



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

*MODELACIÓN DE LA METEOROLOGÍA A ESCALA URBANA Y SU
APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO DE AZOTEAS NATURADAS PARA UNA
ZONA DE LA CIUDAD DE MÉXICO*

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A

M. en C. WILLIAMS VAZQUEZ MORALES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ARÓN JAZCILEVICH DIAMANT
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMOSFERA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

"Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales".

Agradecimientos

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el apoyo económico otorgado durante mis estudios de doctorado.

A **PAPIIT-UNAM IN113607-3** y **ICYT-GDF PICS-08-31** por el apoyo económico para realizar este trabajo.

Al **Dr. Aron Jazcilevich Diamant** por darme oportunidad de formar parte de su grupo de trabajo, al realizar mis estudios de doctorado y en el desarrollo del trabajo de investigación.

Al **Dr. Agustín García Reynoso**, por sus consejos en la realización de este proyecto.

A los asesores:

Dr. Luis Gerardo Ruiz Suárez

Dr. Diego Morales Ramírez

Dr. Ernesto Caetano Neto

Dr. José Noel Carbajal Pérez

Por aceptar ser parte de mi jurado de evaluación y por sus valiosas observaciones en el desarrollo de este trabajo.

A los **Ing. Wilfrido Gutiérrez López**, **Ing. Manuel García Espinoza** por el apoyo y capacitación de los equipos meteorológicos empleados en la campaña de mediciones meteorológicas.

Al **Dr. Robert Bornstein** del Depto. de Meteorología de la Universidad Estatal de San José California, EU., por su colaboración en el desarrollo del proyecto.

Al **Biol. Jerónimo Reyes Santiago**, biólogo-taxónomo del Jardín Botánico de la UNAM, por el apoyo para realizar las mediciones en la azotea verde a su cargo.

A **G. Alma Luz Cabrera** y **M. en C. Gabriela Gómez Rodríguez** por la obtención de los datos de la morfología urbana.

Al **Posgrado en Ciencias de la Tierra** por darme la oportunidad de superarme académicamente.

Al **Centro de Ciencias de la Atmósfera** por permitirme laborar en sus instalaciones.

Al **Centro de Gestión de Riesgos y Cambio Climático del Instituto de Ciencias Básicas y Aplicadas, UNICACH**. Por permitirme laborar y concluir el proceso del doctorado.

Dedicatoria

A mis padres Fermín Vázquez González y Eudexia Morales Tondopó, por el apoyo incondicional, pero sobre todo por el gran amor que me han brindado toda la vida. Y a mi hermano Manuel A., por su apoyo y cariño.

A mi esposa Ariadna C. Toalá Culebro por su amor y apoyo incondicional durante todo este tiempo. Te amo.

A mis hijos William Isai y Victor Yael, que son el motor que me impulsa día con día ser mejor padre y persona. Los amo.

A todos mis amigos y compañeros que de una y otra forma aportaron un granito de arena para culminar este proyecto.

Resumen

Empleando el modelo meteorológico urbanizado uMM5 se realizó la modelación a una resolución de 500 m, para conocer los efectos de las azoteas verdes en la altura de capa de mezcla en una zona de la Ciudad de México. El modelo necesita datos detallados de la morfología urbana de la zona de estudio, estos datos fueron obtenidos mediante procesamiento cartográfico empleando sistemas de información geográfica. Los parámetros iniciales necesarios para ejecutar el modelo, se obtuvieron de campañas meteorológicas para una azotea verde y una azotea convencional localizadas en el Jardín Botánico, UNAM.

Con datos de estudios realizados en la Ciudad de México y comparándolos con los resultados de uMM5, se constató que este representó adecuadamente los campos meteorológicos y la altura de capa de mezcla.

Para estudiar los efectos de la naturación de azoteas, se tuvo que realizar la sustitución total de las azoteas convencionales por azoteas verdes, la modelación muestra reducciones de las islas de calor hasta en 1.5°C, tal enfriamiento y de acuerdo a las condiciones meteorológicas presentes, el efecto más importante fue la reducción de la altura de la capa de mezcla, hasta en un 8%, lo cual generaría un aumento en la misma proporción de los contaminantes atmosféricos. Para constatar esto, se usó un modelo de caja básico de dispersión de contaminantes, el cual revela que el aumento significativo de los contaminantes evaluados, se dio en las concentraciones de PM₁₀ durante el periodo de 07:00 a 10:00 horas.

En base a los resultados obtenidos de esta investigación es muy importante realizar un análisis preliminar sobre la implementación de azoteas naturadas, sobre todo en ciudades que presentan graves problemas de contaminación atmosférica, ya que al implementarlas podría agravar el problema, cabe señalar que los resultados pueden cambiar en otras ciudades.

Índice

Agradecimientos

Dedicatoria

RESUMEN

INDICE

Introducción	1
Capítulo 1 : Justificación y objetivos	3
1.1 JUSTIFICACIÓN	3
1.2 OBJETIVOS	5
Capítulo 2 : Antecedentes	6
2.1 METEOROLOGÍA URBANA	6
2.2 NATURACIÓN DE AZOTEAS	8
2.3 MODELACIÓN DEL CLIMA URBANO	10
Capítulo 3 : Metodología	13
3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO MM5 URBANO.	13
3.2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.	13
3.3 CAMPAÑA DE MEDICIONES EN AZOTEAS VERDES Y CONVENCIONALES	16
3.4 PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO.	19
3.5 ESTUDIO ESTADÍSTICO.	23
Capítulo 4 : Resultados	25
4.1 DÍAS DE SIMULACIÓN	25
4.2 CONDICIONES SINÓPTICAS	25
4.3 MODELACIÓN DE INTENSIDADES DE VIENTOS Y TEMPERATURA PARA UMM5 Y MM5	26
4.4 CAMPAÑA DE MEDICIONES EN LAS AZOTEAS	30
4.5 MODELACIÓN DE LA ALTURA DE LA CAPA DE MEZCLA PARA AZOTEAS CONVENCIONALES Y AZOTEAS VERDES.	31
4.6 EFECTO DE LAS AZOTEAS VERDES A LA ISLA DE CALOR URBANO.	43

4.7 EFECTO EN LA CALIDAD DEL AIRE.	48
Capítulo 5 : Conclusiones.....	53
<i>Bibliografía.....</i>	56
Anexo.....	63

Lista de tablas

TABLA 3.1 EQUIPOS EMPLEADOS EN LA AZOTEA VERDE	18
TABLA 3.2 DOMINIOS DE SIMULACIÓN.....	19
TABLA 4.1 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE IC, DESVIACIÓN ESTÁNDAR (STD), ERROR MÁXIMO DE LAS INTENSIDADES DE VIENTO.....	28
TABLA 4.2 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE IC, DESVIACIÓN ESTÁNDAR (STD), ERROR MÁXIMO DE LAS TEMPERATURAS ..	29

Lista de figuras

FIGURA 1.1 SERIE DE TIEMPO DE MAGNITUDES DE VIENTO (M/S) REPORTADOS POR LAS ESTACIONES DE LA RAMA (LÍNEA CONTINUA) Y LAS OBTENIDAS DE SIMULACIÓN (LÍNEA CON PUNTOS) (DÍAZ, 2005). NÓTESE COMO EN EL CASO DE LA MERCED (B), LA INTENSIDAD DE VIENTO REPORTADA POR MM5 ESTÁ POR ARRIBA DE LA MEDICIÓN, MIENTRAS QUE EN CHAPINGO (A) QUE ESTÁ FUERA DE LA ZONA URBANA LAS INTENSIDADES DE VIENTO MEDIDAS Y MODELADAS CONCUERDAN MUY BIEN.	4
FIGURA 2.1 AZOTEA NATURADA A) TIPO EXTENSIVA (JARDÍN BOTÁNICO, UNAM), B) TIPO INTENSIVA (CENDI, D.F).....	9
FIGURA 3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO. LOCALIZADA EN EL CENTRO DE LA REPÚBLICA CON UNA EXTENSIÓN DE 1,479 KM ² (WIKIPEDIA, 2011).	14
FIGURA 3.2 ZONA DE ESTUDIO (RECUADRO NEGRO), CELDAS DE 13 X 13 CON RESOLUCIÓN DE 500M.....	15
FIGURA 3.3 AZOTEA DE LADO IZQUIERDO NATURADA TIPO EXTENSIVA Y DEL LADO DERECHO SIN NATURAR.	16
FIGURA 3.4 EQUIPOS INSTALADOS EN LA AZOTEA VERDE.....	18
FIGURA 3.5 DOMINIOS DE SIMULACIÓN, DONDE EL DOMINIO 1 TIENE UNA RESOLUCIÓN DE 27 KM., DOMINIO 2 DE 9 KM., DOMINIO 3 DE 3 KM., Y EL DOMINIO 4 DE 0.5 KM.....	19
FIGURA 3.6 MORFOLOGÍA Y VISUALIZACIÓN EN 3D DE LA ZONA DE ESTUDIO EN LA CIUDAD DE MÉXICO, (1) BOSQUE DE CHAPULTEPEC, (2) PARQUE ESPAÑA, (3) PARQUE MÉXICO, (4) CEMENTERIO FRANCES Y (5 ESTRELLA) SIMAT. ...	22
FIGURA 3.7 DIAGRAMA DE EJECUCIÓN DEL MODELO MM5 Y UMM5.....	23
FIGURA 4.1 CONDICIÓN SINÓPTICA A 500 MB PARA EL DÍA 10 DE MARZO PROMEDIADO DE LAS 6 A 12 HRS	26
FIGURA 4.2 GRÁFICA COMPARATIVA DE INTENSIDADES DE VIENTOS.....	27

FIGURA 4.3. GRAFICA COMPARATIVA DE TEMPERATURAS	29
FIGURA 4.4 GRAFICAS DE MEDICIONES PARA EL 22 DE MARZO DEL 2009, (A) TEMPERATURA VIRTUAL (TV) Y (B) HUMEDAD RELATIVA (HR), LÍNEA SÓLIDA PARA AZOTEA VERDE (AV) Y LÍNEA SECCIONADA PARA AZOTEA CONVENCIONAL (AC), DE IGUAL FORMA (C) Y (D) PARA EL DÍA 20 DE MARZO.	30
FIGURA 4.5 GRAFICAS DE RETRODISPERSIÓN DE UN CEILÓMETRO PARA EL SITIO T0, SOBREPUESTA LAS ALTURAS DE CAPA DE MEZCLA OBTENIDAS POR EL MODELO UMM5 (PBL UMM5 SEÑALADO CON LAS FLECHAS) PARA LOS DÍAS (A) 12 Y (B) 14 DE MARZO DEL 2006.....	33
FIGURA 4.6 PROMEDIOS HORARIOS DE LA ALTURA DE LA CAPA DE MEZCLA, SMA-GDF (LÍNEA CON TRIÁNGULOS), UMM5 (LÍNEA CON PUNTOS)	34
FIGURA 4.7 EVOLUCIÓN DIARIA DE LA ALTURA DE CAPA DE MEZCLA, PARA T0 (CÍRCULOS AZULES), T1 (LÍNEA ROJA), Y T2 (TRIÁNGULOS VERDES) POR SHAW, ET AL. 2007 Y UMM5 (LÍNEA NEGRA PUNTEADA)	35
FIGURA 4.8 COMPARACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA ALTURA DE CAPA DE MEZCLA PARA EL AC (LÍNEA PUNTEADA) Y PARA EL AV (LÍNEA SOLIDA), CON UN ACERCAMIENTO PARA LAS 9:00 A 9:30:00 HORAS (RECTÁNGULO NEGRO).	36
FIGURA 4.9 COMPARACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA ALTURA DE CAPA DE MEZCLA PARA LA AC (LÍNEA PUNTEADA) Y PARA LA AV (LÍNEA SOLIDA), CUANDO LAS CONDICIONES SINÓPTICAS PREVALECEAN.....	37
FIGURA 4.10 PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LA ALTURA DE CAPA DE MEZCLA PARA CADA DÍA DE SIMULACIÓN	38
FIGURA 4.11 TEMPERATURA POTENCIAL (°C) Y ALTURAS DE PBL (LÍNEAS HORIZONTALES) OBTENIDAS POR UMM5, AZOTEA CONVENCIONAL (AC) Y AZOTEA VERDE (AV), PARA EL 12 MARZO A LAS 0910 LST (A) Y 14 MARZO A LAS 0840 LST (B); (C) Y (D) MUESTRAN LOS VALORES DE TKE (J/KG) MODELADO.	40
FIGURA 4.12 FLUJOS DE CALOR SIMULADOS Y MEDIDOS (SITIO SIMAT) PARA EL 10 DE MARZO 2006: (A) CALOR SENSIBLE Y (B) CALOR LATENTE, AMBOS PARA AZOTEA CONVENCIONAL (AC PUNTOS), AZOTEA VERDES (CR TRIÁNGULOS), Y MEDICIONES (LÍNEA SECCIONADA); TAMBIÉN SE MUESTRA LOS FLUJOS SIMULADOS DE CALOR SUPERFICIAL (C) Y CALOR ALMACENADO (D).....	42
FIGURA 4.13 EVOLUCIÓN DIARIA DE LA ICU (TEMPERATURA DE SUPERFICIE) PARA AC Y AV (100% ÁREA CUBIERTA) DEL DOMINIO D4 PARA LAS HORAS LOCALES: 6:00 (A, B), 14:00 (C, D), 21:00 (E, F) Y 00:00 (G, H).....	48
FIGURA 4.14 MODELO DE CAJA BÁSICO	49
FIGURA 4.15 CONCENTRACIÓN DE LOS CONTAMINANTES PARA AV (LÍNEA SOLIDA) Y PARA AC (LÍNEA PUNTEADA), PARA EL DÍA 12 DE MARZO.	50

FIGURA 4.16 CONCENTRACIÓN DE LOS CONTAMINANTES PARA EL CASO VERDE (LÍNEA SOLIDA) Y CASO CONVENCIONAL (LÍNEA PUNTEADA), PARA UN DÍA DE LA MODELACIÓN, CUANDO LAS CONDICIONES SINÓPTICAS PREVALECEEN.....52



Introducción

El propósito de este estudio fue evaluar los efectos que la naturación de azoteas tiene en la altura de la capa de mezcla e Isla de Calor Urbano. Para este fin se utiliza, por primera vez en la Ciudad de México, un modelo meteorológico urbanizado a una resolución de 500 metros, denominado uMM5. Este incluye parámetros físicos tales como flujos de humedad, balance de energía y arrastre que mejora sustancialmente la fidelidad de la modelación.

Se realizaron dos campañas de mediciones meteorológicas en dos azoteas ubicadas en el jardín botánico de CU, UNAM: Una fue una azotea verde de un área de 100 m² y otra fue una azotea convencional de 150m², de acá se obtuvieron parámetros que son necesarios para la modelación. Los resultados de la modelación, son comparados con datos proporcionados de la campaña MILAGRO realizada en el 2006, y de diversos estudios sobre meteorología urbana que se han realizado en la Ciudad de México.

El modelo uMM5, ha sido probado exitosamente en Huoston, Texas por Bornstein en el 2006, Martilli (2002), Taha (2008), Gutiérrez (2015), entre otros. Sin embargo, no se ha aplicado para analizar el efecto de azoteas naturadas. La modelación de los efectos de azoteas naturadas en temperatura e isla de calor, ha sido estudiada en la Ciudad de Nueva York (NYC), en la cual emplearon el modelo meteorológico a meso-escala denominado MM5. Este trabajo se realizó sin incorporar los parámetros propios de un ambiente urbano y a una resolución 2 km, por lo que consideramos que nuestro trabajo, es una contribución para este tipo de análisis.

Los resultados de uMM5 muestran que el efecto más importante de la implementación de azoteas naturadas en un área metropolitana como la Ciudad de México se da por las

mañanas entre 07:00 y 10:00 horas, donde por el enfriamiento provocado por las azoteas verdes induce a una reducción de la altura de capa de mezcla y es en este lapso tiempo donde la mayoría de las emisiones tienen lugar, debido al comienzo de las actividades industriales, del hogar, comerciales, y de transporte. Con la reducción de la altura de capa de incide directamente aumentando las concentraciones de los contaminantes primarios. Esto se analizó con un modelo de caja, usando las salidas del modelo uMM5 aquí implementado, arrojó que para el caso de la Ciudad de México, hay un aumento en las concentraciones de los contaminantes en la mañana, pero se mantienen por debajo las normas de salud mexicanas. El aumento más significativo de concentraciones fue para PM_{10} .

Cabe destacar que las azoteas verdes también tiene un efecto positivo, en la reducción de las isla de calor, los resultados nos muestran una reducción de las ICU alrededor de $1.5^{\circ}C$, esto sumado a que el modelo muestra las islas frías generadas por la vegetación y los cuerpos de agua presentes en la zona de estudio. Lo cual es de suma importancia en las ciudades donde la vegetación es suplantada por materiales retentores de calor, puntualizando la importancia que tiene la conservación, implementación o restauración de las áreas verdes urbanas como un beneficio para la población.

Por lo tanto este trabajo y las herramientas aquí empleadas como el modelo uMM5, se convierte en un instrumento más para la tomas de decisiones, en los análisis de impacto ambiental o en el análisis para la implementación de nuevas políticas ambientales.

Capítulo 1: Justificación y objetivos

1.1 Justificación

La importancia de usar modelos de calidad del aire radica en que contribuyen al conocimiento de los fenómenos meteorológicos y de fotoquímica que provocan la contaminación atmosférica y ayudan a la definición de planes de contingencia y de estrategias para establecer políticas de control de la contaminación.

Obedeciendo a esta necesidad, en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM y otras instituciones del país se han desarrollado y modificado modelos meteorológicos numéricos, de transporte de contaminantes y de fotoquímica atmosférica, (Cruz, 1992; Jazcilevich y García, 2002a,b, 2005a,b; Diaz, 2005). Otros investigadores también se han interesado por la meteorología y transporte de contaminantes en el Valle de México (Bossert, 1996; De Foy, 2003; Fast, 1998, 2005). Muchos de estos esfuerzos para estudiar la meteorología del Valle de México se basan en el uso del modelo meteorológico MM5 (Jazcilevich *et al.*, 2005a; Magaña, 1998) o modelos similares como RAMS (Regional Atmospheric Modeling System).

Sin embargo, estas experiencias han mostrado que existen desviaciones consistentes entre los resultados de velocidad de los vientos modelados y los medidos. Por ejemplo, en la figura 1.1 se muestran los resultados de velocidad de viento usando MM5 en dos localidades del Valle de México y su comparación con las mediciones la simulación corresponde al 5 de diciembre del 2001. En la figura 1.1a, se aprecia cómo la velocidad del viento en Chapingo, un área fuera de la interferencia por edificaciones, presenta valores de magnitud de viento modelados y medidos comparables. El desfaseamiento se atribuye a la resolución espacial usada en el modelo

afectando en el tiempo los datos de salida. En la figura 1.1b, se muestran las magnitudes de viento medidos y modelados en la estación de la Merced, un área en medio de edificaciones de alta densidad. Se aprecia como la magnitud de viento reportada por el modelo MM5 es mayor a las medidas en este caso.

Esta situación tiene importantes consecuencias cuando se trata de determinar el clima urbano mediante modelación y cuando se quiere incluir el modelo MM5 en estudios de calidad del aire.

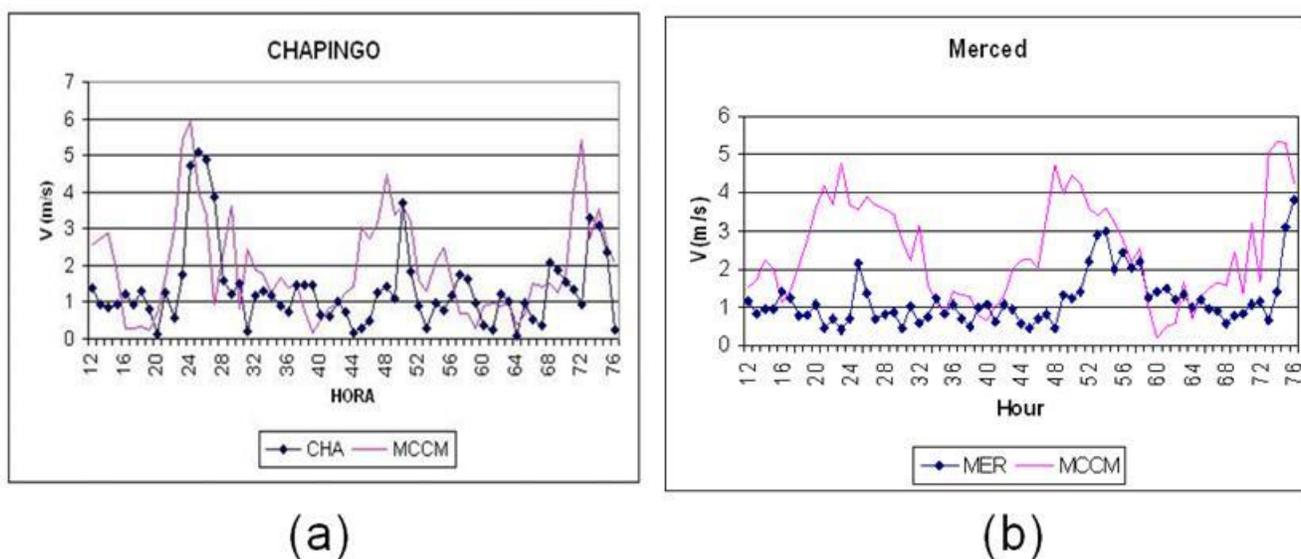


Figura 1.1 Serie de tiempo de magnitudes de viento (m/s) reportados por las estaciones de la RAMA (línea continua) y las obtenidas de simulación (línea con puntos) (Díaz, 2005). Nótese como en el caso de la Merced (b), la intensidad de viento reportada por MM5 está por arriba de la medición, mientras que en Chapingo (a) que está fuera de la zona urbana las intensidades de viento medidas y modeladas concuerdan muy bien.

Diferentes estudios en el área de meteorología urbana indican que este problema se debe a la falta de un término de arrastre en la ecuación de momento del modelo MM5 (Dupont *et al.*, 2004) y términos mencionados por Martili (2001) como el balance energético antropogénico y humedad, entre otros. La presencia de edificios, árboles, calles y el uso de suelo urbano tienen que ser cuidadosamente parametrizados para incluir éstos efectos.

El modelo meteorológico MM5 urbanizado que desde ahora llamaremos uMM5, simula con resoluciones de 0.5 a 1 km los flujos atmosféricos, e introduce el término de arrastre, rugosidad, parametrizaciones de temperatura y humedad para un ambiente urbano.

En un primer trabajo, correspondiente a mis estudios de maestría, se implementó exitosamente el modelo uMM5 para una pequeña área de la Ciudad Universitaria, UNAM. Este se cotejó con mediciones realizadas en la zona (Vazquez,2007). También el modelo uMM5 ha sido implementado en las ciudades de Houston (Hitchcock, 2005) y Philadelphia en los EE. UU (Dupont et al., 2004). Este modelo necesita datos de la morfología urbana como la altura de los edificios, área de las azoteas, área frontal, área pavimentada, altura de la vegetación, uso y cobertura de suelo entre otros (Burian, *et al.*, 2004, a, b).

En este proyecto se aprovecha esta experiencia para aplicar el modelo uMM5 para evaluar el efecto en la meteorología urbana el uso de azoteas verdes. Esto se realiza en una zona en la Ciudad de México, en un dominio de 42.25 km² con una resolución de celda de 0.5 km. A continuación, se detallan los objetivos de este trabajo.

1.2 Objetivos

- Usar datos de morfología urbana para comparar la operación de los modelos uMM5 y MM5.
- Aplicar el modelo uMM5 para modelar azoteas verdes y evaluar los efectos en los flujos atmosféricos.

Capítulo 2: Antecedentes

La urbanización ha sido la tendencia demográfica en México durante la segunda mitad del siglo XX. La sustitución de suelos naturales por elementos de la ciudad (calle, construcciones, etc.) altera el clima a escala local/regional. Este crecimiento de la urbanización en México ha incrementado las temperaturas urbanas, lo que tiene implicaciones para la salud y el bienestar humano. Además a nivel global, la urbanización y la deforestación, influyen en el cambio climático global (Jauregui, E. 2005).

2.1 Meteorología urbana

Un área urbana es una zona que se distingue de sus alrededores por la presencia de obstáculos (edificios y otras estructuras) que incrementan la fuerza de arrastre. Además se aumenta la capacidad de retención de calor por los diferentes materiales que conforman las edificaciones y áreas pavimentadas. También se presenta la introducción de calor y humedad por las actividades del hombre. Estas condiciones generan un clima urbano, que se refleja en las temperaturas, la humedad y los flujos de calor, entre otras (Oke, 1987).

La diferencias de temperaturas entre una zona urbana y una rural, propicia la convergencia del viento en la horizontal y corrientes verticales sobre algunas ciudades. Además la profundidad de la capa de mezcla de la ciudad aumenta como resultado de los movimientos del aire verticales así como del calentamiento de la superficie (Taha and Bornstein R., 2005. Jazcilevich et al., 2005a).

La velocidad del viento en un área urbana es menor que en los alrededores. Esta reducción de la velocidad está estrictamente relacionada con las características de la superficie, es decir, densidad y altura de las barreras (edificios, árboles, etc.). La velocidad se reduce en un 20% en comparación con los alrededores, y se ven frecuentemente vientos más débiles (aproximadamente $<3\text{m/s}$).

La dirección del viento también se ve afectada, ya que este sigue los túneles (cañones urbanos) creado por los edificios en ambos lados de una calle, o al formarse barreras por los edificios situados perpendicularmente a la dirección original del viento.

El balance energético en una zona urbana es un problema complejo debido al volumen de los edificios. Se debe incluir el intercambio de calor por la conducción del suelo, calles, fachadas de los edificios, así como el calor antropogénico liberado a la atmósfera.

Un elemento importante de la estructura urbana son los llamados cañones urbanos. La cantidad de radiación solar recibida por un cañón urbano depende, por lo general, de la altura de los edificios y de la orientación del cañón. También depende de las propiedades de los materiales empleados en la construcción de los edificios y las calles, no sólo por su admisión térmica, sino también por la reflexión de onda corta o albedo.

El efecto de una ciudad sobre la humedad, la precipitación y la formación de niebla es objeto de duda. En algunas ciudades se ha observado un mayor número de días con niebla y mayor frecuencia de nubes. Tales fenómenos se ven favorecidos por la humedad del aire y algunos autores también consideran la presencia de partículas que fungen como núcleos de condensación. Además, la formación de nubes ha aumentado debido a la convección

intensificada por el efecto isla de calor urbano y la formación de niebla, provocada por la baja velocidad o ausencia del viento.

Todos estos efectos de urbanización hacen complejo y variante el clima de una ciudad, además de que cada ciudad tiene una determinada topografía, ubicación geográfica, distancia al mar, etc., y tales condiciones locales pueden modificar las propiedades de su clima.

Para contrarrestar los efectos adversos de la urbanización, específicamente la Isla de Calor Urbana, se han generado diversas medidas de adaptación como restauración de bosques, creación de jardines urbanos y actualmente una medida que se está considerando es la de Naturación de Azoteas, coloquialmente llamadas “Azoteas verdes” o “Azoteas vivas” que es el objeto de estudio en este proyecto.

2.2 Naturación de azoteas

La naturación de azoteas representa una opción para añadir vegetación en el paisaje urbano con el fin de compensar la falta de áreas verdes en las ciudades, obteniendo grandes ventajas ecológicas y estéticas que benefician tanto a la comunidad, como a los usuarios y propietarios del inmueble.

En su definición más básica, una azotea verde es un sistema de ingeniería que permite el crecimiento de vegetación en la parte superior de los edificios (azoteas), manteniendo protegida su estructura.

Las azoteas verdes se dividen básicamente en dos categorías; las de tipo extensivas y las intensivas. Las extensivas son livianas, de bajo mantenimiento y generalmente inaccesibles. A menudo se plantan en ellas especies con poco requerimiento de humedad, necesitan solamente de 5 a 15 cm de sustrato y suelen subsistir con agua de lluvia (Fig. 2.1 (a)).

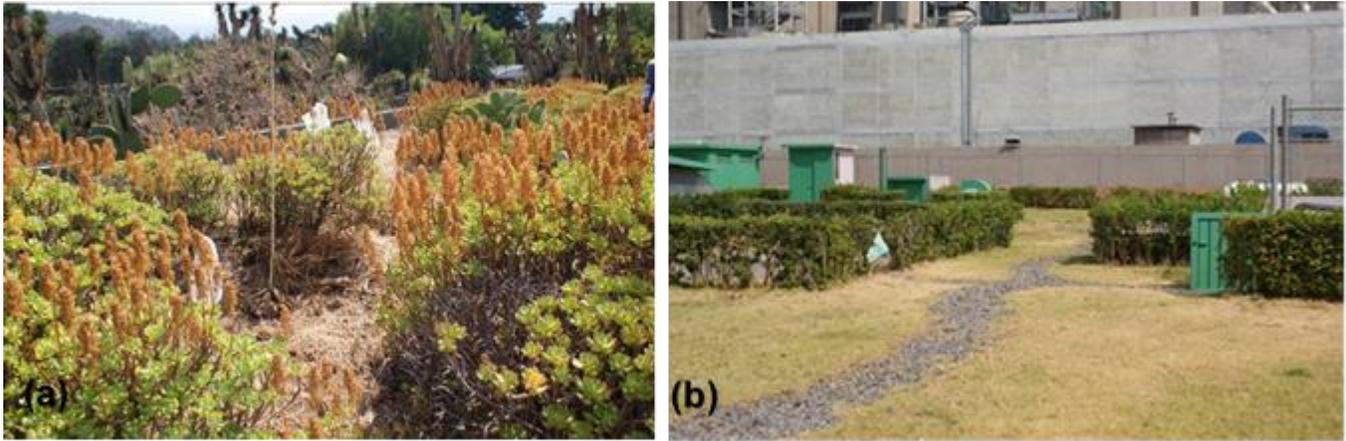


Figura 2.1 Azotea naturada a) tipo extensiva (Jardín botánico, UNAM), b) tipo intensiva (CENDI, D.F)

Las de tipo intensivas, (Fig.2.1 (b)), son accesibles y tienen sustratos espesos que alojan una variedad de plantas, desde comestibles y arbustos, hasta árboles. Estas cubiertas requieren de una estructura de soporte reforzada y mucho más mantenimiento e irrigación.

Las azoteas verdes tienen beneficios como la reducción de la isla de calor urbana, la reducción de las aguas pluviales y eliminación de la contaminación del aire. También embellecen a la comunidad y proveen un ambiente más hospitalario para los insectos, animales y población.

Otros posibles beneficios de las azoteas verdes se citan a continuación:

- Refrescan el aire gracias al proceso de evaporación y transpiración de las plantas, lo cual se ve reflejado en el mejoramiento del clima en la ciudad.
- Ayudan a regular la temperatura interior del lugar, lo que permite que se conserve fresco en verano y bloquee el frío en invierno.
- Sirven como aislamiento acústico; este es un sistema especialmente recomendado en aquellas áreas próximas a los aeropuertos o a las zonas industriales con ruido excesivo.
- Evitan el deterioro de azoteas, ya que el daño provocado por los rayos ultravioleta, la

erosión a causa del agua, el viento y las partículas suspendidas como metales pesados y carbono, entre otros, son los principales agentes destructores de las azoteas. Con el sistema de naturación es posible ahorrar considerablemente en su mantenimiento e incrementar la vida útil del impermeabilizante empleado.

Para evaluar estos beneficios de las Azoteas Verdes (AV), es necesario apoyarnos en la modelación a escala urbana, respaldados con mediciones de campo de las principales variables como temperatura y humedad en las AV.

2.3 Modelación del clima urbano

La modelación es una herramienta de gran ayuda en el estudio de clima y tiempo local. Permite la incorporación de nuevos datos, como la morfología urbana y las azoteas verdes, para estudiar y evaluar formas de mitigación para la reducción de la Isla de Calor Urbano (ICU).

La urbanización de los modelos comenzó con el modelo numérico de diagnóstico de ICU de Myrup (1969). Este modelo es de una dimensión y no incluye la divergencia del flujo radiativo, Los parámetros de longitud de rugosidad, capacidad calorífica del suelo y humedad relativa para el área urbana fueron especificados como una “losa de concreto”. Numerosos estudios extendieron este proyecto, por ejemplo, Tapper et al. (1981), quien incluyó la ecuación de difusión de calor en el suelo, calor antropogénico, mientras Ackerman (1977) introdujo los efectos radiativos de gases urbanos y partículas contaminantes.

Los efectos de los “cañones urbanos” en la energía de superficie fueron estudiados por Johnson et. al. (1991) usando el modelo de 1-D SHIM, que considera flujos de calor de edificios y reflexión de la radiación infrarroja dentro de los cañones.

El primer modelo urbano en 2-D (plano vertical), consistió de soluciones analíticas simplificadas

de las ecuaciones lineales, como por ejemplo, Vukovich (1971, 1973,1975) quien usó un modelo con tres niveles, sin considerar la fuerza de Coriolis, con una fricción linear, y especificando las razones de calor.

Delage y Taylor (1970) fueron los primeros en usar un modelo no lineal de dos dimensiones, hidrostático con ecuaciones dinámicas de pronóstico, aunque sin topografía, sin balance de energía en la superficie y sin diferencias espaciales de rugosidad. Fue realizado para estudiar las circulaciones inducidas en una ICU.

El modelo de 2-D, hidrostático, con aproximación de Boussinesq, que incluye la vorticidad de la capa limite (URBMET) de Bornstein (1972, 1975) fue el primero en simular flujos sobre área urbana rugosa y caliente.

Vukovich et al., (1976) fue el primero en usar un modelo hidrostático en 3-D para simular como la ICU induce circulaciones sobre un ciudad. Bornstein et al., (1986) expandió el modelo URBMET de 2-D en un modelo 3-D no topográfico ligado un modelo de 3-D de dispersión de calidad del aire para la Ciudad de Nueva York. El modelo incluía parametrizaciones de la turbulencia de alto orden y una ecuación de pronóstico de balance de energía con flujos de calor divididos entre la superficie y atmósfera.

Thunis (1990) incorpora la topografía natural y efectos de turbulencia dentro del Modelo de Vorticidad Topográfica (VTM) versión de URBMET, mientras Bornstein et al., (1993) usa VTM con “bloques de edificios” urbanos. El modelo simulaba el retardo en el movimiento de un frente de brisa marina sobre la ciudad de Nueva York, así como la correspondiente convergencia en el día y la divergencia en la noche fuera de la ciudad.

El modelo a mesoescala, hidrostático e incompresible que usa ecuaciones básicas de

momentum, energía entre otras, de la Universidad de Colorado (CSUMM) (Pielke, 1974) fue usado para estudiar el albedo urbano (Taha, 1997). CSUMM también fue usado para investigar la humedad del suelo en Atlanta (Hafner y Kidder, 1999) y el impacto en la calidad del aire (Taha, 1999).

Dupont et al. (2001) emplea por primera vez el modelo urbano llamado DA-SM2-U comúnmente conocido como uMM5, para simular los campos meteorológicos dentro y sobre las coberturas rurales y urbanas en la ciudad de Philadelphia, USA.

La modelación de los efectos de azoteas verdes en temperatura e isla de calor, ha sido estudiada en la Ciudad de Nueva York (NYC), en la cual emplearon el modelo MM5, un modelo de meso-escala que se ha utilizado ampliamente a diversas resoluciones de acuerdo a los requerimientos de los investigadores.

Los estudios en NYC, concluyen que las azoteas verdes pueden ser una importante estrategia de mitigación para la ICU. La infraestructura de azoteas verdes en NYC reduce en promedio 0.8°C si el 50% de las azoteas de la ciudad son naturadas. Esto contribuye a la reducción del efecto de la ICU y podría mejorar la calidad del aire y la salud pública (Rosenzweig, C., et al., 2009).

El modelo uMM5 un modelo a micro-escala (alta resolución), se empleara en una zona de la Ciudad de México para estudiar cómo influye la urbanización en el clima local, y como una herramienta para evaluar las formas de mitigación de la ICU y de la calidad del aire.

Capítulo 3: Metodología

3.1 Descripción del modelo MM5 urbano.

El modelo MM5 tiene su origen a principios de los años 70's y desde entonces ha tenido varias modificaciones y mejoras. Es descrito en diferentes fuentes, por ejemplo en Dudhia et al. (2005). La versión conocida como MM5 urbano o uMM5 es descrito por Dupont et al. (2004), la cual se basa en el incluir los parámetros de rugosidad, arrastre y de los diferentes usos de suelo presentes en un área urbana y rural.

3.2 Descripción de la zona de estudio.

La Ciudad de México (CM) se ubica en el centro de la República Mexicana (Fig. 3.1). Debido a que se encuentra en la Zona Intertropical recibe alta insolación durante todo el año. La altura promedio de la CM de 2240 msnm. La precipitación pluvial en la CM total varía de 1,000 en el Sur a 600mm en el Norte por año, y el período en que se concentra es en el verano (SMA-GDF, 2005).

El uso de suelo urbano corresponde a un 65.5 % de la superficie total, con un 43 % en el D. F. y un 22.5 % en el Estado de México. La zona rural cuenta con el 34.5 % restante, con usos de suelo agrícola, pecuario, forestal y de conservación.

En la época invernal, la presencia de la Corriente de Chorro, misma que se caracteriza por una fuerte velocidad de los vientos del oeste en niveles altos de la troposfera y un favorable transporte de humedad, genera precipitaciones normalmente no muy importantes en las cuales la orografía juega un papel decisivo. Durante la misma época se presentan incursiones de

masas de aire frío y seco, impulsadas por sistemas ciclónicos situados en la porción centro occidental de Estados Unidos o aún más al norte de ese país, que penetran por la región norte de nuestro territorio y avanzan hacia la zona central, llegando a extenderse sobre la ZMVM, provocando descensos de temperatura, algunas heladas y nevadas, así como estratificación de las capas troposféricas, induciendo la formación de inversiones térmicas en superficie o en capas atmosféricas muy bajas.



Figura 3.1 Ubicación Geográfica de la Ciudad de México. Localizada en el centro de la república con una extensión de 1,479 km² (Wikipedia, 2011).

La zona de estudio corresponde a una sección de la Colonia Escandón y Condesa (Fig.3.2). Esta elección se hizo debido a su representatividad de un tipo de vivienda de la Ciudad de México, su homogeneidad en las edificaciones y además se tienen datos meteorológicos

proporcionados de la campaña MILAGRO de la estación ubicada en las oficinas centrales del SIMAT en la colonia Escandón.

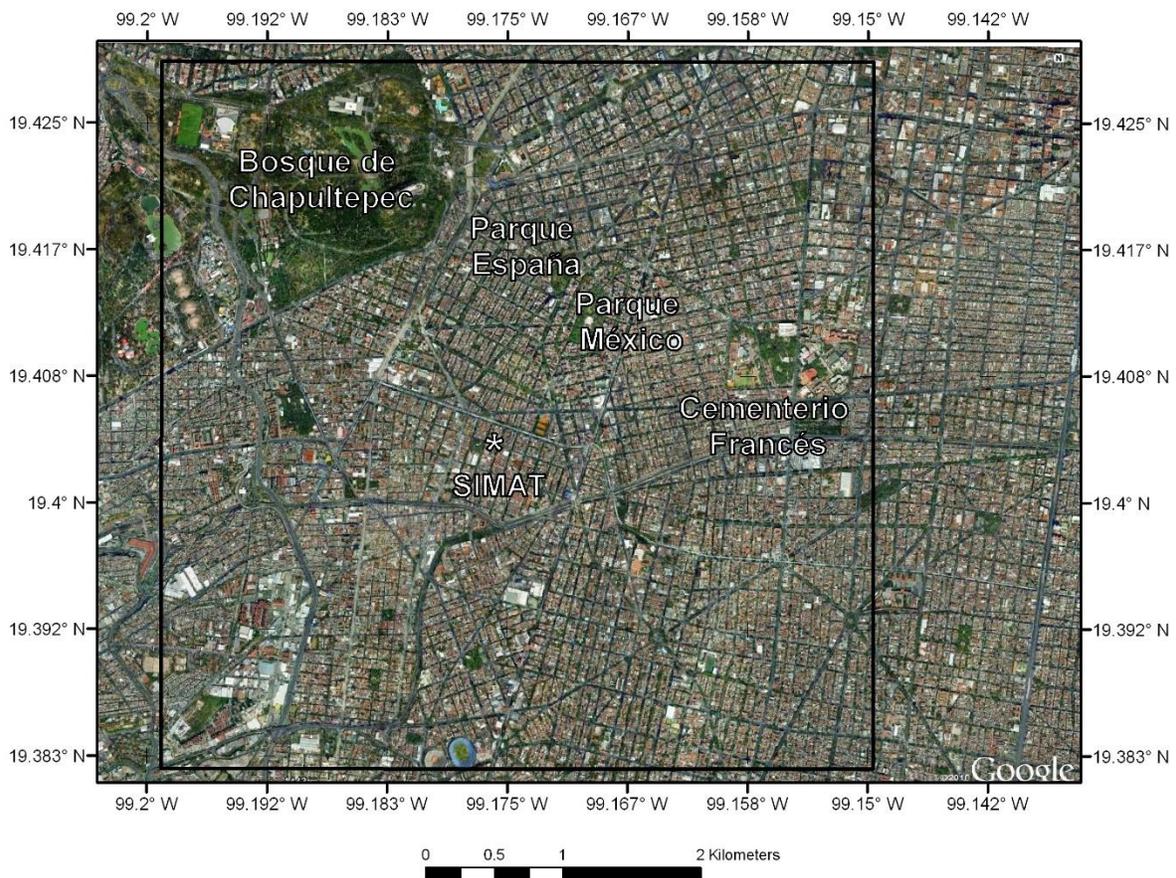


Figura 3.2 Zona de estudio (recuadro negro), celdas de 13 x 13 con resolución de 500m

En la zona se tiene también las presencias de áreas moderadamente grandes de vegetación o parques urbanos, como el Bosque de Chapultepec, Parque España, Parque México y el Cementerio Francés, que por su área de extensión tendrán algún efecto en la modelación.

3.3 Campaña de mediciones en azoteas verdes y convencionales

Para proporcionar información adecuada al modelo uMM5, el comportamiento hidrotermal de la atmósfera de una azotea verde y convencional durante un ciclo diurno fueron medidos. Este comportamiento se incorporó a través de condiciones de frontera en uMM5. Para ello, se seleccionaron dos lugares que se muestran en la figura 3.3. Ambos edificios se encuentran en las afueras del Jardín Botánico de la UNAM y con una separación entre ellos de 100 m. La azotea verde de tipo extensivo tiene una superficie aproximada de 100 m² y está conformado por plantas de tipo suculenta y cactácea. La azotea convencional es de concreto con una capa de impermeabilizante de color rojizo de uso común en México. Su superficie es de 150 m².



Figura 3.3 Azotea de lado izquierdo naturada tipo extensiva y del lado derecho sin naturar.

Como se ha mencionado, las mayores concentraciones de contaminación tienen lugar en la ciudad de México durante la temporada seca de invierno por lo que la campaña de medición en ambos sitios se prolongó desde febrero hasta mayo de 2010 precedido por una campaña más corta de preparación en abril de 2009.

En la campaña de mediciones se usaron los siguientes equipos:

Tabla 3.1 Equipos empleados en la azotea verde

2	Piranómetros
2	Pirgeómetros
1	Termohigrometro
1	Sensor de temperatura superficial



Figura 3.4 Equipos instalados en la azotea verde

En la azotea convencional, los datos fueron otorgados por el Dr. Agustín Muhlia, donde se tiene una estación meteorológica y se instaló un termómetro para temperatura superficial de la azotea.

Los parámetros a medir son temperatura superficial, temperatura ambiente, humedad, radiación neta, albedo, intensidad y dirección del viento, que son parámetros que el modelo uMM5 emplea para su configuración.

3.4 Parametrización del modelo.

Los parámetros empleados en los modelos para el caso de estudio con un énfasis en el aspecto meteorológico se describen a continuación.

Se utiliza la estrategia de dominios anidados (Figura 3.5), donde MM5 usa tres dominios mientras que uMM5 es usado solamente para el dominio interior de alta resolución, ver Tabla 3.2.

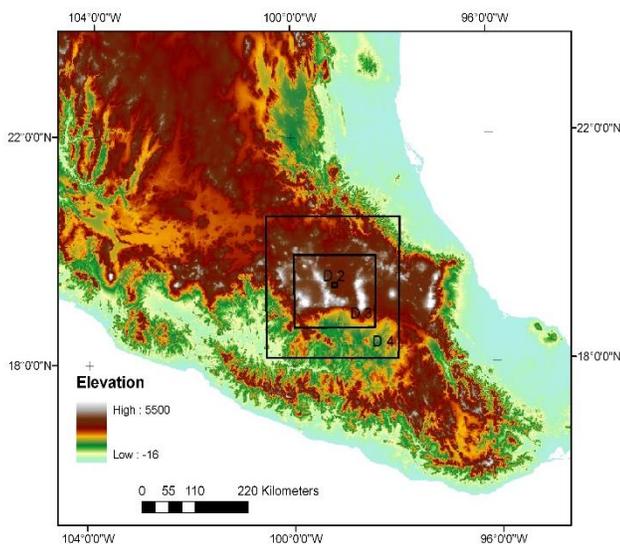


Tabla 3.2 Dominios de simulación

Dominio	Dimensiones (celdas)	Resolución
1	60 x 60	27 km
2	34 x 34	9 Km
3	61 x 52	3 km
4	13 x 13	0.5 km

Figura 3.5 Dominios de simulación, donde el dominio 1 tiene una resolución de 27 Km., dominio 2 de 9 Km., dominio 3 de 3 Km., y el dominio 4 de 0.5 Km.

En los dominios 1-3 se usan 24 niveles sigma (proporcionados con la altura de 100 hPa) con el nivel sigma más bajó a una altura aproximada de 10m. En el domino de alta resolución se usaron 49 niveles sigma ya que se agregaron puntos adicionales cerca de la superficie.

Las opciones seleccionadas para MM5 son:

-
- Esquema de cumulus Grell en dominios 1-2
 - Humedad simple-ice en dominios 1 a 4
 - radiación RRTM en dominios 1-4
 - SM2-U en dominio 4
 - ETA PBL en dominio 1-3
 - Gayno-Seaman (únicamente para uMM5) en dominio 4
 - Datos de NCEP/NCAR para el mes de Marzo 2006 con promedio de 6 horas de análisis final

Las siguientes propiedades de superficie asignada para cada categoría de uso de suelo (LU) y cobertura (LC) en los dominios 1-3 están internamente establecidas en el modelo:

- Dominio 1-3: altura topográfica USGS (1.0, 0.5, 0.16, 0.08 grados de resolución)
- Dominio 1-3: esquema de 24 categorías de LU/LC USGS modificadas para la Ciudad de México (García, 2002).

Basados en Burian et al. (2004), la siguiente morfología urbana es necesaria como parámetros de entrada del modelo uMM5:

- Esquema de 38 categorías correspondientes a LU/LC para el Dominio 4.
- Distribución de las diferentes coberturas para superficies pavimentadas, vegetación y azoteas.
- Porcentaje de superficies pavimentadas/áreas impermeables conectadas a la red de drenaje.
- Alturas promedio de los edificios y de la vegetación.
- Razón total del área de la superficie de la pared entre el área de cada celda.

-
- Razón entre la altura y ancho de los edificios.
 - Densidad del área frontal de los edificios y la vegetación.
 - Densidad del área de los techos de los edificios y vegetación.
 - Densidad del área de los costados de los edificios y vegetación.

La obtención de estos datos estuvo a cargo del Instituto de Geografía, para el cual emplearon un juego de aproximadamente 60 ortofotos del INEGI de resolución de 2 metros como referente visual de calidad para la corrección geométrica de los vectores. Cuarenta de ellas pertenecen al laboratorio de SIG y PR del Instituto de Geografía, y veinte más fueron compradas para completar el área de estudio. En la obtención de la cubierta vegetal se procesaron imágenes Landsat ETM de 30 metros de resolución por píxel de la zona de estudio, para la realización de un índice de vegetación que nos ayude a obtener dicho parámetro.

Un sistema de información geográfica, códigos en FORTRAN y Matlab fueron implementados para integrar el conjunto de datos de construcción con los datos de uso suelo para generar las características de la morfología urbana del área de estudio útil para uMM5. La representación en 3D de la morfología urbana del dominio de estudio se muestra en la figura 3.6.

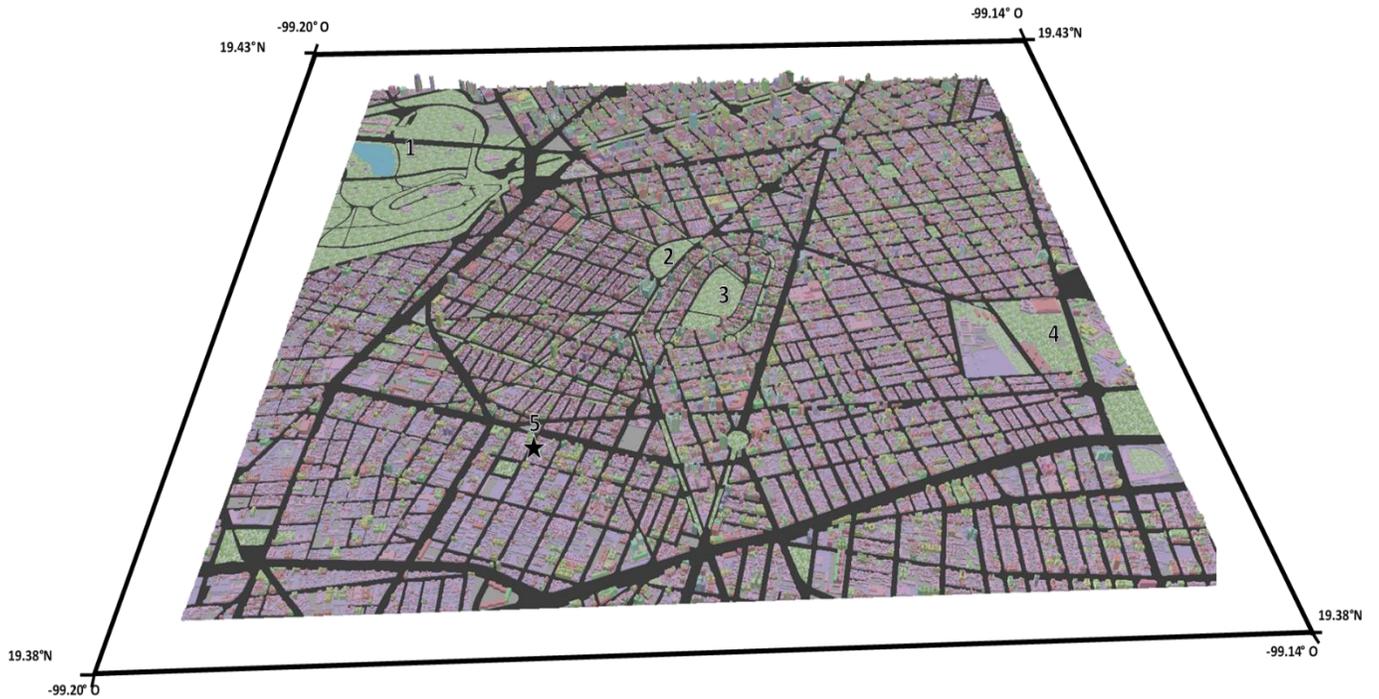


Figura 3.6 Morfología y visualización en 3D de la zona de estudio en la Ciudad de México, (1) Bosque de Chapultepec, (2) Parque España, (3) Parque México, (4) Cementerio Frances y (5 estrella) SIMAT.

Las corridas del modelo MM5 son realizadas en una estación de trabajo con plataforma Linux compilado para Intel fortran del CCA, mientras que uMM5 fue implementado en el clúster Omteotl con una plataforma Linux y compilado para Portland Group Fortran 90. Todo este proceso se realiza de acuerdo al siguiente diagrama de flujo.

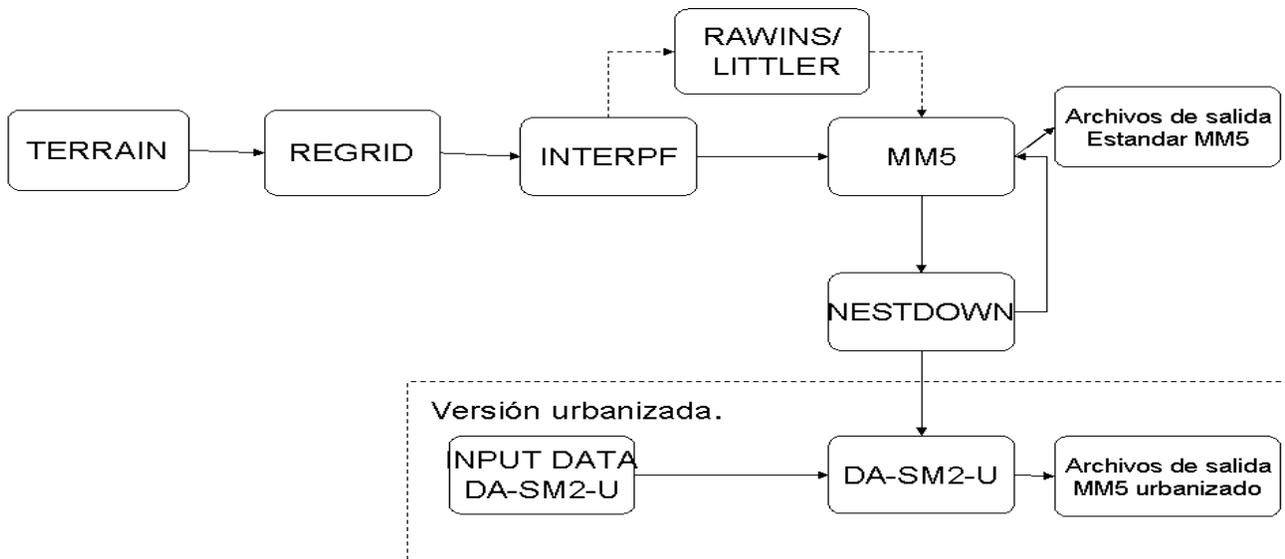


Figura 3.7 Diagrama de ejecución del modelo MM5 y uMM5

Una parte importante del trabajo es conocer que tan apegado está a la realidad el modelo, por lo que es necesario dar un estudio estadístico a los resultados obtenidos.

3.5 Estudio estadístico.

Para evaluar el desempeño del modelo de forma cuantitativa se utilizaron las siguientes métricas estadísticas (Willmott, 1981).

$$\sigma_p = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(p_i - \bar{p} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\sigma_o = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(o_i - \bar{o} \right)^2 \right]^{1/2}$$

donde σ_p y σ_o son las desviaciones estándar de los datos predichos y observados respectivamente. N es el número de puntos de monitoreo. Los parámetros p_i y o_i fueron tomados como promedio por hora para cada punto o estación de monitoreo, donde \bar{p} y \bar{o} son los valores de las medias para las N ubicaciones.

El índice de concordancia se define como:

$$I_c = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|p_i - \bar{p}| + |o_i - \bar{o}|)^2}$$

Este índice compara las salidas de los valores de predicción con los valores observados.

Con estas herramientas se puede determinar el nivel de acierto del modelo. Es considerado alto si la desviación estándar de los datos de predicción es similar. El rango posible para el índice de concordancia (IC) es de 0 a 1, siendo el valor de 1 una concordancia perfecta.

Capítulo 4: Resultados

4.1 Días de simulación

Los días de simulación se seleccionaron de acuerdo a los datos proporcionados de la campaña MILAGRO (Megacity Initiative: Local and Global Research Observations), del sitio SIMAT que fueron del 9 al 16 de Marzo del 2006. A continuación se describen las condiciones meteorológicas sinópticas de los días estudiados y modelados.

4.2 Condiciones sinópticas

Las condiciones meteorológicas sinópticas para los días 9 al 16 de Marzo del 2006, indican la presencia de un sistema de alta presión sobre el Golfo de México provocando circulación anticiclónica. Estos sistemas son típicos en la temporada de invierno y son condiciones críticas para la dispersión de contaminantes al generar velocidad de vientos bajos y una atmósfera estable. Con el transcurso del día, la advección provocada por el calentamiento de la superficie debido a la radiación solar rompe esta estabilidad. Se presentan cielos despejados, y las condiciones meteorológicas presentes en la zona de estudio son locales, ver Figura 4.1.

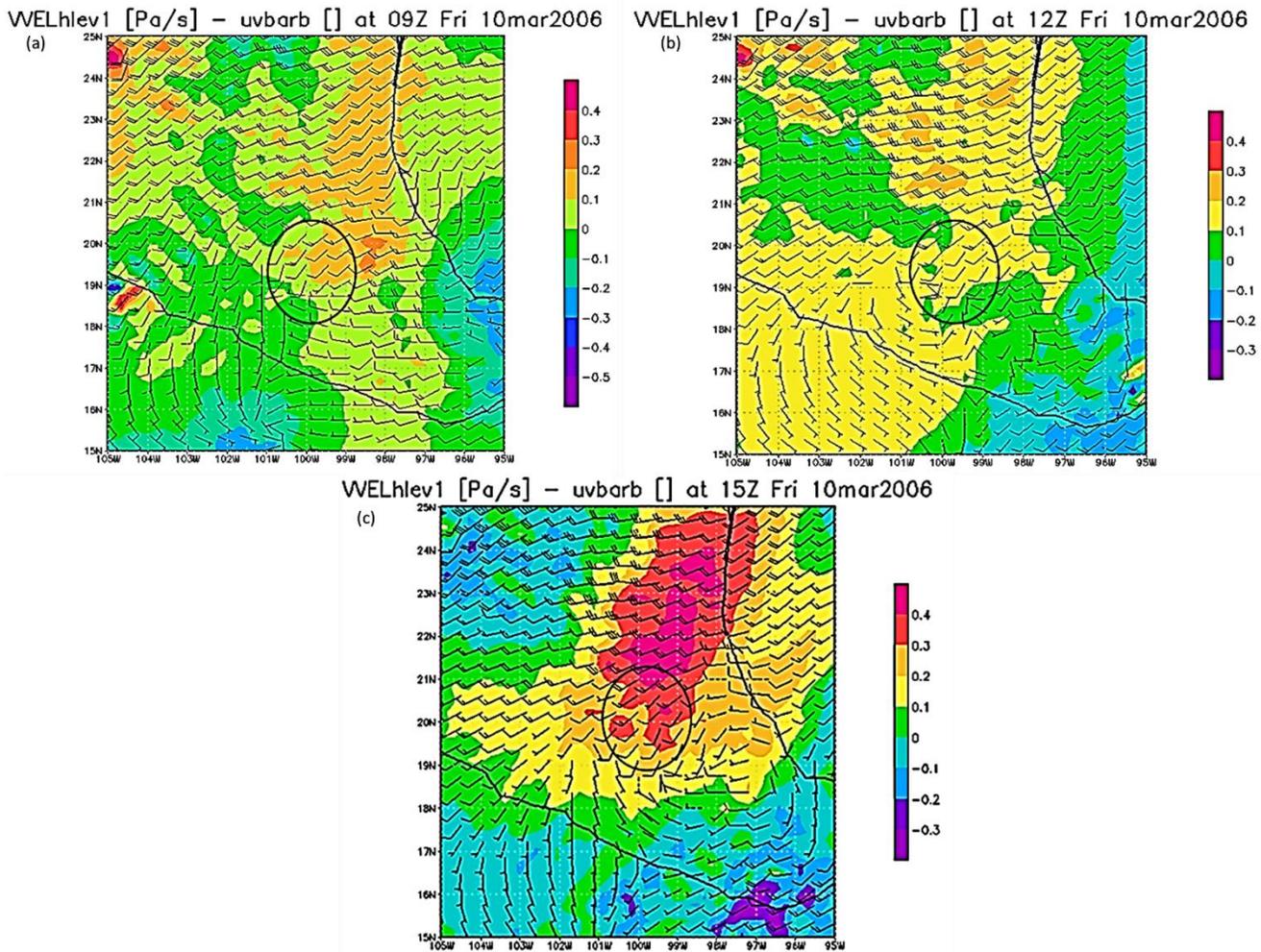


Figura 4.1 Condición sinóptica a 500 mb para el día 10 de Marzo promediado de las 6 a 12 hrs

4.3 Modelación de intensidades de vientos y temperatura para uMM5 y MM5.

La primera parte de la modelación consiste en simular la zona de estudio sin la implementación de azoteas verdes y observar el comportamiento de los modelo uMM5 y MM5. Se obtuvieron los siguientes resultados para una corrida correspondiente a la semana del 9 al 16 de Marzo del 2006, comparados con los datos proporcionados de la campaña poner nombre MILAGRO.

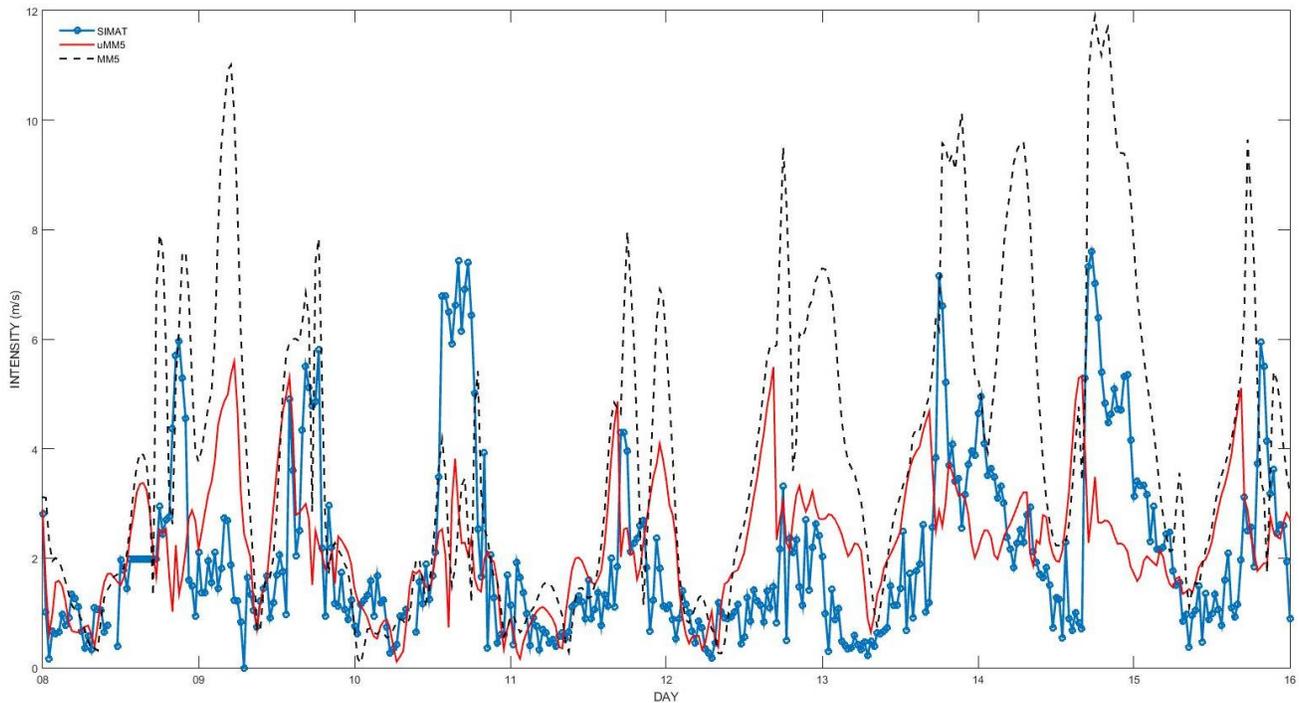


Figura 4.2 Gráfica comparativa de intensidades de vientos

Las gráficas correspondientes se muestran en la Figura 4.2. Se observa que uMM5 (línea roja) tiene un mejor desempeño con respecto a MM5 (línea punteada negra) al compararlos con las mediciones (círculos azules). MM5 sobrepredice las intensidades, debido que no incluye las parametrizaciones como el término de arrastre y la morfología urbana.

Esto es corroborado al usar el Índice de Concordancia (IC) que se muestra en la Tabla 4.1.

Este corresponde a la aproximación óptima cuando se acerca al valor unitario.

Tabla 4.1 Evaluación estadística de IC, Desviación Estándar (STD), Error máximo de las intensidades de viento.

Marzo 2006 Día	IC		STD			Error máximo absoluto (m s ⁻¹)	
	uMM5	MM5	Observado	uMM5	MM5	uMM5	MM5
8	0.48	0.64	1.35	1.55	2.08	4.29	6.23
9	0.51	0.39	1.36	1.94	2.86	4.20	8.94
10	0.76	0.68	2.32	1.21	1.22	5.32	5.77
11	0.46	0.54	0.91	1.19	1.98	3.44	5.44
12	0.43	0.29	0.57	1.32	2.56	4.14	7.72
13	0.66	0.57	1.66	1.99	2.67	4.63	7.33
14	0.61	0.52	1.83	1.49	3.12	5.09	7.49
15	0.37	0.45	1.16	1.28	2.00	3.93	7.08

Se observa como uMM5 mejora todas las métricas estadísticas. Para MM5 el índice de concordancia (IC) oscila entre 0.29 a 0.68, mientras que para uMM5 oscila entre 0.48 a 0.76, con una desviación aproximada a la observada. Esto indica que los datos predichos por uMM5 tienden a los observados con mayor fidelidad, mientras que para MM5 sus desviaciones estándares son mayores a las observadas y mostrando una clara sobreestimación. La métrica estadística ratifica como uMM5 se acerca más a las mediciones mientras MM5 los sobreestima.

Para los resultados de temperatura también uMM5 muestra mejor desempeño con respecto a MM5, como se muestra en la Figura 4.3.

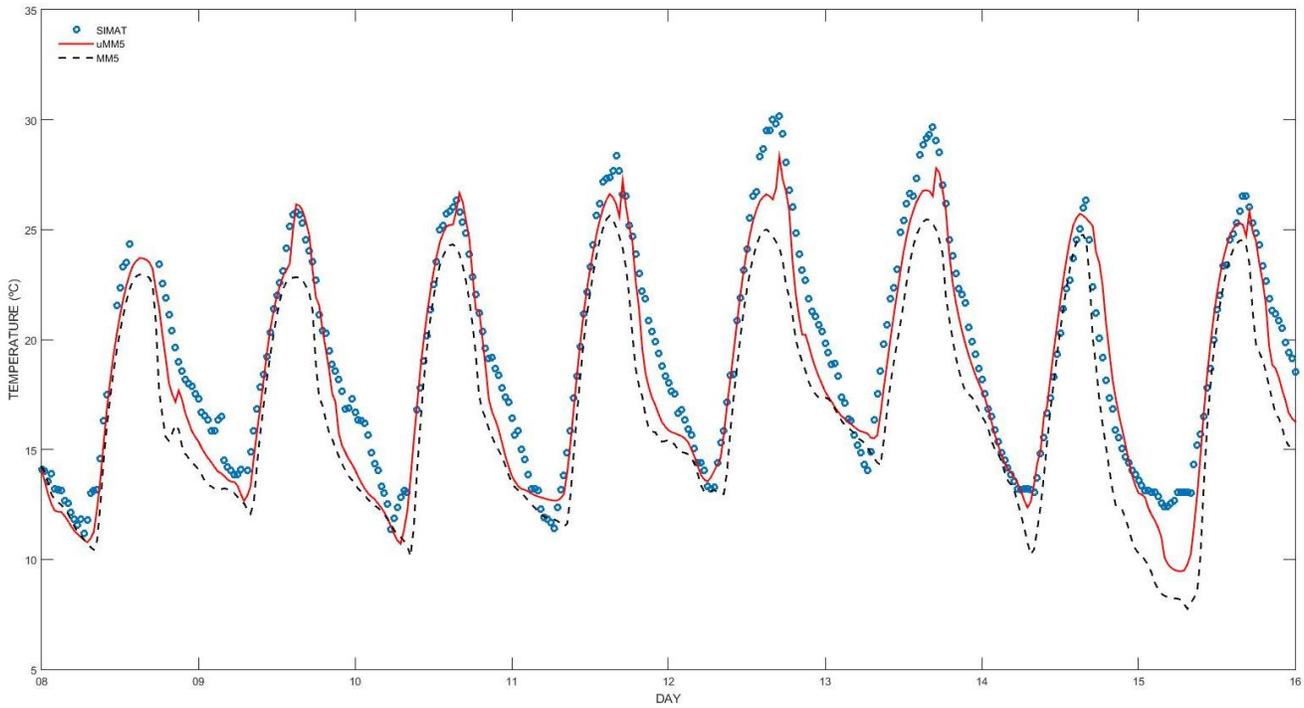


Figura 4.3. Grafica comparativa de temperaturas

Se observa que las temperaturas de ambos modelos tienen comportamientos similares. Sin embargo uMM5 tiene una mejor aproximación a los datos, como se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Evaluación estadística de IC, Desviación Estándar (STD), Error máximo de las temperaturas

Marzo 2006 Día	IC		STD			Error máximo absoluto (K)	
	uMM5	MM5	Observado	uMM5	MM5	uMM5	MM5
8	0.96	0.87	4.23	4.56	4.19	3.35	6.49
9	0.97	0.89	3.78	3.82	3.84	3.28	4.63
10	0.97	0.93	4.65	5.07	4.77	3.18	4.06
11	0.98	0.93	5.51	5.29	4.97	3.92	5.60
12	0.97	0.89	5.52	4.80	4.22	3.70	6.13
13	0.97	0.88	4.75	4.17	3.70	3.24	4.65
14	0.98	0.94	3.94	4.72	4.51	3.14	3.91
15	0.97	0.89	5.05	5.82	6.04	3.70	6.30

La estadística muestra como los valores del modelo uMM5 son más cercanos a los observados, teniendo un rango del IC de 0.96 a 0.98, mientras que MM5 es de 0.87 a 0.94.

4.4 Campaña de mediciones en las azoteas

De la campaña de mediciones en las azoteas verde y convencional, se hace una comparación de la Temperatura Virtual (T_v) y la Humedad Relativa (HR), como se muestra en la figura 4.4

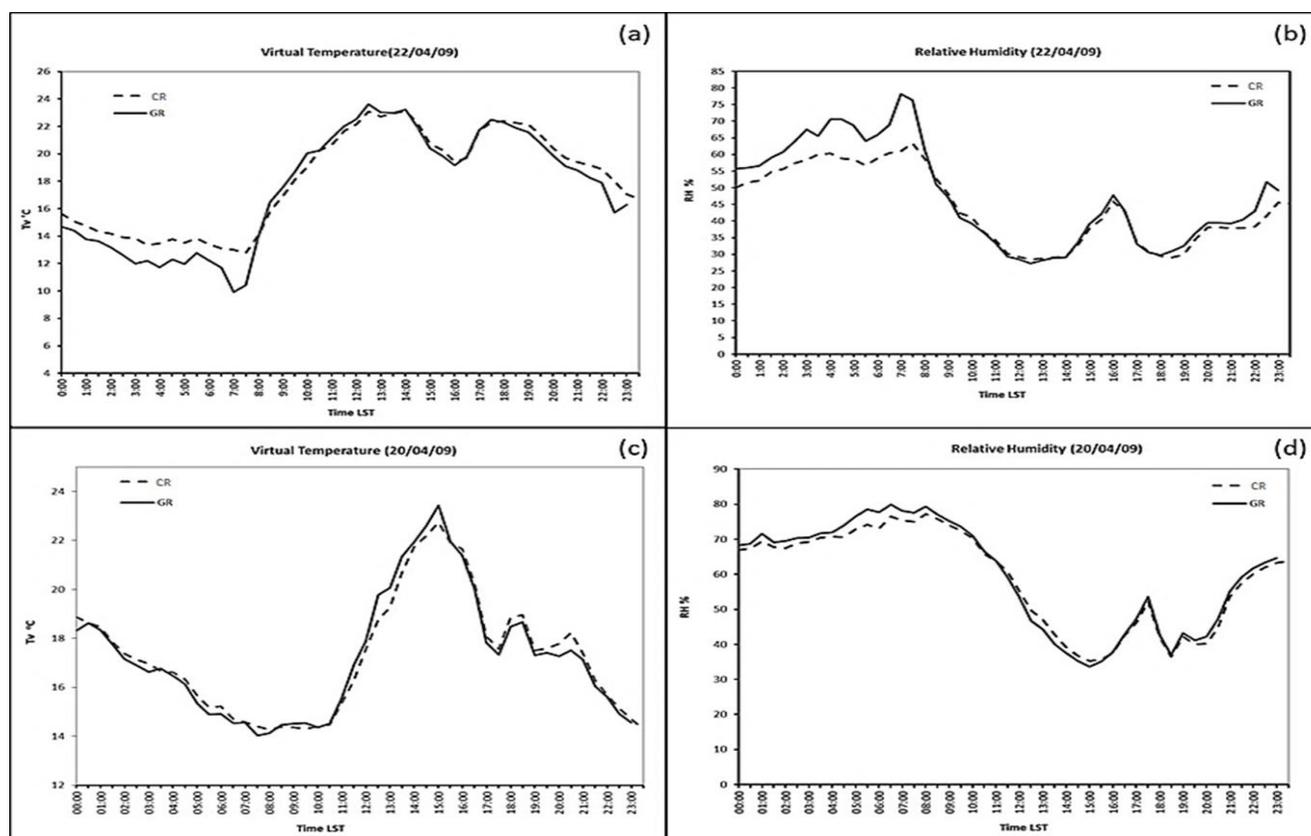


Figura 4.4 Graficas de mediciones para el 22 de Marzo del 2009, (a) Temperatura virtual (T_v) y (b) Humedad Relativa (HR), línea sólida para azotea verde (AV) y línea seccionada para azotea convencional (AC), de igual forma (c) y (d) para el día 20 de Marzo.

Se observa claramente la diferencia de temperaturas entre cada azotea, siendo más fría la azotea verde (Figura 4.4 (a)). Sin embargo se visualiza un sumidero de temperatura en la azotea verde, entre las 7 y 8 am correlacionada con el aumento de la humedad a esa misma hora (Figura 4.4 (b)). Este patrón es observado todos los días de la campaña y es consistente en el horario. Este comportamiento se atribuye a la evapotranspiración de las plantas con los primeros rayos de sol, incrementado así la humedad y por lo tanto el descenso de temperatura. Este fenómeno es de interés para evaluar en la modelación de azoteas verdes, ya que una mayor área de azoteas verdes, induciría o potencializaría la inversión térmica en las primeras horas de la mañana, el cual es un factor que aumenta la concentración de contaminantes atmosféricos.

Para las horas de la tarde se observan descensos bruscos de temperatura e incrementos en la humedad, esto se le atribuye a días nublados, lloviznas o entradas de corrientes de aire provenientes del jardín botánico por la tarde.

Cuando las condiciones sinópticas son dominantes las condiciones locales desaparecen, como podemos observar en la figura 4.4 (c) y (d), donde la Tv y la HR para el día 20 de Marzo son indiferentes para ambas azoteas.

4.5 Modelación de la altura de la capa de mezcla para azoteas convencionales y azoteas verdes.

La altura de la capa de mezcla es una variable crucial para este trabajo, en la Ciudad de México se tienen diversos estudios sobre este parámetro, por lo que se tomaron algunos para compararlos con los resultados de la modelación, que continuación se describen.

La figura 4.5 está compuesta de 2 gráficas que muestran la altura de mezcla modelada por uMM5 usando el criterio de TKE (Energía Cinética Turbulenta) para el centro del dominio D4 (sitio SIMAT) sobrepuesta con una gráfica obtenida por un ceilómetro ubicado en una zona urbana a 9.4 Km al norte del SIMAT, denominado T0. Las gráficas corresponden a las fechas 12 y 14 de Marzo del 2006.

La presencia de aerosoles puede ser detectado por el perfil de retrodispersión de un ceilómetro. Como los aerosoles son principalmente emitidos en la superficie, la concentración es más alta en la capa de mezcla que en la troposfera libre. Por lo tanto, la estimación de la altura de capa de mezcla por los sistemas Lidar se basa en la detección de la fuerte disminución de la retrodispersión de aerosoles en la parte superior de la capa de mezcla (De Haij, 2006).

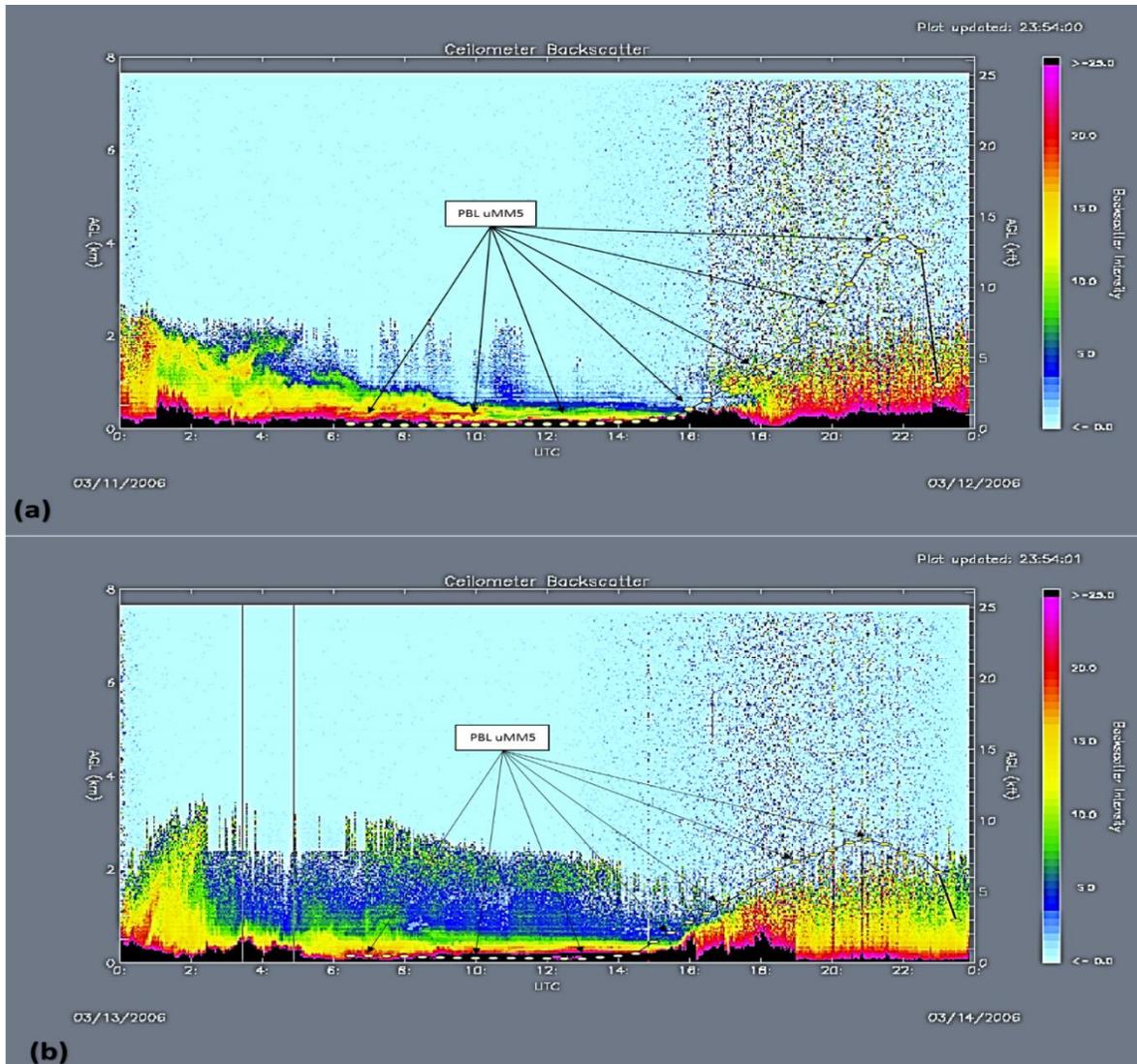


Figura 4.5 Graficas de retrodispersion de un ceilómetro para el sitio T0, sobrepuesta las alturas de capa de mezcla obtenidas por el modelo uMM5 (PBL uMM5 señalado con las flechas) para los días (a) 12 y (b) 14 de Marzo del 2006.

Nótese que la concentración de los aerosoles está representada por la capa oscura en la gráfica que indica la altura de la capa de mezcla y la línea de puntos representa la altura de la capa de mezcla obtenida por uMM5. El modelo sigue consistentemente el desarrollo de la capa especialmente de las 6:00 hasta las 16:00 UTC.

Los resultados también son comparados con datos de la altura de capa de mezcla promedio de cada media hora, reportados en el informe anual SMA-GDF para marzo del 2006 (SMA-GDF,2006).

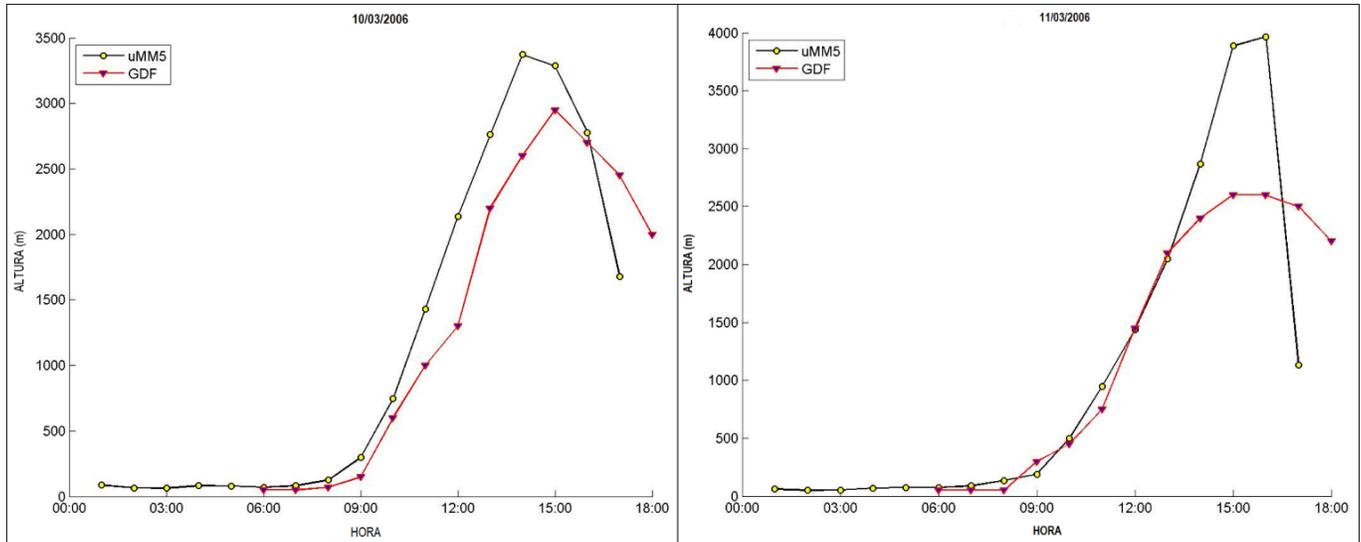


Figura 4.6 Promedios horarios de la altura de la capa de mezcla, SMA-GDF (línea con triángulos), uMM5 (línea con puntos)

De la figura 4.6, podemos observar que las primeras horas de la mañana el modelo (línea de puntos) sigue adecuadamente las mediciones reportadas (línea con triángulos), y así mismo la evolución a partir de las 10:00 horas locales.

Por último, en la campaña Milagro se realizaron numerosas evaluaciones de técnicas para medir la profundidad de la capa de mezcla como radiosondeos, sodars, perfiles de viento y lidar. La figura 4.7 muestra la evolución diaria del 8 al 16 de Marzo del 2006 de la capa de mezcla para los sitios T0, T1 y T2 . Se sobreponen los correspondientes resultados de uMM5

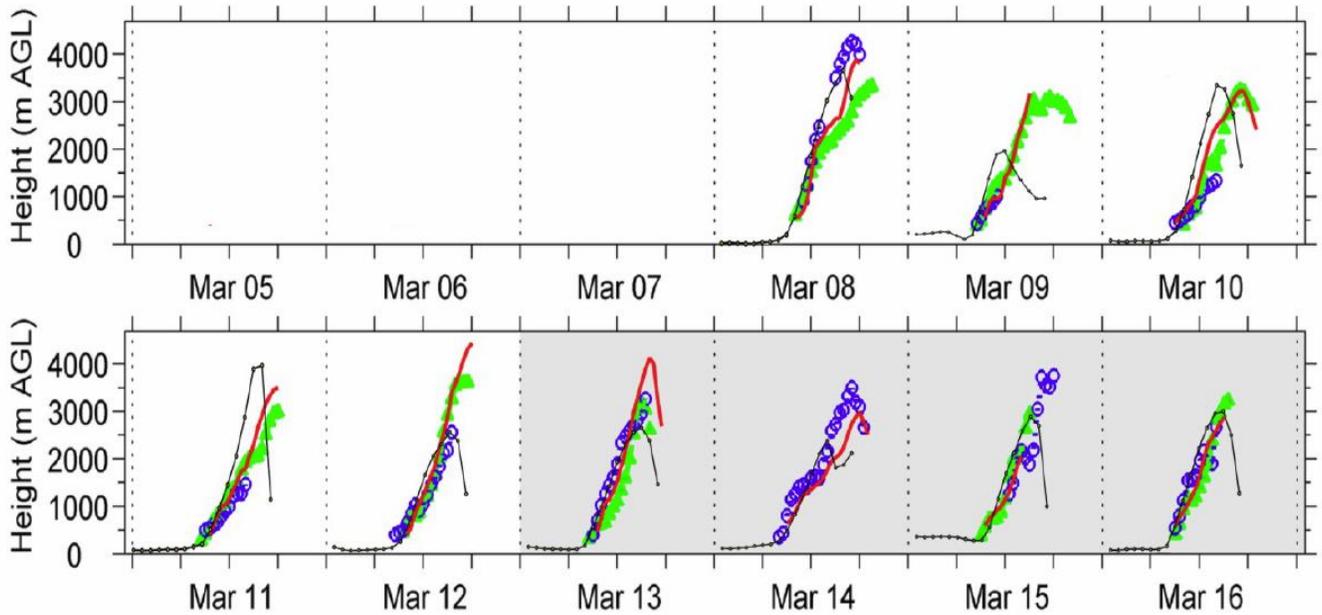


Figura 4.7 Evolución diaria de la altura de capa de mezcla, para T0 (círculos azules), T1 (línea roja), y T2 (triángulos verdes) por Shaw, et al. 2007 y uMM5 (línea negra punteada)

Estas mediciones se realizaron en T0, que se encuentra localizado en un área residencial a 10 Km al norte de SIMAT, T1 un área predominantemente suburbana y semirural a 39 km al noreste, y T2 en un área rural a 51 Km. al noreste. Se puede observar que uMM5 capta la mayor parte de la altura de mezcla. Esto es especialmente acertado en el rango de las 6:00 LST hasta las 10:00 LST.

Conociendo que el modelo reproduce favorablemente la altura de capa de mezcla, se procedió a realizar la modelación con azoteas verdes y analizar el efecto en la capa de mezcla.

En la figura 4.8 muestra la comparación de la altura de la capa de mezcla modelada para la azotea convencional (AC, línea punteada) y la azotea verde (AV, línea solida) en el dominio D4, para el 12 de Marzo del 2006. Se observa que hasta las 7:00 horas no hay variación de la capa de mezcla. De acuerdo con uMM5, después de las 7:00 hasta las 10:00 horas la altura de la

capa de mezcla se reduce por la presencia de las azoteas verdes, teniendo la máxima variación a las 9:10 hrs.

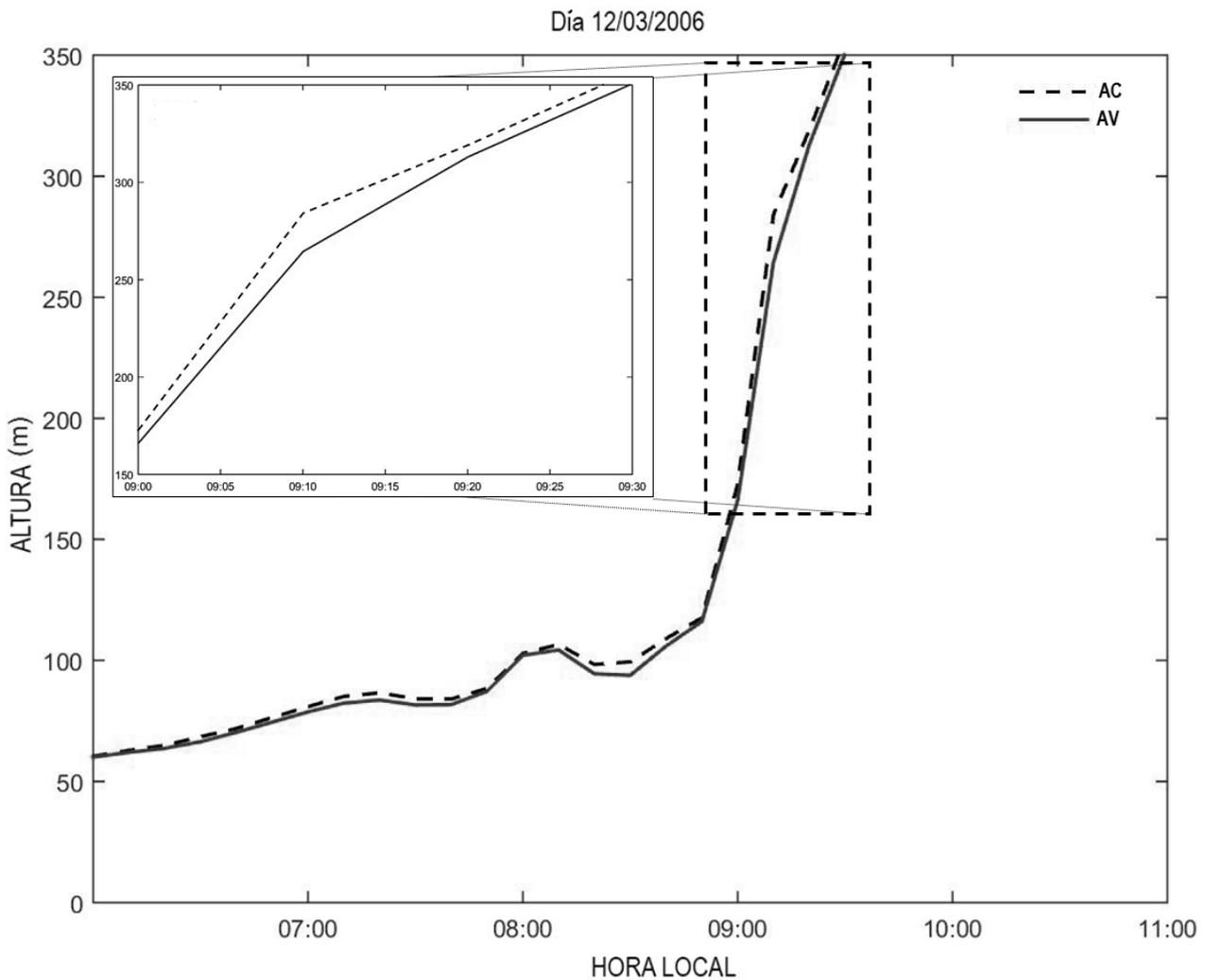


Figura 4.8 Comparación de la evolución de la altura de capa de mezcla para el AC (línea punteada) y para el AV (línea sólida), con un acercamiento para las 9:00 a 9:30:00 horas (rectángulo negro).

Para el día 14 de marzo debido a la entrada de un frente frío, que generan que las condiciones locales desaparezcan prevaleciendo así las condiciones sinópticas, se observa que no hay prácticamente ninguna diferencia entre las capas de mezcla (ver figura 4.9).

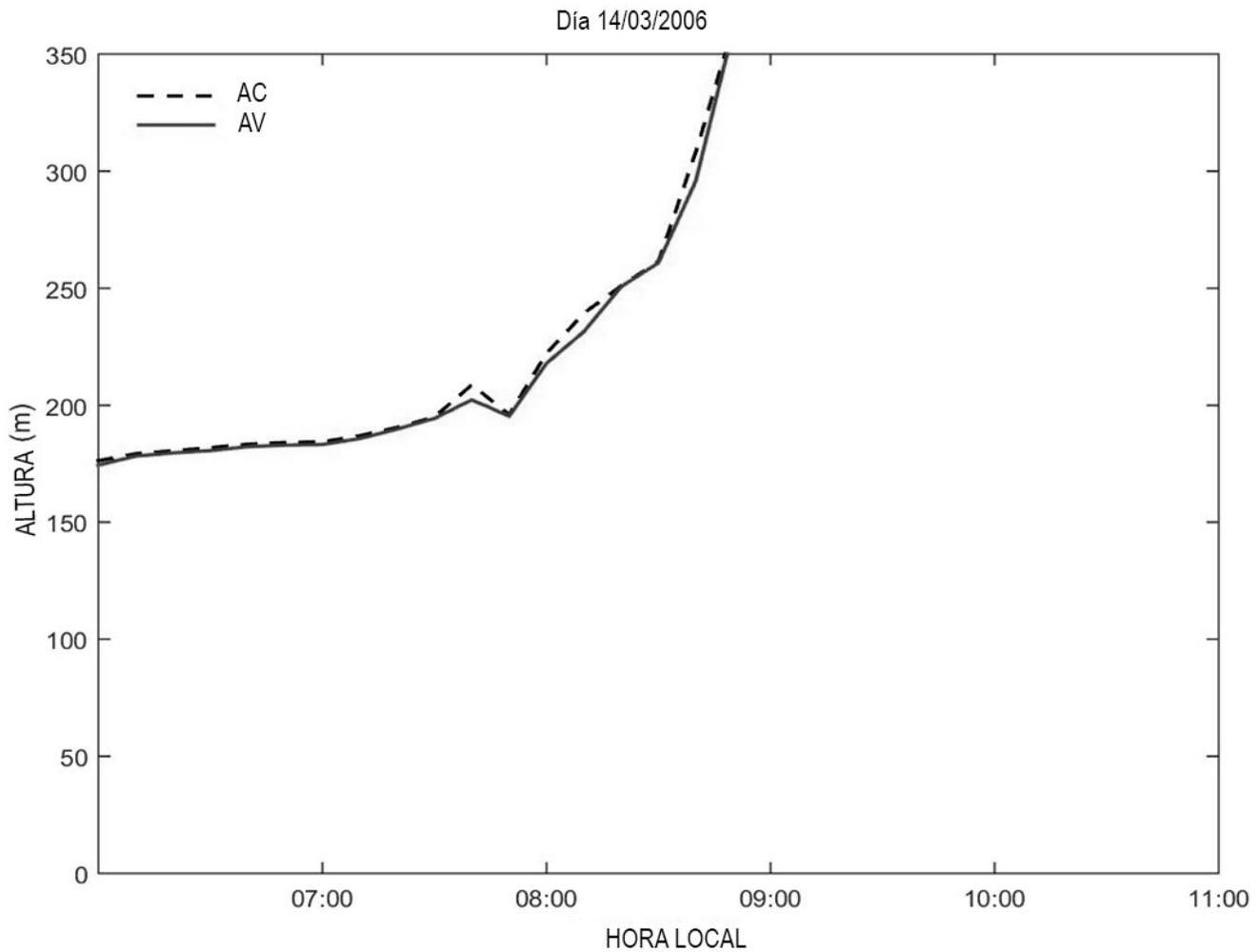


Figura 4.9 Comparación de la evolución de la altura de capa de mezcla para la AC (línea punteada) y para la AV (línea sólida), cuando las condiciones sinópticas prevalecen

El periodo de modelación de la altura de la capa de mezcla debido al efecto de las AV, se analizó para encontrar el máximo de reducción en cada día, graficando los resultados como se muestra en la figura 4.10. Esta reducción tiene en un rango de 2.7 a 7.5% como máximo y un 7% se hace presente en 3 días del periodo, entre las 7:00 a 9:00 horas, y para el día 14 la reducción es mucho menor debido a las condiciones sinópticas por la entrada de un frente frío.

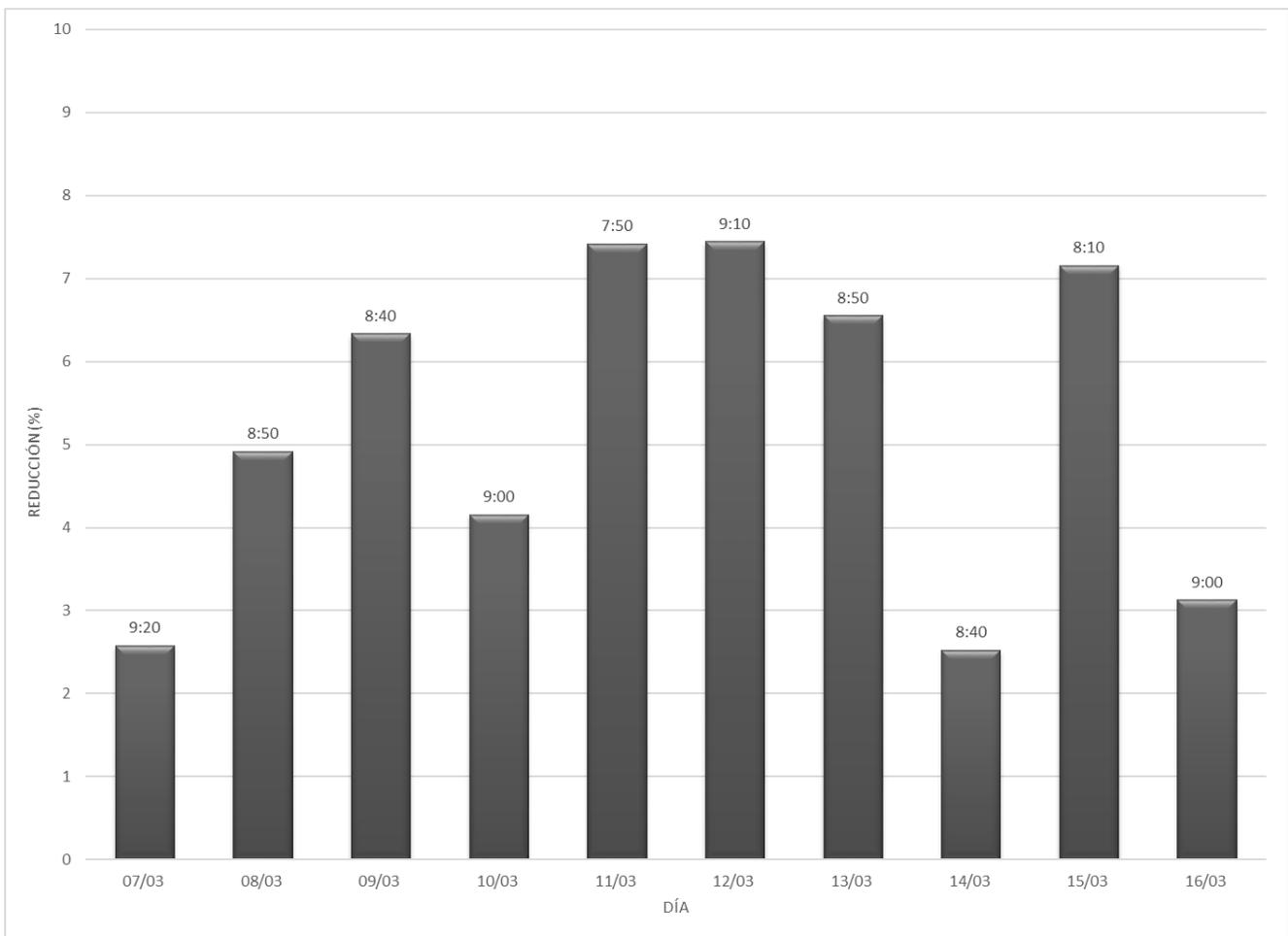


Figura 4.10 Porcentaje de reducción de la altura de capa de mezcla para cada día de simulación

Resultados similares son observados para el desarrollo vertical de la temperatura (Figura 4.11), para el caso de azoteas verdes, el día 12 provocan un enfriamiento aproximado de 1.2 °C con respecto al caso de azoteas convencionales, por lo tanto la altura de capa de mezcla es menor para este día. Por otro lado, para el día 14 cuando las condiciones sinópticas son dominantes, la diferencia de temperatura y los cambios en la capa de mezcla son imperceptibles.

En el perfil vertical de temperatura para el caso verde (Figura. 4.11(a)) es complejo, ya que en ella se observan dos capas de inversión (una a 35 m y otra más profunda a 70 m), en lugar de una sola capa de inversión (Figura 4.11(b)) poco profunda de 50 – 60m (altura promedio de las azoteas). Este fenómeno de inversión térmica en azoteas convencionales, es ocasionado por el enfriamiento radiactivo en forma de onda larga, tal fenómeno fue observado por Bornstein (1968), donde documenta que las azoteas inducen a inversiones térmicas que limitaban la dispersión de los contaminantes de la ciudad. Esta es la primera vez que este fenómeno es reproducido en una modelación con uMM5 o uWRF.

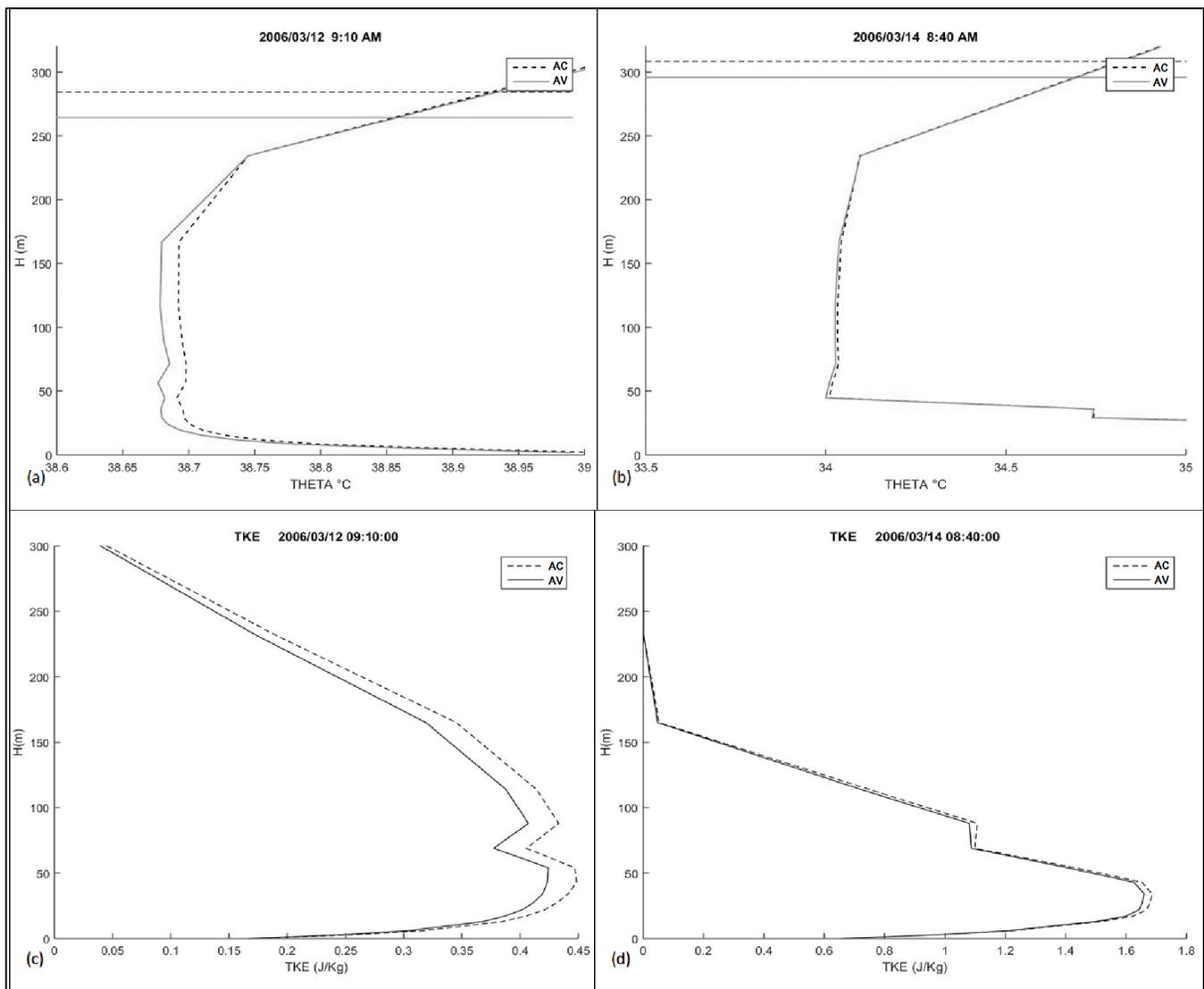


Figura 4.11 Temperatura potencial (°C) y alturas de PBL (líneas horizontales) obtenidas por uMM5, azotea convencional (AC) y azotea verde (AV), para el 12 Marzo a las 0910 LST (a) y 14 Marzo a las 0840 LST (b); (c) y (d) muestran los valores de TKE (J/kg) modelado.

El perfil de TKE (de sus siglas en ingles Energía Cinética Turbulenta) para el día 12 de marzo (Figura 4.11(c)) muestra una baja capa de mezcla para el caso verde en comparación al caso convencional, como era de esperarse. Las diferencias se reducen de nuevo cuando las condiciones sinópticas son dominantes (Figura 4.11(d)), pero la intensidad de TKE en este caso

son 3 a 4 veces mayores que para el caso verde, esto es debido a las altas intensidades de los vientos que provocan mayor turbulencia. Estos resultados son interesante pero se hace necesario un análisis a futuro con modelos micrometeorológicos a escalas finas. Los efectos de la reducción de la capa de mezcla en la calidad del aire, es analizado en la sección 4.7.

Otro factor de importancia es el intercambio energético que se da entre las diferentes superficies y la atmosfera, en este caso las azoteas. Los flujos simulados de calor latente y sensible se compararon con las mediciones del sitio SIMAT (Velasco, E., 2005a,b), para la simulación de las azoteas verdes la información hidrotermal recopilada durante la etapa experimental, se utilizó para parametrizar el modelo uMM5.

La figura 4.12 muestra la comparación de los flujos de calor sensible y latente para los techos convencionales y verdes, del 10 de marzo de 2006 durante condiciones sinópticas débiles, típico de cielo despejado. Se obtuvo una buena correlación entre los flujos de calor modelados y medidos, aunque el calor latente está por debajo de lo observado y el calor sensible por encima, esto posiblemente se debió a la influencia local de un jardín cerca del edificio el cual no fue captado por la resolución del modelo.

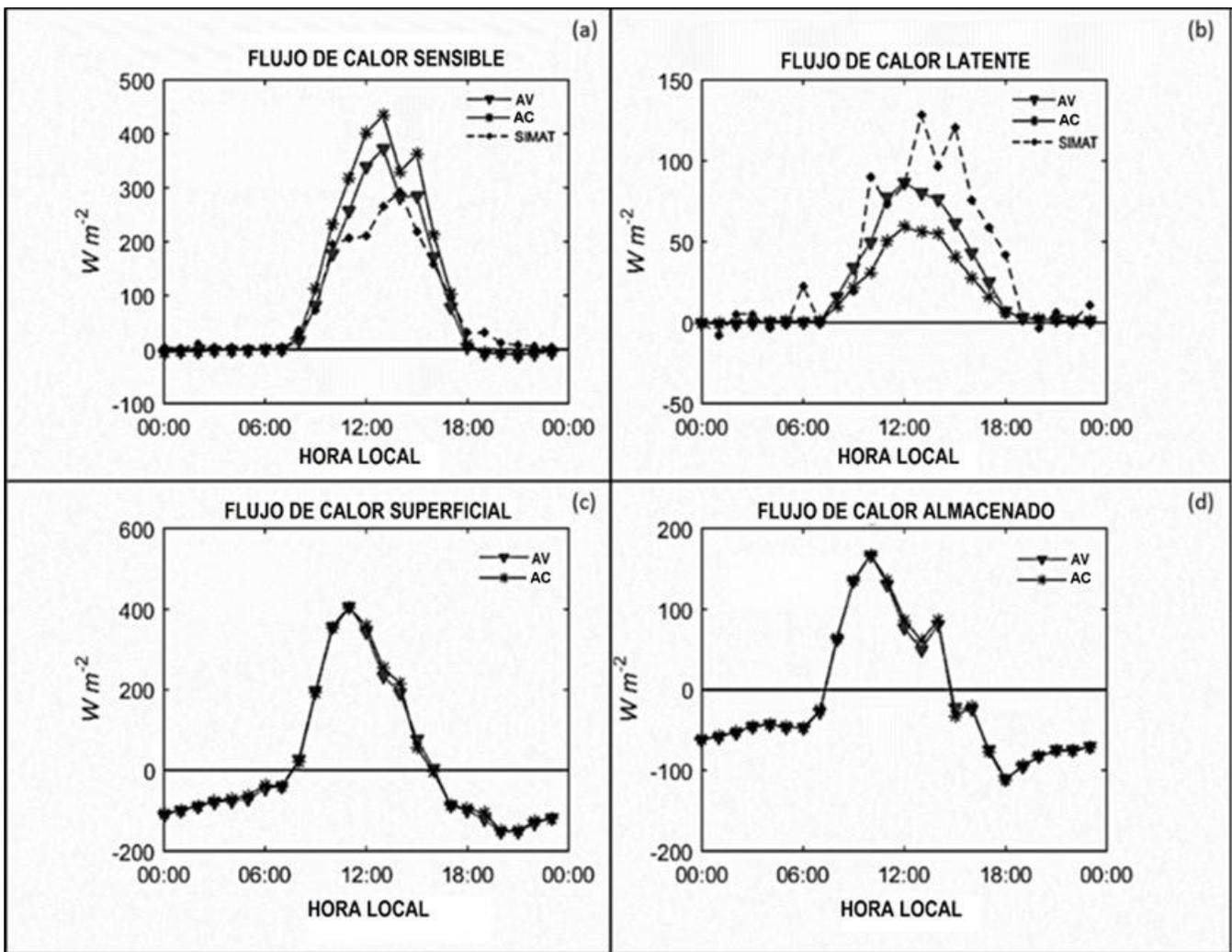


Figura 4.12 Flujos de calor simulados y medidos (sitio SIMAT) para el 10 de marzo 2006: (a) Calor Sensible y (b) Calor Latente, ambos para Azotea Convencional (AC puntos), Azoteas Verdes (CR triángulos), y mediciones (línea seccionada); también se muestra los flujos simulados de Calor superficial (c) y calor almacenado (d).

Los techos verdes debido a la vegetación aumentan el flujo de calor latente (AV), y los valores picos (entre las 12 y 13 horas) se incrementa de 50 W m^{-2} (AC) a 75 W m^{-2} (AV). En tanto para el flujo de calor sensible este se redujo, pasando de 450 W m^{-2} a 245 W m^{-2} . Los flujos de calor superficial se muestran en las figuras 4.12 (c) y (d), caber denotar que no hay comparación con mediciones del sitio debido a la inexistencia de las mismas, los valores de flujo de calor de

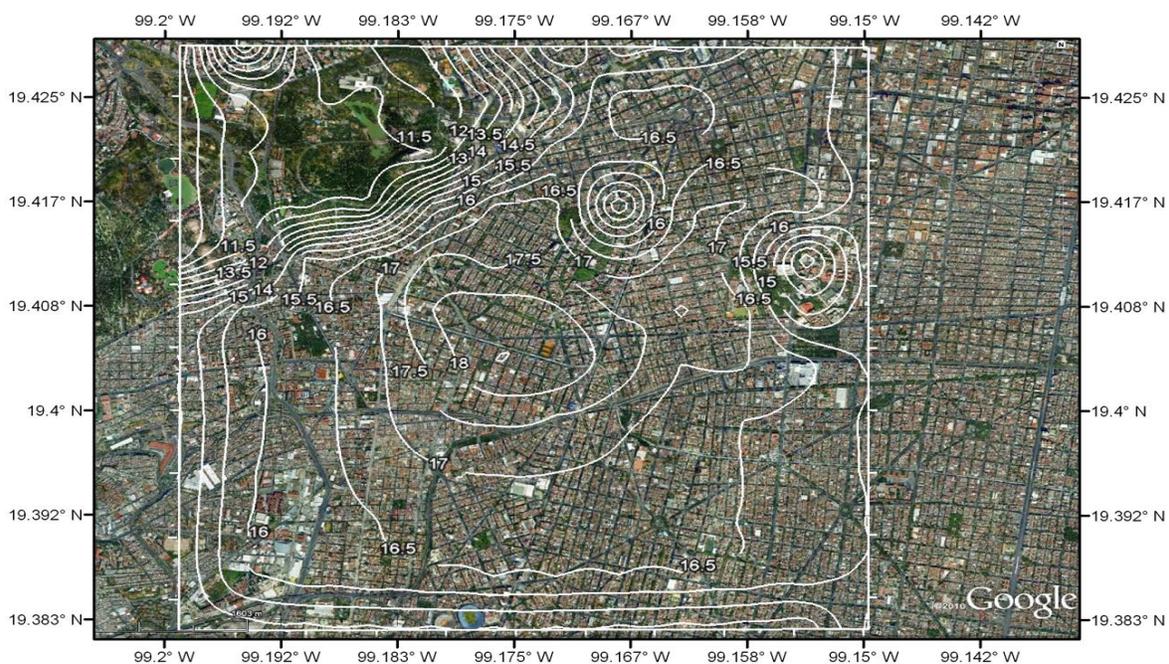
almacenado (ΔH_s) no se puede medir, por lo tanto se estima por la ecuación de balance de energía (Dupont, 2004). Los resultados simulados para los techos convencionales son similares a los encontrados en un estudio para la Ciudad de México realizado por Oke et al., (1999). Al obtener uMM5 altas relaciones de Bowen (> 7) y con los coeficientes de calor (almacenado y superficial), la radiación neta es de casi el 50%.

4.6 Efecto de las azoteas verdes a la Isla de Calor Urbano.

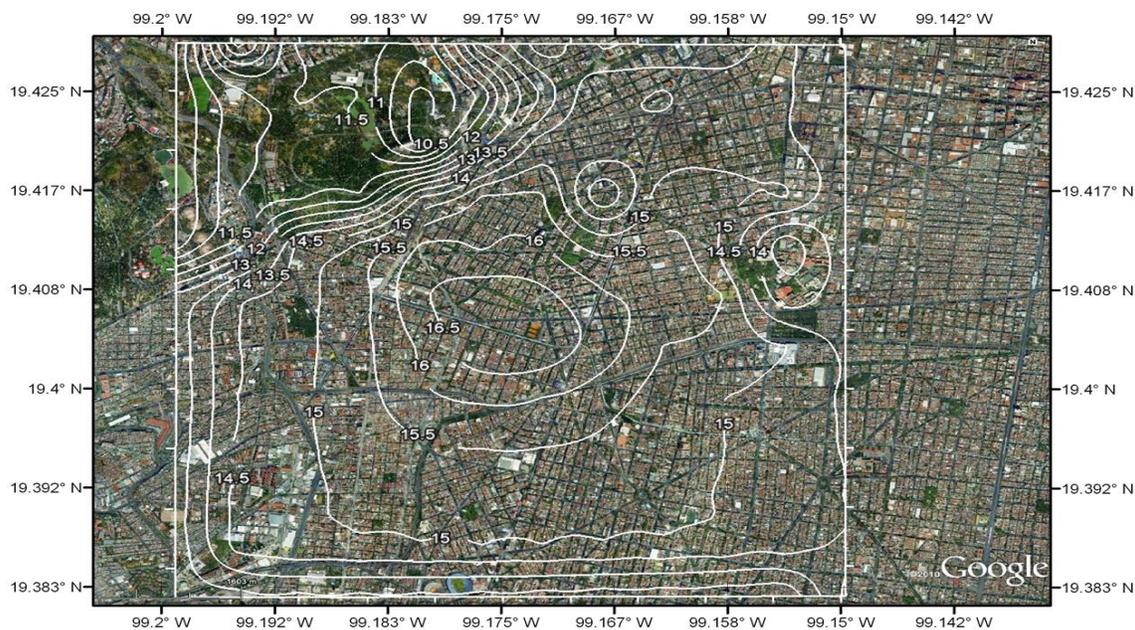
A partir de la modelación para el caso de azoteas verdes, se ha detectado que se producen efectos apreciables en el sitio SIMAT, cuando más del 5% (2.25 km²) de las azoteas convencionales del dominio D4 es sustituido con azoteas verdes.

En la figura 4.13 se muestra la ICU, empleando temperatura potencial virtual de la superficie del suelo y techos, referida a la presión de la Ciudad de México (777 mb). Esto a diferentes horas del día y para cada hora se muestra en la parte superior a las azoteas convencionales (AC) y en la inferior a las azoteas verdes (AV) cuando el 100% de la superficie del dominio D4 es sustituido por estas.

12/03/2006 06:00 LST

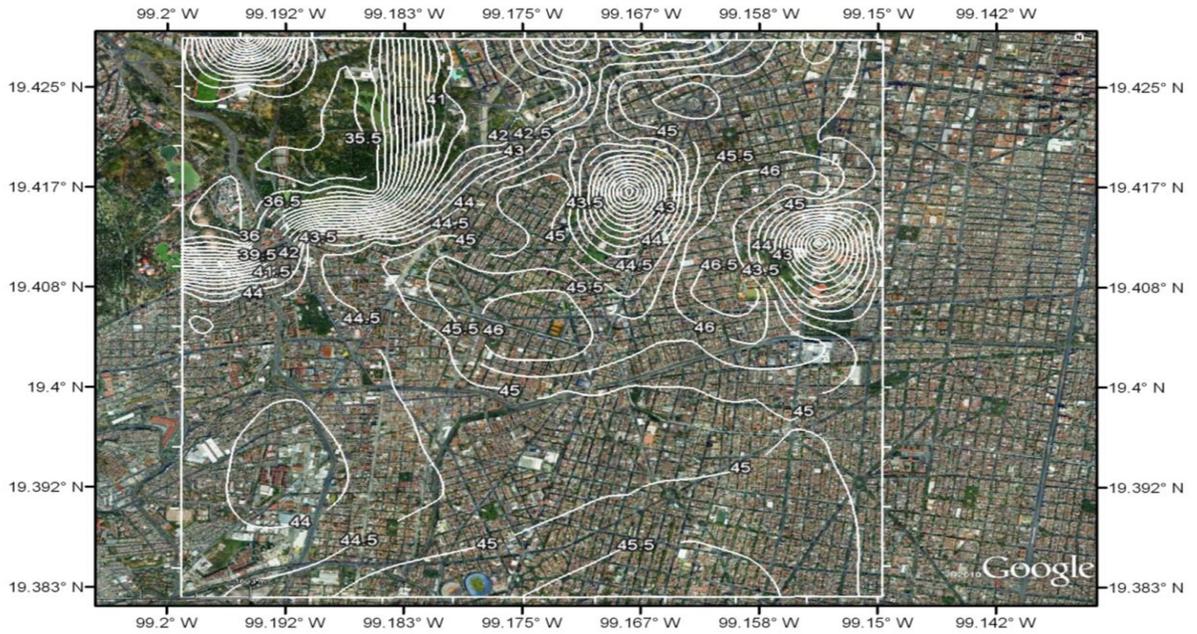


(a) AC

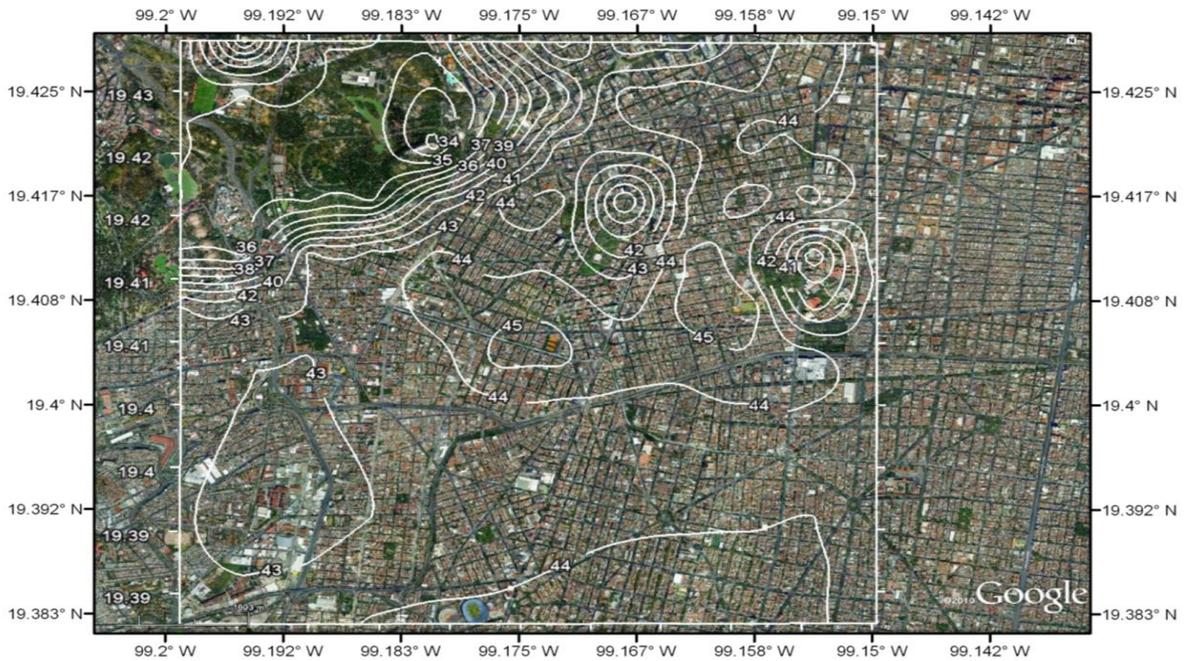


(b) AV

12/03/2006 14:00 LST

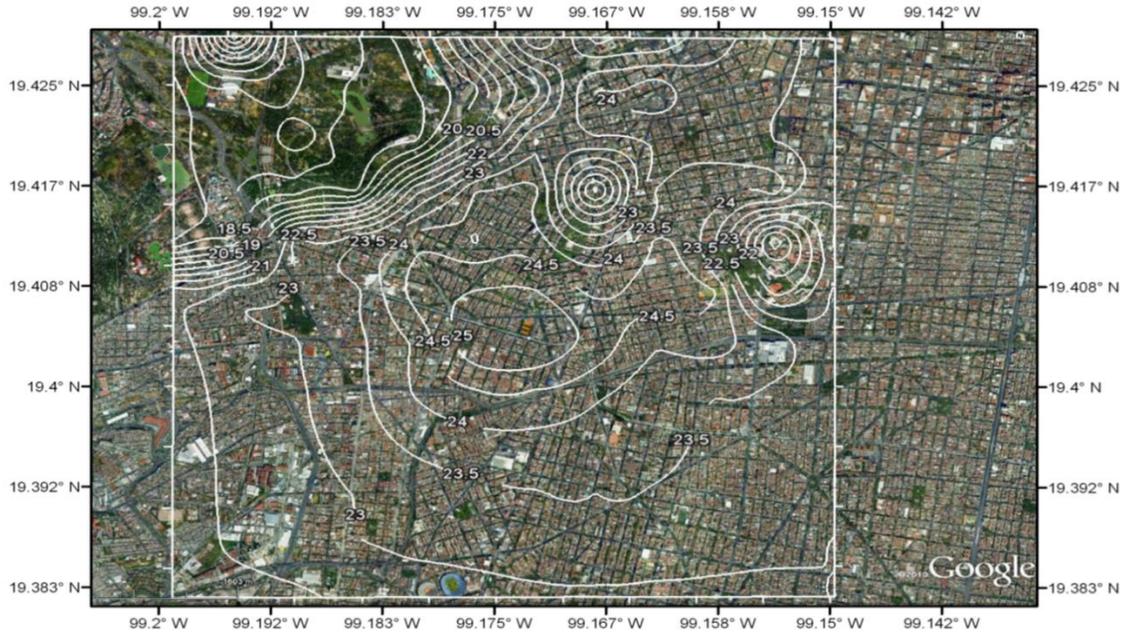


(d) AC

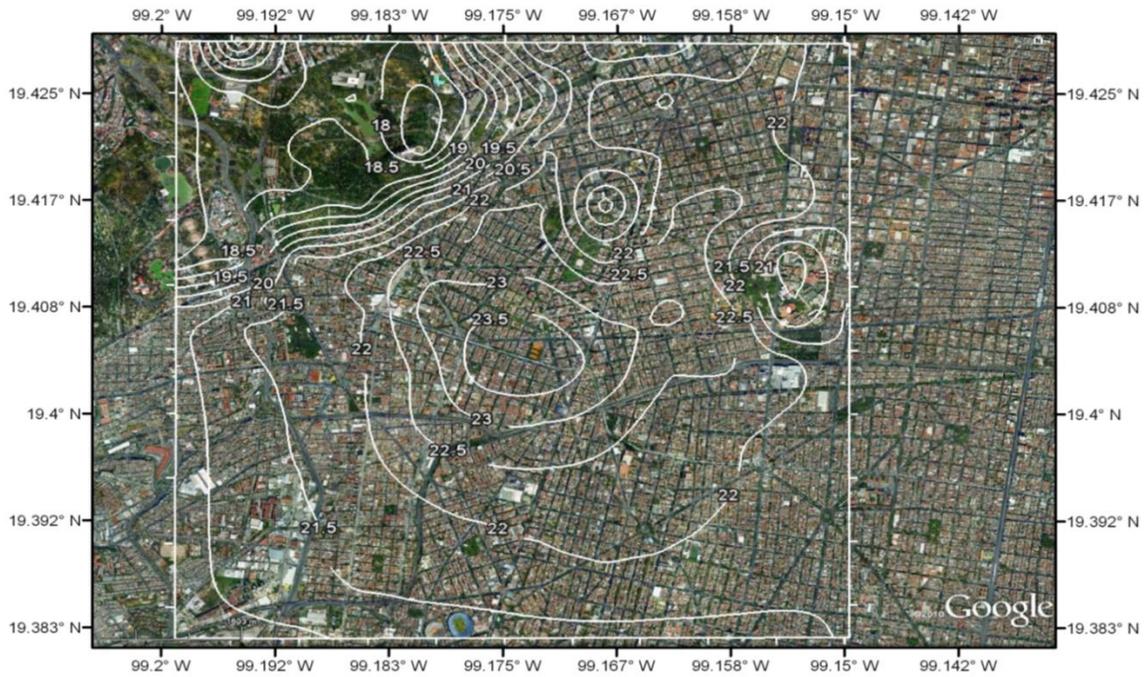


(c) AV

12/03/2006 21:00 LST

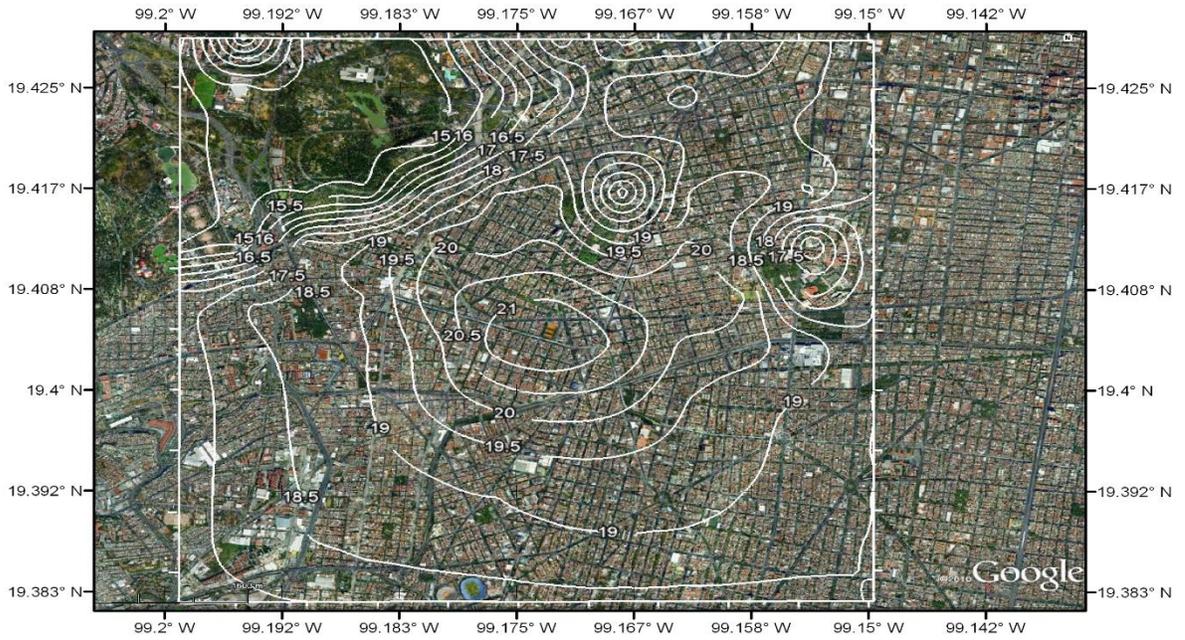


(e) AC

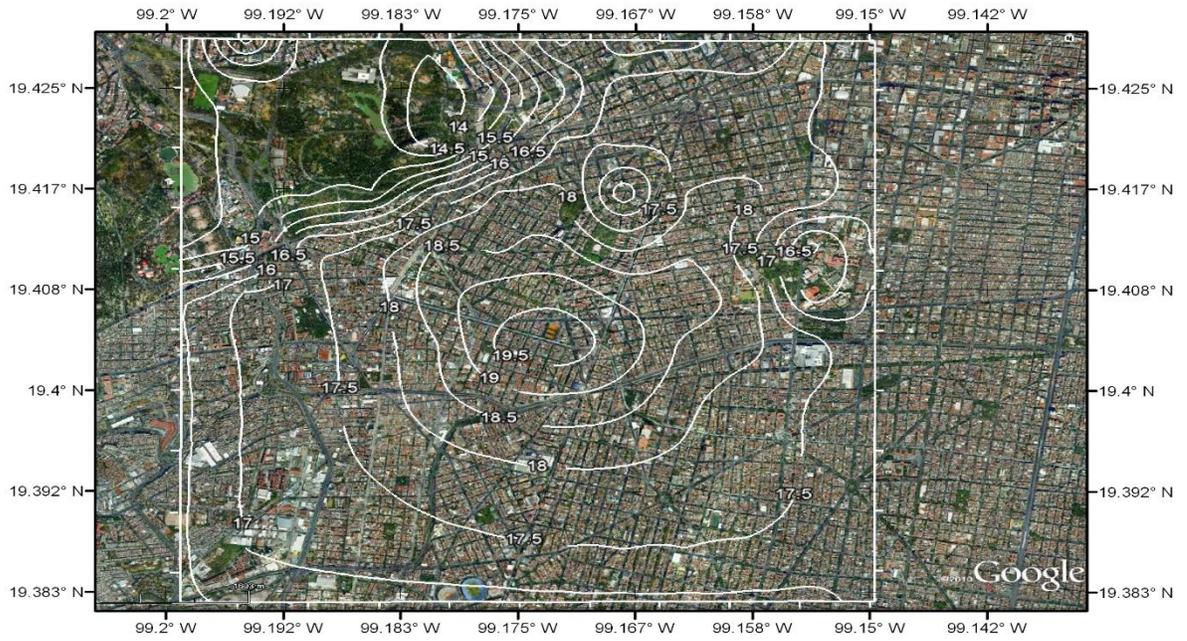


(f) AV

13/03/2006 00:00 LST



(g) AC



(h) AV

Figura 4.13 Evolución diaria de la ICU (temperatura de superficie) para AC y AV (100% área cubierta) del Dominio D4 para las horas locales: 6:00 (a, b), 14:00 (c, d), 21:00 (e, f) y 00:00 (g, h).

De la figura 4.13(b) a las 6:00 horas, hay una expansión de la superficie fría con una reducción de la temperatura desde 18° hasta 17°C debido a la presencia de AV. Para las 14:00 horas, la temperatura potencial virtual promedio de la superficie para el caso convencional (Figura 4.13 (c)) tiene un máximo de 45°C y mínima de 43°C cerca de las zonas verdes existentes, mientras que para el caso de las AV se encuentra un máximo de 44°C y mínima de 41°C en el mismo lugar (Figura 4.13 (d)). El enfriamiento debido a las AV es de aproximadamente 1 a 2 °C.

Para las 21:00 horas la diferencia de enfriamiento es de 2°C; la máxima temperatura para el caso convencional es de 23.5°C y 21.5°C para las AV, mientras que la mínima es de 21°C y 19°C respectivamente (Figura 4.13 (e), (f)).

Para la medianoche el enfriamiento en las AV es rápido en comparación con los convencionales, esto es debido al almacenamiento de calor y la emisividad de los materiales empleados en las zonas urbanas (Figura 4.13 (g) y (h)). El enfriamiento debido a las azoteas verdes es alrededor de 1°C.

4.7 Efecto en la calidad del aire.

Se empleó un modelo básico de caja para evaluar el efecto de los cambios meteorológicos por la introducción de azoteas verdes en la calidad del aire, similar a lo descrito por Seinfeld (1998). La concentración de un contaminante primario $C(t)$ es calculado a través de

$$C(t) = (V L M)^{-1} E(t), \quad (1)$$

Donde V es la intensidad del viento ($m s^{-1}$), L es el largo de la caja (m), M es la altura de mezcla (m) y E es la emisión ($g s^{-1}$). El diagrama del modelo de caja se muestra en la Figura 4.14.

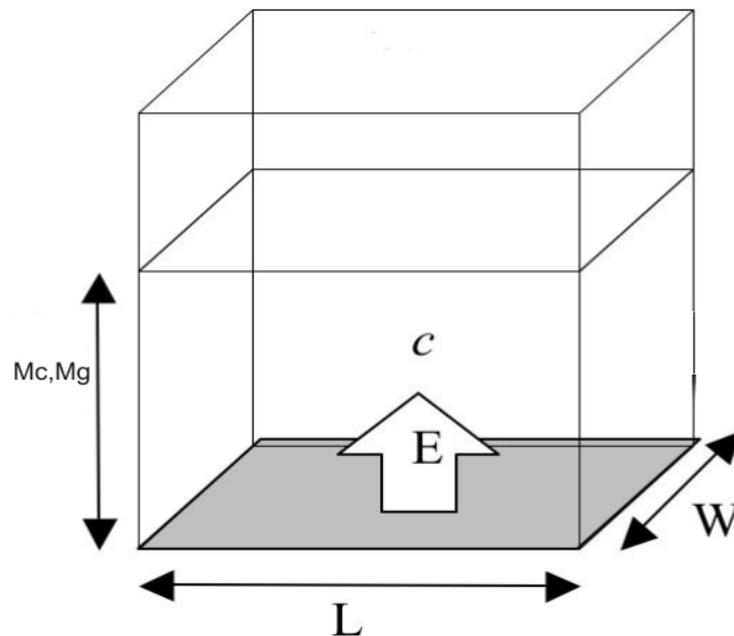


Figura 4.14 Modelo de caja básico

Usando la Eq. 1 y considerando la misma emisión, velocidad de viento V y largo L , la razón $R(t)$ de la concentración entre las azoteas verdes (C_g) y el azotea convencional (C_c), está dado por

$$R(t) = M_c / M_g(t), \quad (2)$$

donde M_c y M_g son las alturas de mezcla para azotea convencional y azotea verde respectivamente. Entonces los cambios en las concentraciones con el tiempo son inversamente proporcionales a la razón altura de capa de mezcla.

Usando mediciones locales de las concentraciones de los contaminantes y estimando $R(t)$ a partir de la modelación, se obtienen las concentraciones para cada caso. Esto se presenta en la figura 4.15, para el 12 de marzo del 2006.

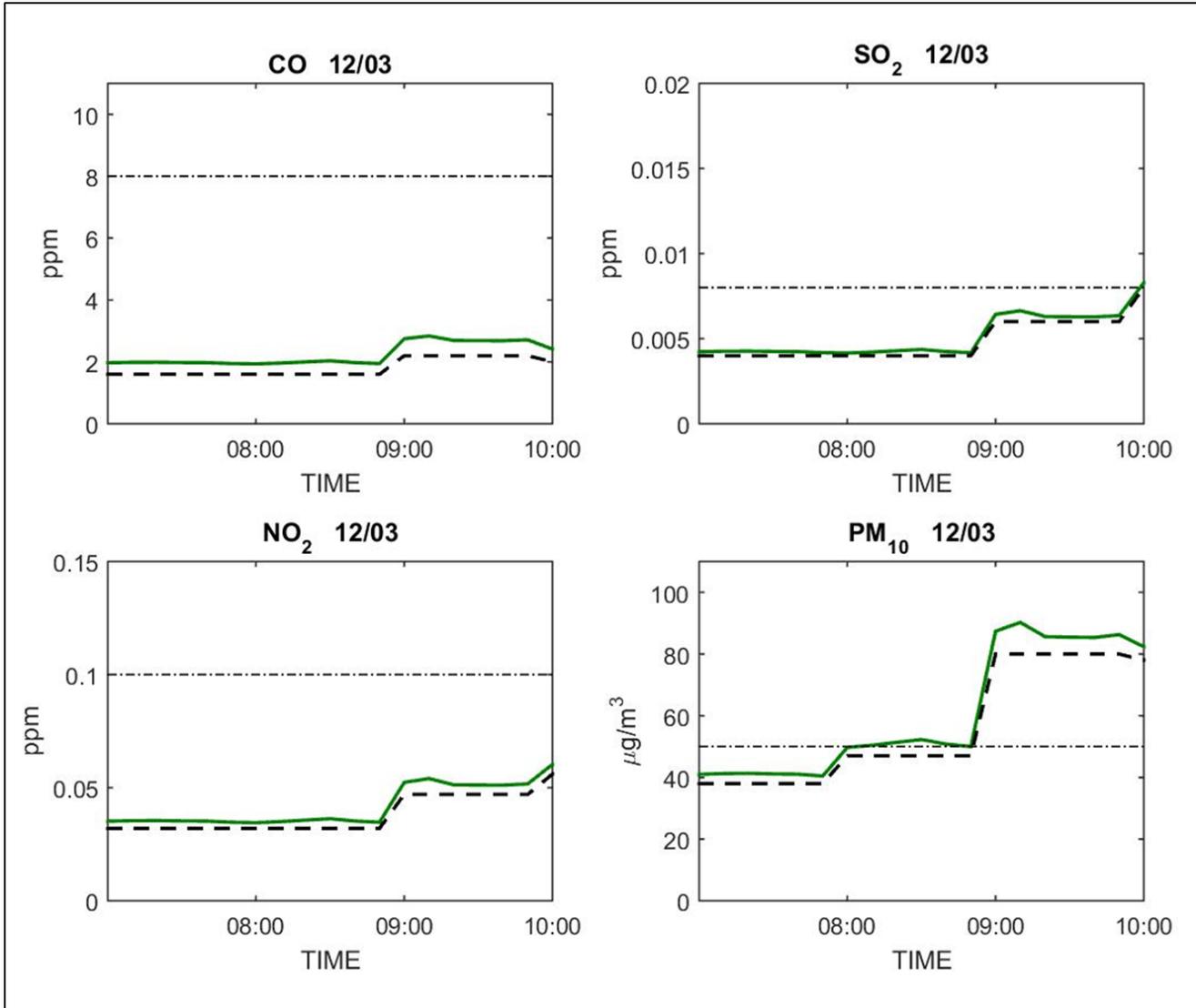


Figura 4.15 Concentración de los contaminantes para AV (línea sólida) y para AC (línea punteada), para el día 12 de Marzo.

Se observa que para las mismas emisiones y velocidades de viento, la presencia de azoteas verdes tiende a incrementar la concentración de los contaminantes entre las 8:00 y 10:00 horas, debido a la reducción de la altura de la capa de mezcla. Sin embargo, los niveles

de las concentraciones no excedieron las normas de salud Mexicanas. Una atención especial se enfocaría hacia las concentraciones de PM10, debido al incremento importante cercana a los niveles máximos permisibles.

En la figura 4.16 cuando las condiciones sinópticas prevalecen, las diferencias en las concentraciones son imperceptibles.

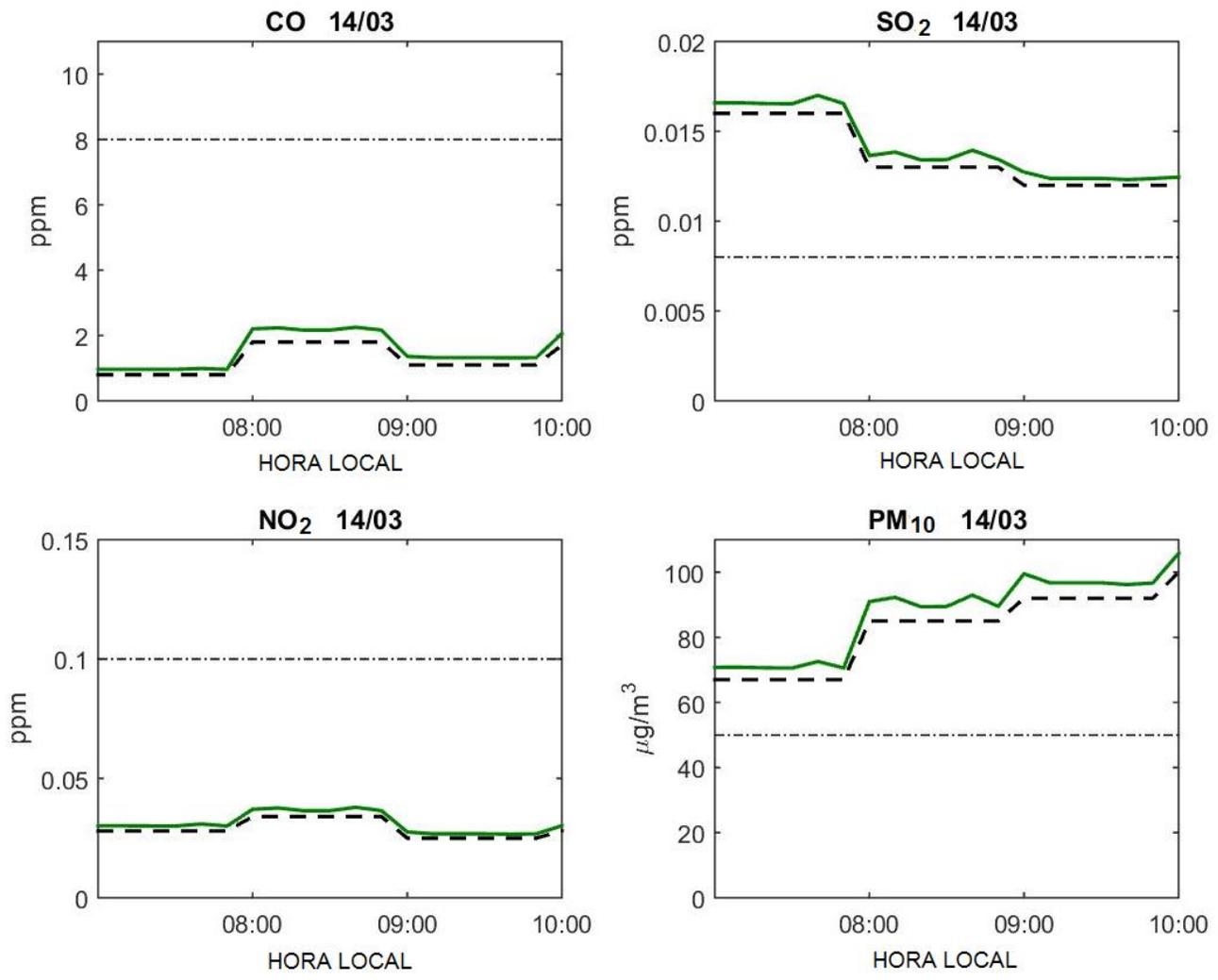


Figura 4.16 Concentración de los contaminantes para el caso verde (línea sólida) y caso convencional (línea punteada), para un día de la modelación, cuando las condiciones sinópticas prevalecen

Capítulo 5: Conclusiones

Por primera vez se evaluaron los efectos a la PBL en una zona densamente urbana debido a la introducción de los techos verdes, mediante el uso de una versión altamente urbanizada del modelo a mesoescala MM5 y configurando al modelo con datos meteorológicos medidos directamente a una azotea verde en las dos campañas realizadas. El nuevo modelo (uMM5) utiliza parametrizaciones físicas de la morfología urbana y se aplicó a la Ciudad de México con una resolución de malla de 0,5 km, para cuantificar su exactitud la modelación se llevó a cabo en una escala de tiempo de 10-15 minutos, y sus resultados se compararon con observaciones de campo de amplias campañas de medición existentes en la zona de estudio.

Los resultados mostraron que durante horas de la mañana (07:00-10:00 LST) la presencia de las azoteas verdes induce a reducciones importantes en la altura de capa de mezcla. Estas condiciones son resultado del metabolismo de las cactáceas, en la que su evapotranspiración nocturna humedece sus alrededores, que genera depósitos de humedad en el suelo y durante el día, su estoma se cierra, manteniendo su humedad. La humedad del suelo se libera por la mañana, cuando la radiación solar calienta la superficie provocando la evaporación de la humedad, con el consiguiente descenso de las temperaturas de la superficie del techo verde. Todos estos efectos fueron mayores en un día con condiciones sinópticas débiles (prevaleciendo las condiciones locales) que en un día con un fuerte forzamiento sinóptico.

Las concentraciones de los contaminantes primarios son proporcionales a la altura de capa de mezcla, un efecto de los techos verdes es la reducción de esta capa, hasta en un 8%

incrementando de igual forma las concentraciones. Después de las 1000 LST o cuando las condiciones sinópticas predominan, estas diferencias desaparecen.

Lo anterior, fue corroborado al evaluar las concentraciones usando un modelo de caja simple, aunque las azoteas verdes afectan a la altura de capa de mezcla incrementando las concentraciones, no sobrepasaron los límites máximos permisibles establecidas en las normas mexicanas, sin embargo la principal preocupación radica en las PM_{10} al no contar con una evaluación de la sedimentación de las partículas PM_{10} , se podrían sobrestimar estos valores.

El efecto de las azoteas verdes hacia la ICU desaparece conforme avanza las horas de la mañana, así que no hay enfriamiento atmosférico importante que está presente después de 1200 LST, que es cuando aumenta el flujo actínico y se inicia la fotoquímica. Un factor importante a considerar en el futuro son las emisiones biogénicas, que son precursores fotoquímicos, debido a la vegetación implementada en las azoteas verdes.

La reducción de la ICU es más pronunciada durante la noche, cuando hay enfriamiento superficial del suelo de hasta $3^{\circ} C$ en comparación con el caso convencional. Durante el día, la disminución es de $0,5$ a $2^{\circ} C$.

Los impactos positivos de los techos verdes, tales como la reducción térmica en el interior de los edificios, en el ahorro de energético, y los correspondientes por la adsorción y absorción de gases contaminantes y partículas por las plantas, también deben ser considerados en la

implementación de techos verdes. Por otro lado, las emisiones biogénicas pueden influir negativamente en la actividad fotoquímica.

Otro resultado interesante es la reducción térmica que generan los parques urbanos o cuerpos de aguas presentes en la zona de estudio, como es el caso del Bosque de Chapultepec con sus lagos, los parques España y México, así como el Cementerio Francés, que son áreas de vegetación que mitigan a las ICU, con esto se demuestra la importancia de las áreas verdes en una ciudad, para encaminar las políticas ambientales en la preservación, restauración o implementación de áreas verdes en las ciudades Mexicanas.

El modelo uMM5 demuestra que es una herramienta versátil, que se puede utilizar para evaluar los efectos en la meteorología por el crecimiento urbano, lo cual coadyuvaría en las políticas sobre ordenamiento territorial de diferentes ciudades en México.

Los resultados encontrados en este documento pueden variar para otras ciudades debido a la orografía, cuerpos de agua, ubicación geográfica o por los diferentes materiales de construcción presentes.

Bibliografía.

- Ackerman, T. P., 1977. "A model of the effect of aerosols on urban climate with particular attention to the Los Angeles Basin", *Journal Atmospheric Science*.
- Bornstein, R. D., 1968. "Observations of the Urban Heat Island Effect in New York City," *J. Appl. Meteorol.*, 7(4), pp. 575–582.
- Bornstein, R., 1972. "Two dimensional non-steady numerical simulations of nighttime flow of a stable planetary boundary layer over a rough warm city". Preprints, Conference on Urban Environment, American Meteorology Society.
- Bornstein, R., 1975. "The 2-D URBMET urban boundary layer model", *Journal Appl. Meteorology*.
- Bornstein, R., 1986. "Application of linked three-dimensional PBL and dispersion models to NYC", *Air Pollution Modeling and its Applications*.
- Bornstein, R., 1993. "Simulation of urban barrier effects on polluted urban boundary layers using the three dimensional URBMET/TVM model with urban topography", In *Air Pollution*, Elsevier Science, NYC.
- Bornstein, R., Balmori, R. T. F., Taha, H., Byun, D., Cheng, B., Nielsen-Gammon, J., y Smith, P., 2006. "Modeling the effects of land-use/land-cover modifications on the urban heat island phenomena in Houston, Texas". Final report to David Hitchcock Houston Advanced Research Center.
- Bossert, J. E., 1996. "An investigation of flow regimes affecting the México City region", *American Meteorological Society*.

-
- Burian, S., Stetson, S. W., Han, W. S., Ching, J. K. S., y Byun, D. W., 2004a. "High resolution dataset of urban canopy parameters for Houston, Texas", Fifth Conference on Urban Environment. American Meteorological Society.
 - Burian, S., Brown, M.J., Ching, J. K. S., Cheuk, M. L., Yuan, M., Han, W.S., y Mckinnon, A. T., 2004b. "Urban morphological analysis for mesoscale meteorological and dispersion modeling applications: current issues", Fifth Conference on Urban Environment. American Meteorological Society.
 - Cruz Xochitl, et al., 1992. "Development and Testing of an Air Quality Model for Mexico City", IMP-Los Alamos.
 - De Foy, B., 2003. "Land surface comparison for complex terrain flow", Atmospheric and planetary science.
 - Delage, Y., 1970. "Numerical studies of heat island circulations", Boundary Layer Meteorology.
 - Díaz, E., 2005. "Modelación de partículas PM10 emitidas por erosión eólica en el valle de México", Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, 84pp.
 - Dudhia et al., 2005. "PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3", NCAR.
 - Dupont, S., Burian, S.J., and Ching, J., 2003. "Application of the urbanized version of MM5 for Houston". CMAS Workshop, October 27-29, 2003, Research Triangle Park, North Carolina, USA.
 - Dupont, S., Otte, T., y Ching, J., 2004. "Simulation of meteorological fields within and above urban and rural canopies with a mesoscale model (MM5), EPA.

-
- Fast, J.D., 1998. "Meteorological factors associated with inhomogeneous ozone concentrations within the Mexico City basin", *Journal of geophysical research atmospherics*.
 - Fast J. D., 2005. "Evaluation of the boundary layer characteristics and pollutants in Mexico city predicted by WRF". WRF/MM5 user's workshop.
 - García, A., 2002. "Evaluación de Escenarios Utilizando el Modelo Regional de Calidad del Aire Multiscale Climate Chemistry Model". Tesis de Doctorado. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. 111 pp.
 - García, A., 2006. "Sistema pronóstico de calidad del aire para el Valle de México". *Memorias del XLI congreso Mexicano de Química*, pp 49-52.
 - Gutierrez E., González J.E., Arend M., Bornstein R., y Martilli A., 2015. "On the anthropogenic heat fluxes using an air conditioning evaporative cooling parameterization for mesoscale urban canopy models". *ASME. J. of Solar Energy Engineering*, 137(5):051005-051005-13. doi:10.1115/1.4030854
 - Hann, S., Britter, R., 2003. "Flow and dispersion in urban areas", University California.
 - Hafner, J. y Kidder, S., 1999. "Urban heat island modelling in conjunction with satellite derived surface/soil parameters". *Journal appl. Meteorology*.
 - Hitchcock, D. et al, 2005. "Evaluating meteorological impacts of urban forest and albedo changes in the Houston-Galveston region: A fine resolution (UCP) meso-urban modeling study of the August-September 2000 episode", Houston Advanced Research Center.
 - Jáuregui, E., 2005. "Possible impact of urbanization on the thermal climate of some large cities in México". *Atmósfera*, p. 247.

-
- Jazcilevich, A., García, A. y Ruíz, G., 2002. "A modeling study of air pollution modulation through land-use change in the Valley of Mexico", *Atmospheric Environment*, Volume 36, Issue 14, pp 2297-2307.
 - Jazcilevich, A., García, A. y Caetano, E., 2005a. "Locally induced surface air confluence by complex terrain and its effects on air pollution in the valley of Mexico", *Atmospheric Environment*, Volume 39, Issue 30, pp 5481-5489.
 - Jazcilevich, A., García, A., Caetano E., 2005b. "Meteorology and pollution modeling in the Valley of Mexico". Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.
 - Magaña, V., Pérez, J.L., 1998. "Usos de un modelo de mesoescala en el estudio de la dinámica atmosférica regional de México". GEO UNAM.
 - Martilli, A., 2001. "Modelización de los efectos urbanos en modelos meteorológicos". CIEMAT.
 - Martilli, A., 2002. "An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models". *Boundary-Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers.
 - Michel, J. Brown, 2000. "Energy and environmental analysis (TSA-4)", *Mesoscale Atmospheric Dispersion*, Capítulo 5.
 - Molina, L., 2002. "Air quality in México megacity: an integrated assessment", alliance for global sustainability bookseries.
 - Myrup, L., 1969. "A numerical model of the UHI", *Journal Appl. Meteorology*.
 - Oke, T.R., 1987. "Boundary Layer Climates". London, UK. Routledge.

-
- Oke, T. R., Spronken-Smith, R. A., J_auregui, E., y Grimmond, C. S., 1999, "The Energy Balance of Central Mexico City During the Dry Season," *Atmos. Environ.*, 33(24), pp. 3919–3930.
 - Pielke, R., 1974. "A three-dimensional numerical model of the sea breeze over South Florida", *Mon. Wea. Rev.*
 - Rosenzweig, C., Solecki, W. D., Cox, J., Hodges, S., Parshall, L., Lynn, B., y Watson, M., 2009. "Mitigating New York City's heat island: Integrating stakeholder perspectives and scientific evaluation". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(9), 1297-1312.
 - Seinfeld, John H., y Spyros N. Pandis., 1998. "Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change". Wiley-Interscience, Isbn 0-471-17815-2, pp.1197-1200
 - Shaw, W. J., Pekour, M. S., Coulter, R. L., Martin, T. J., y Walters, J. T., 2007. "The daytime mixing layer observed by radiosonde, profiler, and lidar during MILAGRO". *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 7(5), 15025-15065.
 - SMA-GDF, 2007. "La calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Mexico 1986-2006", SMA-GDF.
 - SMA-GDF, 2006. "Informe climatológico ambiental del Valle de México 2006". Disponible en http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe_anual_climatologico_2006/#p=1.

-
- Taha, H., 1997. "Modeling the impacts of large scale albedo changes on ozone air quality in the south coast air basin", Atmospheric Environment.
 - Taha, H., 1999. "Modifying a mesoscale meteorological model to better incorporate urban heat storage: bulk parameterisation approach", Journal Appl. Meteorology.
 - Taha, H., Bornstein, R. D., Balmori, R., y Noble, J., 2005. "Urban heat island alterations from urban-forest and albedo changes in Houston-Galveston region: fine-resolution urbanized MM5 modeling of an August-September 2000 O3 episode". Tech. Rep. Houston Advanced Research Center, San Jose, CA.
 - Taha, H., 2008. "Episodic performance and sensitivity of the urbanized MM5 (uMM5) to perturbations in surface properties in Houston Texas". Boundary-Layer Meteorology, 127(2), 193-218.
 - Tapper, N., 1981. "Modeling the winter urban heat island over Christchurch, New Zealand", Journal Appl. Meteorology.
 - Thunis, P., y Schayes, G., 1993. "Simulation of urban barrier effects on polluted urban boundary layers using three-dimensional URBMET/TVM model with urban topography", Computational Mechanics Publications.
 - Vazquez-Morales, W., 2007. "Implementación de un modelo meteorológico de alta resolución en una zona del Valle de México ", Tesis de Maestría, CCA-UNAM.
 - Velasco, E., Pressley, S., Allwine, e., Westberg, H. y Lamb, B., 2005a. "Measurements of CO2 fluxes from the Mexico City urban landscape", Atmospheric Environment.

-
- Velasco, E., Lamb, B., Pressley, S., Allwine, E., Westberg, H., Jobson B. T., Alexander, M., Prazeller, P., Molina, L. T., y M. J. Molina., 2005b. "Flux measurements of volatile organic compounds from an urban landscape", *Geophysical Research Letters*.
 - Vukovich, F. M., 1971. "Theoretical analysis of the effect of mean wind and stability on a heat is-land circulation characteristic of an urban complex", *Mon. Wea. Rev.*
 - Vukovich, F. M., 1973. "A study of the atmospheric response due to a diurnal heating function characteristic of an urban complex", *Mon. Wea. Rev.*
 - Vukovich, F. M., 1975. "Study of the effect of wind shear on a heat island circulation characteris-tic of an urban complex", *Mon. Wea. Rev.*
 - Vukovich, F., J. Dunn, y B. Crissman, 1976. "A theoretical study of the St. Louis heat island: the wind and temperature distribution", *Journal Appl. Meteorology*.
 - Willmott, C. J.: 1981, "On the validation of models". *Phys. Geography*.
 - Wikipedia, 2007. "México D.F.", disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Mexico_map,_MX-DIF.svg.

Portada del artículo obtenido de los resultados del trabajo de investigación doctoral.

Williams Vázquez Morales¹

Centro de Ciencias de la Atmósfera,
Universidad Nacional Autónoma de México,
CDMX, 04510, México
e-mail: williams.vazquez@unicach.mx

Arón Jazcilevich

Centro de Ciencias de la Atmósfera,
Universidad Nacional Autónoma de México,
CDMX, 04510, México
e-mail: jazcilev@unam.mx

Agustín García Reynoso

Centro de Ciencias de la Atmósfera,
Universidad Nacional Autónoma de México,
CDMX, 04510, México
e-mail: agustin@atmosfera.unam.mx

Ernesto Caetano

Centro de Ciencias de la Atmósfera,
Universidad Nacional Autónoma de México,
CDMX, 04510, México
e-mail: caetano@unam.mx

Gabriela Gómez

Instituto de Geografía,
Universidad Nacional Autónoma de México,
CDMX, 04510, México
e-mail: gabyg@igg.unam.mx

Robert D. Bornstein

Department of Meteorology and Climatology,
San Jose State University,
One Washington Square,
San Jose, CA 95192-0104
e-mail: pblmodel@hotmail.com

Influence of Green Roofs on Early Morning Mixing Layer Depths in Mexico City

An urbanized version of MM5 (uMM5) was used at a 500 m horizontal grid-resolution to study effects on morning urban mixing depths and near roof-top stability from use of extensive green roofs in Mexico City, which is characterized by large Bowen ratios and high building storages. The model uses urban-morphology data, while building hydro-thermal uMM5 input parameters were obtained from measurements over green and nearby conventional roofs. Evaluation of uMM5 predicted values against rooftop and planetary boundary layer (PBL) observations from extensive field measurement campaigns showed that the model performed reasonably well. Additional simulations were carried assuming that the roofs in entire urban neighborhoods were greened. Predicted mixing depths from these simulations, along with observed air pollution concentrations, were then used in a simple box model to evaluate potential green roof impacts on concentration. Results showed that green roofs produced an early morning (7–10 LST) cooling of up to 1.2 °C at rooftop levels, which reduced mixing depths during that period. Effects were greater on a day with weak synoptic forcing than on one 48 h later with strong synoptic forcing. The mixing-depth decreases produced increased box-model pollutant concentrations. While the green roofs did not elevate the observed concentrations of CO, SO₂, and NO₂ above World Health Organization (WHO) health standards, they did increase PM₁₀ values (which were already above its standard) by as much as 8% from 7 to 9 LST, when local populations are normally exposed to peak concentrations. This study has applications in the analyses of building energy efficiency. [DOI: 10.1115/1.4034807]

1 Introduction

Green roofs have been proposed as an energy saving measure in buildings, as they providing a passive technique to cool building rooftops by reducing heat transfer and enhancing solar reflectivity [1–4]. The work of Gutierrez et al. [5] showed that green roofs produce both positive and negative effects, e.g., positive effects include reduced energy use for cooling. Negative effects, however, include cooling effects at rooftop level, which alters local atmospheric stability conditions by lowering mixing heights [6], which produces changes in atmospheric mixing and pollutant dispersion [7], increasing concentrations below roof-top height. It is thus necessary to estimate the magnitude of such changes to improve our knowledge on the roles played by green roofs in altering urban ecosystems and meteorology, which in turn will provide information for cost benefit studies of green roofs as a cooling energy-use reduction measure.

To study these effects, it is thus necessary to use time scales in the order of 10–30 min, which allows incorporation of soil and

vegetative evapotranspiration changes that take place especially after sunrise. A suitable meteorological model capable of using appropriate parameterizations to operate at short time and space scales is thus necessary, e.g., the urbanized version of MM5 (known as uMM5) has been used in past studies. It contains PBL schemes modified to use both the advanced urban canyon energy balance model of Dupont et al. [8], called the Drag Approach Soil Model 2 Urban (DA-SM2-U), and the advanced urban PBL parameterizations of Martilli et al. [9]. This latter scheme transmits dynamic, thermodynamic, and turbulent effects from urban canopy elements into the PBL, via three (i.e., for roofs, building walls, and streets) new source terms in each prognostic PBL conservation equation.

These two modeling advances produce a more accurate and higher resolution urban meteorological model, e.g., successfully applied to Philadelphia by Hitchcock [10] and to Houston by Taha [11–13]. These neighborhood scale applications, i.e., with 500 m horizontal grid resolutions, produced more accurate simulated meteorological fields within and above the urban canopy layer. Another application of uMM5 in Tehran also showed better correlations with observations, as compared with results from the standard MM5 [14].

While previous urban climate modeling studies have dealt with the effects of green roofs on urban heat island (UHI) intensity, climate change adaptation [1,2,15], or health issues [16], the phenomena studied in these works involved time scales of hours,

¹Corresponding author.

Contributed by the Solar Energy Division of ASME for publication in the JOURNAL OF SOLAR ENERGY ENGINEERING: INCLUDING WIND ENERGY AND BUILDING ENERGY CONSERVATION. Manuscript received January 12, 2016; final manuscript received September 15, 2016; published online October 13, 2016. Assoc. Editor: Jorge E. Gonzalez.