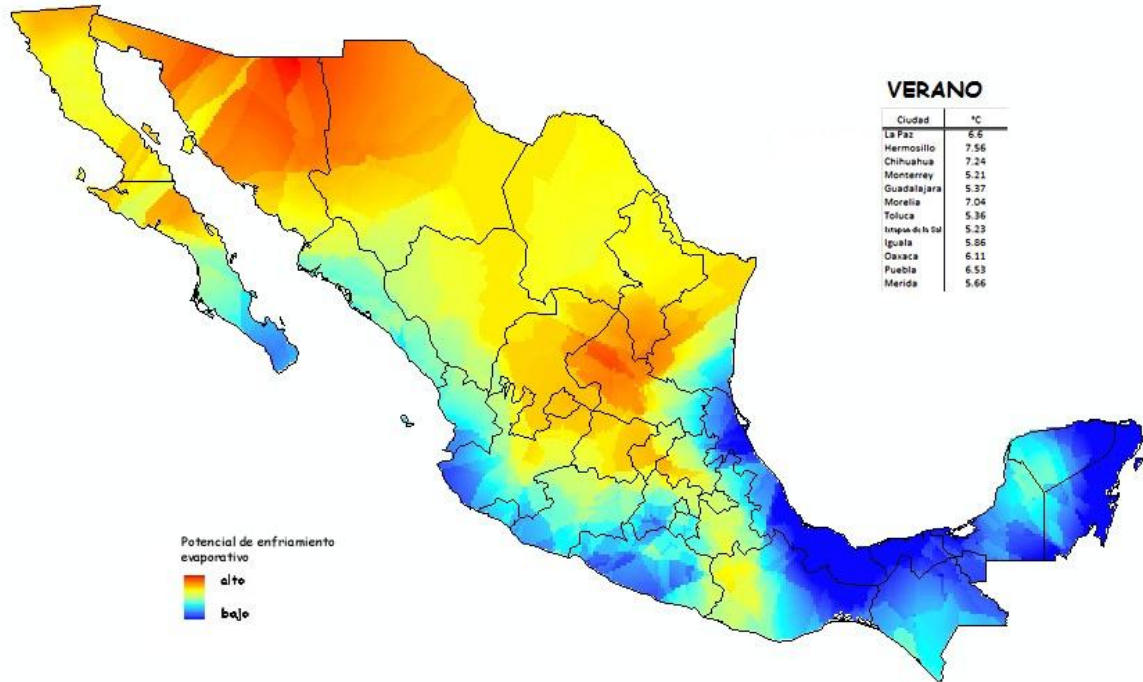


Fig 6.15 Potencial del enfriamiento evaporativo promedio en verano.

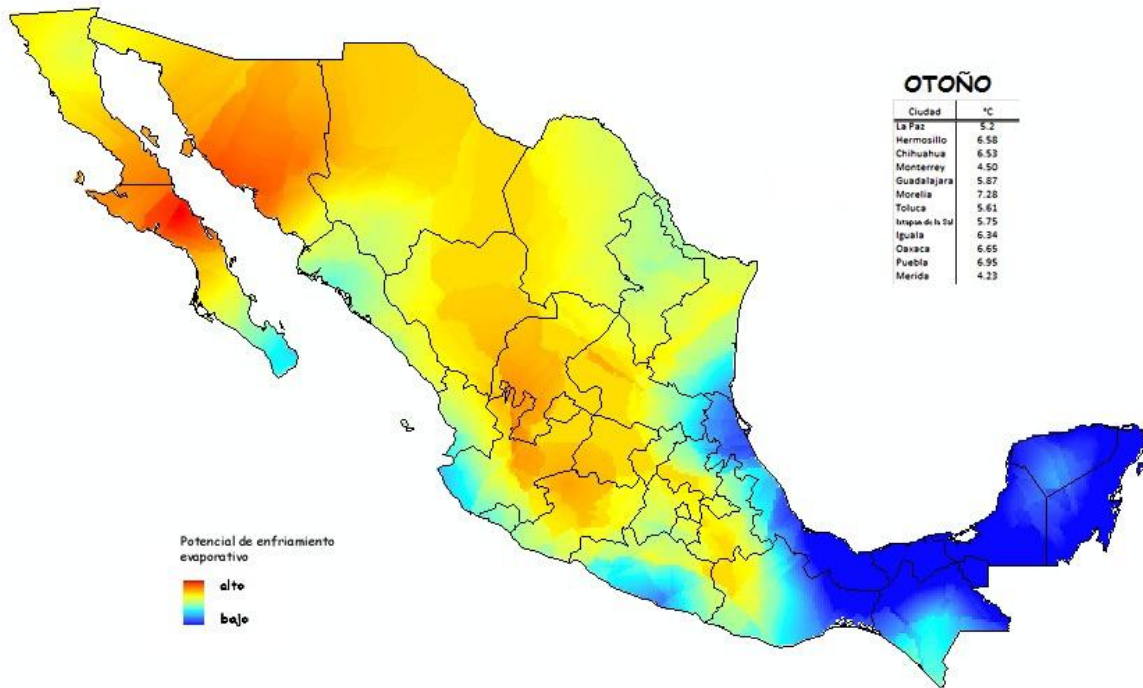


Fig 6.16 Potencial del enfriamiento evaporativo promedio en otoño.

Los mapas muestran claramente como el centro y occidente del país en primavera tienen el mayor factor de utilización del enfriamiento evaporativo, al compaginarse el potencial de enfriamiento con las elevadas horas de calor que se presentan durante esta temporada en las ciudades. Seguido por el norte, que si bien no presenta las condiciones extremas que tiene en verano si empieza a elevarse el número de horas de calor presente. Las zonas del sureste y regiones costeras del golfo y pacífico, vegetadas y de alta presencia de humedad, si bien presentan condiciones de reducción de hasta 12°C no es conveniente por la elevada humedad presente y las altas velocidades de viento por parte del ventilador que se requieren para lograr dichas condiciones. Sin embargo el enfriamiento evaporativo indirecto, puede ser parte de la solución al no incrementar la humedad al interior de los espacios arquitectónicos.

En otoño e invierno el enfriamiento evaporativo es una posibilidad grande al centro del país. México cuenta con inviernos fríos y muy secos que favorecen a este principio. Sin embargo el factor de utilización cae notablemente pues no se requiere refrigerar espacios, al contrario durante esta época se requiere ganancia térmica para lograr el confort de los usuarios.

Las zonas del país que presentan menos potencial fueron aquellas situadas en zonas vegetadas, y costeras que presentan valores más altos de humedad, como lo es la región del sureste del país, las cuales cuentan con grandes volúmenes del recurso hídrico. Temperaturas de bulbo húmedo por encima de los 22°C, con lo que de acuerdo a Givoni el enfriamiento evaporativo directo no es una opción viable.

Para afinar el trabajo y encontrar los sitios de alto potencial para refrigeración evaporativa, se tendría que identificar los volúmenes o limitaciones con las que cuenta cada ciudad respecto al recurso hídrico, por lo cual cualquier propuesta de diseño de sistemas de acondicionamiento evaporativo (activos o pasivos) deberá contemplar la reutilización y el aprovechamiento máximo del recurso para que la estrategia resulte sustentable, y no se solucione un problema generando otro.

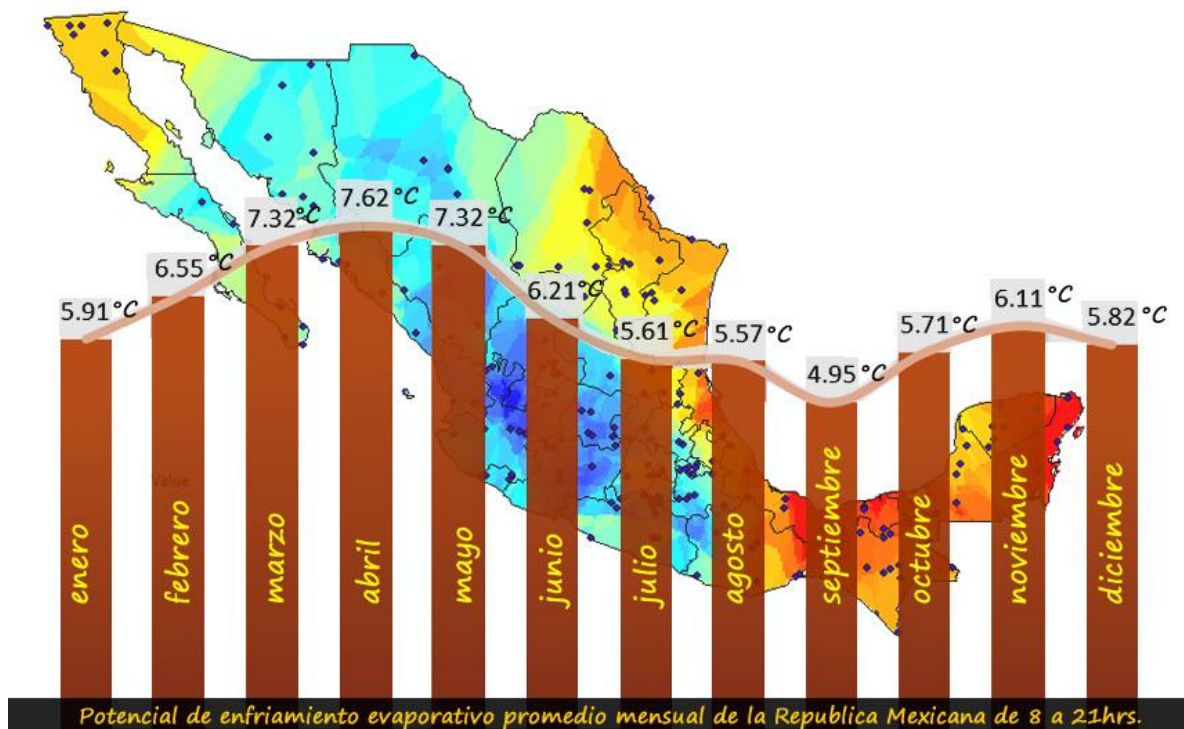


## Capítulo VII. Resultados, beneficios ambientales y energéticos.

### 7.1 Potencial de Enfriamiento Adiabático en la República Mexicana (PEA)

A partir de los datos meteorológicos de 200 ciudades estudiadas de forma aleatoria ubicadas en los 31 estados de la República Mexicana más algunas zonas del Distrito Federal se pudo identificar el PEA espacialmente en los mapas presentados en el capítulo anterior. Encontrando un aumento de 2.2°C en promedio en el potencial de enfriamiento bajo esta estrategia en el horario con mayor incidencia solar contra el considerar las 24 horas del día, involucrando el horario nocturno donde la humedad relativa aumenta considerablemente. El año se dividió en sus 4 estaciones a partir de los meses más representativos de cada una de estas, primavera, verano, otoño, invierno; con el fin de encontrar las temporadas en que se vuelve más eficiente esta técnica de enfriamiento. Los resultados coincidieron en su mayoría con lo pensado al inicio del trabajo. Siendo primavera la estación regularmente la más calurosa y seca del año la que presenta mayor potencial de refrigeración por enfriamiento evaporativo principalmente al centro y occidente del país. Los meses de marzo, abril y mayo estuvieron por encima de las demás meses, aunque el potencial en el verano es muy importante en la región norte de la república mexicana. El otoño e invierno si bien el potencial no es despreciable, por los climas fríos presentes este no es requerido.

La grafica 7.1 muestran el promedio de los grados de temperatura que son posible abatir de 8 a 21 horas. Alto potencial para el empleo de equipos de enfriamiento evaporativo se presenta durante la primavera, en marzo, abril, mayo, la región centro presenta la temporada con el mayor número de horas de calor fuera del confort aun si una persona se coloca a la sombra.



Grafica 7.1 Grados de temperatura promedio que son posible reducir a nivel nacional mediante enfriamiento evaporativo adiabático de 8 a 21hrs. Fuente:Elaboración propia.

Durante el verano la zona norte del país es la que muestra condiciones adecuadas para el uso de esta estrategia, pues no presenta temporadas de lluvias abundantes que aumenten la humedad relativa del ambiente y atenúen la depresión de bulbo húmedo. Al centro del país, las regiones costeras del golfo, el pacífico y el sureste muestran a la llegada de esta estación el inicio de la temporada de lluvias. Con lo que el potencial, donde es adecuado su uso, presenta una caída notable pronunciándose en el mes de septiembre, mes donde con la históricamente mayor presencia de huracanes. Fenómenos meteorológicos que impactan las costas pero cubren gran parte del centro y occidente del país con nubosidad y precipitaciones, lógicamente con incrementos notables de humedad. Por ello el centro y occidente del país no requiere en gran medida de mecanismos del enfriamiento durante el verano, y de llegar a presentar horas de calor de las 12 a las 16 horas se tienen el potencial de disminuir hasta en 5.92°C la temperatura ambiente mediante evaporación.

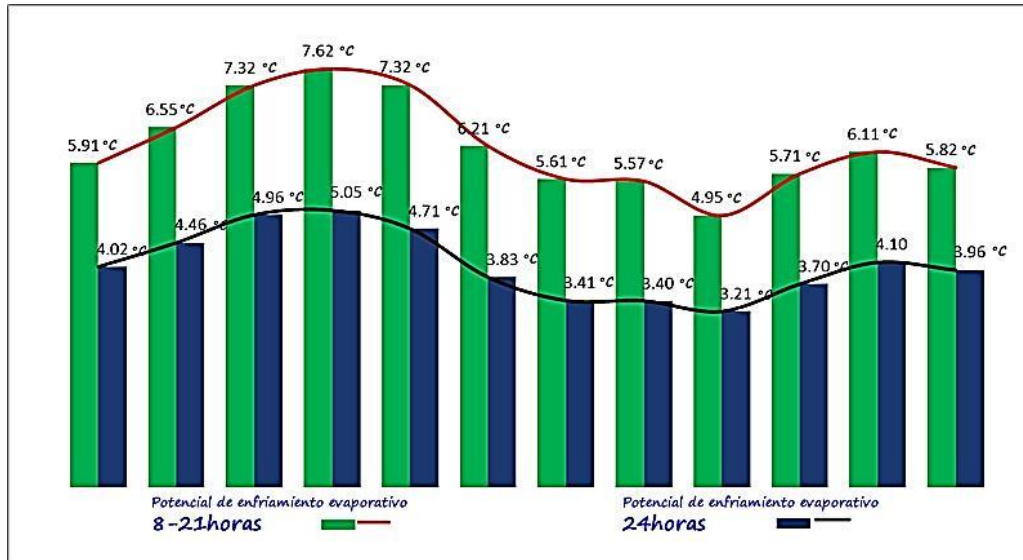
De los meses evaluados el mes que presenta mayor potencial es mayo, con valores medios de reducción del aire de 7.96°C al compartir condiciones elevadas de temperatura el centro y norte del país. Una vez iniciada la temporada de lluvias al centro de la República, las temperaturas descienden, alejándose las horas de calor llegando al confort, incluso para ciertos sitios al elevarse la humedad relativa se mueven al frío. El norte quedando únicamente como sitio adecuado para el enfriamiento evaporativo.

Los valores medios de reducción de la temperatura del aire para los meses de primavera 7.9°C y los 8.2°C al centro del país, mientras el verano se presentan al norte del país como el área con mayor potencial de enfriamiento con valores de 5.9°C y 7.1°C. Teniendo valores máximos medios oscilando durante el verano de 12.5°C a 15°C.

El potencial en los meses de Julio, Agosto, Septiembre disminuye por el aumento de precipitaciones en el centro, sur y occidente del país, sin embargo en ciertos horarios no puede ser despreciable. Al norte del país alcanza su punto máximo. Es durante el verano cuando se dan los mayores consumos de energía eléctrica en toda la región septentrional de la república mexicana. Por lo que para un buen diseño bioclimático y optimizar el uso de este recurso, deben prestarse atención a las condiciones particulares del sitio estudiado. Retomando el caso de estudio de Morelia, el mes de septiembre aún presenta condiciones de calor de 13 a 15hrs. Para ese mes, Morelia muestra regularmente temperaturas promedio entre de 28.6°C a 27.5°C, con 37-38% de humedad relativa. Bajo esas condiciones Morelia tiene un potencial de enfriamiento para disminuir la temperatura entre 7.5-8.4°C, considerando un equipo que con eficiencia del 70% se tendría entonces la posibilidad de abatir la temperatura en 7.1°C por evaporación. Alcanzando en ese horario fácilmente el confort térmico con bajos consumos de energía eléctrica para los usuarios de un edificio cualquiera.

La consideración tomada para evaluar el potencial de enfriamiento a lo largo de todas las estaciones analizadas dentro del horario de 8 a 21 horas, mostro un incremento del 53.6% contra la evaluación del PEA a lo largo de las 24 horas del día. Incremento favorecido por el decremento de la humedad relativa, la cual comúnmente es mucho más alto por las noches. Esto hace del enfriamiento evaporativo una muy buena técnica al atacar los horarios de calor presentes en la tarde. Por las noches pueden emplearse distintas estrategias de enfriamiento, ajenas al evaporativo como el enfriamiento radiativo.

El horario analizado además de contar con la mayor presencia solar abarca el horario laboral. El mejorar las condiciones críticas presentes en este horario representa beneficios económicos incalculables al mejorar el confort de los usuarios. El gráfico 7.2 muestra la comparación entre el potencial encontrado a lo largo de las 13 horas estudiadas y el obtenido a lo largo de las 24 horas del día.



**Grafica 7.2 Potencial de enfriamiento evaporativo a lo largo de las 24 horas del día y potencial de enfriamiento a lo largo del horario de 8 a 21 horas (53% mayor)**  
Fuente: Elaboración propia.

El potencial del enfriamiento evaporativo se reprodujo espacialmente mediante sistemas geográficos de información para los doce meses del año, sin embargo se contabilizaron las horas de calor de las 43 principales ciudades de la República Mexicana a partir del Atlas del Bioclima de México<sup>58</sup> para conocer el factor de utilización como potencial real de esta técnica.

Las horas de calor contabilizadas de las principales ciudades de la república Mexicana generaron un promedio anual de 4.19 horas de calor. Durante la primavera dicho promedio se eleva a 5.15 horas y para el verano llega a su punto máximo por la elevación de temperaturas en la gran zona norteña del país, llegando a 6.1 horas de calor durante esta temporada a pesar de que gran parte del país se ve beneficiado por la temporada de lluvias.

El promedio anual de horas de confort a la sombra que deben ser protegidas para no caer al calor es de 5.16 horas. Las horas de confort disminuyen en la primavera a 5.04 y a 4.63 durante el verano, dado que la elevación de la temperatura promedio y baja de humedad, se sale del confort llevándolas al calor a lo largo del país. La tabla 7.1 muestra los resultados de la contabilización de horas de calor en el territorio mexicano. Las contabilización de horas de confort puede encontrarse en el anexo III de este documento.

<sup>58</sup> Morillon, 2004.



	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
Acapulco	8	8	8	8	10	11	11	11	10	10	10	8
Aguascalientes			3	5	6	5	2					
Campeche	3	5	8	10	11	11	10	10	9	7	5	3
Cancún	5	5	7	8	8	8	8	8	8	8	8	7
Chetumal	5	5	7	8	10	9	8	8	8	8	7	5
Chihuahua				4	6	9	8	6	5	2		
Chilpancingo	3	4	5	7	7	3	3	3	2	3	4	3
Mixcoac, DF			4	5	4	2						
Ciudad Juárez				4	6	9	9	9	7	2		
Cd. Obregón		1	4	6	8	10	12	12	11	9	6	
Cd. Victoria		2	5	9	11	11	11	14	10	7	2	
Colima	7	8	8	9	10	10	9	9	9	9	9	8
Cuernavaca		3	5	7	7	3						
Culiacan	3	4	6	6	8	10	10	9	9	8	5	4
Durango				3	5	6	3					
Guadalajara		3	5	7	8	7	3	3	3	4	2	
Hermosillo		1	4	7	9	12	13	13	12	9	5	
La Paz, BCS			4	6	8	9	11	11	10	9	6	
León, Gto			4	6	7	5	2	1	1			
Manzanillo	6	5	5	5	11	11	11	11	10	10	8	7
Mazatlan					3	8	10	10	9	8	2	
Mérida	6	7	10	11	11	11	11	11	10	8	7	6
Mexicali				5	8	10	13	12	10	7	1	
Monterrey			1	6	8	9	10	9	7	1		
Morelia	2	3	5	7	7	5	4	4	3	3	3	2
Oaxaca	5	6	7	8	8	6	5	5	3	4	5	4
Pachuca												
Puebla			1	3	3							
Queretaro			5	5	7	5	3	3				
Saltillo			3	5	7	7	7	7	2			
SLP			4	5	5	5	1	2				
Tampico				5	7	8	8	9	8	5		
Tepic		2	4	5	5	5	3	3	2	4	3	
Tijuana							4	5	4			
Torreón			1	4	6	6	6	5	2			
Toluca												
Tuxtla Gutiérrez	7	7	8	9	9	8	8	8	7	7	7	7
Veracruz				5	8	8	8	9	8	7		
Xalapa												
Zacatecas				1	3	2						
	5.0	4.4	5.0	6.1	7.4	7.5	7.4	7.7	6.9	6.4	5.3	5.3

Tabla 7.1 Horas del día que presentan calor en las condiciones bioclimáticas características de las principales ciudades de México.

El método para encontrar las horas de calor ayuda a validar este trabajo para encontrar el factor de ahorro al utilizar enfriamiento evaporativo. Sucesivamente se encontró el promedio del factor de utilización de las principales ciudades del país y el promedio anual nacional. Se tomó la consideración de despreciar todo aquel sitio que presente temperaturas de bulbo húmedo superiores a los 22°C por la alta humedad relativa que presentan, ya que dichos sitios como lo propone Givoni difícilmente se adecuaran al confort mediante esta estrategia, al saturar y llevar la humedad relativa presente a niveles que incomodan a las personas.

La parte de invierno y otoño el factor de utilización del enfriamiento evaporativo va por 0.100 a 0.200 en gran parte por que no se requiere enfriar a lo largo del país un número elevado de horas de calor. Mayoritariamente durante estas épocas, se presentan condiciones de frío y los sitios que presentan calor contienen elevados niveles de humedad.

	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	Prom.
Acapulco	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
Aguascalientes	0.100	0.100	0.192	0.254	0.285	0.254	0.162	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.154
Campeche	0.192	0.254	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.192	0.128
Cancún	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
Chetumal	0.254	0.254	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.254	0.138
Chihuahua	0.100	0.100	0.100	0.223	0.285	0.377	0.346	0.285	0.254	0.162	0.100	0.100	0.203
Chilpancingo	0.192	0.223	0.254	0.315	0.315	0.192	0.192	0.192	0.162	0.192	0.223	0.192	0.221
Mixcoac, DF	0.100	0.100	0.223	0.254	0.223	0.162	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.138
Ciudad Juárez	0.100	0.100	0.100	0.223	0.285	0.377	0.377	0.377	0.315	0.162	0.100	0.100	0.218
Cd. Obregón	0.100	0.131	0.223	0.285	0.346	0.408	0.408	0.408	0.438	0.377	0.285	0.100	0.292
Cd. Victoria	0.100	0.162	0.254	0.377	0.438	0.438	0.438	0.469	0.408	0.315	0.162	0.100	0.305
Colima	0.315	0.346	0.346	0.377	0.408	0.408	0.377	0.377	0.377	0.377	0.377	0.346	0.369
Cuernavaca	0.100	0.192	0.254	0.315	0.315	0.192	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.164
Culiacan	0.192	0.223	0.285	0.285	0.346	0.408	0.408	0.377	0.377	0.346	0.254	0.223	0.310
Durango	0.100	0.100	0.100	0.192	0.254	0.285	0.192	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.144
Guadalajara	0.100	0.192	0.254	0.315	0.346	0.315	0.192	0.192	0.192	0.223	0.162	0.100	0.215
Hermosillo	0.100	0.131	0.223	0.315	0.377	0.469	0.408	0.408	0.408	0.377	0.254	0.100	0.297
La Paz, BCS	0.100	0.100	0.223	0.285	0.346	0.377	0.100	0.100	0.100	0.377	0.285	0.100	0.208
León, Gto	0.100	0.100	0.223	0.285	0.315	0.254	0.162	0.131	0.131	0.100	0.100	0.100	0.167
Manzanillo	0.285	0.254	0.254	0.254	0.438	0.438	0.100	0.100	0.100	0.100	0.346	0.315	0.249
Mazatlan	0.100	0.100	0.100	0.100	0.192	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.162	0.100	0.113
Mérida	0.285	0.315	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.285	0.149
Mexicali	0.100	0.100	0.100	0.254	0.346	0.408	0.438	0.438	0.408	0.315	0.131	0.100	0.262
Monterrey	0.100	0.100	0.131	0.285	0.346	0.377	0.408	0.377	0.315	0.131	0.100	0.100	0.231
Morelia	0.162	0.192	0.254	0.315	0.315	0.254	0.223	0.223	0.192	0.192	0.192	0.162	0.223
Oaxaca	0.254	0.285	0.315	0.346	0.346	0.285	0.254	0.254	0.192	0.223	0.254	0.223	0.269
Pachuca	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
Puebla	0.100	0.100	0.131	0.192	0.192	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.118
Queretaro	0.100	0.100	0.254	0.254	0.315	0.254	0.192	0.192	0.100	0.100	0.100	0.100	0.172
Saltillo	0.100	0.100	0.192	0.254	0.315	0.315	0.315	0.315	0.162	0.100	0.100	0.100	0.197
SLP	0.100	0.100	0.223	0.254	0.254	0.254	0.131	0.162	0.100	0.100	0.100	0.100	0.156
Tampico	0.100	0.100	0.100	0.254	0.100	0.100	0.100	0.100	0.346	0.254	0.100	0.100	0.146
Tepic	0.100	0.162	0.223	0.254	0.254	0.254	0.192	0.192	0.162	0.223	0.192	0.100	0.192
Tijuana	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.223	0.254	0.223	0.100	0.100	0.100	0.133
Torreón	0.100	0.100	0.131	0.223	0.285	0.285	0.285	0.254	0.162	0.100	0.100	0.100	0.177
Toluca	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
Tuxtla Gutiérrez	0.315	0.315	0.346	0.377	0.377	0.100	0.100	0.100	0.315	0.315	0.315	0.315	0.274
Veracruz	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
Xalapa	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
Zacatecas	0.100	0.100	0.100	0.131	0.192	0.162	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.115

0.1862

**Tabla 7.2 Factor de utilización del enfriamiento evaporativo conveniente para ahorro de energía en las principales ciudades de México durante las horas de confort.**

Durante la primavera y verano se presentan factores entre 0.200 y 0.250, siendo mayo el mes más caluroso en todo el país, ya que con la llegada de lluvias, el centro, occidente y sureste del país presentan condiciones térmicas más favorables. A diferencia del norte que enfrenta un verano con altas horas de calor que pueden ser enfrías mediante esta técnica. Teniendo un promedio anual de utilización de 0.1862. (tabla 7.2)

En la gráfica 7.3 se comparan los factores de utilización para los doce meses del año. El factor va de 0.136 en el mes más frío del año a 0.254 durante el cálido mes de mayo para las principales ciudades del país. La primavera es el mes con mayor potencial de utilización al unir al centro, occidente y norte del país en condiciones cálidas. Para el verano, el norte del país registra un alto potencial dadas las altas temperaturas que presenta. El centro y occidente del país sufren una atenuación de las temperaturas producto de la llegada de la temporada de lluvias. Efecto de un enfriamiento evaporativo dado de forma natural.

El otoño presenta un norte con un buen número de horas de calor y un factor de utilización alto. Zonas del centro en caso de presentar elevación en la humedad se saldrían de la zona de confort hacia el frío, caso de ciudades como Toluca, Pachuca, Puebla, D.F.



**Gráfica 7.3** Factor de utilización del enfriamiento evaporativo en las principales ciudades del país considerando únicamente las horas de calor de los requerimientos bioclimáticos presentes.

Para poder visualizar en términos económicos y ambientales el uso del enfriamiento evaporativo en México como técnica pasiva o activa de ahorro de energía, la tabla 7.3 muestra la diferencia de consumos energéticos entre equipos de aire acondicionado y “coolers” o equipos de enfriamiento evaporativo adiabático.

Aparato	Potencia promedio	Tiempo uso al día (periodos típicos)	Tiempo de uso al mes	Consumo mensual kilovatios-hora (vatios/1000) x hora	Consumo anual 5 meses al año	Energía consumida vs cooler de similar capacidad
	Watts	hrs. diarias	horas	kWh	kWh	%
Aire lavado (cooler) grande	600	12	360	216	1080	100%
Aire lavado (cooler) mediano	400	12	360	144	720	100%
Aparato de ventana 1 ton. antiguo	1850	10	300	555	2775	385%
Aparato de ventana 1 ton. nuevo	1200	8	240	288	1440	200%
Aparato de ventana 1.5 ton. antiguo	2250	10	300	675	3375	313%
Aparato de ventana 1.5 ton. nuevo	1800	8	240	432	2160	200%
Aparato de ventana 2 ton. antiguo	3200	10	300	960	4800	444%
Aparato de ventana 2 ton. nuevo	2450	8	240	588	2940	272%
Aparato dividido 1ton. (minisplit)	1160	8	240	278	1390	193%
Aparato dividido 1.5ton. (minisplit)	1680	8	240	403	2015	187%
Aparato dividido 2ton. (minisplit)	2280	8	240	547	2735	253%

**Tabla 7.3. Consumos eléctricos de equipos de refrigeración.**

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CFE.

El uso del enfriamiento evaporativo en México llevado a un beneficio económico puede llevarse mediante sistemas pasivos o activos. Para el caso de un sistema pasivo los beneficios económicos se traducen a partir de la tabla 7.3, donde se muestran los consumos eléctricos dados por la CFE para diversos tamaños de equipos de refrigeración, aire acondicionados (AC) tradicionales y “coolers”, equipos a base de enfriamiento evaporativo. El siguiente cuadro muestra los consumos y ahorro económico para la ciudad de Morelia, Michoacán caso de estudio.

## 7.2 Beneficios energéticos del uso del enfriamiento evaporativo en la República Mexicana.

El consumo de energía eléctrica de los sectores comercial y residencial en aire acondicionado registrados por el balance nacional de energía 2008, tabla 2.2, muestra el porcentaje y consumo por sector. Considerando el factor de uso anual encontrado para el adecuado funcionamiento por parte del enfriamiento evaporativo adiabático, se tiene entonces el posible ahorro de energía que esta estrategia significa como lo muestra la tabla 7.4 para el sector residencial y la tabla 7.5 para el sector comercial.

Sector residencial, 2008	Porcentaje consumido por aire acondicionado	Consumo de electricidad por aire acondicionado	
47,450 GWh	18%	8,541 GWh	
Consumo residencial por aire acondicionado	Potencial promedio de ahorro enfriamiento evaporativo en México por uso	Ahorro de electricidad	
8,541 GWh	hrs. de confort	0.1862	1,113.234 GWh
	Confort +Calor	0.322	1,925.141 GWh

**Tabla 7.4 Consumo del sector residencial en 2008 en aire acondicionado y posible ahorro mediante el uso del enfriamiento evaporativo usándose durante horas de calor y horas de calor más horas de confort. Fuente: Elaboración propia.**

En el sector residencial mexicano se podría tener un posible factor de utilización promedio nacional de 0.1862 de emplearse durante las horas que presentan calor (tabla 7.2). Factor que crece a 0.322 de usarse durante las horas de calor y durante las horas que presentan confort a la sombra (anexo II). Dichas horas de confort, bien pueden mantenerse mediante protección solar o ventilación natural ahorrando el consumo eléctrico que significa arrancar durante dicho lapso de tiempo los equipos. Se hace esta consideración, tomando en cuenta posibles distracciones de los usuarios quienes utilizarían los equipos durante dicho periodo.

Considerando que los equipos mecánicos de enfriamiento evaporativo utilizan en promedio el 30% de la energía que equipos de similares características de aire acondicionado convencional, se tendría un ahorro del 2.34% en el consumo total del sector por el empleo de esta estrategia, 1,113.234 GWh. Teniendo en cuenta que únicamente se consideró el uso de este potencial durante las horas de calor del día presentes en las ciudades estudiadas.

Sector comercial, 2008	Porcentaje consumido por aire acondicionado	Consumo de electricidad por aire acondicionado	
13,627 GWh	28%	3,815.56 GWh	
Consumo comercial por aire acondicionado	Potencial de ahorro enfriamiento evaporativo en México	Ahorro de electricidad	
3,815.56 GWh	hrs. de confort	0.1862	497.32 GWh
	Confort +Calor	0.322	860.02 GWh

**Tabla 7.5 Consumo del sector comercial en 2008 en aire acondicionado y posible ahorro mediante el uso del enfriamiento evaporativo usándose durante horas de calor y horas de calor más horas de confort. Fuente: Elaboración propia.**

El sector comercial que presenta un mayor porcentaje de uso del aire acondicionado, se tiene un potencial de ahorro del 3.77% en el consumo total del sector, 514.548 GWh. Como lo muestra la tabla 7.6, se tiene entonces un posible ahorro de 1,610.554 GWh.

Ahorro enfriamiento evaporativo en sector residencial	1,113.234 GWh
Ahorro enfriamiento evaporativo en sector comercial	497.32 GWh
<b>POTENCIAL DE AHORRO POR ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO</b>	<b>1,610.554 GWh</b>
Durante las horas de calor que presentan las ciudades	

**Tabla 7.6 Potencial de ahorro de energía eléctrica al sustituir equipos de aire acondicionado por equipos de enfriamiento evaporativo (coolers).**

### 7.3 Beneficio ambiental

En México combustibles fósiles como el gas natural, diesel, carbón mineral son empelados como combustibles para generación de vapor con una siguiente transformación a fluido eléctrico. Por arriba del 70% de la energía eléctrica generada, proviene de fuentes fósiles, en un parque de generación que incluye desde ciclos combinados, carboelectricas hasta turbinas de gas menos eficientes empleadas durante horarios punta. El enfriamiento evaporativo comparado con sistemas de aire acondicionado convencionales significa un notable ahorro en el consumo y demanda de estos recursos, y menor emisión de gases contaminantes a nivel local y de Bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), gas asociado al calentamiento global por efecto invernadero.

Para el año 2008 el haber evitado el consumo de 1,610.554 GWh por empleo de enfriamiento evaporativo se habría logrado un ahorro de 844 mil toneladas de CO<sub>2</sub>, ayudando a disminuir fuertemente las emisiones del país, siendo esto una meta del programa nacional para el aprovechamiento sustentable de la energía. Para este trabajo no se calculó el posible beneficio económico por venta de bonos de carbono, dado a que no se ha logrado a nivel internacional un acuerdo para darle continuidad al protocolo de Kyoto, el cual vence el próximo año 2012.

<b>Contaminante</b>	<b>Toneladas evitadas</b>
Bióxido de carbono	844,735 CO <sub>2</sub>
Óxidos de nitrógeno	7,136.3 NO <sub>x</sub>
Óxidos de azúfre	33,499 SO <sub>x</sub>

**Tabla 7.7 Toneladas evitadas de gases de efecto invernadero por uso de enfriamiento evaporativo que se habrían tenido en México en el año 2008.**

*Capítulo VIII*

*Conclusiones*



## Capítulo VIII

### Conclusiones

El uso adecuado de la energía y la disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero toman tal relevancia en nuestros días, por lo que deben ser tomadas todas las medidas que lo logren. Afortunadamente en la totalidad del territorio de la República Mexicana se posee el potencial para aprovechar el enfriamiento evaporativo como técnica de disminución de temperatura. Para el acondicionamiento de espacios, se pueden obtener los mismos niveles de servicio con menores consumos de energía contrario a lo que significan los sistemas convencionales de aire acondicionado mecánicos.

Toda la República Mexicana tiene potencial para disminuir la temperatura mediante la estrategia del enfriamiento evaporativo como sistema de climatización. Aún en regiones cálidas y húmedas como el sureste y gran parte de la región costera de la república mexicana existe potencial de disminuir la temperatura varios grados bajo esta técnica, no para uso de confort humano al poseer temperaturas de bulbo húmedo superiores a los 22°C, lo cual no lo hace recomendable por requerir para lograr dicho efecto altas velocidades del viento y la elevada humedad que se presenta, lo cual aumenta la sensación de calor. Para usos agrícolas en invernaderos para vegetales o en el manejo de animales en la actividad pecuaria si puede ser considerable.

A pesar de ello en las regiones húmedas, las cuales son fuertes zonas turísticas con altos consumos de energía por uso de aire acondicionado; la hora más caliente del día viene acompañada de una disminución en la humedad relativa del ambiente, posibilitando el uso del enfriamiento evaporativo durante ciertas temporadas. O bien, bajo estas condiciones se recomienda el uso de enfriamiento evaporativo indirecto que asegure que no se incrementara la humedad relativa en los espacios construidos. El uso de mecanismos desecantes del ambiente, con el aumento en los costos asociados puede ayudar a lograr dicho efecto y hacerlo considerable durante mayores temporadas.

Al dividir al año en sus 4 estaciones, (primavera, verano, otoño, invierno) los resultados coincidieron con lo pensado en un inicio. Pudiéndose dividir el potencial nacional de enfriamiento evaporativo en dos grandes zonas y dos etapas. Durante la primavera al vinculársele con ser la más calurosa y seca del año los factores más altos de posible ahorro se encuentran en la zona centro y occidente del país. Zonas secas que van de Oaxaca a Puebla, corren por Michoacán, el centro del país, hasta las regiones de Nayarit y Jalisco. Los meses de marzo, abril y mayo presentan un factor de ahorro muy por encima de las demás meses a nivel nacional.

Durante el verano el potencial disminuye en el centro y occidente del país con el arribo de la temporada de lluvias, las regiones calurosas del norte y principalmente del noroeste del país son las que presentan mayores factores de ahorro de energía por uso de esta estrategia. Son las zonas secas las que mayor potencial presentan durante todo el año por lo amplio de la depresión de bulbo húmedo que presentan. zonas que llegan a presentar veranos de 40°C y pueden abatir sus temperaturas a cómodos 22-25°C. Durante otoño e invierno estas regiones siguen presentando gran número de horas de calor, y gran potencial de abatirlas por esta estrategia.

En regiones calurosas de baja humedad, se tiene el mayor potencial para uso del enfriamiento evaporativo, el problema presente es la baja disponibilidad de agua por lo seco de estas regiones. Los equipos de enfriamiento evaporativo requieren **reglamentación y normatividad nacional** que estandarice y regule la calidad y consumos de agua los equipos, relación litros por hora por °C atenuado (lt/hr °C). Se recomienda considerar las recomendaciones del trabajo de Luis Carlos Herrera (PLEA 2008) para acompañar esta



estrategia de refrigeración de espacios acompañada de otras medidas bioclimáticas que logran disminuir los consumos de 1.03 lt/°C a 0.48 lt/°C.

En regiones del altiplano central el elevar la humedad relativa durante ciertas temporadas, lleva a la disminución de la temperatura pudiendo salir del confort a frías. En Toluca o Pachuca durante el verano, temporada generalmente cálida en la mayoría del territorio mexicano, el aumento de humedad con la presencia de la temporada de lluvias condiciona la presencia de frío.

A pesar de que en el sureste Mexicano no sea del todo viable el enfriamiento evaporativo por los 22°C-24°C de temperatura de bulbo húmedo que presenta, contar con temperaturas calientes que rondan los 28°C-30°C. Condiciones logradas por tener eficiencias en equipos promedio de 70%, grados de temperatura ganados por convección, más alta humedad y velocidades de aire en los ventiladores no adecuadas. A pesar de ello es primordial aplicar otras técnicas de control bioclimático en estas regiones para lograr el confort térmico buscando reducir el consumo de energía por acondicionamiento de aire.

El uso de sistemas pasivos o híbridos de enfriamiento evaporativo para acondicionar el aire que ingresa a edificaciones tiene un alto potencial de aceptación entre los consumidores al relacionar beneficios ambientales con un ahorro económico en facturas de energía eléctrica. En ciertas regiones estos equipos pueden acondicionar espacios, creando las mismas condiciones que equipos de aire acondicionado basados en compresión de refrigerantes. Además de que de estas tecnologías son definitivamente más económicas. El que se aprovechen más dependerá de cómo la sociedad las vaya asumiendo y de la existencia de políticas públicas que reconozcan su valor ambiental, económico y social.

Por otra parte, se pudo verificar el beneficio que se tiene al promover este tipo de climatización. En 2008 en construcciones del sector residencial o comercial de haber maximizado su uso se habría tenido un ahorro de energía aproximado de 1.610TWh, considerando el factor de utilización promedio nacional buscando acondicionar únicamente las horas de calor del día.

Ahorros en energía se traducen en beneficios para la economía del país. El gobierno quien pudiera liberar recursos de generación y pago de combustibles y destinarlos a otros rubros prioritarios. Los beneficios económicos para los usuarios son altos. Para el caso de Mexicali donde los usuarios residenciales consumen 3.5 veces más energía que el promedio nacional, a pesar de subsidios en tarifas eléctricas, el uso del enfriamiento evaporativo conduciría a lograr ahorros del 40-60% de la factura eléctrica.

Las tendencias de venta de equipos van en aumento, vinculándose con aumentos en el ingreso de las familias. Hoy día existen muchas regiones del país donde la población por razones económicas vive fuera del confort térmico afectando su salud y productividad. En el caso de las aplicaciones agrícolas, o eventualmente para **localidades alejadas de la red**, de difícil acceso su **uso mediante paneles fotovoltaicos cuya potencia se obtiene en fase con la demanda durante las horas de sol**, El enfriamiento evaporativo en esas regiones constituye una fuerte **oportunidad para mejorar la calidad de vida de dichas personas**. Además pueden fabricarse dispositivos que utilicen esta estrategia con relativa facilidad.

Beneficios en salud presenta el enfriamiento evaporativo al estimular la introducción de aire fresco a los edificios renovando el aire con tasas de tiempo cortas, a diferencia de los equipos convencionales, en los que se vicia el aire y contaminantes presentes dentro de una habitación. El abrir puertas o ventanas en presencia de A/C se tienen fuertes pérdidas energéticas al introducir masas de aire caliente. Los equipos de

enfriamiento evaporativo por otra parte aseguran al no contar con rociadores o pulverizadores de agua, no hay riesgo de formación de aerosoles, *no existe entonces riesgo de contagio de Legionella* o la propagación de cualquier otra bacteria presente en el agua. Lo que en ciertos casos podría permitir el uso de agua de lluvias o agua parcialmente tratada.

No únicamente existe potencial para el sector residencial, también se presenta como alternativa de gran potencial dentro de los sistemas agropecuarios intensivos el refrescamiento por enfriamiento evaporativo. Con este mecanismo se ayudaría en granjas porcinas, avícolas, granjas lecheras o invernaderos a mejorar la productividad notablemente. En cuanto a costos de inversión, de acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA) los equipos de enfriamiento evaporativo directo equivalen a 1/3 del costo de un equipo de aire acondicionado mecánico.

Para combatir el el cambio climático se requiere atacar desde diversas perspectivas. Reducir nuestras necesidades energéticas, emplear la energía de modo más eficiente, cambiar las fuentes de energía por el uso de renovables y cambio de prácticas por parte de usuarios. Como beneficio el enfriamiento evaporativo abarca varias de estas, con relación al año 2008 se habrían dejado de emitir a la atmósfera 844,735 toneladas de CO<sub>2</sub>, de 7,136.3 de óxidos de nitrógeno, de 33,499 de óxidos de azufre aproximadamente. Cantidad de emisiones nada despreciable, y que contribuiría con importante aporte conforme a los dramáticos escenarios posibles que se manejan ante una elevada concentración de ppm de CO<sub>2</sub> equivalente presente en la atmósfera.

Esta tesis es el resultado de un estudio teórico que evalúa las condiciones ambientales del país, sin considerar cargas térmicas particulares al interior de espacios. El estudio presento la limitación de no poder identificar dentro de ciudades las diferencias en el PEE provocadas por las diferencias entre sitios urbanizados, que presentan una alta y media densidad edilicia, comparadas con las zonas de baja densidad de las orillas de las ciudades, o de los sitios que cuentan con mayor vegetación. A pesar de que con la metodología recomendada y datos medidos confiables estos pudieran obtenerse con mayor precisión, se debe tomar en cuenta que este trabajo se basa en simulaciones virtuales, por lo que requiere validarse con estudios experimentales, que seguramente involucraran otras variables reales.

A pesar de ser el enfriamiento evaporativo una técnica subutilizada y subestimada en un país con tanto potencial como México, los sistemas basados en un principio de enfriamiento tan sencillo y natural como el deben ser considerados como una alternativa real para la climatización en la búsqueda de alcanzar el confort térmico en la aplicación que se quiera, sin representar excesivas inversiones adicionales.

Este trabajo busca facilitar y ampliar el uso del enfriamiento evaporativo al poder interpretar fácilmente la metodología y mapas generados en la búsqueda de sitios propicios para optimizar el uso de la energía en el sector edilicio, siendo este más amigables con el entorno sin sacrificar la comodidad, mejorando las condiciones de salud al renovar continuamente el aire al interior, reduciendo las facturas en el cargo de electricidad y evitando impactos al ambiente en México.

*Bibliografía*



## Bibliografía

Alpuche Cruz María G., Ávila Segura, Francisco (2000). "El uso de sistemas de enfriamiento con desecantes en el acondicionamiento de edificaciones". Centreo de Investigaciones Electricas (CIE) UNAM. México.

ASHRAE (1989), "Fundamentals Handbook SI Edition, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.", Atlanta, Ga.

Baker D.R. and Shryock HA (1961) A comprehensive approach to the analysis of cooling tower performance. J.Heat Transfer. ASME Trans. Chicago.

Bom Gert Jan, Foster Robert, Dijkstra Ebel, Tummers Marja. (1998) Evaporative Air-Conditioning. Applications for environmentally Friendly Cooling. World Bank Technical Paper. Energy Series. New York.

Carrasco C.Carlos; Morillón, David. (2001) Patio central como sistema pasivo de enfriamiento en clima cálido seco: Edificios comerciales. CIE. UNAM. Memorias de ANES

Carrier Psychrometric Chart (1946) American Society of heating and Ventilation. Energy Guide, New York.

CFE. Tabla de Consumo de Electrodomésticos. México D.F: Comisión Federal de Electricidad. Consulta mayo 2011.

<http://www.cfe.gob.mx/sustentabilidad/ahorroenergia/Paginas/Tabladeconsumo.aspx> México.

Chávez Galán, Jesús; Morillón Gálvez, David (2008) Sistema pasivo de ventilación-deshumidificación. Instituto de Ingeniería, UNAM. México Memorias de ANES

Correa E.N., De Rosa C., Lesino G. (2007) Acondicionamiento térmico de los espacios. Estudio del potencial de enfriamiento evaporativo adiabático dentro del área metropolitana de Mendoza, Argentina.LAHV Lab.de Ambiente Humano y Vivienda. INCIHUSA-CONICET. INENCO. Memorias de ASADES Mendoza, Argentina.

Gallegos, R. Luna, A. Velázquez, N., Bojórquez, G. (2006) Estudio de las limitantes del uso de enfriamiento evaporativo en el clima árido de Mexicali. Universidad Autónoma de Baja California. Memorias de ANES

Gershon Grossman.(2002) Solar energy vol.72 No.1 USA.

Gea M., Sánchez B., Placco C., Iriarte A. y Lesino G. (2003) Estudio y comparación de distintos tipos de intercambiadores para enfriamiento evaporativo. Universidad Nacional de Salta, Instituto en Energías No Convencionales (INENCO) Memorias de ASADES 2004. Argentina.

Givoni, B (1976), *Man, climate and architecture*, Van Reinhold Nostrand, Nueva York.

Givoni, B. (1994). *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*. Van Nostrand Reinhold. New York. USA.

Givoni, B. (1997). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. Van Reinhold Nostrand, Nueva York.

Givoni, B. (1997). Performance of the "shower" cooling tower in different climates. *Renewable energy* , 10, 173-178. Nueva York, USA.

Givoni, Baruch (2009) Indoor temperature reduction by passive cooling systems. Article in press. . Solar Energy. Nueva York, USA.

Herrera Sosa, Luis Carlos; Gómez Azpeitia, Gabriel. (2008) Estrategias bioclimáticas y ahorro de agua en equipos de enfriamiento evaporativo directo. Universidad de Colima, México. Palapa, vol.III, Octubre. Pp55-61. Disponible en:

<http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=94814746008>

INEGI, Encuesta Nacional Ingreso Gasto de los Hogares 2004, INEGI, México D.F., 2005, <http://www.inegi.gob.mx/prodserv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/encuestas/hogares/enigh/2004/ENIGH2004.pdf>.

INEGI, Encuesta Nacional Ingreso Gasto de los Hogares, 2006. Bases de datos, **Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Ags. México, 2007**

IMPCO. Calculating evaporative cooler. En línea disponible en: <http://impcoco.com/>

Lamberts, R (2005), Reglamentación para etiquetado voluntario de nivel de eficiencia energética de edificios comerciales y públicos, Ley de Eficiencia Energética, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil, Conferencias ISES-ISADES 2006.

Lewis, W.K. (1993) The evaporation of a Liquid into a Gas, ASME, vol.44 vol.55, p.1567. Septiembre.  
Mardomingo Jimeno, Antonio (1998) Fundamentos de aire acondicionado. Biblioteca Técnica Universitaria. Madrid, España.

Metz, Bert. (2010) Controlling Climate Change. Cambridge, UK.

Morillón Gálvez. David, Oropeza Pérez Iván. Atlas de la ventilación natural para la República Mexicana. Potencial para ahorrar energía en la climatización de edificios. (2009) Serie investigación y desarrollo. Instituto de Ingeniería. UNAM. México.

Morillón Gálvez. David. Atlas del bioclima de México. (2004) Serie investigación y desarrollo. Instituto de Ingeniería. UNAM. México.

Morillón Gálvez, David. Bioclimática. Sistemas pasivos de climatización. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México.

Morillón Gálvez, David. (1993) BASES BIOCLIMÁTICAS PARA EL DISEÑO DE CONSTRUCCIONES AGROPECUARIAS. Programa Universitario de Energía, FIRCO-SAGARPA. México.

Price et al. (2006) Sectoral trends in global energy use and greenhouse gas emissions, LBL, report LBNL-56144, Julio. Holanda. CE.

Pinazo Ojer, José Manuel (1995) Manual de Climatización. Tomo I. Universidad Politecnica de Valencia, España.

Pilatowsky Figueroa, Isaac. (2002) Psicrometría, métodos de humidificación y dehumidificación y sus aplicaciones en el diseño arquitectónico. Centro de Investigación en Energía. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable 2009-2012. Secretaría de Energía. México

Passive Cooling Technologies. 2007 Agencia Austriaca de Energía. Austria.

Quadri, Nestor Pedro ( 2002) Instalaciones de aire acondicionado y calefacción. Librería y Editorial Alsina. 6ª ed. Argentina.. [www.acondicionamiento.com.ar](http://www.acondicionamiento.com.ar)

Romero Moreno Ramona A., . Morales Ramírez, José D. Sáñdez Pérez, Agustín. (2000) Consumo de energía eléctrica del sector residencial en México: El caso Mexicali. Memorias de ANES . Facultad de Arquitectura, Universidad de Baja California Posgrado. UNAM. México.

Roriz Víctor Figueiredo. Roriz Mauricio (2008) Enfriamiento evaporativo por aspersión de agua sobre telas en clima semi húmedo. Encuentro Nacional de Tecnología de Ambiente Construido ENTAC .Universidad Federal de San Carlos, Brasil.

Roriz Victor Figueiredo; Maurício Roriz. Resfriamiento Evaporativo por aspersão de agua sobre tlas de fibrocimento em clima semi-úmido. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil – Brasil.

**Rosas-Flores, Jorge Alberto**, Rosas-Flores, Dionicio, Morillón Gálvez, David. (2011) Energy and Buildings. Saturation, energy consumption, CO2 emission and energy efficiency from urban and rural households appliances in Mexico. Energy and Buildings 43, 10-11. México.

**Rosas-Flores, Jorge Alberto**. Morillón Gálvez, David. 2010. What goes up: Recent trends in Mexican residential energy use. Energy.35, 2596–2602. México.

Sámano Diego A. (2002) Enfriamiento Evaporativo. Energía y Ecología, S.A. de C.V. México.

Stoecker,W.F.(1958) Refrigeración y Acondicionamiento de Aire. McGraw-Hill. EUA. Traducción, revisión y conversión de tablas y graficas por José Seijas Domínguez. Escuela Politécnica de Madrid. España

Solar Energy. Experimental and numerical evaluation of a Solar passive cooling system under hot and humid climate conditions. Vol71. 2001. Page 71. USA.

TANG, R.; ETZION, Y. (2004) On termal performance of an improved roof pond for coolin buildings. Chicago, USA.

Tejeda, A. (1991). Simulación de la marcha diaria del confort higrotérmico en la República Mecivana. Memorias de I Encuentro Nacional de Diseño y Medio Ambiente Universidad de Colima-CFE pp167-172.

Building and Environment, Oxford, n.39.p.201-209. Oxford. UK.

Torres Campos, Elcio. Klosowski Silvério, Santos Campos Diogo, Antonio Ribeiro da Cunha. (2006) Estimacion de reduccion de temperatura mediante enfriamiento evaporativo, utilizando datos climaticos para la region de Maringá, Paraná, Brasil. Grupo de Investigaciones en Ambiente del Oeste de Paraná.

Tudela, F (1982), *Ecodiseño*, UAM-Xochimilco, México, 233 pp

Waugaman, D.g. Kini, (1993) A Review of Desiccant Cooling Systems, Journal of Energy Resources Technology, Vol.115, 1-8 USA.

*Apéndice I*

*Temperatura de bulbo húmedo y potencial de abatimiento de temperatura  
por enfriamiento evaporativo de principales ciudades del país*



*Apéndice II*

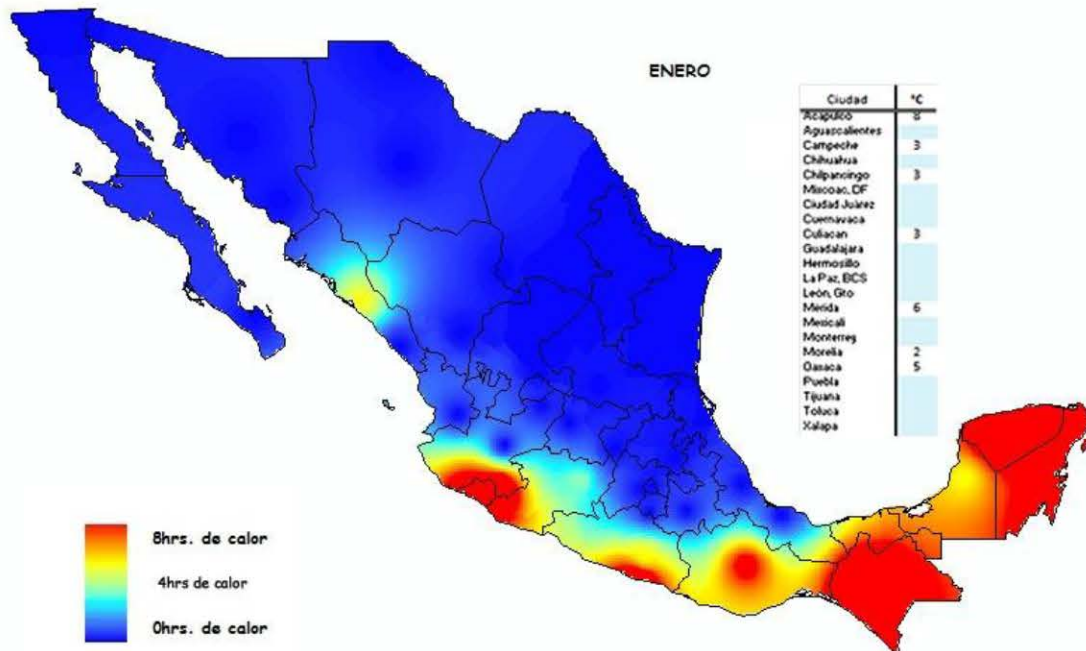
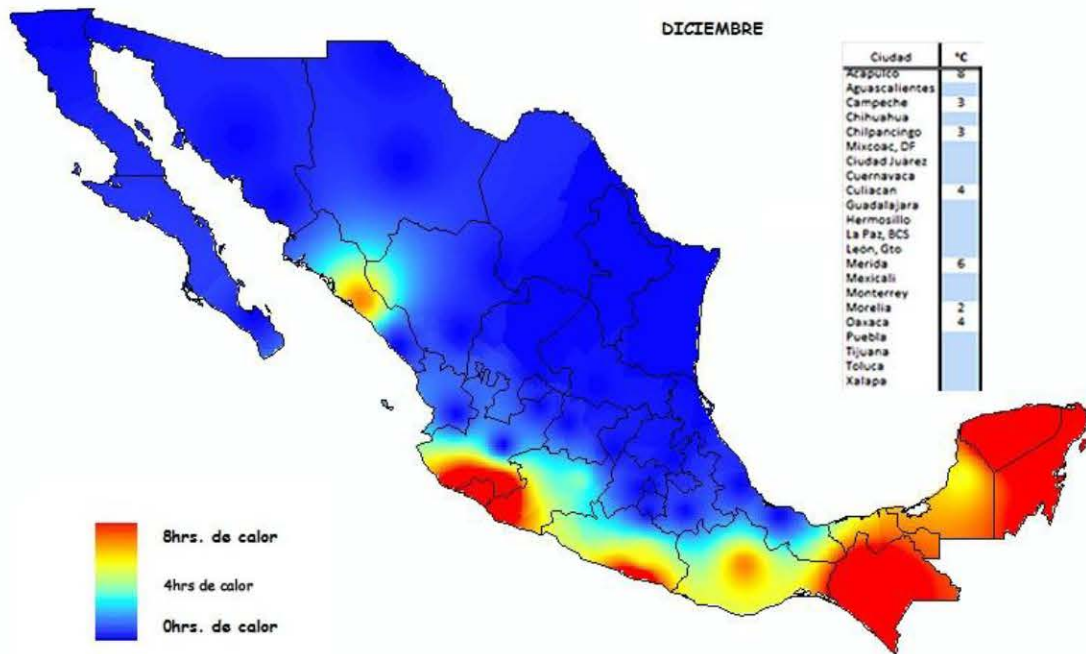
*Horas de calor presentes en ciudades del país*

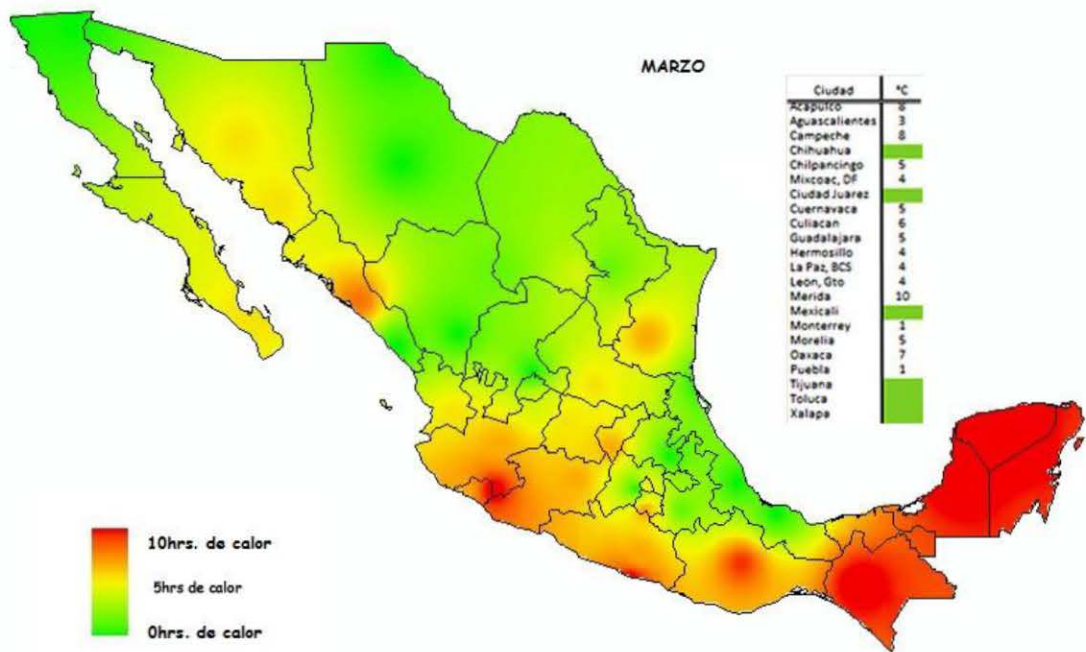
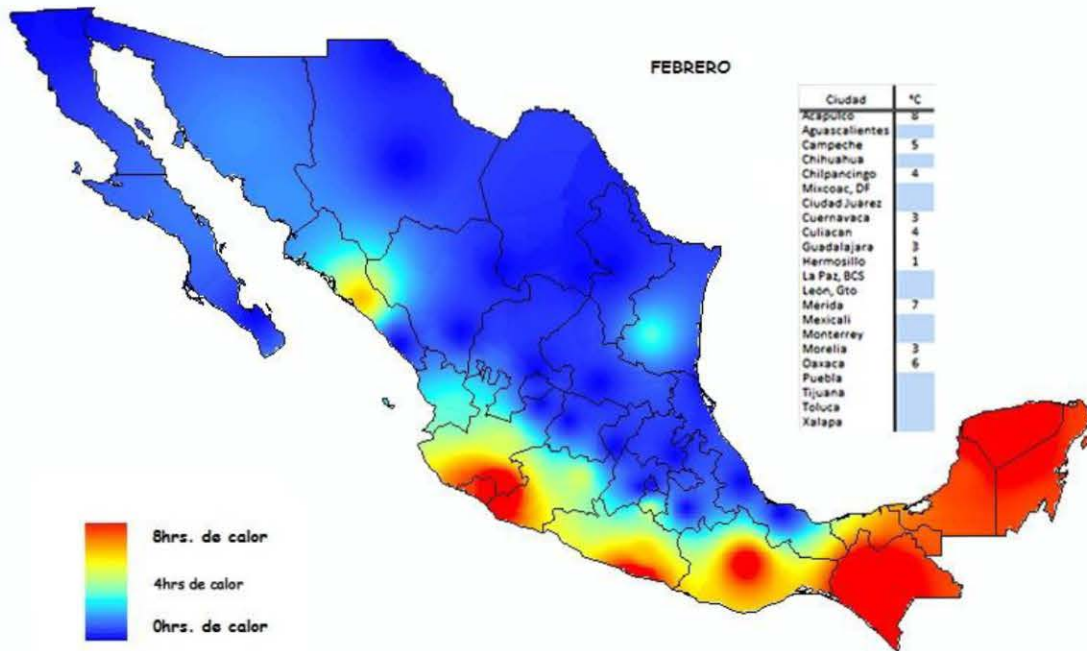


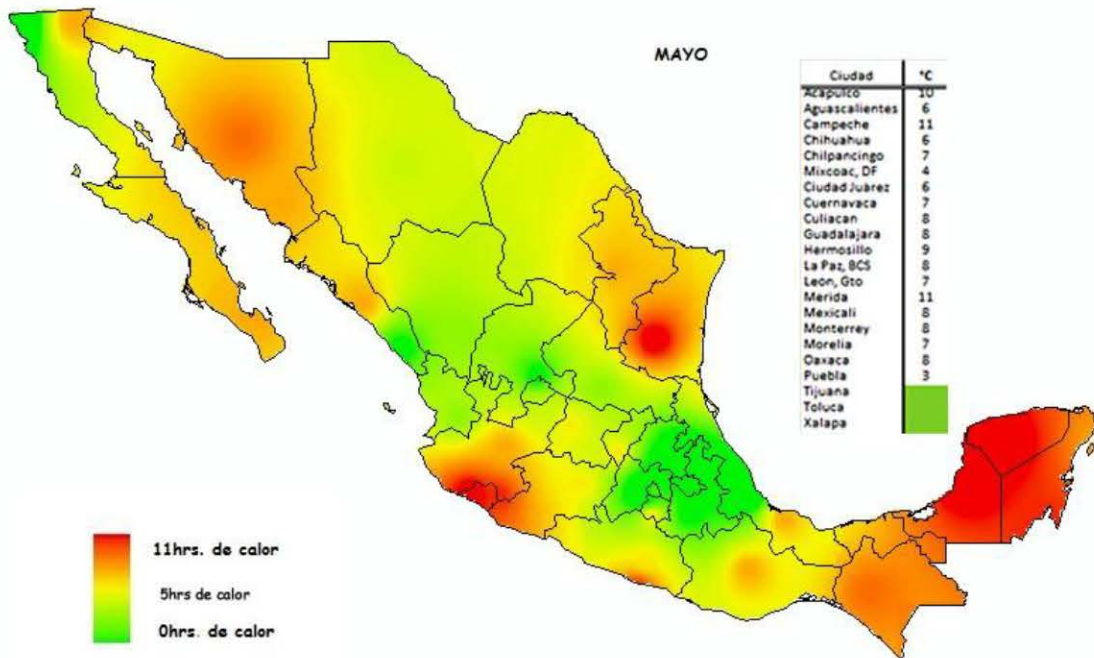
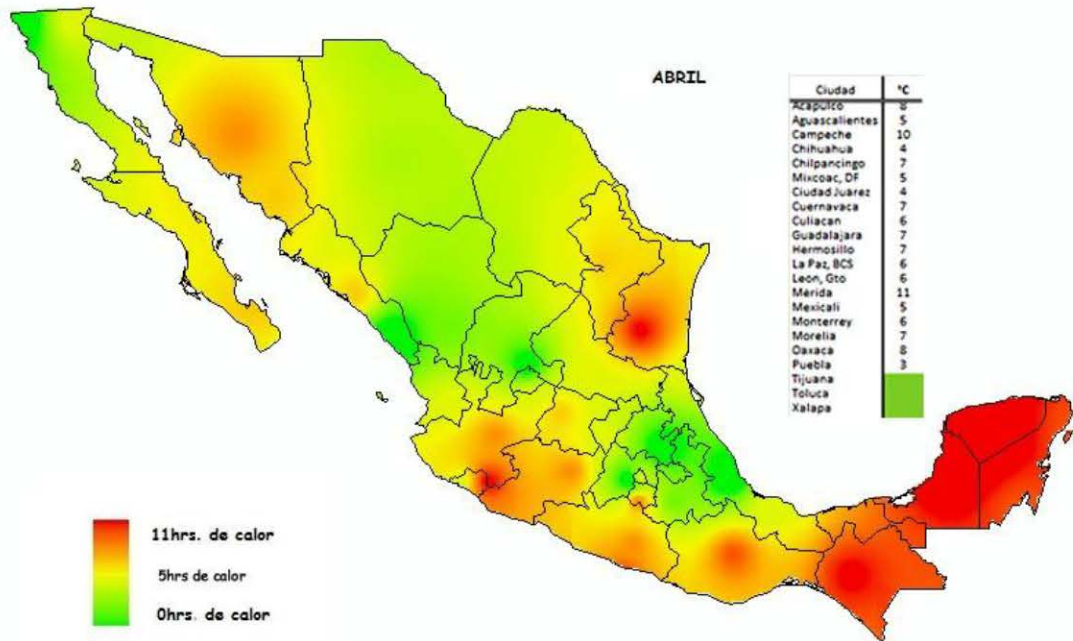


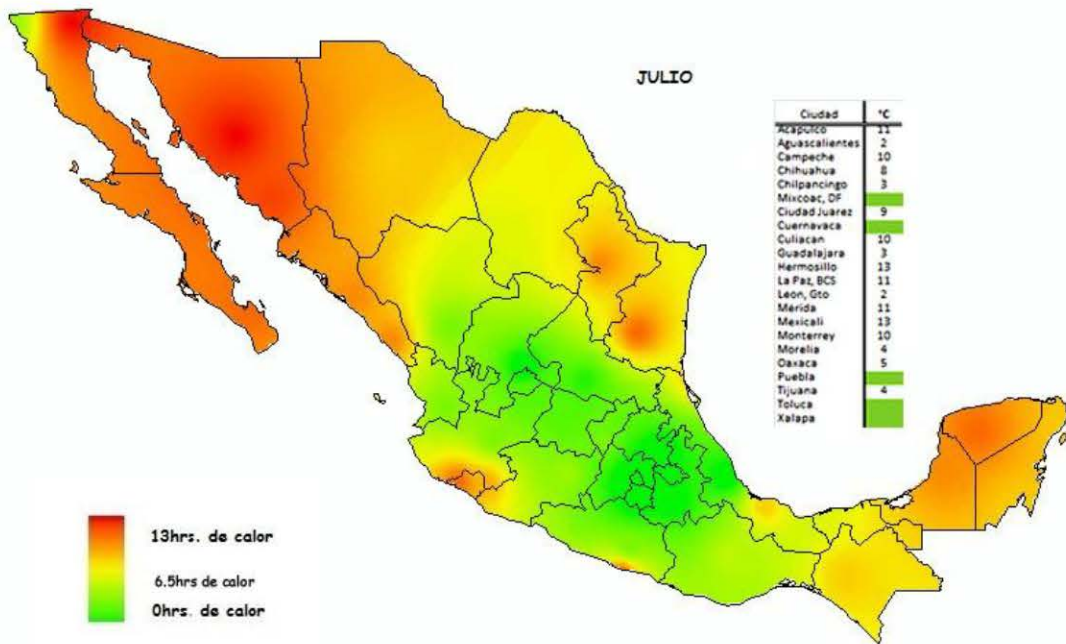
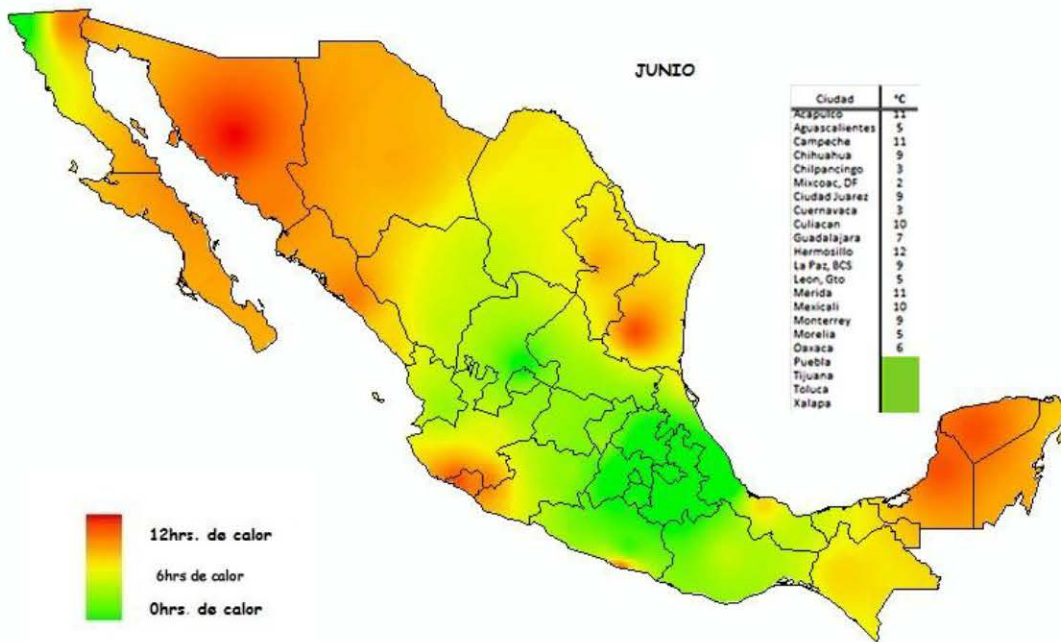
## Horas de Calor

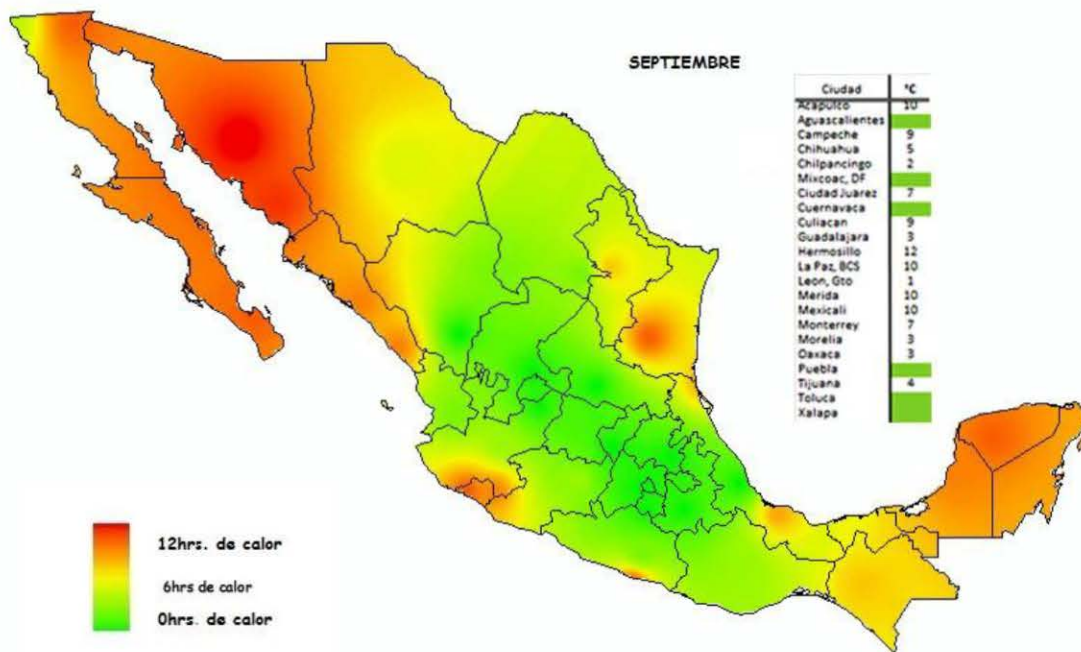
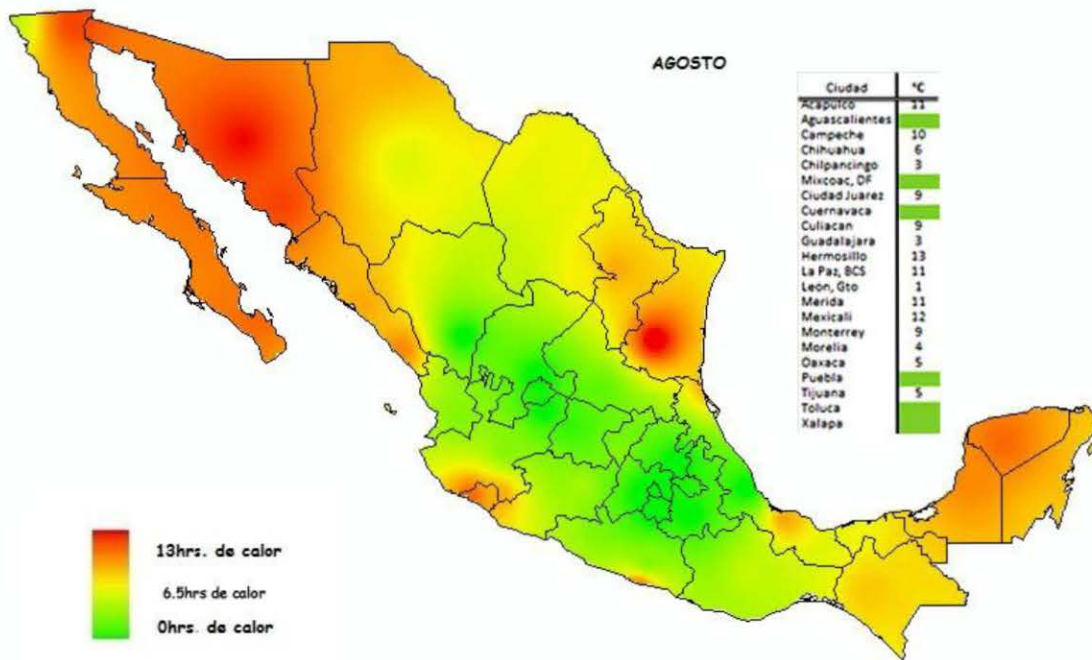
Horas de calor presentes en las distintas ciudades del país que se encuentran fuera del confort deseado.

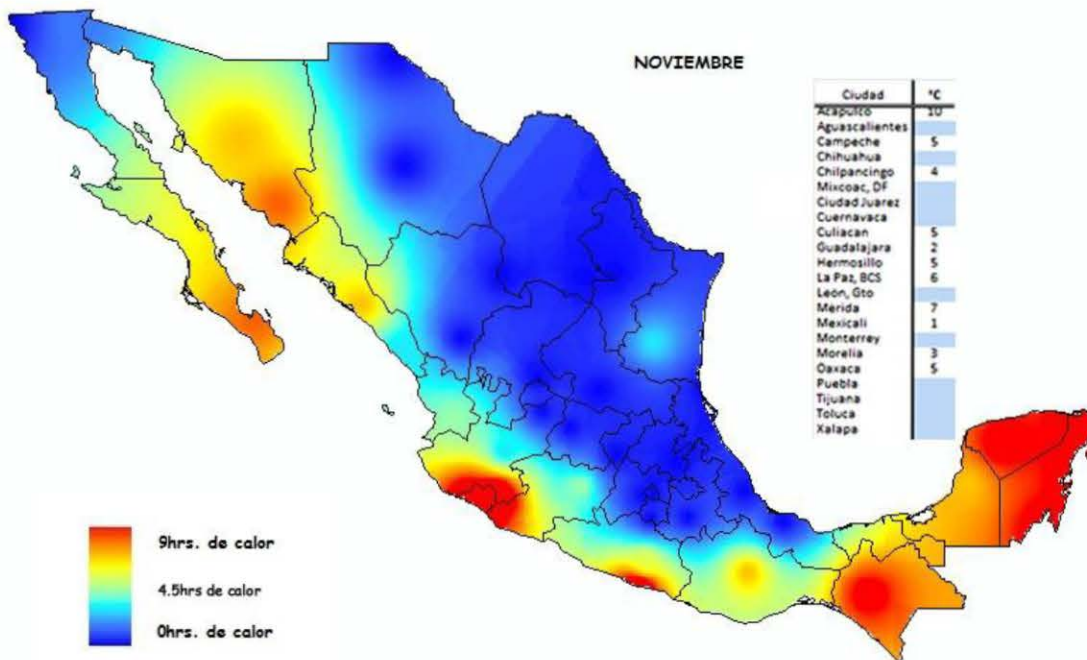
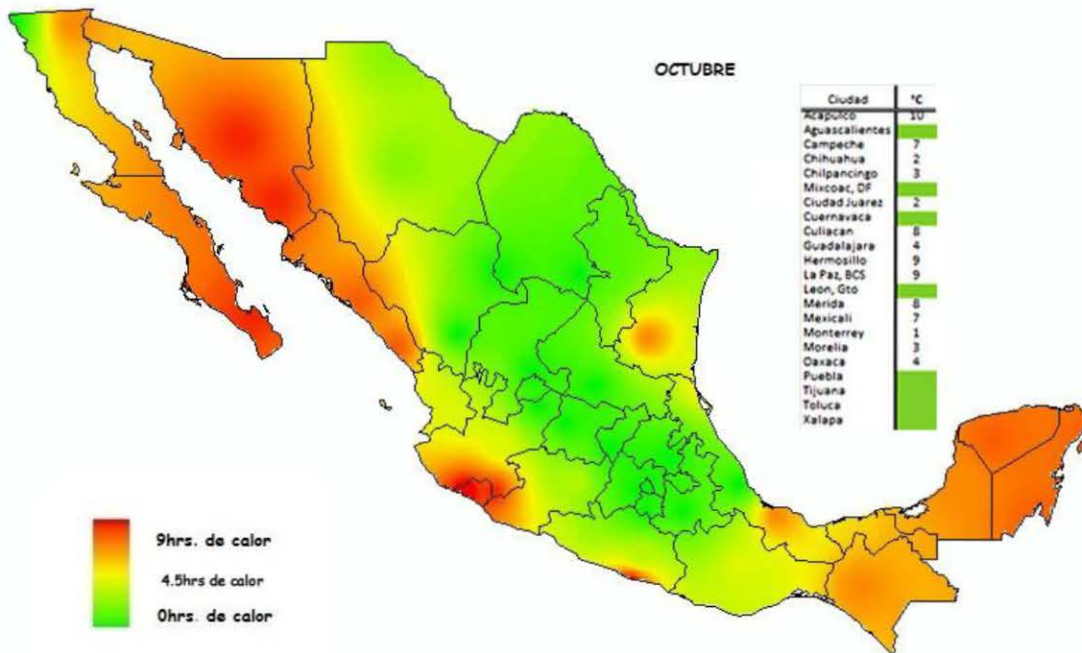


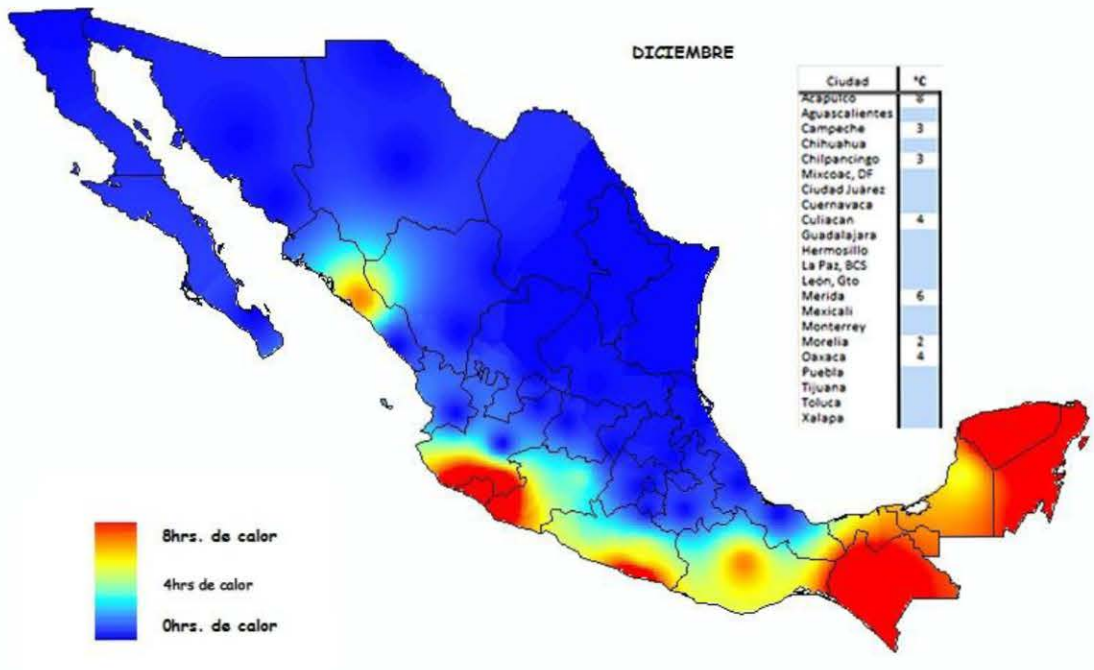












*Apéndice III*

*Horas de calor y confort presentes en ciudades del país*





enero		febrero		marzo		abril		mayo		junio		julio		agosto		septiembre		octubre		noviembre		diciembre	
Ciudad	°C	Ciudad	°C	Ciudad	°C	Ciudad	°C	Ciudad	°C	Ciudad	°C	Ciudad	°C	Ciudad	°C	Ciudad	°C	Ciudad	°C	Ciudad	°C	Ciudad	°C
Acapulco	8	Acapulco	8	Acapulco	8	Acapulco	8	Acapulco	10	Acapulco	11	Acapulco	11	Acapulco	11	Acapulco	10	Acapulco	10	Acapulco	10	Acapulco	8
Agascalientes	3	Agascalientes	5	Agascalientes	3	Agascalientes	5	Agascalientes	6	Agascalientes	5	Agascalientes	2	Agascalientes	10	Agascalientes	9	Agascalientes	7	Agascalientes	5	Agascalientes	3
Campeche	3	Campeche	5	Campeche	8	Campeche	10	Campeche	11	Campeche	11	Campeche	10	Campeche	10	Campeche	9	Campeche	7	Campeche	5	Campeche	3
Chihuahua	3	Chihuahua	4	Chihuahua	5	Chihuahua	4	Chihuahua	6	Chihuahua	9	Chihuahua	8	Chihuahua	6	Chihuahua	5	Chihuahua	2	Chihuahua	3	Chihuahua	3
Chilpancingo	3	Chilpancingo	4	Chilpancingo	5	Chilpancingo	7	Chilpancingo	7	Chilpancingo	3	Chilpancingo	3	Chilpancingo	3	Chilpancingo	2	Chilpancingo	3	Chilpancingo	4	Chilpancingo	3
Mixcoac, DF	3	Mixcoac, DF	4	Mixcoac, DF	4	Mixcoac, DF	5	Mixcoac, DF	4	Mixcoac, DF	2	Mixcoac, DF	2	Mixcoac, DF	9	Mixcoac, DF	7	Mixcoac, DF	2	Mixcoac, DF	2	Mixcoac, DF	3
Ciudad Juárez	3	Ciudad Juárez	3	Ciudad Juárez	4	Ciudad Juárez	4	Ciudad Juárez	6	Ciudad Juárez	9	Ciudad Juárez	9	Ciudad Juárez	9	Ciudad Juárez	7	Ciudad Juárez	2	Ciudad Juárez	2	Ciudad Juárez	4
Cuernavaca	3	Cuernavaca	3	Cuernavaca	5	Cuernavaca	7	Cuernavaca	7	Cuernavaca	3	Cuernavaca	3	Cuernavaca	3	Cuernavaca	7	Cuernavaca	2	Cuernavaca	2	Cuernavaca	3
Culiacan	3	Culiacan	4	Culiacan	6	Culiacan	6	Culiacan	8	Culiacan	10	Culiacan	10	Culiacan	9	Culiacan	9	Culiacan	8	Culiacan	5	Culiacan	4
Guadalajara	3	Guadalajara	3	Guadalajara	5	Guadalajara	7	Guadalajara	8	Guadalajara	7	Guadalajara	3	Guadalajara	3	Guadalajara	3	Guadalajara	4	Guadalajara	2	Guadalajara	2
Hermosillo	1	Hermosillo	4	Hermosillo	7	Hermosillo	7	Hermosillo	9	Hermosillo	12	Hermosillo	13	Hermosillo	13	Hermosillo	12	Hermosillo	9	Hermosillo	5	Hermosillo	5
La Paz, BCS	3	La Paz, BCS	4	La Paz, BCS	4	La Paz, BCS	6	La Paz, BCS	8	La Paz, BCS	9	La Paz, BCS	11	La Paz, BCS	11	La Paz, BCS	10	La Paz, BCS	9	La Paz, BCS	6	La Paz, BCS	6
León, Gto	3	León, Gto	4	León, Gto	4	León, Gto	6	León, Gto	7	León, Gto	5	León, Gto	2	León, Gto	1	León, Gto	1	León, Gto	1	León, Gto	1	León, Gto	1
Mérida	6	Mérida	7	Mérida	10	Mérida	11	Mérida	11	Mérida	11	Mérida	11	Mérida	11	Mérida	10	Mérida	8	Mérida	7	Mérida	6
Mexicali	6	Mexicali	7	Mexicali	10	Mexicali	5	Mexicali	8	Mexicali	10	Mexicali	13	Mexicali	12	Mexicali	10	Mexicali	7	Mexicali	1	Mexicali	1
Monterrey	6	Monterrey	7	Monterrey	10	Monterrey	6	Monterrey	8	Monterrey	9	Monterrey	9	Monterrey	9	Monterrey	7	Monterrey	10	Monterrey	1	Monterrey	1
Morelia	2	Morelia	3	Morelia	5	Morelia	7	Morelia	7	Morelia	5	Morelia	4	Morelia	4	Morelia	3	Morelia	3	Morelia	3	Morelia	2
Oaxaca	5	Oaxaca	6	Oaxaca	7	Oaxaca	8	Oaxaca	8	Oaxaca	6	Oaxaca	5	Oaxaca	5	Oaxaca	3	Oaxaca	4	Oaxaca	5	Oaxaca	4
Puebla	2	Puebla	3	Puebla	3	Puebla	3	Puebla	3	Puebla	3	Puebla	5	Puebla	5	Puebla	3	Puebla	3	Puebla	3	Puebla	4
Tijuana	2	Tijuana	3	Tijuana	5	Tijuana	7	Tijuana	7	Tijuana	5	Tijuana	4	Tijuana	5	Tijuana	4	Tijuana	4	Tijuana	4	Tijuana	2
Toluca	2	Toluca	3	Toluca	5	Toluca	7	Toluca	7	Toluca	5	Toluca	4	Toluca	5	Toluca	4	Toluca	4	Toluca	4	Toluca	4
Xalapa	2	Xalapa	3	Xalapa	5	Xalapa	7	Xalapa	7	Xalapa	5	Xalapa	4	Xalapa	5	Xalapa	4	Xalapa	4	Xalapa	4	Xalapa	4

	Horas de Calor 13 horas											
	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
Acapulco	8	8	8	8	10	11	11	11	10	10	10	8
Agascalientes	0	0	3	5	6	5	2	0	0	0	0	0
Campeche	3	5	8	10	11	11	10	10	9	7	5	3
Cancún	5	5	7	8	8	8	8	8	8	8	8	7
Chetumal	5	5	7	7	9	8	7	7	7	8	7	5
Chihuahua	0	0	0	4	6	9	8	6	5	2	0	0
Chilpancingo	3	4	5	7	7	3	3	3	2	3	4	3
Mixcoac, DF	0	0	4	5	4	2	0	0	0	0	0	0
Ciudad Juárez	0	0	0	4	6	9	9	9	7	2	0	0
Cd. Obregón	0	1	4	6	8	10	10	10	11	9	6	0
Cd. Victoria	0	2	5	9	11	11	11	12	10	7	2	0
Colima	7	8	8	9	10	10	9	9	9	9	9	8
Cuernavaca	0	3	5	7	7	3	0	0	0	0	0	0
Culiacan	3	4	6	6	8	10	10	9	9	8	5	4
Durango	0	0	0	3	5	6	3	0	0	0	0	0
Guadalajara	0	3	5	7	8	7	3	3	3	4	2	0
Hermosillo	0	1	4	7	9	12	10	10	10	9	5	0
La Paz, BCS	0	0	4	6	8	9	11	11	10	9	6	0
León, Gto	0	0	4	6	7	5	2	1	0	0	0	0
Manzanillo	6	5	5	5	11	11	11	11	10	10	8	7
Mazatlán	0	0	0	0	3	8	10	10	9	8	2	0
Mérida	6	7	10	11	11	11	11	11	10	8	7	6
Mexicali	0	0	0	5	8	10	11	11	10	7	1	0
Monterrey	0	0	1	6	8	9	10	9	7	1	0	0
Morelia	2	3	5	7	7	5	4	4	3	3	3	2
Oaxaca	5	6	7	8	8	6	5	5	3	4	5	4
Pachuca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Puebla	0	0	1	3	3	0	0	0	0	0	0	0
Querétaro	0	0	5	5	7	5	3	3	0	0	0	0
Saltillo	0	0	3	5	7	7	7	7	2	0	0	0
SLP	0	0	4	5	5	5	1	2	0	0	0	0
Tampico	0	0	0	5	7	8	8	9	8	5	0	0
Tepic	0	2	4	5	5	5	3	3	2	4	3	0
Tijuana	0	0	0	0	0	0	4	5	4	0	0	0
Torreón	0	0	1	4	6	6	6	5	2	0	0	0
Toluca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tuxtla Gutiérrez	7	7	8	9	9	8	8	8	7	7	7	7
Veracruz	0	0	0	5	8	8	8	9	8	7	0	0
Xalapa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zacatecas	0	0	0	1	3	2	0	0	0	0	0	0
	1.5	2.0	3.5	5.3	6.6	6.6	5.9	5.8	4.9	4.0	2.6	1.6

Horas de confort													
	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	
Acapulco	5	4	5	5	3	2	2	2	3	3	3	3	5
Aguascalientes	5	7	5	5	5	6	8	8	8	8	7	7	5
Campeche	8	7	4	3	2	2	3	3	4	6	7	8	8
Cancún	7	7	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5
Chetumal	7	7	6	6	4	5	6	6	6	5	6	7	7
Chihuahua	1	4	6	5	4	1	2	4	5	6	5	1	1
Chilpancingo	6	6	6	4	4	8	8	8	9	8	6	6	6
Mixcoac, DF	5	5	8	8	8	7	5	5	5	5	5	5	5
Ciudad Juárez	0	0	4	4	4	1	2	1	3	6	3	0	0
Cd. Obregón	6	6	4	3	2	2	2	2	2	1	3	7	7
Cd. Victoria	8	7	6	3	2	2	2	1	2	4	8	7	7
Colima	4	3	3	3	2	2	4	4	4	4	4	4	4
Cuernavaca	8	8	6	4	4	8	10	10	10	10	10	8	8
Culiacan	6	5	3	3	2	2	3	3	3	3	5	5	5
Durango	3	4	6	6	4	4	6	9	9	7	6	2	2
Guadalajara	8	5	6	4	3	4	8	8	8	7	6	8	8
Hermosillo	6	7	5	3	1	1	3	3	2	2	4	7	7
La Paz, BCS	8	9	5	4	2	1	1	2	3	2	4	9	9
León, Gto	7	7	5	5	5	6	8	8	9	9	8	7	7
Manzanillo	7	7	7	7	2	2	2	2	3	3	5	6	6
Mazatlán	8	8	8	11	9	5	3	3	4	5	10	10	10
Mérida	6	5	2	1	2	2	2	2	3	5	5	7	7
Mexicali	3	6	7	4	3	2	2	2	2	4	6	4	4
Monterrey	3	6	8	4	3	2	2	2	4	9	6	4	4
Morelia	5	5	5	4	4	6	6	6	7	5	5	5	5
Oaxaca	5	4	4	4	4	6	6	6	7	6	5	6	6
Pachuca	0	3	6	7	7	4	2	2	0	0	0	0	0
Puebla	6	6	7	6	6	8	7	7	6	6	6	6	6
Queretaro	7	7	4	6	4	6	7	7	9	8	7	7	7
Saltillo	4	5	6	6	5	5	5	5	7	8	5	4	4
SLP	5	7	5	5	6	5	8	8	8	7	7	5	5
Tampico	7	8	11	7	6	5	5	4	5	7	11	8	8
Tepic	7	6	4	5	5	6	8	8	9	7	5	8	8
Tijuana	3	3	3	6	6	9	6	5	6	9	6	2	2
Torreón	3	4	7	5	4	4	4	5	7	8	6	4	4
Toluca	2	4	6	7	7	5	3	3	4	5	3	2	2
Tuxtla Gutiérrez	4	4	3	3	3	4	3	3	4	4	4	4	4
Veracruz	11	11	12	8	5	5	5	4	5	6	12	11	11
Xalapa	0	3	8	10	10	10	8	8	8	7	4	1	1
Zacatecas	4	5	6	7	7	7	8	8	8	7	6	5	5
	5.2	5.625	5.675	5.125	4.325	4.4	4.725	4.775	5.375	5.65	5.7	5.375	