

01060



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**INFLUENCIA DEL USO DEL SUELO EN LAS  
MEDICIONES DE BALANCE ENERGÉTICO  
ATMOSFÉRICO EN BARCELONA, ESPAÑA, Y  
CIUDAD DE MÉXICO**

**T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
MAESTRA EN GEOGRAFÍA**

**P R E S E N T A :**

**ELDA LUYANDO LÓPEZ**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. ERNESTO JÁUREGUI OSTOS**

**CODIRECTOR: DR. ADALBERTO TEJEDA MARTÍNEZ**

**MÉXICO, D.F.**

**2004**

A blue ink stamp with a decorative border. The text inside the stamp reads 'POSGRADO EN GEOGRAFÍA' and 'COORDINACIÓN' below it.

**POSGRADO EN GEOGRAFÍA  
COORDINACIÓN**



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.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

*A Alejandro*

*por haber llegado, Joan.*

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Elda Lujando

López

FECHA: 11 mayo 2004

FIRMA: F. Lujando

*Agradezco al Dr. Ernesto Jáuregui el apoyo y tiempo dedicados a este trabajo y a todos los años de convivencia académica.*

*Al Dr. Adalberto Tejeda por la amistad, el impulso, la paciencia y acertada dirección.*

*A los miembros del sínodo: Dra. Ma. del Carmen Moreno, Dra. Rosalía Vidal, Dra. Cecilia Conde, por su interés y buenos consejos.*

*A Fernando García, por la confianza y la ayuda incondicional e invaluable.*

*También gracias, claro, a Mario Casasola por cargar con todo el trabajo que no hice para dedicarme a este. A Yojana Nava por compartir sus conocimientos. A Guillermo Montero por su generosa ayuda.*

*A todos aquellos que directa o indirectamente se relacionan con estos resultados.*

*Reconocimiento.*

*A mis padres y hermanos.*

## INDICE

<b>Introducción</b> . . . . .	1
<b>1. Evolución urbana de la ciudad de Barcelona, España y de la Ciudad de México</b> . . . . .	10
1.1 Evolución Urbana de Barcelona . . . . .	10
1.2 Evolución Urbana de la Ciudad de México . . . . .	13
<b>2. El clima en las ciudades</b> . . . . .	17
2.1 Los lugares donde se llevaron a cabo las mediciones de balance energético . . . . .	19
2.1.1 Barcelona . . . . .	19
2.1.2 Ciudad de México. . . . .	22
<b>3. El balance energético atmosférico en ambientes urbanos</b> . . . . .	25
3.1 Métodos de evaluación del balance energético . . . . .	27
3.2 Instrumental empleado en las campañas de Barcelona y Ciudad de México . . . . .	27
3.3 Antecedentes de estudios climáticos de la ciudad de Barcelona y de estudios climáticos y de balance energético en la Ciudad de México. . . . .	29
3.3.1 Barcelona . . . . .	29
3.3.2 Ciudad de México . . . . .	30
3.4 Resultados de las campañas de balance energético atmosférico en Barcelona y Ciudad de México (Preparatoria 7) . . . . .	33
3.4.1 El balance energético atmosférico en Barcelona . . . . .	33
3.4.2 El balance energético atmosférico en la Ciudad de México: Escuela Preparatoria 7 . . . . .	35
<b>4. Las áreas fuente</b> . . . . .	37
4.1 Conceptos . . . . .	37
4.2 La escala de las observaciones y la escala de los flujos . . . . .	37
4.3 La cuestión de la homogeneidad y la heterogeneidad . . . . .	40
4.4 La capa límite urbana . . . . .	40
<b>5. Caracterización de las áreas fuente para Barcelona y Ciudad de México</b> . . . . .	42
5.1 Análisis del uso del suelo . . . . .	42
5.2 El uso del suelo en Barcelona y Ciudad de México para las campañas de balance energético. . . . .	43
5.2.1 Elementos a utilizar para caracterizar el uso del suelo en la campaña de mediciones en la Universidad de Barcelona, España. . . . .	43
5.2.2 Elementos a utilizar para caracterizar el uso de suelo en la campaña de mediciones en la Preparatoria 7, Ciudad de México.. . . .	45

5.3	Tipificación del uso del suelo alrededor de las estaciones del balance energético . . . . .	46
5.3.1	Tipificación del uso del suelo alrededor de la estación de balance energético en la Universidad de Barcelona . . . . .	47
5.3.2	Tipificación del uso del suelo alrededor de la estación Preparatoria 7. . . . .	50
5.4	El área fuente del radiómetro neto . . . . .	53
5.4.1	El radiómetro neto . . . . .	54
5.4.2	Estimación del área visual inferior del radiómetro neto. . . . .	55
5.4.3	Cálculo del área visual del radiómetro neto para Barcelona. . . . .	57
5.4.4	Cálculo del área visual del radiómetro neto para Preparatoria 7. . . . .	59
5.5	El área fuente del anemómetro sónico e higrómetro de kryptón. . . . .	61
5.5.1	El viento, elemento fundamental para el cálculo de las áreas fuente. . . . .	61
5.5.2	El modelo de Schmid para el cálculo de las áreas fuente. . . . .	65
5.5.3	Cálculo del área fuente del anemómetro sónico e higrómetro de kryptón para las campañas de mediciones. Universidad de Barcelona y Preparatoria 7 . . . . .	68
5.6	Discusión. . . . .	77
6.	<b>Conclusión y comentarios finales . . . . .</b>	<b>81</b>
	<b>Referencias . . . . .</b>	<b>84</b>

## INTRODUCCIÓN

Hablar del clima de un lugar es hablar de ciertas condiciones duraderas que caracterizan el estado medio de la atmósfera, y que pueden variar a lo largo del año y de forma muy semejante a lo largo de periodos más largos. Sin embargo, es de apreciación muy generalizada que nada hay tan variable como el clima, a lo largo de una estación y a través de los años.

El cambio climático global es un tema que ha ido ganando importancia, causando cada vez mayor controversia sobre la magnitud y alcance que el hombre ha tenido para modificar el medio. El inicio de este cambio se da principalmente en las ciudades: la cubierta natural pre-existente da paso de forma drástica a un nuevo uso del suelo que se adapta a las necesidades de una sociedad cada vez más demandante de recursos y de espacio.

Una ciudad, en sí, constituye ya un ecosistema que no siempre (quizá nunca) resulta en un equilibrio, donde hay un gran consumo de energía, una hidrología nueva, lo mismo que la población vegetal, la topografía, la calidad del aire y, por supuesto, un clima también nuevo y diferente.

Una ciudad, tomando en cuenta sus dimensiones, puede llegar a modificar las características de la estructura vertical de la atmósfera (Oke, 1988). La influencia de la superficie de la Tierra en la atmósfera se limita a los primeros 10 kilómetros en una capa llamada troposfera (Fig. I.1). Sobre periodos determinados de aproximadamente un día, esta influencia se restringe a una capa mucho más delgada conocida como “capa límite atmosférica”. Esta capa recibe gran parte de su calor y la totalidad del agua por procesos de turbulencia generados por el calentamiento de la superficie terrestre. La altura de esta capa límite no es constante y depende de la fuerza de mezclado producto del calentamiento de la superficie. Dentro de esta capa se encuentra la capa superficial turbulenta, la cual se caracteriza por tener turbulencia intensa en una menor escala en la vertical, generada por la rugosidad de la superficie y por los procesos de convección. De día esta capa se extiende hasta aproximadamente 50 metros y por la noche se reduce a unos cuantos metros de profundidad.

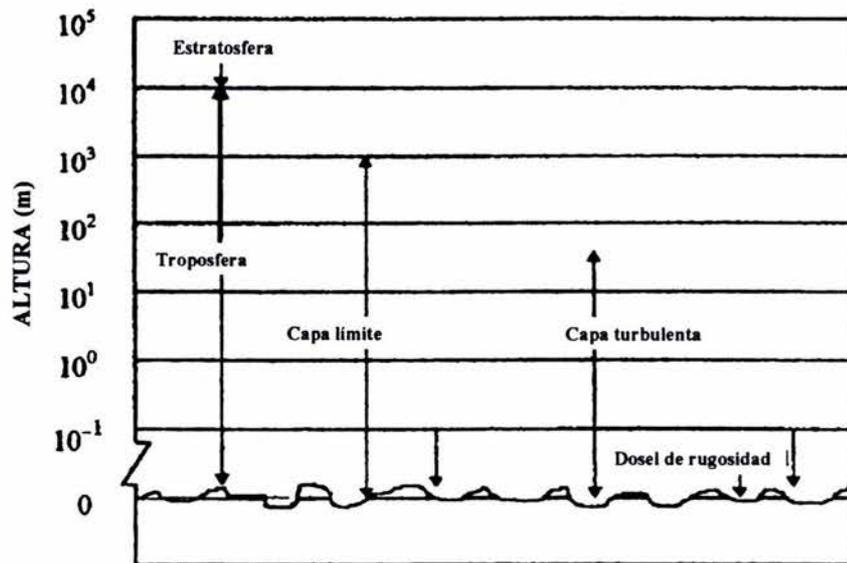


Figura I.1 Principales subcapas troposféricas. (Tejeda, 1996).

Debajo de esta capa se encuentran otras dos que dependen de la influencia de las características de la superficie, donde las profundidades dependen de los elementos de rugosidad superficiales. La primera es la capa de rugosidad, que se extiende de los techos superiores de los edificios (nivel medio de las azoteas de los edificios, conocido como dosel o palio urbano) hasta aproximadamente una a tres veces su altura y el espaciamiento entre ellos. Es en esta capa donde se han llevado a cabo los experimentos que interesan a este trabajo. La segunda capa se encuentra en contacto directo con la superficie y se reduce a un espesor de unos cuantos milímetros.

Los estudios del clima urbano y bioclima han tenido en los últimos años un desarrollo muy importante, como lo muestran las diversas conferencias internacionales abocadas a estos temas, siendo el principal interés el conocimiento del clima en las áreas urbanas, particularmente vulnerables a los cambios de las condiciones del medio ambiente. Además de los problemas existentes en los asentamientos urbanos no planeados, vulnerables por ello a los desastres naturales, se espera que en años venideros haya un incremento sustancial en la mortalidad resultado del estrés por calor en las ciudades (Obasi, 1999.) El ambiente bioclimático se ve modificado de la misma manera, causando situaciones de *comfort* o *incomfort* resultado de la variación de los elementos climáticos por el efecto urbano. Muestra

del desarrollo de estos estudios sobre el clima en las ciudades son los diferentes encuentros de especialistas en conferencias con temas innovadores con respecto al clima urbano, como serían, entre otros, las influencias antropogénicas, tales como la contaminación del aire, y el bioclima, que es una parte importante cuando se considera como fin último la adaptación del hombre con el medio que lo rodea. Existe todavía en la actualidad un desequilibrio en el conocimiento y aplicaciones del clima urbano en latitudes medias con respecto a los países de latitudes bajas (Oke, 1984). Esto es debido, principalmente, a que es en las zonas tropicales donde se tienen más carencias respecto a conocimientos técnicos y, seguramente, a la baja prioridad que estudios como éstos tiene en países no desarrollados, países casi todos que ocupan la zona tropical. La idea ha sido, entonces, evaluar métodos para transferir y extrapolar resultados de una ciudad a otra (Oke, 1984).

El clima en las ciudades, diferente al que se encuentra en los alrededores rurales, está directamente relacionado con la forma en que se disipa la energía proveniente del Sol, dando como resultado fenómenos tan característicos como la *isla de calor*: durante el día, los materiales en las ciudades se calientan de forma progresiva e incluso más lentamente que los suelos con vegetación o desnudos de las zonas rurales, pero durante la noche los materiales urbanos conservan durante más tiempo el calor ganado durante el día, mientras el campo se enfría a gran velocidad. Esto es, en las ciudades la superficie original se encuentra recubierta de materiales más densos, impermeables y con una capacidad y conductividad térmica mayores que las de la cubierta natural. La presencia de edificios y calles forman los *cañones urbanos*, dando a la ciudad un aspecto rugoso y discontinuo donde el calor acumulado en las superficies tiene mayor dificultad para disiparse. Además, esta presencia de edificios y construcciones diversas modifica el movimiento del aire en superficie, pues reduce su velocidad dificultando aún más esta pérdida de calor. La isla de calor se presenta en aire en calma y cielos despejados, condiciones que se producen generalmente durante la época invernal.

Este fenómeno tan estudiado en el mundo (y donde la Ciudad de México es un ejemplo a mencionar), tiene como fundamento la forma en que se presenta la ley de la conservación de la energía, es decir, en el balance energético (Tejeda, 1996), y nos conduce a tratar de explicar el papel que juega la repartición de la energía solar incidente en las superficies.

Para examinar el origen del calentamiento o la presencia de la burbuja de aire tibio se examinan aquí resultados de mediciones que ilustran la forma en que se reparte la energía incidente del sol en la complejidad del tejido urbano en las ciudades. El conocimiento del balance energético en un área urbana es fundamental para la climatología de las ciudades y se determina en el volumen comprendido en los elementos de la superficie del dosel (nivel medio de las azoteas, también conocido como palio urbano) así como el aire contenido entre los elementos del dosel y el suelo. Los flujos que se miden en dicho volumen son los observados (medidos) en la parte superior del volumen del dosel.

El balance energético consiste en la evaluación del presupuesto energético atmosférico que resulta del flujo de radiación solar incidente, menos la radiación reflejada y emitida por la superficie, y la porción de atmósfera por debajo del instrumento de medición, es decir, la radiación neta ( $Q^*$ ). Se llama radiación neta porque es la energía que queda disponible en el sistema suelo-atmósfera y sobre la cual ocurren los siguientes procesos: una parte es cedida por la superficie a la atmósfera como calor sensible turbulento ( $Q_h$ ), es decir, bajo la forma de remolinos que transportan calor; otra porción también es cedida del suelo a la atmósfera como calor latente de evaporación ( $Q_e$ ), y otra parte se queda como calor retenido en la masa de los materiales que constituyen el tejido urbano ( $Q_s$ ). La transferencia neta advectiva ( $\Delta Q_A$ ) se refiere a la advección horizontal de calor sensible y latente. En las atmósferas urbanas deben considerarse otros ingresos de energía al sistema: la radiación de origen terrestre que es absorbida por la capa de esmog más el calor de origen antropogénico ( $Q_r$ ), como sigue (Tejeda, 1996):

$$Q_r + Q^* = Q_h + Q_e + \Delta Q_s + \Delta Q_A$$

Todos los términos de esta ecuación son densidades de flujo y se miden en  $W/m^2$ , siendo los términos de la izquierda de la ecuación cantidades positivas (*inputs*) y los de la derecha negativos o de salida (*outputs*).  $Q_r$  y  $\Delta Q_s$  se modelan o estiman. En el caso de esta última, no existe en nuestro conocimiento una forma de medir en una ciudad el flujo neto de almacenamiento, por lo que usualmente se parametriza.

El efecto de esta geometría con bloques separados por cañones de calles (Fig. I.2) tiende a que el albedo decaiga en comparación con las superficies horizontales, pues la radiación

queda atrapada en el espacio que separa a las edificaciones. Además, los albedos de los materiales con que se construyen las ciudades en general son menores que los albedos de las superficies rurales.

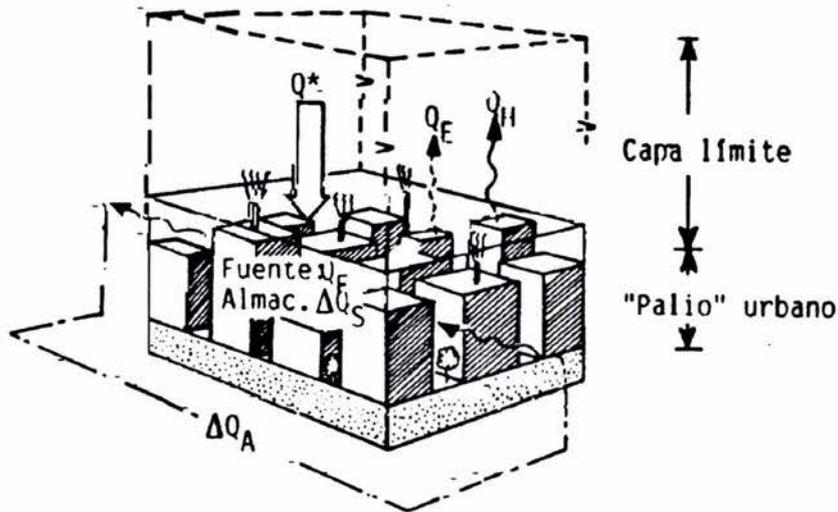


Figura I.2. Esquema de las componentes energéticas en un volumen edificado con aire. (Oke, 1987).

Estas componentes del balance energético muestran comportamientos diferentes según se trate de sitios rurales o urbanos, por la dependencia que existe con el tipo de uso de suelo. La Tabla I.1 muestra algunos valores correspondientes a campañas de mediciones realizadas en un sitio rural, uno suburbano y uno urbano, para ejemplificar los rangos de valores que se obtienen en el balance energético en periodo diurno.

Tabla I.1. Sumario estadístico de las componentes del balance energético en periodo diurno (i.e., cuando adquieren valores positivos) para campañas realizadas en México (Jáuregui y Luyando, 1999). Los valores están dados en  $W/m^2$ .

	Rural: Texcoco, 24-31 ago 1994	Suburbano: Pedregal, 28 jun - 3 jul 1995	Urbano: Palacio de Minería, 1-7 dic 1993
$Q^*$	392.6	169.8	267
$Q_h$	48.5	46.9	95.7
$Q_e$	320.3	118.8	11.1
$Q_s$	23.8	4.1	160.5

Como se puede observar en la tabla anterior, una ciudad con escasas áreas verdes (prácticamente nulas en el caso de los alrededores del Palacio de Minería en la ciudad de México) reflejan un balance energético con un calor latente de vaporización ( $Q_e$ ) muy bajo comparado con el área rural. A su vez, la disipación de calor sensible ( $Q_h$ ) es el doble que en las áreas rural y suburbana, es decir, se dedica una mayor parte de la energía disponible a calentar el aire. En el caso de la energía acumulada ( $Q_s$ ) la superficie densamente edificada y el carácter masivo de las construcciones difieren de la superficie del campo, donde el enfriamiento es más acelerado dada la baja conductividad de los materiales.

A partir de dos campañas de mediciones llevadas a cabo en Barcelona, España, y la Ciudad de México (ambas en lo que denominamos "centro de la ciudad") se explicará cómo es que los diversos usos de suelo están relacionados con la distribución del consumo de energía, es decir, cómo los usos de suelo muestran diferencias en la utilización de la energía que queda atrapada en el sistema suelo-atmósfera. A esta forma de presentarse la ley de la conservación de la energía se le conoce como *balance energético*.

El conocimiento de las características físicas de determinada superficie explicará en gran medida el comportamiento o la variación de las componentes del balance energético en la atmósfera, ya sea rural o urbana. A este conjunto de elementos de superficie que son muestreados por los sensores de las estaciones micrometeorológicas se les conoce como área fuente o área de influencia (Schmid y Oke , 1981). La escala para determinar o medir los flujos del balance energético es la de un barrio o porción de una ciudad. Sin embargo, estos elementos de superficie no son percibidos de la misma manera por los instrumentos, habiendo de usarse sensores visuales para los flujos radiativos (radiómetros) e instrumentos que midan flujos advectivos o convectivos (anemómetro sónico, termopares, higrómetro de kriptón, por ejemplo). Aquí es donde radica la importancia de conocer las áreas de influencia para ambos tipos de instrumentos: si el área de influencia que ve o detecta el radiómetro neto difiere en gran proporción del área de influencia que percibe el anemómetro sónico, entonces las mediciones del balance energético estarán referidas a áreas diferentes y, por lo tanto, el balance difícilmente será representativo del área que se pretende estudiar.

Los instrumentos de análisis usados para evaluar la importancia de la escala espacial de una medida son los modelos de área fuente (*source-area*), para medidas de flujos escalares. Se trata de una adaptación del modelo SAM (Source Area Model; Schmid, 1997a). Los límites de

las áreas de influencia los calculan Oke *et al* (1981) aplicando un modelo de dispersión gaussiano, pero en sentido inverso al cálculo del área fumigada por una fuente puntual de contaminantes. En el símil, la fuente sería el sensor y el área fumigada, el área de influencia. Las condiciones medidas por los instrumentos suponen una representación de los procesos en la superficie, o bien, de una porción específica de la superficie (Schmid, 1997b). Esto acarrea, por supuesto, discusiones acerca de la homogeneidad o heterogeneidad de los sitios de medición, aunque según Schmid (1997b) el área fuente de una medición separa efectivamente el área de influencia de la superficie dominante de las otras regiones del suelo, con un peso relativo tan bajo que dista mucho de ser importante. La presencia del viento es indispensable para que estas áreas de influencia puedan existir.

En el caso de los flujos radiativos (radiación neta  $Q^*$ ), el área que el instrumento ve se calcula considerando un ángulo de  $85^\circ$  con respecto a la superficie, partiendo de la altura en que se encuentre colocado el instrumento (en una torre) dando como resultado, en la superficie, un radio en la horizontal (alrededor del sitio del instrumento), el cual se ve modificado al tomar en cuenta la densidad y la altura de las edificaciones. El viento en el cálculo de esta área de influencia no se toma en cuenta; tan es así que el instrumento de medición, que es un sensor visual, incluso se protege con un cristal para evitar el enfriamiento.

Resumiendo lo anterior: las mediciones micrometeorológicas que se llevan a cabo en una torre (como es el caso de los dos sitios Barcelona y Ciudad de México para medir los flujos en el balance energético) muestran un área fuente que depende de la altura de los instrumentos y de la rugosidad de la superficie (para la radiación neta  $Q^*$ ) y son variables en el tiempo con la estabilidad, la turbulencia lateral y la dirección del viento (en el caso de los flujos turbulentos).

Además, en ulteriores capítulos se mostrará el trabajo realizado para la caracterización del uso del suelo en sectores de viento dominante a lo largo del día y de la noche en ausencia de fenómenos meteorológicos sinópticos. Se calculó de una manera sencilla cuánto aporta cada tipo de cubierta al sensor (en porcentaje), como una posible opción para conocer la influencia que puede tener determinado tipo de superficie sin la necesidad de aplicar modelos en computadora y el cálculo de los datos de entrada que esto significa.

Uno de los objetivos de conocer el balance energético de sitios como éstos y realizar el cálculo de sus áreas fuente, sería el de poder extrapolar los resultados a lugares con características semejantes de uso de suelo (en el caso de ciudades, rugosos y heterogéneos) y

en condiciones meteorológicas iguales. Pero, antes de medir, es importante definir la ubicación del sensor de manera que las áreas fuente de los distintos instrumentos se correspondan y las áreas que ven y perciben sean las mismas. Habiendo logrado esto, las mediciones de balance energético podrán considerarse como representativas del sitio.

La elección de ciudades como Barcelona y Ciudad de México interesa por sus diferencias y semejanzas. Moreno (1993) describe así a la ciudad de Barcelona: “un lugar que se localiza en la cuenca occidental mediterránea, en la región de Cataluña, España, no lejos de la estrecha abertura a las aguas atlánticas de Gibraltar, y su enclave concreto en la fachada oriental del compacto y amplio espacio de la Península Ibérica confieren una notable originalidad, no sólo climática, a su indudable carácter mediterráneo” (Fig. I.3). Se trata de un área metropolitana con una extensión de más de 50 mil hectáreas, con todas las características de una gran ciudad de larga historia y tradición. Su crecimiento ha originado lo que cualquier ciudad ocasiona al medio en que se desarrolla: lo ha modificado y, en términos de la distribución del consumo de energía que queda atrapada en el sistema suelo-atmósfera, puede parecerse más a una ciudad como México que a otras de latitudes medias.



**Figura I.3** Localización de la ciudad de Barcelona en España.

La Ciudad de México, de ubicación netamente continental (Fig. I.4), posee un clima tropical (por su régimen de lluvias) atemperado por la altitud en que se encuentra (2,240 m.s.n.m, aproximadamente; Jáuregui, 2000). El proceso acelerado de urbanización ha inducido modificaciones considerables en las características térmicas y pluviométricas en los últimos años. Campañas de balance energético atmosférico anteriores a la que ocupa este trabajo (Preparatoria 7), han mostrado cómo el centro de la ciudad tiende a presentar un comportamiento en la distribución del consumo de energía semejante al obtenido en ciudades de clima desértico, o bien como en zonas industriales de latitudes medias, donde la ausencia de vegetación y de fuentes de humedad son el paisaje predominante.



**Figura I.4** Ubicación de la Ciudad de México en la República Mexicana.

El objetivo principal de esta tesis es caracterizar el uso del suelo en los sitios de medición (Barcelona y Preparatoria 7, Cd. de México), ambos muestras de ambientes urbanos densos y heterogéneos, calculando las áreas fuente de los flujos radiativos (radiómetro neto) y turbulentos (anemómetro sónico-higrómetro de kryptón) por medio de métodos y modelos que se explican en los siguientes capítulos, de manera que se pueda conocer si las mediciones del balance energético son consistentes y representativas del tejido urbano en el entorno de las estaciones de medición.

## CAPÍTULO 1:

### EVOLUCIÓN URBANA DE LA CIUDAD DE BARCELONA (ESPAÑA) Y DE LA CIUDAD DE MÉXICO

#### **1.1 EVOLUCIÓN URBANA DE BARCELONA**

Vista desde la cima del Tibidabo, Barcelona aparece como una compleja red de calles en la planicie que se extiende entre los ríos Llobregat y Besós, la sierra Collserola y el mar. Barcelona se convirtió en la capital de Cataluña durante el siglo X de nuestra era, siendo testigo, desde sus orígenes ibéricos, de la presencia de los griegos y de los romanos, quienes fundaron la colonia del Barcino, hoy día el corazón del Barrio Gótico (Triangle Postals Eds.).

En su devenir histórico Barcelona ha pasado por diferentes etapas que, o bien se corresponden con períodos de crisis o de estancamiento, o bien con períodos de crecimiento y desarrollo. Durante mucho tiempo fue una ciudad pequeña, si bien su densidad de población (200 hab/km<sup>2</sup>) ya era elevada en el siglo XIV, considerándose quince veces superior a la media de la de Cataluña. Es entonces cuando se ordena la construcción de un nuevo cinturón de murallas que amplía el área de la ciudad y que se mantendrá durante quinientos años hasta su derribo en 1859, con motivo de la construcción del "Ensanche Cerdá". El plan del ingeniero Cerdá acometía la organización del ensanche de la ciudad, que iba a ocupar el llano que separaba el antiguo núcleo central de los pueblos de la periferia, donde se había ido localizando la población, además de las nuevas industrias que no tenían cabida en Barcelona.

Ya en los inicios del siglo XX, la construcción de obras públicas y de grandes infraestructuras como el metro, entre otras, atrajo una gran cantidad de mano de obra procedente no sólo del resto de Cataluña, sino también de toda España. En 1929, la ciudad supera el millón de habitantes. En 1950 Barcelona tenía 1,280,179 habitantes y en 1970 llegó a tener 1,745,142, hasta que en los años 80 se produjo un freno claro a este crecimiento demográfico (Moreno, 1993). El área metropolitana de Barcelona constituye una de las áreas de gran concentración de población en el mundo, siendo los más habitados la ciudad de Barcelona y algunos municipios limítrofes. El municipio barcelonés cuenta con 1,527,190 habitantes (en 2001) y su densidad es de 15,127 hab/km<sup>2</sup> (<http://www.bcn.es/urbanisme>).

Las características morfológicas más destacadas de la ciudad de Barcelona se resumen en el predominio de la construcción vertical de edificios plurifamiliares de seis a diez pisos y el elevado grado de ocupación del suelo urbano. Esto es, la ciudad de Barcelona constituye principalmente un conjunto denso y moderadamente alto. Sin embargo, existen diferencias entre los distintos sectores o barrios que conviene reseñar.

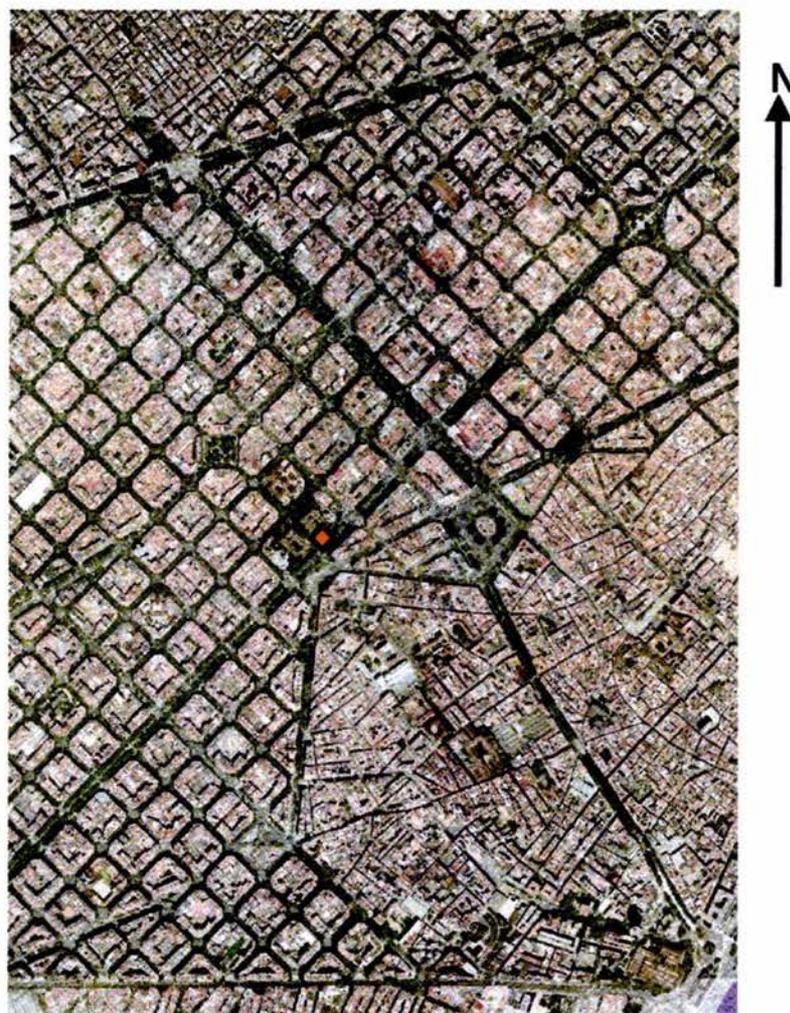
El sector conocido con el nombre del Ensanche de la ciudad constituye una de las imágenes urbanas más típicas de Barcelona (Figura 1.1). Este gran conjunto ortogonal ocupa 7.47 km<sup>2</sup> y se caracteriza por sus manzanas cerradas de cien metros de lado, con sus esquinas cortadas en chaflanes de veinte metros y separadas por calles que se cruzan perpendicularmente. En él se distinguen dos barrios diferenciados: uno, el Ensanche Derecho, que se localiza al noreste del eje de la calle Balmes y se caracteriza por la arquitectura modernista de principios del siglo XX de muchos de sus edificios; el otro, el Ensanche Izquierdo, situado al suroeste de la calle Balmes, es de construcción más modesta y reciente. En la actualidad, ambos barrios se han revalorizado mucho como área residencial, poseyendo también el mayor número de establecimientos comerciales y de servicios y las densidades más altas de establecimientos de este tipo en la ciudad (Moreno, 1993).



Fig. 1.1 Vista del Ensanche, Barcelona. (Fuente: Triangle Postals Eds.).

El distrito de la Ciudad Vieja incluye todo el casco antiguo de la ciudad, con los característicos Barrios Gótico y de la Ribera, el Raval y la Barceloneta (Figura 1.2). El número de establecimientos comerciales es elevado también. Los edificios en este distrito son antiguos, de altitud modesta (4 a 6 pisos) y con unas viviendas muy pequeñas.

Barcelona es una ciudad que ha incrementado en los últimos años el espacio destinado a áreas verdes. En el censo de 1981 las cifras mostraban una superficie destinada a la vegetación en la ciudad de 6,677,501 m<sup>2</sup>, lo que suponía tan sólo el 6.7 % de la superficie total del municipio (Moreno, 1993). En el año 2001, la superficie se había incrementado a 10,066,800 m<sup>2</sup>. En esta consideración del verde urbano no sólo se han incluido los parques, sino también los jardines y las plazas arboladas.



◆ Ubicación de la Universidad de Barcelona.

**Figura 1.2** Vista aérea del centro de Barcelona y el edificio de la Universidad (Esc. 1:10000).

En cuanto al tipo de vegetación y especies más frecuentes en los parques y jardines de Barcelona pueden mencionarse las siguientes: especies esclerófilas mediterráneas, especies laurifolias de los bosques subtropicales y árboles y arbustos caducifolios. Dentro de estos últimos, cabe destacar el plátano, árbol predominante en las calles de la ciudad, a las que imprime un sello característico. También las coníferas alcanzan una cierta importancia en los jardines barceloneses. Por último, no hay que olvidar tampoco a las palmeras cuya imagen exótica está presente, cada vez más, en numerosos parques, jardines y también en algunas calles de la ciudad.

El paisaje vegetal del área de estudio se encuentra en la actualidad profundamente alterado y empobrecido por causa antrópica, lo que constituye una notable modificación de las características biogeográficas y físicas de la superficie natural (Moreno, 1993).

## 1.2 EVOLUCIÓN URBANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

En el centro de la cuenca de México, rodeada de montañas, aparecía a la vista hace 700 años la imagen de un inmenso lago cuya formación data de más de un millón de años, coincidiendo con la formación de la Sierra del Chichinautzin, que siguió a los ya formados volcanes del Ajusco, Iztaccíhuatl y Popocatepetl. La gran cantidad de lava originada en la sierra represó los ríos que corrían hacia el sur. Así fue formándose la cerrada Cuenca de México (SEP, 1995).

En 1428 dio principio el Imperio Mexica, donde cada uno de los nueve monarcas que tuvo procuraron engrandecerla y pretendieron hacer de su ciudad la más bella, por lo que llega a tener, tiempo después, un equilibrio entre construcciones y espacios verdes muy poco común (Lombardo, 1978). Espinoza (1991) hace una descripción precisa del crecimiento de la ciudad de México desde su fundación hasta 1980, cuando las dimensiones de la ciudad ya correspondían a las de una megalópolis, como se muestra en los siguientes párrafos extractados de la obra mencionada.

A 196 años de fundada la ciudad de Tenochtitlán, los mexicanos enfrentan la llegada de los españoles. Este hecho dio un resultado funesto por la destrucción casi total de la ciudad. Los primeros cambios que hacen los españoles a la antigua ciudad fueron cegar algunos canales destruyendo el sistema de drenaje de la gran Tenochtitlán. Concluidos estos

preliminares, entre diciembre de 1521 y enero de 1522, dio principio la construcción de la nueva ciudad. Se sabe que las construcciones eran fornidas y toscas y apenumbadas mansiones con tupidas y macizas rejas de hierro y con fuertes torres que más bien eran altivas fortalezas y no hogares.

Durante algunos años, los lagos no pudieron contener la enorme cantidad de agua que, rebasando su nivel normal, inundaba la campiña y la ciudad, causando sensibles pérdidas en las clases menesterosas. En 1605 se ordenó la reparación y limpieza de los diques y canales de todo el valle. Al término del siglo XVII, la ciudad ya había adquirido notoria importancia, no sólo como cabeza de la Nueva España, sino por su población que llegaba a los cien mil habitantes sin contar con la población flotante de los pueblos circunvecinos.

En 1810 da principio la llamada lucha por la independencia. Durante esta época, la ciudad no tuvo cambios, excepto en el estilo arquitectónico de algunos edificios. La transformación de la ciudad tuvo lugar con la progresiva desecación de los lagos, originada por la terminación de la gran obra del paso de Nochistongo y, posteriormente, por las obras de las desviaciones de los ríos. La ciudad de México, al término del siglo XIX (1900) alcanzó una extensión de 850 hectáreas aproximadamente, con una población de 367,446 habitantes.

Al iniciarse la revolución el 20 de noviembre de 1910 en la ciudad de México se suscita la inmigración. Es en aquellos años también en que, según el boletín oficial del gobierno México del 28 de febrero de 1905, el 29 de mayo de 1903 se decretó una disposición en la que se prohibía en la ciudad de México levantar edificios de propiedad particular a una altura mayor de 22 metros, siendo ésta la máxima altura, correspondiente a las calles de más de 18 metros de ancho y debiendo sujetarse en las de menor ancho, a lo que determinara la Dirección General de Obras Públicas. Para 1910, la ciudad tenía ya 9.62 km<sup>2</sup> de área urbana, creciendo 1.12 km<sup>2</sup> más que en 1900 o sea, 13.18%. La tendencia de crecimiento de la ciudad se dio principalmente hacia el poniente y suroeste. También hacia el norte la ciudad creció, pero en la parte oriente, la ciudad permaneció casi sin desarrollo. Las condiciones topográficas del terreno y del medio ambiente hacían a esta zona poco atractiva para la fundación de nuevas colonias pues era más susceptible de inundaciones; las mismas aguas salobres la hicieron impropia para la vegetación, y, en consecuencia, presentaba llanuras áridas y desagradables; además, los vientos arrastraban el mal olor de los desechos de la ciudad. En la mayoría de las calles la altura de los edificios era de 9 metros, o sea, de plata baja y un nivel pero, entre más

cerca del centro se encontraban, la altura era mayor (sobre todo en el costado poniente de la Plaza de la Constitución) alcanzando de 13 a 17 metros, es decir, de planta baja y 3 niveles, excepto en la Av. Madero que había edificios modernos con alturas hasta de 25 metros.

En el transcurso de los años 1941 a 1950, se acentúan más los cambios de imagen urbana en la zona del primer cuadro. Ya se construyen edificios modernos de influencia norteamericana con alturas del doble de los coloniales. En 1959 la ciudad de México llega a tener 115 km<sup>2</sup> de área urbana, con un incremento del 27.5% en relación a 1950. La mayor expansión y tendencia de crecimiento sigue siendo hacia el sur. Es a partir de la década de los setenta que se da una verdadera explosión del crecimiento urbano en la ciudad. En esta década que la tendencia del crecimiento urbano del Distrito Federal y del área conurbada del Estado de México se extendió en todas direcciones. Asimismo, las áreas verdes públicas eran disímbricas por la variedad de sus tamaños, es decir, lo mismo se encontraban pequeñas áreas verdes de 200m<sup>2</sup> en camellones, que de varios kilómetros cuadrados, como el Bosque de Chapultepec, en las delegaciones centrales. La dotación de áreas verdes, sobre todo al oriente y suroriente, era raquítica. En 1980, el Distrito Federal contaba con 8,831,079 habitantes, con ello se obtiene una densidad de 5,876 habitantes por kilómetro cuadrado. En el área urbanizada, alcanza una densidad de 181 habitantes por hectárea. Para 1991, la superficie urbanizada alcanza los 1,328 km<sup>2</sup>.

En cuanto al área específica de estudio, los alrededores donde se encuentra ubicada la Escuela Preparatoria No. 7 se consideran actualmente como parte del centro de la ciudad (Fig. 1.3). La distancia entre el sitio donde se encuentra el edificio de la Preparatoria 7 y el centro original de la ciudad es de menos de un kilómetro al sureste de la Plaza de la Constitución, sobre la Calzada de La Viga, antiguo canal de importancia en la época colonial y anterior, por donde se trasladaban en barcas la población y sus diversas mercaderías. Los alrededores y las calles, aún siendo el centro de la ciudad, distan mucho de parecerse a los inmediatos del Zócalo (Plaza de la Constitución) cuyos edificios son masivos, muchos de ellos antiguos, y los más recientes de altura considerable. En esta zona de estudio, las edificaciones son bajas (dos y tres pisos, principalmente) recientes (menores de 50 años la mayoría) a pesar de constituir barrios antiguos, como son La Merced, San Antonio Abad y Merced Balbuena y dedicadas principalmente a uso comercial y habitacional. Es una zona que sufrió grandes estragos con motivo de los terremotos de septiembre de 1985.



◆ Ubicación Preparatoria 7

Fig. 1.3 Vista aérea del centro de la Ciudad de México (Escala 1:15000). (Fuente: Aerofoto, febrero 2002).

## CAPÍTULO 2:

### EL CLIMA EN LAS CIUDADES

El clima de las ciudades es una cuestión que ha preocupado con creciente interés a los investigadores, sobre todo a partir del instante en que se advirtieron las sensibles diferencias entre los ambientes rurales y urbanos. Las primeras referencias de que se tiene conocimiento datan de los romanos, y también con Horacio y Séneca en los inicios de la Era Cristiana. Muchos años después nace la climatología urbana con Luke Howard (1772-1884) y su estudio sobre el clima de la ciudad de Londres. Emilien Renou (1815-1902) hará lo mismo con la ciudad de París y con las nuevas metodologías para obtener observaciones que permitieran un estudio más preciso del clima en las ciudades a principios y mediados del siglo XX. Es a partir de las Guerras Mundiales que el crecimiento de las ciudades y la industrialización tienen un gran auge y, paralelamente con ellas, el estudio de los impactos urbanos en la atmósfera, principalmente en países de latitudes medias.

Una proporción grande y cada vez mayor de la población mundial vive en áreas urbanas. El crecimiento anual de la población urbana para 1996, según la ONU, fue del 0.8 % para países industrializados y del 3.5% en los países en desarrollo, lo que representa un porcentaje del 45% de la población total, y se espera que para el 2015 alcance el 54% ([www.france.diplomatie.fr/label\\_france](http://www.france.diplomatie.fr/label_france)).

La urbanización implica un reemplazo de la cubierta natural por otros materiales que alteran significativamente las propiedades aerodinámicas, radiativas, térmicas y de humedad. Un área natural que ha sido sustituida por materiales impermeables (pavimento) traerá como consecuencia una reducción de la evaporación, ya que el agua escurre rápidamente por los drenajes y, por lo tanto, la humedad en el ambiente es menor. La presencia de los edificios modifica la circulación del aire, reduciendo la velocidad del viento en la superficie e incrementando en general la turbulencia. Asimismo, las actividades humanas contribuyen a la modificación del ambiente generando calor con sus vehículos e industrias, lo cual, a su vez, incrementa la turbidez por la elevada presencia de partículas. Los materiales con que se construyen las ciudades tienen como características comunes una mayor absorción y capacidad calórica y menor albedo. Por todo lo dicho, cabe concluir que los conceptos

manejados perturban, lógicamente, la atmósfera, alterando los balances de energía y generando entonces *un clima urbano*, que se caracteriza fundamentalmente por la elevación de las temperaturas con respecto al entorno rural (la isla de calor) y por una calidad del aire deficiente. Las propiedades de esta superficie (materiales y geometría de las calles) afectan el intercambio de energía y agua, y estas variaciones crean climas locales y de micro-escala. La interfase ciudad-atmósfera es extremadamente compleja, por lo que es necesario tener un buen entendimiento del papel y la importancia de las superficies urbanas para así predecir o reducir los efectos negativos de la urbanización, en el mejor de los casos (Grimmond y Souch, 1994). Algunas de las alteraciones locales en el clima que son producto de la presencia de las ciudades son las que se muestran en la Tabla 2.1 (tomado y resumido a partir de Landsberg, 1981).

Pero no siempre los cambios son en las direcciones señaladas en la Tabla 2.1. La urbanización no siempre ha implicado cambios negativos en el ambiente ni la incomodidad que estos cambios significan. También existen ciudades que al establecerse en mitad de zonas áridas alteran el clima local, dando lugar a situaciones de menor temperatura, mayor humedad, menor cantidad de partículas en la atmósfera etc. Esto significa que la ciudad en sí puede convertirse en una especie de "oasis" (Tejeda, 1996). Un ejemplo de esto son algunas ciudades norteamericanas asentadas en los desiertos.

Tabla 2.1 Alteraciones locales del clima en las ciudades.

<i>Fenómeno</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Tendencia</i>
<b>Radiación</b>	Radiación solar en superficie	Disminuye
	Duración de la insolación	Disminuye
<b>Temperatura ambiente</b>	Media anual	Aumenta
	Estación libre de heladas	Aumenta
	Media mínima invierno	Aumenta claramente
<b>Precipitación</b>	Total anual	Aumenta
	Eventos de nieve	Disminuye
<b>Humedad relativa</b>	Media anual	Disminuye
<b>Viento</b>	Rapidez media anual y racha máxima	Disminuye
	Turbulencia	Aumenta
<b>Nubosidad</b>	Nubes	Aumenta
	Niebla	Aumenta
<b>Contaminación</b>	Concentración de contaminantes	Aumenta

Además está, por supuesto, la circunstancia de que no todas las ciudades presentan el mismo comportamiento. Las diferencias pueden ser sustanciales si se toman en cuenta la ubicación (latitud) y la situación socioeconómica: por la altura de los edificios, el tejido urbano, la mucha o poca planeación al extenderse, las características de los asentamientos, etc.

## **2.1 LOS LUGARES DONDE SE LLEVARON A CABO LAS MEDICIONES DE BALANCE ENERGÉTICO**

Los lugares donde se realizaron las campañas de balance energético en Barcelona y en la Ciudad de México, son sitios eminentemente urbanos aunque con características muy diferentes tanto en lo que al tipo de construcción se refiere como a los materiales y a la posición geográfica de cada una de ellas, es decir, régimen climático, relieve, cercanía al mar, etc. como se verá a continuación.

### **2.1.1 Barcelona**

El área metropolitana de Barcelona se encuentra entre los 41° 16' y 41° 30' de latitud norte y a 1° 54' y 2° 18' de longitud este, a orillas del mar Mediterráneo.

El edificio de la Universidad de Barcelona se encuentra en la parte de la ciudad conocida como El Ensanche (ver Fig. 1.2), lugar que se caracteriza por la regularidad de sus calles; edificios de entre 8 y 10 pisos, principalmente; manzanas ortogonales de 100 por 100 metros en su mayoría, y en donde el interior se encuentra sin construcción o con edificaciones muy bajas. Al este, sureste y sur del sitio de observaciones se encuentra la parte vieja que ya fue descrita en la sección 1.1, correspondiente a la evolución urbana de la ciudad, con edificios antiguos y de poca altura, calles muy estrechas y sin orden aparente. La vegetación que rodea este lugar pertenece principalmente a las avenidas (Figuras 2.1 y 2.2), con árboles de 20 a 25 metros, siendo prácticamente nula en la parte vieja de la ciudad y ningún parque de importancia en cuando menos 1 kilómetro a la redonda. El mar dista aproximadamente un kilómetro y medio en línea recta hacia el sureste del sitio de mediciones (Fig. 2.3).



**Fig. 2.1** Vista al este desde el edificio de la Universidad de Barcelona, sitio donde se llevó a cabo la campaña de mediciones en junio del 2001.



**Fig. 2.2** Vista al noroeste desde el edificio de la Universidad de Barcelona, sitio donde se llevó a cabo la campaña de mediciones en junio del 2001.

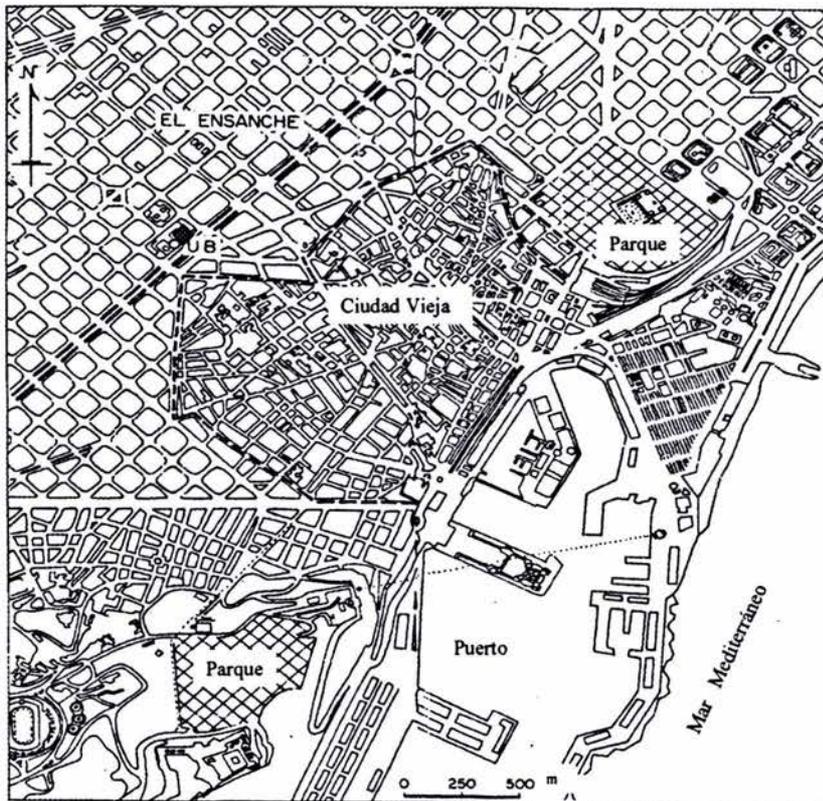


Fig. 2.3 Centro de Barcelona y sitio donde se realizaron las observaciones (◆). (Fuente: Jáuregui *et al.*, 2003).

La ciudad de Barcelona posee un clima mediterráneo típico. La precipitación media anual de es de unos 600 mm, con chubascos de carácter tormentoso y ocasionalmente torrenciales, que suelen producirse con cierta frecuencia al final del verano y en otoño y que, a menudo, han llegado a producir inundaciones de consideración.

El ritmo anual de la temperatura muestra una notable benignidad, característica del clima mediterráneo. En Barcelona, las temperaturas en invierno son francamente suaves, como lo muestra la temperatura media del mes de enero: 9.5°C, y relativamente elevadas en verano: 24.3°C en los meses de julio y agosto, en promedio. Los vientos en general son poco fuertes (Moreno, 1993).

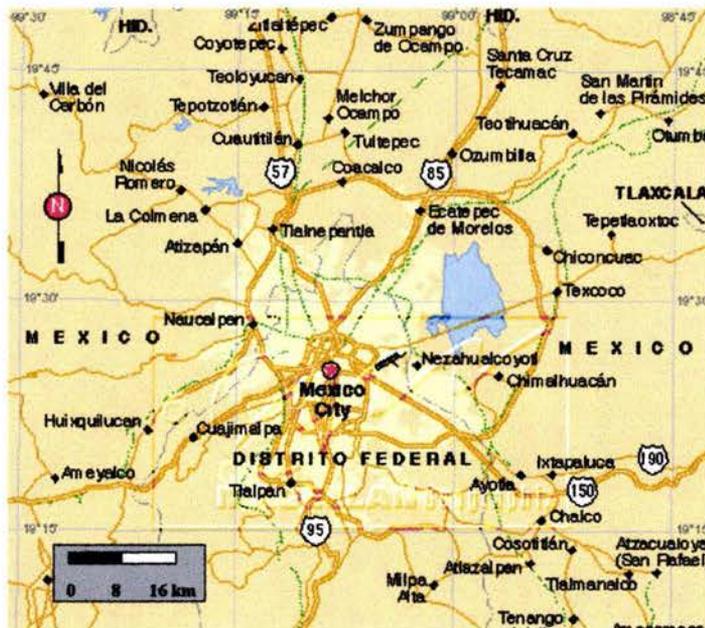
Durante el periodo de observaciones (15 al 22 de junio del 2001) las condiciones atmosféricas fueron uniformes y sin nubosidad, a excepción del día 17 de junio en que se presentó lluvia desde el mediodía debido a la presencia de un frente frío.

## 2.1.2 Ciudad de México

Esta enorme urbanización, ubicada a los  $19^{\circ} 25'$  latitud norte y  $99^{\circ} 10'$  longitud oeste, se encuentra situada en un elevado valle interior a una altitud de 2,250 metros en la parte central de la República Mexicana. El clima es templado, con una estación lluviosa bien definida (mayo-octubre); y con una precipitación que puede variar según la zona pues, al tratarse de una ciudad de grandes dimensiones, la cantidad de lluvia anual en el noreste semiárido (400mm) es considerablemente menor que en los suburbios al suroeste, al pie de las montañas (700mm) (Jáuregui, 1973).

El sitio de la campaña de observaciones que nos ocupa, como se ha mencionado en el capítulo 1, se localiza en el centro mismo de la capital del país, muy cerca de lo que se denomina el Centro Histórico de la ciudad (Figura 2.4).

En uno de los edificios al sur de la Escuela Preparatoria No. 7, sobre Calzada de la Viga, vía muy transitada y ancha con escasa vegetación, se erige una torre con los instrumentos de la estación meteorológica que sirvió para la colocación de los sensores de balance energético durante la campaña de mediciones. Las construcciones que hay en los alrededores son bajas y recientes (Figs. 2.5 y 2.6).



**Fig. 2.4** Ciudad de México y sitio donde se encuentra la Preparatoria 7 (●).  
(Fuente: <http://mexicochannel.net/maps/mxcvalley.gif>).



Fig. 2.5 Vista al suroeste desde el sitio donde se llevó a cabo la campaña de observaciones en la Preparatoria 7, D.F., en diciembre de 1998.



Fig. 2.6 Como en la Fig. 2.5, pero con vista al oeste.

A pesar de tratarse de la parte central de la ciudad, al igual que en Barcelona las características físicas de las construcciones y geometría de las calles de las respectivas zonas son completamente distintas. El conocimiento de estas características urbanas de forma detallada será de vital importancia para el cálculo de las áreas fuente en capítulos más adelante.

### CAPÍTULO 3:

#### EL BALANCE ENERGÉTICO ATMOSFÉRICO EN AMBIENTES URBANOS

La atmósfera obtiene aproximadamente el 20% de su energía por absorción directa de la radiación solar incidente. Cerca del 30% de esta radiación es reflejada al espacio, el resto de la energía pasa a través de la atmósfera y es absorbida por la superficie. La energía solar recibida en la superficie sufre varios procesos de partición de intercambio de calor entre el suelo y la atmósfera (Sozzi *et al.*, 1999). Durante el día, la energía ganada por la superficie es transferida a la atmósfera y al suelo y es absorbida en procesos de evaporación.

El balance energético atmosférico (Ec. 3.1) es la evaluación del presupuesto energético obtenido de la radiación solar incidente (radiación solar global) menos la radiación reflejada y emitida por la superficie, y la porción de atmósfera por debajo del instrumento, es decir, la radiación neta ( $Q^*$ ). Esta radiación neta se llama así porque es la energía que queda atrapada por el sistema suelo-atmósfera (Tejeda, 1996) y es en ella que se llevan a cabo los siguientes procesos:

- Una parte se utiliza para calentar el aire a través de pequeños remolinos. Es la disipación turbulenta de calor sensible de la superficie hacia la atmósfera ( $Q_h$ ).
- Otra porción es la ganancia o pérdida de calor por condensación o evaporación, respectivamente. Es el calor latente de evaporación ( $Q_e$ ).
- Otra parte se queda como calor almacenado en la superficie ( $Q_s$ ).

$$Q^* = Q_h + Q_e + Q_s \quad 3.1$$

En ambientes urbanos se toma en cuenta una ganancia extra de calor procedente de la fuente antropogénica, es decir, de la energía desprendida por la industria, calefacciones, los vehículos, etc., y la radiación de origen terrestre que es absorbida por diferentes contaminantes en la atmósfera ( $Q_r$ ). Si esta contribución es lo suficientemente importante (es decir, si el consumo de energía per cápita es elevado y, por lo tanto, también lo es el calor que se desprende) debe agregarse a la ecuación anterior:

$$Q^* + Q_r = Q_h + Q_s + Q_e \quad 3.2$$

La radiación neta no es un parámetro que se mida comúnmente. Sin embargo, existen algunos métodos empíricos para estimarla, como puede ser conociendo previamente la radiación solar global incidente ( $Q_g$ ), el albedo o reflectividad de la superficie ( $\alpha$ ), la radiación de onda larga (calórica) emitida por la atmósfera al suelo ( $Q_{al}$ ) y la radiación de onda larga emitida por el suelo a la atmósfera ( $Q_{lu}$ ):

$$Q^* = (1-\alpha) Q_g + Q_{al} - Q_{lu} \quad 3.3$$

Sin embargo, en ocasiones resulta más difícil medir esto que la radiación neta directamente.

Otro método es mediante regresiones que se han hecho de  $Q^*$  versus  $Q_g$  o contra la temperatura ambiente. Este es el caso de las parametrizaciones que se hicieron para un sitio suburbano de México (Texcoco) con la intención de crear un modelo donde se supliera la necesidad de efectuar campañas experimentales, y acceder a estimaciones de radiación neta ( $Q^*$ ) a través de variables que pueden medir la mayoría de las estaciones meteorológicas (Sozzi *et al.*, 1999). Este tipo de modelos es de creación reciente y su uso es polémico todavía.

¿Qué diferencias hay, entonces, entre las mediciones de balance energético en ambientes rurales y urbanos con respecto a los elementos de la ecuación anterior? Básicamente, la diferencia resulta del papel que juega la evapotranspiración, es decir, que en el medio rural la radiación solar se consume primordialmente en evaporar agua (una  $Q_e$  mayor), mientras que en el medio urbano la energía se emplea más en calentar las edificaciones ( $Q_h$ ) al existir menos superficies con agua. A su vez, este calor que quedó en la ciudad por el efecto peculiar de la geometría urbana y los colores y materiales con que se construyen las viviendas y edificios, es cedido durante la noche a la atmósfera. Así, bajo condiciones de cielos despejados y aire en calma, es como se presenta la llamada *isla de calor* (Jáuregui, 1987), la cual coincide frecuentemente con el centro de las ciudades, lógicamente si se toma en cuenta que es ahí donde se da una concentración más densa y compacta de edificaciones.

### 3.1 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DEL BALANCE ENERGÉTICO

El método de medición que se utilizó en las campañas de Barcelona y ciudad de México fue el llamado correlación de remolino o *eddy correlation*, en el cual el suelo cede calor sensible a la atmósfera ( $Q_h$ ) o calor latente ( $Q_e$ ) a través de pequeños remolinos verticales, como ya lo apuntaban autores en el segundo tercio del siglo XX (Tejeda, 1996) cuando se postuló que:

$$Q_h = K_h \text{ cov}(T, w) \quad 3.4$$

$$Q_e = K_e \text{ cov}(e, w) \quad 3.5$$

donde  $K_h$  y  $K_e$  son los respectivos coeficientes de intercambio turbulento,  $\text{cov}$  es la covarianza estadística,  $T$  la temperatura,  $e$  la presión de vapor, y  $w$  la rapidez del viento, en este caso en su componente vertical.

Esta correlación de remolino no pudo medirse hasta que se desarrollaron sensores suficientemente sensibles y de respuesta rápida como para detectar cambios de temperatura, viento y presión de vapor varias veces (20 o más) en un segundo, y el equipo adecuado para almacenar horas o días de información.

Otro método para evaluar el balance energético es el de la *Razón de Bowen* ( $\beta$ ), que se obtiene a través del cociente  $Q_h/Q_e$ , razón que, a su vez, puede conocerse si se miden la temperatura ambiente y la presión de vapor a dos alturas. Aunque es un método usual, no fue utilizado en ninguna de las dos campañas que ocupan este trabajo.

### 3.2 INSTRUMENTAL EMPLEADO EN LAS CAMPAÑAS DE BARCELONA Y CIUDAD DE MÉXICO

En ambas campañas, los instrumentos utilizados fueron instalados y calibrados por el Departamento de Instrumentación Meteorológica del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México. En el caso de la campaña de Barcelona durante los días 15 a 22 de junio del 2001, la instalación se llevó a cabo sobre la azotea del edificio de la Universidad (Gran Vía 585) a una altura de 40 metros sobre el nivel de la calle y sobre una torre de nueve metros, quedando dispuestos los instrumentos según se muestra en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Instrumentación utilizada en la campaña de mediciones de balance energético. Barcelona: del 15 al 23 de junio de 2001; y Preparatoria 7, Ciudad de México: del 2 al 14 de diciembre de 1998.

Variable	Instrumento	Altura sobre la azotea (Universidad de Barcelona)	Altura sobre la azotea (Preparatoria 7)	Unidades de medición
<b>V:</b> Rapidez del viento horizontal	Anemómetro <i>RM Young</i>	9.0 m	6.5 m	m/s
Dirección del viento	Veleta <i>RM Young</i>	9.0 m	6.5 m	grados
<b>Q<sub>g</sub>:</b> Radiación global	Piranómetro <i>Licor</i>	3.2 m	-	W/m <sup>2</sup>
<b>Q<sup>*</sup>:</b> Radiación neta	Radiómetro neto <i>Campbell</i>	8.0 m	8.0 m	W/m <sup>2</sup>
<b>Q<sub>h</sub>:</b> Flujo vertical de calor sensible	Anemómetro sónico <i>Campbell</i>	8.0 m	8.0 m	W/m <sup>2</sup>
<b>Q<sub>e</sub>:</b> Flujo vertical de calor latente	Higrómetro de Kriptón <i>Campbell</i>	8.0 m	8.0 m	W/m <sup>2</sup>
<b>T:</b> Temperatura ambiente	Termómetro <i>Vaissala</i>	3.8 m	3.5 m	°C
<b>HR:</b> Humedad relativa	Higrómetro <i>Vaissala</i>	3.8 m	3.5 m	%
<b>W:</b> Rapidez del viento vertical	Anemómetro sónico	9.0 m	8.0 m	m/s

En la campaña que se llevó a cabo en la Ciudad de México en la Escuela Nacional Preparatoria No. 7 (centro de la ciudad) durante los días 1 al 14 de diciembre de 1998, los instrumentos fueron instalados sobre la azotea de uno de los edificios a 20 metros de altura y en una torre de 30 metros aproximadamente, siendo utilizados los mismos instrumentos (excepto el piranómetro *Licor* para medir la radiación global, que no se instaló) que en la campaña de Barcelona, pero dispuestos algunos de ellos a alturas diferentes, como se muestra también en la Tabla 3.1. En ambos casos,  $Q_s$  (flujo de calor almacenado en el suelo) fue estimado por residuo en la Ec. 3.1.

### **3.3 ANTECEDENTES DE ESTUDIOS CLIMÁTICOS EN LA CIUDAD DE BARCELONA Y DE ESTUDIOS CLIMÁTICOS Y DE BALANCE ENERGÉTICO EN LA CIUDAD DE MÉXICO**

#### **3.3.1 Barcelona**

Las referencias de estudios climáticos en España han tenido un avance significativo en los últimos años como lo muestran los trabajos de la Asociación Española de Climatología (AEC; Pérez-Cueva *et al.*, 2001), donde se han reunido las investigaciones de geógrafos, físicos, meteorólogos, etc., en un intento por dar a la climatología en España un papel relevante en los ámbitos científico, social y económico. Los estudios de clima urbano en ese país han empezado a despegar: existen ya trabajos importantes en cuanto al clima urbano se refiere y que han hecho uso de la observación meteorológica registrada en las ciudades, y también de las mediciones a través de transectos en automóviles donde se toman medidas meteorológicas en diversos puntos. Esta técnica se convirtió en algo muy usual desde la década de los 30 en el siglo pasado en algunos países de latitudes medias, y es muy representativa para el análisis de los climas urbanos. En un recuento breve, se muestran a continuación, algunos de los trabajos existentes de clima urbano en ciudades importantes españolas, incluida Barcelona.

Los trabajos de López-Gómez (1991) y de López-Gómez y Fernández-García (1984) son los pioneros de los estudios dedicados al clima urbano en España, en específico de la ciudad de Madrid. En 1989 se presentó una tesis de doctorado sobre el clima de Tarragona (Brunet, 1989) con atención preferente a los planteamientos teóricos de la climatología urbana. El equipo de las Universidades de Barcelona y Autónoma de Barcelona presentó una memoria preliminar (Carreras *et al.*, 1990) sobre la "isla de calor" de Barcelona. También ha habido otros trabajos referentes a los climas de las ciudades de Logroño, de Valencia y otro más dedicado a un aspecto importante del clima urbano, a los parques y jardines, en este caso de la ciudad de Madrid. Moreno (1998) hace una recopilación de gran parte de los trabajos publicados sobre distintas ciudades españolas.

Moreno (1988, 1991, 1993) ha contribuido al conocimiento del clima urbano de Barcelona a través de la publicación de diversos trabajos, como son la comparación de la isla de calor en Barcelona y otras ciudades de España, los eventos de precipitación y la presentación de la tesis doctoral antes mencionada con estudios-caso de observaciones hechas a lo largo de tres años. Ambas islas de calor, la madrileña y la barcelonesa, se presentan en la noche con valores similares de intensidad, de igual manera que para ciudades de esas

dimensiones. Como es el caso de la Ciudad de México, el fenómeno se presenta en época de invierno, en situaciones de anticiclón.

La campaña de mediciones de balance energético que se llevó a cabo en la Universidad de Barcelona (centro de la ciudad) da inicio a una nueva etapa en el conocimiento del clima urbano de esa ciudad, aplicando métodos recientes para la descripción y entendimiento de los procesos que se llevan a cabo en la capa superficial, en la porción de atmósfera en que el hombre ejerce una influencia directa al alterar el entorno.

### **3.3.2 Ciudad de México**

El clima de la ciudad de México es un tema que se ha estudiado de forma bastante minuciosa desde hace ya varias décadas, siendo su principal precursor el Dr. Ernesto Jáuregui, investigador y jefe de la sección de Clima Urbano del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM. Su amplia obra abarca, entre otros ámbitos, el estudio de las modificaciones creadas en el clima por efecto de la urbanización (ver, entre otros, Jáuregui 1987, 1988, 1989, 1990/91; Jáuregui y Tejeda, 1997). Se pueden encontrar en esos trabajos (resultados en su mayoría de la información obtenida de las redes de estaciones dentro y en los alrededores de la ciudad) descripciones del comportamiento y variaciones de la temperatura, precipitación, viento, radiación, calidad del aire y de la bioclimatología de una ciudad que, por su extensión, es un claro ejemplo del cambio en el clima y el deterioro en el ambiente.

En un ejemplo interesante de estos estudios de Jáuregui (2000) sobre la ciudad de México, se describe cómo ha sido el clima a partir del imperio azteca y el cambio que se ha generado durante el siglo XX debido tanto a causas antropógenas (deseccación de lagos, urbanización, etc.) como a aquéllas de naturaleza mundial (el calentamiento global). Este libro resume, en alguna medida, años de estudio e investigación sobre las características climáticas, naturales o inducidas, de una ciudad en constante cambio.

Existen otros trabajos importantes también relacionados con el clima y el ambiente de la ciudad de México. Referencia de una gran parte de ellos se puede encontrar en la compilación que hacen Tejeda y Cervantes (2001), donde se muestra cómo un 90% de los títulos compilados hacen uso de la información que se genera en las estaciones de observación ya existentes sin la instalación de redes especiales. En un 70% son estudios descriptivos que no proponen modelos cuantitativos.

Con el paso del tiempo, este enfoque descriptivo se ha ido modificando dando paso a la búsqueda de una explicación del clima en términos de las leyes físicas de la conservación de la energía, el momento, o la masa, es decir, de la *climatología física* (Tejeda, 1996). En ella se inscriben las campañas de mediciones del balance energético atmosférico realizadas en la ciudad de México y que se explican brevemente a continuación.

### **Antecedentes de Mediciones de Balance Energético en la Ciudad de México**

La ciudad de México ha sido objeto de estudios anteriores que datan desde 1985, con una campaña de mediciones que se llevó a cabo en el Observatorio de Tacubaya (Oke *et al.*, 1992), en donde se montó una torre instrumentada de 20 metros de altura a partir del nivel de la calle, resultando efectivos aproximadamente 8 metros sobre el edificio del Observatorio. Se usó un radiómetro neto, el flujo de calor turbulento se midió con un anemómetro sónico y el flujo de calor latente con un higrómetro de krypton. Se parametrizaron el almacenamiento de calor en la superficie ( $Q_s$ ) y la contribución antropogénica ( $Q_r$ ). Se encontró que la importancia del calor almacenado en la superficie es mayor que en latitudes medias, y que su disipación está más o menos equilibrada entre el flujo turbulento y la transferencia convectiva (Oke *et al.*, 1992). Posteriormente se realizaron otras campañas que se describen brevemente a continuación:

#### **Plan Texcoco.**

Campaña realizada durante el mes de septiembre de 1993. Se midió la radiación neta ( $Q^*$ ), el flujo de calor sensible ( $Q_h$ ) y el calor retenido en la superficie ( $Q_s$ ). El entorno es rural y el calor latente de evaporación debió parametrizarse después.

#### **Palacio de Minería.**

Diciembre de 1993. Hubo tiempo despejado la mayor parte de los días, salvo en las noches y al amanecer. Se puede considerar como una campaña representativa del ambiente urbano en la época de secas. Bajo los sensores había azotea con impermeabilizante. Se midió la radiación neta, el calor sensible turbulento, el calor latente, y el calor retenido en la superficie. Los resultados muestran que el efecto de la urbanización ha sido más impactante: una razón de Bowen muy alta (8.5) y un alto gasto de la energía neta en calentamiento de la

superficie (60%) sin consumo importante en la evaporación (5% de la radiación neta). Estos resultados llegan incluso a concordar con los obtenidos en regiones de climas áridos por la casi nula vegetación, el carácter masivo de las construcciones de alrededor y la ausencia de fuentes de humedad disponible (Oke *et al.*, 1999).

### **Iztacala, Iztapalapa, UNAM y Texcoco.**

Junio a agosto de 1994. Días parcialmente nublados, representativos del periodo húmedo, con lluvia ocasional. Debido a fallas de algunos instrumentos de medición, los periodos de observación no fueron continuos, de modo que aún siendo similares para los cuatro puntos de observación, varía el número de casos útiles. En Iztacala e Iztapalapa los alrededores son áridos, suburbanos; en la UNAM son suburbanos con vegetación; mientras que en Texcoco los alrededores son de carácter rural y suelo pantanoso.

Los datos de temperatura ambiente, radiación neta y radiación global se midieron a 8 m sobre el suelo (aproximadamente) con las estaciones micrometeorológicas del proyecto COPERA. En los tres lugares urbanizados (Iztacala, Iztapalapa, UNAM) se colocaron las torres en las azoteas de las escuelas y se midió también el calor sensible turbulento. Los demás flujos debieron parametrizarse después. En Plan Texcoco se midió la radiación neta en dos niveles, y se midió la razón de Bowen ( $Q_h/Q_e$ ) y el flujo de calor en el suelo por medio de placas sensoras.

Los resultados de esta campaña simultánea se pueden encontrar en el trabajo realizado por Tejeda (1996). Este estudio nos muestra los resultados estadísticos de mediciones de la radiación neta contra la radiación global y la temperatura, discutiendo los métodos de evaluación, las características del instrumental usado y las comparaciones estadísticas entre las diversas componentes del balance energético. Usando los datos de estas campañas, se encontraron ecuaciones de regresión altamente significativas entre la radiación neta y la radiación global, no así para la radiación neta y la temperatura. Los coeficientes de ajuste acusan una clara dependencia del tipo de uso del suelo.

### **Pedregal de San Angel.**

Se realizó una campaña de mediciones de balance energético en esta área suburbana al sur de la ciudad que se caracteriza por ser una región de lava volcánica cubierta de vegetación.

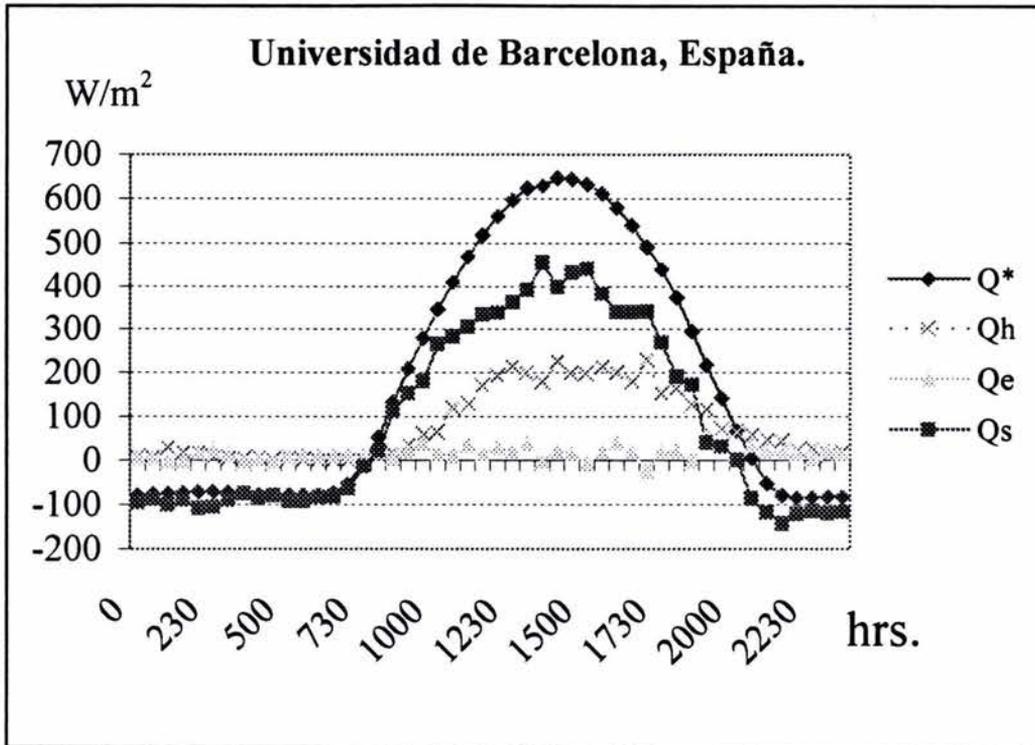
La campaña se llevó a cabo en los meses de mayo, junio y julio de 1995, abarcando una parte del periodo de secas y otro importante del de lluvias. Con datos que se generaron durante esta campaña, Barradas *et al.* (1999) muestran cómo durante la estación seca (mayo) la radiación neta ( $Q^*$ ) se disipa por medio de calor sensible ( $Q_h$ ) en un porcentaje mucho mayor que a través del calor latente ( $Q_e$ ), siendo los porcentajes de 69 y 25%, respectivamente. Durante la estación húmeda, la radiación neta se disipa de forma inversa a la época de secas, siendo  $Q_e$  la del mayor porcentaje (70%) y quedando el calor sensible en un 27%. También se midió el flujo de calor en el suelo.

### **3.4 RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS DE BALANCE ENERGÉTICO ATMOSFÉRICO EN BARCELONA Y CIUDAD DE MÉXICO (PREPARATORIA 7)**

#### **3.4.1 El Balance Energético Atmosférico en Barcelona**

La campaña de mediciones del balance energético en Barcelona se llevó a cabo los días 15 al 22 de junio del 2001 con la participación de la Universidad de Barcelona, el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México y la colaboración de la Universidad Veracruzana. Por cuestiones de fallas en el equipo y la presencia de lluvia el día 17, el número de días utilizables se redujo a cuatro (16 y 19 a 21 de junio), los cuales pueden ser representativos del comportamiento de los flujos de energía en situación de cielo despejado. Los resultados que se muestran a continuación corresponden únicamente al promedio de esos días con datos utilizables.

El periodo diurno durante el verano se caracteriza por valores altos de radiación neta (alrededor de  $640 \text{ W/m}^2$ , ver Figura 3.1) en una atmósfera prácticamente libre de contaminantes (Jáuregui *et al.*, 2003). Los resultados muestran que el flujo de calor sensible ( $Q_h$ ) predomina sobre el flujo de energía utilizado en la evaporación debido a la escasez de áreas verdes en el entorno. Por otro lado, la mayor proporción de energía solar se utiliza en el almacenamiento de calor en los materiales de las construcciones predominantemente masivas, comparable con los resultados obtenidos en la ciudad de México en la campaña llevada a cabo en el Palacio de Minería (centro histórico) en 1993 (Oke *et al.*, 1999). La advección de aire húmedo de la brisa en Barcelona tuvo una participación mínima.



**Figura 3.1** Comportamiento de los flujos promedio de las componentes del balance energético para Barcelona en un ciclo completo de día y noche. Promedio de los días 16 y 19 al 21 de junio del 2001.

En la Tabla 3.2 se muestran resultados de algunas campañas de mediciones realizadas en diversas ciudades con el fin de que pueda establecerse una comparación, dados los diferentes tipos de usos de suelo. Se incluye a la ciudad de México en la campaña realizada en 1993 que ocupa este trabajo: ciudad de México en el edificio de la Preparatoria 7, también centro de la ciudad. Como es de esperar, y dado el carácter masivo de las construcciones en el centro de Barcelona, el flujo de calor almacenado ( $Q_s$ ) es el predominante, comparable con el de la ciudad de México en la campaña de 1993 (centro histórico) y semejante, incluso, a la energía acumulada en un distrito industrial de la ciudad de Vancouver. Sin embargo, Barcelona presenta una diferencia substancial en cuanto a la energía disponible para evaporar agua respecto al centro histórico de México, que puede asociarse a la presencia de avenidas arboladas cercanas al sitio de mediciones y a la influencia, aunque moderada, de la brisa marina.

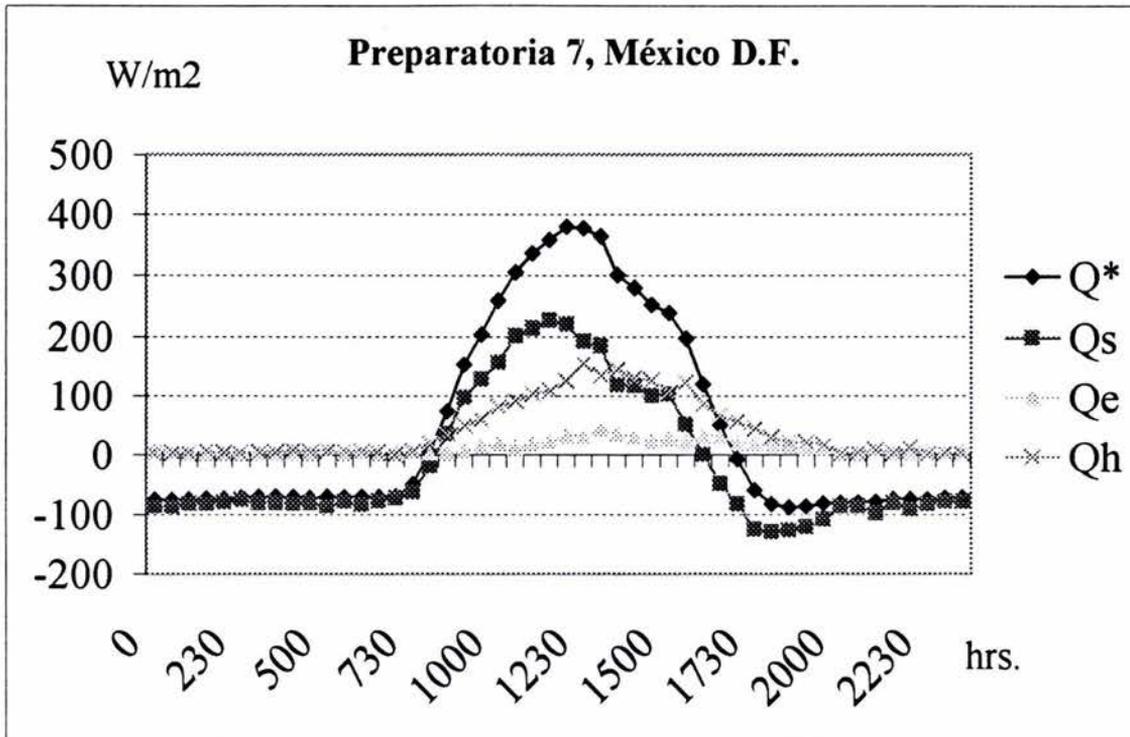
**Tabla 3.2** Comparación de flujos promedio de balance energético en varias ciudades. Cielos despejados, diurno,  $Q^* > 0$ . (Fuentes: Jáuregui *et al.*, 2003; y datos de Preparatoria 7 analizados para esta tesis).

Sitio	Periodo de observaciones	$Q_h/Q^*$	$Q_e/Q^*$	$\Delta Q_s/Q^*$	$Q_h/Q_e$
Minería, D.F. (centro)	1 al 7 de diciembre de 1993	0.38	0.04	0.58	9.9
Prepa 7, D.F. (centro)	2 al 14 de diciembre de 1998	0.42	0.09	0.48	4.2
Barcelona (centro)	16 y 19 al 21 de junio del 2001	0.34	0.1	0.56	7.1
Vancouver (industrial)	11 al 26 de agosto de 1992	0.42	0.1	0.48	4.4
L.A. (residencial)	4 de julio al 11 de agosto de 1993	0.49	0.22	0.29	2.2
Chicago (residencial)	14 de junio al 10 de agosto de 1995	0.46	0.37	0.17	1.2
Texcoco (rural)	24 al 31 de agosto de 1994	0.13	0.76	0.11	0.15

### 3.4.2 El Balance Energético Atmosférico en la Ciudad de México: Escuela Preparatoria 7

En la Tabla 3.2 se puede observar que el calor almacenado en el suelo ( $Q_s$ ) domina al calor sensible turbulento ( $Q_h$ ) y al calor latente ( $Q_e$ ), situación que prevalece también en Barcelona. El calor sensible turbulento domina sobre el calor latente de vaporización (razón de Bowen), lo cual sucede en casi todas las áreas urbanizadas, como muestran los ejemplos en la misma Tabla. El calentamiento del suelo no sobrepasó el 50%, mientras que el gasto de energía para evaporación no fue mayor al 10 %. La marcha diaria de las componentes del balance energético se puede observar en la Figura 3.2.

A manera de comparación, en las campañas llevadas a cabo en Minería y Preparatoria 7, ambas en el centro de la ciudad de México, se muestra un dominio del calor almacenado en el suelo y una diferencia importante en el consumo de energía para evaporar agua. El resultado es una sensible diferencia en la razón de Bowen (9.9 en Minería, similar a lo encontrado en zonas rurales desérticas, y 4.2 en Prepa 7) lo cual conduce a considerar la influencia notable que ejerce el tipo de construcción y, sobretodo, la presencia o no de vegetación. En el caso de Preparatoria 7, la vegetación aladaña al edificio donde se realizaron las observaciones, y que pertenece a la misma escuela, se reduce a la presencia de algunos árboles de alrededor de 15 metros de altura, mientras que en el Palacio de Minería la vegetación es nula. Resultados así son indicativos de que las mediciones realizadas no son representativas de todo el ámbito de las ciudades en estudio, sino que sólo son muestra del impacto que tienen los distintos usos de suelo en el clima en las áreas consideradas.



**Figura 3.2** Comportamiento de los flujos promedio de las componentes del balance energético para Preparatoria 7, Ciudad de México, en un ciclo completo de día y noche. Promedio de los días 2 al 14 de diciembre de 1998.

## CAPÍTULO 4:

### LAS ÁREAS FUENTE

#### 4.1 CONCEPTOS

Un área fuente se define como la porción de superficie viento arriba que contiene los elementos efectivos que contribuyen a los procesos de intercambio turbulento en un punto dado de la capa superficial (Schmid y Oke, 1990). Es decir, el área fuente o área de influencia (*source area*, en inglés) es el conjunto de elementos de superficie que son muestreados por los sensores de las estaciones de micrometeorológicas (del balance energético, por ejemplo). Así, las condiciones medidas por los instrumentos instalados en una torre, supuestamente deben representar algún proceso en la superficie o, cuando menos, de una porción de la superficie (Schmid, 1997b). Las características de la turbulencia en la capa superficial tienden hacia un equilibrio con las condiciones de la superficie subyacente. Sin embargo, sobre superficies complejas e irregulares, en la altura las características no estarán en equilibrio con las condiciones locales, más bien estarán bajo la influencia de una porción de la superficie viento arriba (Schmid y Oke, 1990).

El área fuente depende de los procesos involucrados, de la instrumentación utilizada y de las condiciones meteorológicas en que se hicieron las mediciones. Para mediciones de flujos radiativos, el área fuente está fija en el tiempo y en el campo de visión de los instrumentos, es decir, depende de la geometría. Esta área fuente puede determinarse usando el procedimiento establecido por Reifsnyder (1967) y Schmid *et al.* (1991). El procedimiento involucra, como se verá más adelante, el conocimiento del radio máximo de visión del radiómetro neto en función de la altura en que esté colocado el sensor y de qué tan afectada esté la visión por los obstáculos (edificaciones, árboles, etc.) en los alrededores. Para los flujos turbulentos, el área fuente no está fija y varía a través del tiempo.

#### 4.2 LA ESCALA DE LAS OBSERVACIONES Y LA ESCALA DE LOS FLUJOS

Antes de realizar cualquier campaña de mediciones, es conveniente tomar en cuenta algunos criterios como los que establece Schmid (1997b) para entender cómo es que debe

diseñarse un experimento donde van a medirse flujos de energía y también cómo los micrometeorólogos, al intentar medir flujos turbulentos sobre cultivos, suelo desnudo o con vegetación natural o sobre áreas urbanizadas, se encuentran con preguntas respecto al diseño experimental. Estas preguntas se pueden resumir en tres clases:

1. Preguntas conceptuales sobre la escala espacial y temporal del estudio y acerca del método de observación que se usará: ¿Cuál es el objetivo de las mediciones?
2. Preguntas acerca de la selección de los sitios de observación y la colocación de los instrumentos: ¿Dónde, dentro del área de estudio, es la mejor ubicación de la torre meteorológica?, ¿a qué altura deben colocarse los instrumentos?
3. Preguntas técnicas y operacionales de los instrumentos, medidas físicas y de adquisición de datos: ¿La señal medida por los instrumentos refleja el comportamiento de la variable de interés?

Idealmente uno esperaría empezar con la primera clase de preguntas y definir el campo de acción de las observaciones que se pretenden realizar. ¿Se necesitan las estimaciones de los flujos en valores horarios o como totales mensuales? ¿Las observaciones deben reflejar el intercambio de calor y vapor de agua sobre un campo en particular o se pretende que sean representativas de promedios regionales? Las respuestas a preguntas de este tipo deben dar una guía para responder a la segunda y tercera clase de preguntas, para así determinar el número y tipo de instrumentos, torres y sistemas de adquisición de datos que sean los más apropiados para un propósito establecido, dónde deben ser desplegados y el rango de obtención de los datos que serán colectados.

En la práctica, sin embargo, el método, la estructura y la puesta en operación de las mediciones de los flujos dependen frecuentemente de la disponibilidad de equipo y de las restricciones financieras, de infraestructura y de la logística. Estos factores externos para determinar el carácter de las observaciones son extremadamente dependientes y hacen que las recomendaciones válidas que puedan hacerse sean casi imposibles de llevar a la práctica. Barr (1987) deplora el hecho de que estas limitaciones externas son frecuentemente cruciales para la realización de observaciones y expone, antes que nada, el principio de "pensar antes de medir" y desplegar instrumentos para encontrar objetivos experimentales.

Con el desarrollo de nueva instrumentación, la grabación y procesamiento de datos se ha vuelto cada vez más especializado y sofisticado, aumentando su complejidad y sensibilidad a los errores. En los principios de la era digital, Lettau (1967) consideraba que las dificultades para medir pueden ser tan grandes que los investigadores tienden a estar más preocupados con el conocimiento de los instrumentos y técnicas, tornándose su interés de la meteorología a la metrología.

Schmid (1997b) discute cuestiones prácticas y conceptuales de las mediciones de los flujos sobre superficies complejas y heterogéneas y de cómo se relacionan con la selección y disposición de los sitios y los instrumentos. Es relativamente poco importante qué método usar, mientras se considere el principio esencial de que la escala de las mediciones debe igualarse a la escala de los flujos. Los instrumentos de análisis usados para evaluar la escala espacial de una medición son los ya conocidos *modelos de área fuente*.

La variedad de superficies heterogéneas es interminable, por lo que sería muy ambicioso hacer recomendaciones prácticas para el diseño experimental que sean válidas universalmente para todos los tipos de variedad de la superficie. Para hacer los principios menos vagos, el campo de acción necesita ser limitado: un concepto que ayuda es la noción de escala, la cual es inseparable de cualquier discusión sobre heterogeneidad.

Dos de los tipos de superficies heterogéneas más comunes de meso y micro escala son las áreas urbanas y las regiones agrícolas con parcelas de cultivos variables. En áreas extensas de monocultivo o vastas regiones de pastizal, es posible realizar medidas micrometeorológicas de los flujos de energía dentro de una capa de equilibrio interna donde los flujos y perfiles pueden tener un buen ajuste a las condiciones de la superficie local. Tradicionalmente, se ha aceptado que la capa de equilibrio se extiende con una declinación aproximada de 1% viento abajo del sitio de medición. Las mediciones tomadas a una altura de 10 m de altura son representativas de las condiciones de la superficie local únicamente si la distancia a la frontera más cercana sobrepasa 1 km. Tales condiciones se dan muy ocasionalmente. Pero hay que considerar mayores dificultades cuando se trata de condiciones urbanas drásticamente diferentes. Aquí, la escala horizontal de las superficies principales (edificios, calles, grupos de árboles) es del mismo orden que la de su estructura vertical. Entonces, visto a esa escala, aún en situaciones de flujo medio es de esperar que las condiciones cambien considerablemente sobre distancias cortas (Schmid, 1997b).

### 4.3 LA CUESTIÓN DE LA HOMOGENEIDAD Y LA HETEROGENEIDAD

El área de estudio y el sitio de mediciones ahí contenido deben satisfacer ciertos criterios de homogeneidad y representatividad espacial. Idealmente, el ecosistema de interés debería cubrir el área de estudio uniformemente; y el área de estudio debería ser lo suficientemente grande para descartar cualquier efecto de la existencia de una frontera en los datos de los flujos colectados en el sitio de mediciones. Cualquier homogeneidad espacial dentro o fuera del área de estudio está limitada por la escala del ecosistema mismo (Schmid y Lloyd, 1999). Si se quiere estudiar un bosque en un área de estudio de 100 ha, pero el bosque sólo cubre 80 ha, el área de estudio es necesariamente inhomogénea.

Cualquier programa bien planeado de observación de intercambio de flujos turbulentos entre la superficie y la atmósfera, tiende a lograr el ideal micrometeorológico de tener superficies homogéneas en condiciones estacionarias donde se lleven a cabo las observaciones de medición de los flujos turbulentos. Sin embargo, se debe reconocer que, sobre superficies con vegetación natural o sobre zonas urbanizadas, la variabilidad y la inhomogeneidad son la regla. Sobre áreas heterogéneas, el tamaño, la localización y la orientación de las áreas de influencia dependen de la localización y altura del sensor, y varían en el tiempo con la estabilidad y con la dirección del viento (Schmid, 1994 y 1997b). Una manera de asegurar la representatividad espacial de los valores de los flujos es colocar el sensor sobre la llamada capa de mezcla (*blending height*), donde las variaciones horizontales se desvanecen debido a la mezcla por la turbulencia.

Schmid y Bünzli (1995) consideran dos diferentes conceptos de altura de mezcla: el numérico y el físico. El concepto físico de altura de mezcla se define como la altura en que las variaciones horizontales en los flujos debido a las inhomogeneidades de la superficie se desvanecen, y el flujo viene a ser de una naturaleza unidimensional.

### 4.4 LA CAPA LÍMITE URBANA

Dado que lo que se pretende es caracterizar las áreas de influencia o áreas fuente de las mediciones que se llevaron a cabo en el medio urbano, es importante conocer la disposición de las estructuras de la capa límite sobre una ciudad. Para estudios realizados en Canadá y

Estados Unidos, Grimmond y Oke (1991) han señalado que la caracterización de la capa límite sirve a su vez para precisar los límites de las áreas fuente. Se entiende por *capa límite urbana* o *capa frontera atmosférica* el espesor de aire al que afecta la interacción con la superficie (Tejeda, 1996). Para el caso de la superficie continental (suelo), será aquella capa superior que responde a los cambios térmicos en correspondencia con la atmósfera, y que para suelo cubierto de pasto no llega a los 30 cm de profundidad, mientras que en pavimento y arena es a los 50 cm (Oke, 1987).

La capa límite urbana es una porción que forma parte de la capa límite planetaria. Se extiende desde los techos de los edificios hasta un nivel donde la superficie urbana ejerce influencia en la altura. Durante el día alcanza una extensión mayor en la vertical debido a la convección. Por la noche suele ser más estable aunque, cuando se produce la *isla de calor*, la capa límite urbana tiende a extenderse más. Las mediciones de balance energético que interesan en este trabajo se realizaron en el tope superior del dosel o palio urbano (ver Fig. 4.1), es decir, en la capa de aire existente debajo de la capa límite urbana que se extiende desde la superficie hasta el nivel medio de las azoteas de los edificios. Contiene, entonces, un elemento importante conocido como cañón urbano el cual, al ser de variados materiales, orientaciones y anchos por las características de los edificios y calles, resulta un complejo conjunto de microclimas. En resumen, la presencia de la ciudad genera dos subcapas: la capa límite urbana y el dosel urbano. La capa límite puede prolongarse si hay flujo de viento dominante con fuerza suficiente que traslade la influencia de la ciudad sobre el área rural.

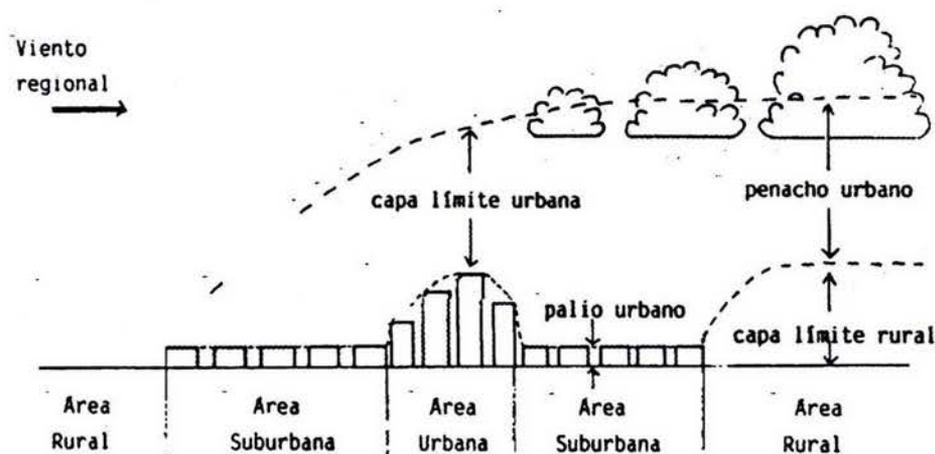


Figura 4.1 Representación de la atmósfera urbana (Oke, 1976).

**CAPÍTULO 5:**  
**CARACTERIZACIÓN DE LAS ÁREAS FUENTE PARA**  
**BARCELONA Y CIUDAD DE MÉXICO**

**5.1 ANÁLISIS DEL USO DEL SUELO**

La urbanización ofrece cambios significativos en la cubierta del suelo: el reemplazo de la superficie natural por otros materiales altera las propiedades aerodinámicas, radiativas, térmicas y de humedad preexistentes. Estos nuevos materiales y la geometría que resulta de la urbanización afectan el intercambio de energía y agua, y dichas variaciones crean climas de escala local o bien microclimas (Grimmond y Souch, 1994). Para entender la naturaleza del clima urbano, predecir los efectos de la urbanización e intentar disminuir algunos de los efectos hidroclimáticos negativos, es necesario tener un buen entendimiento del papel e importancia de la superficie urbana.

Según Grimmond y Souch (1994) hay dos temas importantes a considerar cuando se quiere caracterizar la superficie en estudios hidroclimáticos:

- a) Propiedades de la superficie. Primero, la definición y descripción de una superficie depende del proceso o procesos a estudiar. Por ejemplo, para estudiar las características de la turbulencia en la atmósfera urbana es necesario conocer, entre otros factores, la longitud de rugosidad, la longitud de desplazamiento y la altura de rugosidad de los elementos. O bien, para los estudios de flujo de calor almacenado se necesita información de la distribución espacial de la admitancia térmica, y del porcentaje de áreas construidas y áreas verdes, etc. Otras consideraciones a tomar en cuenta ya se han descrito con anterioridad en este trabajo y se refieren a las escalas temporal y espacial del estudio. La escala a que se lleva a cabo el estudio determina el área de interés y qué atributos son homogéneos y cuáles heterogéneos.
- b) Delimitación del área de estudio. Después de haber identificado los parámetros y la escala apropiados para la descripción de la superficie, queda por considerar dónde establecer los límites del área a describir. La elección de los límites puede convertir un área de

estudio en un área homogénea o heterogénea. Típicamente, la descripción de un sitio se basa en un círculo calculado alrededor del sitio de medición que, en el caso de las campañas que ocupan este trabajo, consistió en 1 km de radio, en el supuesto de que la mayor contribución se debe a la superficie que circunda a cada estación en un kilómetro alrededor (Oke, 1993).

## **5.2 EL USO DEL SUELO EN BARCELONA Y CIUDAD DE MÉXICO PARA LAS CAMPAÑAS DE BALANCE ENERGÉTICO**

Las campañas de balance energético que se llevaron a cabo en la ciudad de México (Preparatoria 7) y Barcelona requirieron del conocimiento de las propiedades radiativas, térmicas y de humedad de la superficie, para conocer las características de las áreas fuente. Para ello, se tomó en cuenta la sugerencia dada por Oke (1993) de tipificar los ocho sectores circulares correspondientes a los ocho rumbos del viento en un radio de 1 km.

Después de evaluar las características de la superficie, se dividió el área de estudio en unidades homogéneas para los sectores del viento. En las campañas de Barcelona y ciudad de México (Preparatoria 7) se llegó a este conocimiento a partir de medios diferentes, como a continuación se especifica.

### **5.2.1 Elementos a Utilizar Para Caracterizar el Uso de Suelo en la Campaña de Mediciones en la Universidad de Barcelona, España**

Las características de la superficie a 1 km a la redonda del sitio de mediciones en la campaña realizada en junio del 2001 se obtuvieron a partir de:

- Fotografías aéreas escala 1:10 000.
- Consulta en la página <http://www.bcn.es/urbanisme> del ayuntamiento de Barcelona.
- Recorridos peatonales.

Los elementos a considerar para poder caracterizar los usos de suelo, para cada uno de los edificios o conjunto de edificios en manzanas homogéneas, se presentan en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1** Información necesaria para poder caracterizar los usos de suelo.

Altura en pisos o en metros
Porcentaje de lote cubierto por la construcción
Porcentaje de vegetación en el lote
Número de construcciones vecinas con que la edificación toca.
Distancia a la calle
Porcentaje de ventanas en la fachada
Materiales de construcción
Color de las edificaciones

A partir de esta caracterización, se tipificó la superficie en unidades homogéneas para los ocho sectores del viento, obteniéndose los siguientes usos de suelo que se presentan en la Tabla 5.2. Éstos también pueden observarse en la Fig. 5.1. A su vez, los usos de suelo anteriores se subdividen según existan diferencias en cuanto a las características de la Tabla 5.1.

**Tabla 5.2** Tipos de cubierta predominantes en 1 km alrededor de la estación Universidad de Barcelona.

<b>Tipos de cubierta</b>	<b>Símbolo en la Figura 5.1</b>
Comercial	C
Comercial / habitacional	CH
Comercial / oficinas	CO
Áreas verdes (calles arboladas)	AV
Plazas (zonas abiertas con cubierta impermeable)	PL
Instalaciones culturales (salas, museos, teatros)	IC
Avenidas	Ave

### **5.2.2 Elementos a Utilizar Para Caracterizar el Uso de Suelo en la Campaña de Mediciones en la Preparatoria 7, Ciudad de México**

En la campaña realizada en la Preparatoria 7, centro de la Ciudad de México, las características de la superficie se obtuvieron a partir de los siguientes medios:

- Fotografías aéreas escala 1:15 000 para estereoscopia.
- Recorridos peatonales.
- Mapas de la Guía Roji (1997).

Los elementos a considerar para cada uno de los edificios o conjunto de edificios en manzanas homogéneas son los mismos que en la Tabla 5.1, pues en ambos casos se busca dar características a las áreas fuente tanto en lo que a la tipificación del uso del suelo respecta y a lo que aporta cada tipo de cubierta, como a lo que los flujos turbulentos y radiativos de las mediciones del balance energético concierne.

De igual manera que en Barcelona, se tipificó a la superficie en unidades homogéneas para los ocho sectores del viento, obteniendo usos de suelo (Tabla 5.3) semejantes a Barcelona y que también pueden observarse en la Fig. 5.2. De la misma forma que en Barcelona, los usos de suelo anteriores se subdividen con respecto a las variaciones que se puedan presentar en las características de la Tabla 5.1.

**Tabla 5.3** Tipos de cubierta predominantes en 1 km alrededor de la estación Preparatoria 7.

<b>Tipos de cubierta</b>	<b>Símbolo en la Figura 5.2</b>
Comercial	C
Comercial / habitacional	CH
Habitacional / comercial	HC
Comercial / oficinas	CO
Áreas verdes (calles arboladas)	AV
Plazas (zonas abiertas con cubierta impermeable)	PL
Escuelas	ESC
Estaciones de servicio (gasolineras)	ESV
Avenidas	Ave

### 5.3 TIPIFICACIÓN DEL USO DEL SUELO ALREDEDOR DE LAS ESTACIONES DEL BALANCE ENERGÉTICO

Con el objetivo de conocer la influencia del uso del suelo en las mediciones de balance energético en la ciudad de México (1992-94), Tejeda (1996) llevó a cabo una tipificación de las áreas de estudio de los sitios donde se realizaron las campañas (Minería, Plan Texcoco, UNAM, Iztacala, Iztapalapa). Este autor propuso un método para conocer la contribución de los distintos tipos de uso de suelo por cada sector del viento dominante, basándose en el método usado por Grimmond y Oke (1991) en que se considera la fracción de área correspondiente a cada tipo de cubierta, tomando en cuenta la contribución de los muros.

Para las campañas de Barcelona y Preparatoria 7, se realizó el mismo procedimiento para caracterizar las áreas de influencia de cada estación, con la intención de comparar más adelante los resultados obtenidos con los modelos de área fuente para los flujos turbulentos y radiativos. El procedimiento seguido para cada sector del viento fue:

- 1) Estimar la fracción horizontal correspondiente a cada tipo de cubierta ( $a$ ).
- 2) Después, a cada una de ellas y en función de su altura vertical y sus colindancias, se le dio un peso ( $p$ ), de modo que la fracción ( $f$ ) de cada tipo de cubierta asignada a cada sector fue calculada como un promedio pesado:

$$f = a p / \sum a p \quad 5.1$$

Los pesos se calcularon con la relación:

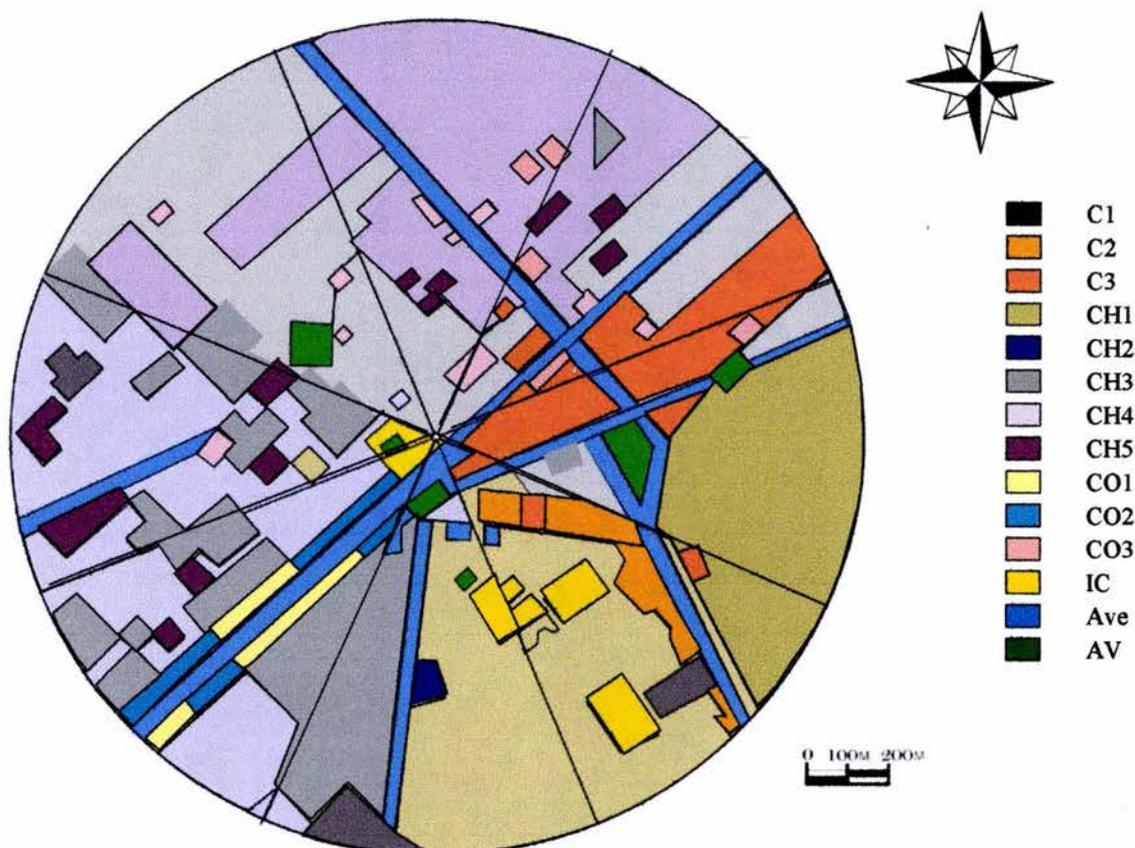
$$p = 1 + 0.5 n + d m \quad 5.2$$

donde  $n$  es el número de pisos (0 para terreno sin construcción),  $d$  es la fracción del lote cubierta por la construcción y  $m$  es función de las colindancias libres (0.5, si el edificio toca a los edificios contiguos por ambos lados; 1 si por un lado, y 2 si por ninguno).

A partir del conocimiento de las características de la superficie a través de los medios nombrados anteriormente (fotos aéreas, recorridos, mapas) y del cálculo del peso, se calcularon los porcentajes de contribución de cada tipo de cubierta, como se muestra a continuación para los casos de Barcelona y Preparatoria 7, en la Ciudad de México.

### 5.3.1 Tipificación del Uso del Suelo Alrededor de la Estación de Balance Energético en la Universidad de Barcelona, España

La Figura 5.1 muestra la superficie de cada tipo de cubierta alrededor de la estación de la Universidad de Barcelona, así como los sectores a considerar para cada rumbo del viento dominante. La descripción de los tipos de cubiertas se presenta en la Tabla 5.4.



<b>C</b> = Comercial	<b>CH</b> = Comercial/ Habitacional	<b>CO</b> = Comercial/ Oficinas	<b>AV</b> = Áreas verdes
<b>PL</b> = Plazas	<b>IC</b> = Instalaciones culturales	<b>Ave</b> = Avenidas	

**Figura 5.1** Usos de suelo en un kilómetro de radio alrededor de la Universidad de Barcelona. Las características de los subtipos se pueden observar en la Tabla 5.4.

**Tabla 5.4** Descripción de los tipos de cubiertas que se consideraron para el cálculo de los porcentajes de aportaciones a los sensores de balance energético. Las letras y números que corresponden al tipo de cubierta se pueden identificar en la

Tabla 5.2.

Uso	C1	C2	C3	C4	CO1	CO2	CO3	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	AV	Ave	PL	IC
Altura en pisos	1-3	4-6	7-9	1-3	4-6	7-9	>10	4-6	7-9	4-6	7-9	>10	0	0	0	1-3
% lote cubierto	>85	>85	>85	>85	>85	>85	>85	>90	>90	>75	>75	>75	35		<10	>75
% vegetación en el lote	<2	<2	<2	<2	<5	<5	<5	<2	<2	<5	<5	<5	20	0	<2	<2
# construcciones vecinas que toca	1	2	2	0	1	1	1	2	2	1	1	1	0	0	0	1
<i>Peso</i>	2.8	3.9	5.4	3.7	4.3	5.8	6.8	3.9	5.4	4.2	5.7	6.7	1.7	2.8	2.6	2.7
Distancia a la calle (m)	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<5	<5	<10	<10	<10	<5		<10	<5
%ventana fachada	10-35	35-55	35-55	10-35	35-55	35-55	35-55	35-55	35-55	35-55	35-55	35-55	0	0	0	35-55
Materiales y color	p.c		oscuro	p.c.	p.c											

p.c. = piedra clara

C = Comercial    CH = Comercial/ Habitacional    CO = Comercial/ Oficinas    PL = Plazas    IC = Instalaciones culturales    Ave = Avenidas    AV = Áreas verdes

La Tabla 5.5 muestra el porcentaje de aportaciones por cada tipo de cubierta en 1 km alrededor de la estación para cada rumbo del viento dominante, es decir, muestra la aportación de cada tipo de cubierta en específico en cada sector. Puede darse el caso de que una cubierta con poca extensión aporte más (por la altura y densidad de las edificaciones) que otra con mayor área pero menor superficie expuesta.

**Tabla 5.5** Porcentaje de aportaciones por cada tipo de cubierta en 1 km alrededor de la estación ubicada en la Universidad de Barcelona para ocho rumbos de viento dominante.

Tipo/sector	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
C1	0	0	0	0	3.8	0	0	0
C2	0	0	0	16	0	0	0	0
C3	0	23.8	28.7	7.4	2.9	0	0	0
C4	0	0	0	5.1	0	0	0	0
CH1	0	0	50.3	54.7	58.8	0	1.6	0
CH2	0	0	0	3	0	0	0	0
CH3	10.9	21.9	8.5	0	21.5	25.2	9.5	48.6
CH4	71.1	32	0	0	3.1	40.5	60.1	35.1
CH5	3.8	10.7	0	0	0	4.2	21.7	0
CO1	0	0	0	0	0	10.7	0	0
CO2	0	0	0	0	0	13.5	0	2.4
CO3	9	8.2	5.2	0	0	0	2.6	10
AV	2.2	0	2.6	3.7	3.7	2.8	2.6	1.8
Ave	3	3.4	4.7	2	3.1	3	2	2
PL	0	0	0	0.7	0.3	0	0	0
IC	0	0	0	7.4	2.9	0	0	0

Aunque en la mayoría de los casos el tamaño del área se corresponde con la cantidad de aportación de determinado tipo de cubierta, en algunos casos puede observarse cómo la altura de los edificios, o bien la profundidad del cañón urbano, es más importante que la extensión del área. Como ejemplo, aunque con una diferencia poco representativa, se tiene el caso de dos usos de suelo diferentes, con áreas diferentes, y con la misma aportación:

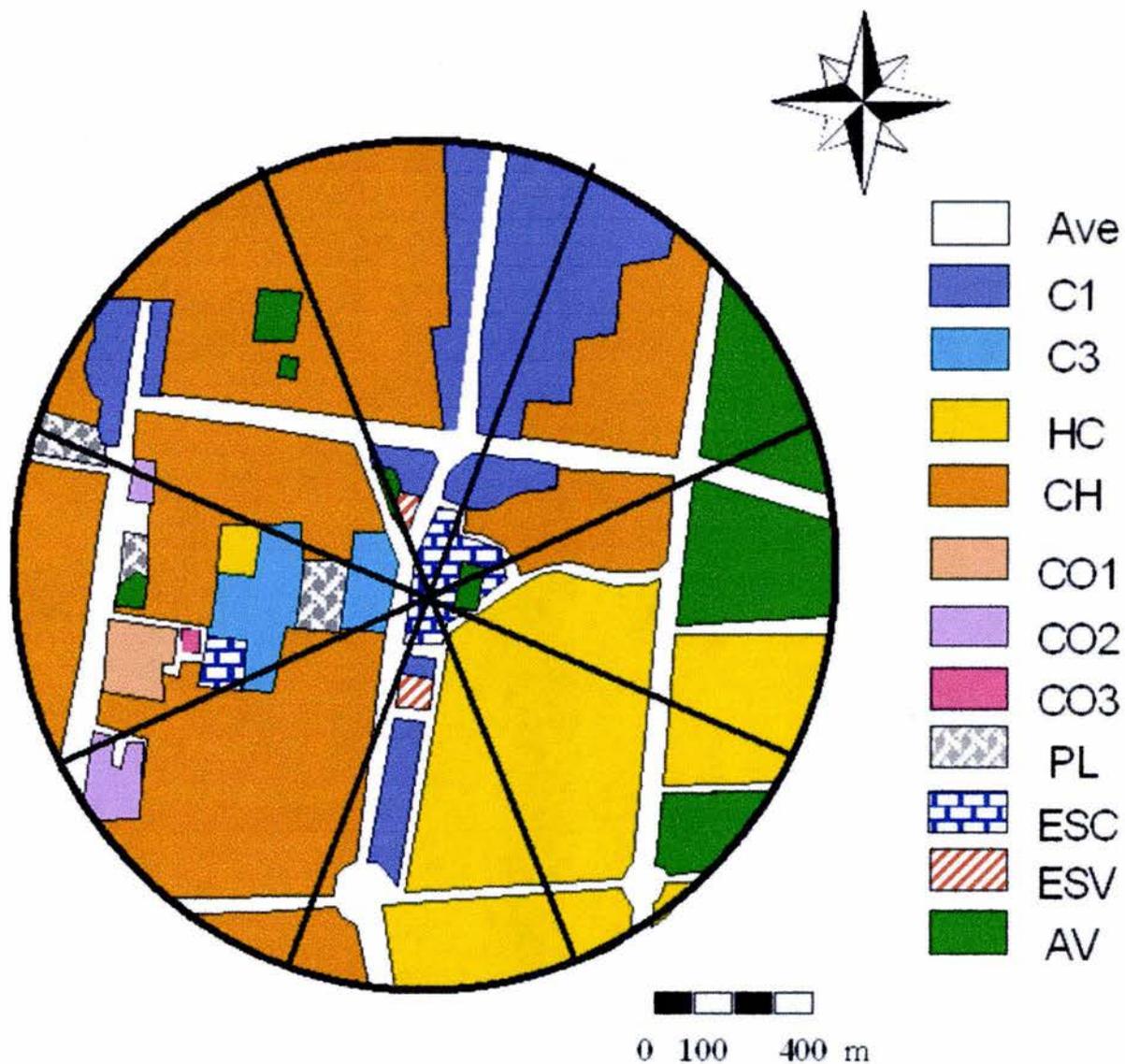
<i>Sector</i>	<i>Tipo de cubierta</i>	<i>% de superficie horizontal</i>	<i>Contribución al sensor (%)</i>
SE	C3	5	7.4
SE	IC	10	7.4

En este caso, la altura del tipo de cubierta de instalaciones culturales (IC) es de 3 pisos, mientras que la altura del tipo comercial 3 (C3) es de 7 a 9 pisos, pero cubre una menor extensión de superficie horizontal: la mitad que el tipo IC.

### **5.3.2 Tipificación del Uso de Suelo Alrededor de la Estación Preparatoria 7, Ciudad de México**

La Figura 5.2 muestra la superficie de cada tipo de cubierta alrededor de la estación Preparatoria 7. Tanto la descripción de los tipos de cubierta como el porcentaje de aportaciones para cada tipo de cubierta se muestran en las Tablas 5.6 y 5.7. Para la Preparatoria 7, en la gran mayoría de los casos la extensión horizontal del tipo de cubierta se corresponde también con el porcentaje de aportación debido a que, principalmente, la presencia de edificios altos en la zona es muy escasa y, en consecuencia, los cañones urbanos son poco profundos. La contribución al sensor se debe más a la extensión horizontal que a la rugosidad.

Los resultados obtenidos con este método en cada sector del viento, donde se pueden apreciar los porcentajes de aportaciones de cada uso de suelo o tipo de cubierta, podrán ser comparados a los resultados que se obtendrán con los modelos de área fuente, tanto del radiómetro neto como de las áreas fuente de los flujos turbulentos.



**C** = Comercial

**CH** = Comercial/  
Habitacional

**HC** = Habitacional/  
Comercial

**CO** = Comercial/  
Oficinas

**AV** = Áreas verdes

**ESC** = Escuela

**PL** = Plaza

**ESV** = Estación de  
Servicio

**Ave** = Avenidas

**Fig. 5.2** Usos de suelo en un kilómetro de radio alrededor de la Preparatoria 7  
Características de los subtipos se pueden observar en la Tabla 5.6.

**Tabla 5.6** Descripción de los tipos de cubiertas que se consideraron para el cálculo de los porcentajes de aportaciones a los sensores de balance energético. Las letras y números que corresponden al tipo de cubierta se pueden identificar en la Tabla 5.3.

Uso	C1	C3	CH	HC	CO1	CO2	AV	ESC	PL	Ave	ESV
Altura en pisos	1-3	1-3	1-3	2	4-6	7-10	0	3-4	0	0	2
% lote cubierto	90	80	90	85	90	90	<70	70	90	90	40
% vegetación en el lote	<5	<5	<5	<5	<5	<5	90	15	10	1	0
# construcciones vecinas que toca	2	2	2	2	1	1	0	1	0	0	1
Peso	2.95	2.65	2.7	1.9	4.4	6.9	2.4	3.45	2.8	2.6	2.4
Distancia a la calle (m)	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	5	5	0	5
%ventana fachada	abierto	20	20-30	30	30	30	0	30	0	0	0
Materiales y color	Cc y lámina	Cc y lámina	Cc	Cc	Cc	Cc	0	Cc	claro	oscuro	claro

Cc = concreto claro

**Tabla 5.7** Porcentaje de aportaciones por cada tipo de cubierta en 1 km. Alrededor de la estación ubicada en la Preparatoria 7 para ocho rumbos de viento dominante.

Tipo/sector	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
C1	45.2	46.1	0	0	15.5	0	0	11
C3	0	0	0	0	0	6.4	14.2	0
CH	51.8	37.3	33.3	0	23.6	0	41.5	78
HC	0	0	20.7	76.7	47.8	54.9	2.4	0
CO1	0	0	0	0	0	0	11.1	0
CO2	0	0	0	0	0	28.1	8.7	0
CO3	0	0	0	0	0	0	8.3	0
ESC	0	6.1	7.5	8.5	9	5.2	2.2	0
PL	0	0	0	0	0	2.5	8	0
ESV	0	0	0	0	2.1	0	0	2.7
Ave	3	2	2	3	2	3	2	3
AV	0	8.5	36.6	0	0	0	1.5	5.3

#### 5.4 EL ÁREA FUENTE DEL RADIÓMETRO NETO

Como se vio en capítulos anteriores, la radiación neta ( $Q^*$ ) es la diferencia entre la radiación de onda corta ( $\downarrow R_S$ ) y de onda larga ( $\downarrow R_L$ ) recibidas, con la radiación de onda corta ( $\uparrow R_S$ ) y de onda larga ( $\uparrow R_L$ ) reflejadas y emitidas por la superficie:

$$Q^* = \downarrow R_S - \uparrow R_S + \downarrow R_L - \uparrow R_L \quad 5.3.a$$

En las áreas urbanas, la radiación de onda corta incidente ( $\downarrow R_S$ ) se ve alterada por su paso a través de la atmósfera contaminada. En una ciudad como México, la radiación de onda corta incidente es, en promedio, de un 10% a un 20% menor que en las áreas rurales circundantes (Jáuregui y Luyando, 1999). Pero, aunque  $\downarrow R_S$  en conjunto disminuye, la mayor difusión y reflexión por los contaminantes hace que aumente la proporción que llega como radiación difusa.

Con respecto a la radiación de onda larga ( $R_L$ ), las diferencias entre los valores de las áreas urbanas y de las rurales son pequeñas. La pérdida de  $R_L$  es mayor en la ciudad respecto a las áreas rurales en el periodo nocturno, porque el área urbana está más caliente que los alrededores.

En términos más específicos,  $Q^*$  se puede escribir como:

$$Q^* = (1 - \alpha) Q_g - \epsilon \sigma T_s^4 \quad 5.3.b$$

donde  $\alpha$  es el albedo,  $Q_g$  es la radiación solar global,  $\epsilon$  es la emisividad de la superficie,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ), y  $T_s$  es la temperatura de superficie.

La radiación neta ( $Q^*$ ) en el caso de las campañas de Preparatoria 7 y Barcelona, se midió por medio de un radiómetro neto, un instrumento que permite evaluar la radiación de forma directa, es decir, mide la radiación de onda corta y de onda larga, evaluando hemisféricamente el flujo neto de la radiación a través del plano horizontal.

### 5.4.1 El Radiómetro Neto

La Figura 5.3 muestra la colocación geométrica de un radiómetro neto sobre una superficie plana horizontal (Schmid, 1997b). Un área diferencial de superficie  $dA$  es vista por el radiómetro en la altura  $Z_m$ , a un ángulo nadir  $\theta$ . El radio,  $r$ , es la distancia horizontal de  $dA$  con respecto al punto nadir, donde  $R = [r^2 + Z_m^2]^{1/2}$  es la distancia al radiómetro. El ángulo azimutal alrededor del eje nadir se indica como  $\phi$ .

El hemisferio inferior del radiómetro neto está expuesto hacia la superficie, y su área visual está afectada por los obstáculos (edificaciones, árboles, etc.) en función de la altura a que esté colocado el sensor. Su campo visual es un ángulo de  $85^\circ$  con respecto a la vertical en todas direcciones, lo que le permite capturar el 99% de las contribuciones de la radiación emitida por la superficie (Anthoni *et al.*, 2000).

En la Figura 5.4 se muestra la parte inferior del radiómetro neto, donde el nivel del área fuente  $P$  es el radio de la proyección del área fuente dentro del hemisferio bajo y dentro del plano del radiómetro ( $A\Omega$ ), a la proyección del hemisferio completo dentro del plano del radiómetro ( $AH$ ).

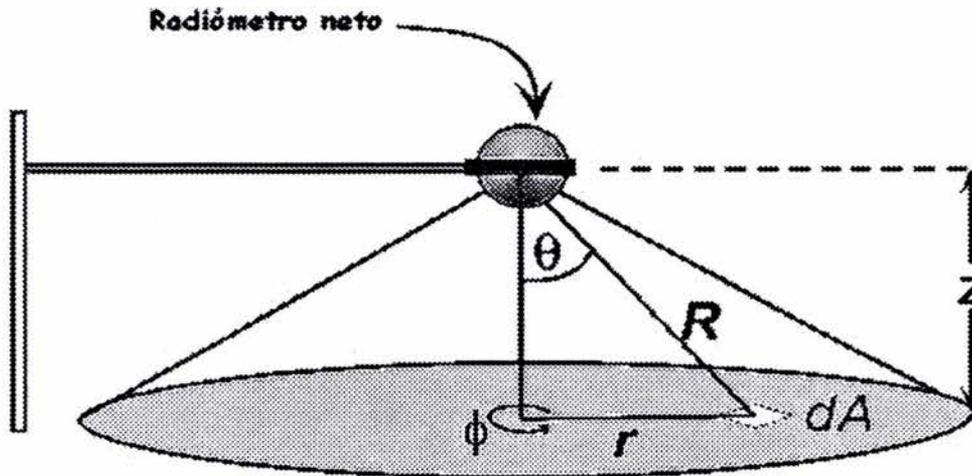


Figura 5.3 Ángulo visual inferior y cobertura del radiómetro neto (Schmid, 1997b).

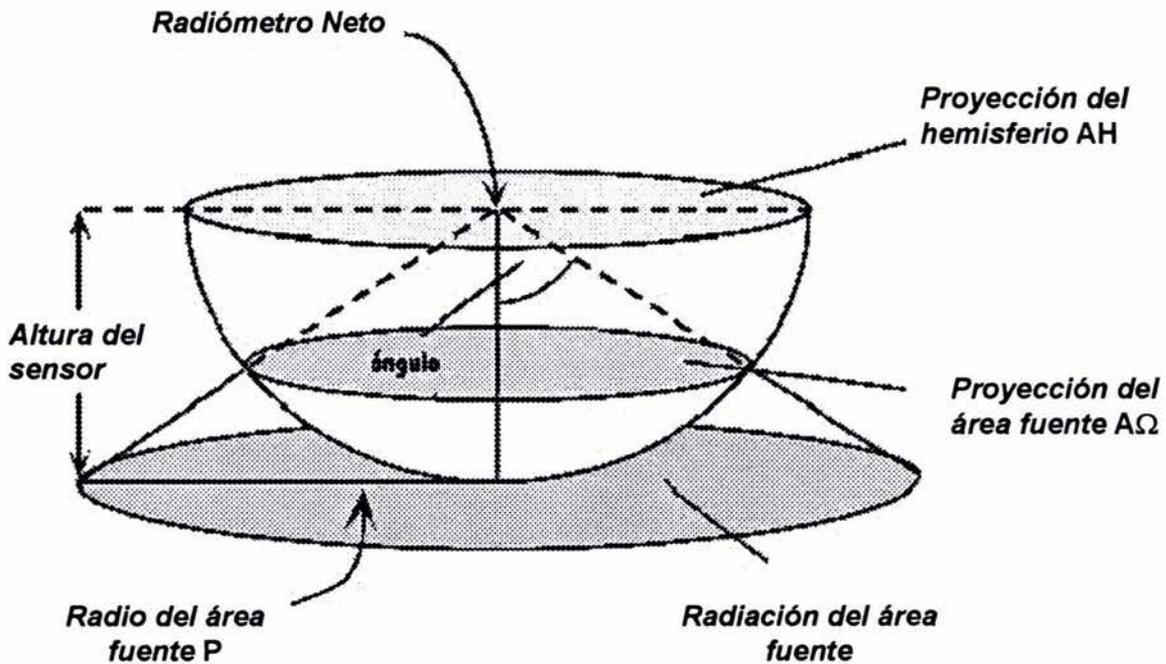


Figura 5.4 Geometría del área fuente y campo visual inferior del radiómetro (Schmid, 1997b).

#### 5.4.2 Estimación del Área Visual Inferior del Radiómetro Neto

El área visual inferior del radiómetro neto lo calcula Nava (2003) considerando, en primera instancia, un ángulo de  $85^\circ$  alrededor de la vertical, de modo que el radio máximo en la horizontal será  $R_{max1}$ :

$$R_{max1} = (\tan 85^\circ) h \quad 5.4$$

donde  $h$  es la altura a la que se colocó el sensor. Puesto que hay obstáculos entre el suelo o la calle y el radiómetro neto, es necesario considerar una altura efectiva ( $h_{efectiva}$ ), calculada por:

$$h_{efectiva1} = h - hd_1 \quad 5.5$$

donde  $hd_1$  es la altura de desplazamiento calculada para el radio máximo  $R_{max1}$  como:

$$hd_1 = (\sum h_i A_i) / (\sum A_i) \quad 5.6$$

$A_i$  es el área horizontal de cada elemento de uso de suelo (edificio, calle, parque, etc.), y  $h_i$  la altura de cada elemento con respecto a la superficie base (calle, por ejemplo).

Entonces, a partir de la altura efectiva inicial ( $h_{efectiva_1}$ ) se recalcula el radio ( $R_{max_2}$ ):

$$R_{max_2} = \tan 85^\circ h_{efectiva_1} \quad 5.7$$

Si el valor absoluto  $|R_{max_2} - R_{max_1}|$  es menor o igual a la mínima medición posible de  $r$  en el mapa igual a  $\delta r$ , entonces:

$$R_{max_{final}} = (R_{max_2} + R_{max_1}) / 2 \quad 5.8$$

$\delta r$  está en función de la escala del mapa, la agudeza visual y la calidad del mapa, entre otros parámetros.

Si  $|R_{max_2} + R_{max_1}| > \delta r$ , entonces se debe calcular:

$$h_{efectiva_2} = h - h_{d_2} \quad 5.9$$

Ahora  $h_{d_2}$  se evalúa en un radio de  $R_{max_2}$ .

Después se procede a evaluar:

$$R_{max_3} = \tan 85^\circ h_{efectiva_2} \quad 5.10$$

y se sigue el proceso hasta que:

$$|R_{max_j} - R_{max_{j+1}}| \leq \delta r \quad 5.11$$

y entonces

$$R_{final} = (R_{max_j} - R_{max_{j+1}}) / 2 \quad 5.12$$

Los cálculos anteriores son válidos en el caso de que las condiciones de la superficie en cualquier dirección alrededor del sensor sean aproximadamente las mismas. De no ser así, se deberá de aplicar el proceso anterior, pero por sectores de la rosa de vientos más o menos homogéneos (Nava , 2003).

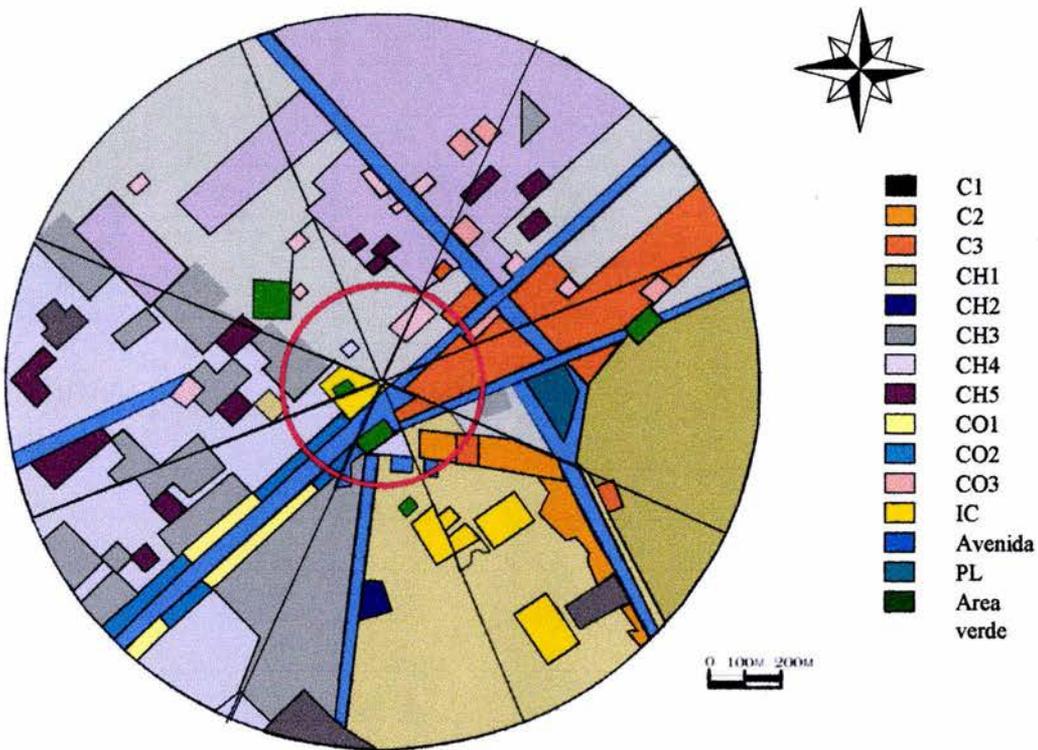
### 5.4.3 Cálculo del Área Visual del Radiómetro Neto Para Barcelona

Para evaluar el área visual del radiómetro neto de la campaña que se llevó a cabo en Barcelona en junio del 2001, se aplicó la ecuación 5.1 tomando un radio inicial de 500 m con una altura de colocación del sensor de  $h = 41$  m. Después se aplicó el procedimiento señalado en la sección anterior. El área de cada elemento de uso de suelo fue cuantificada a partir de la Figura 5.1. Como se puede ver en la Tabla 5.8, en la segunda iteración se observó una solución satisfactoria según el criterio de que  $|R_{\max j} - R_{\max j+1}| \leq \delta r$ , con  $\delta r = 10$  m, que es la resolución que permite la Figura 5.1. De este modo, el  $R_{\max \text{final}}$  que resultó de los cálculos es de 293.6 m, con una altura de desplazamiento ( $h_d$ ) de 15.3 m (Figura. 5.5).

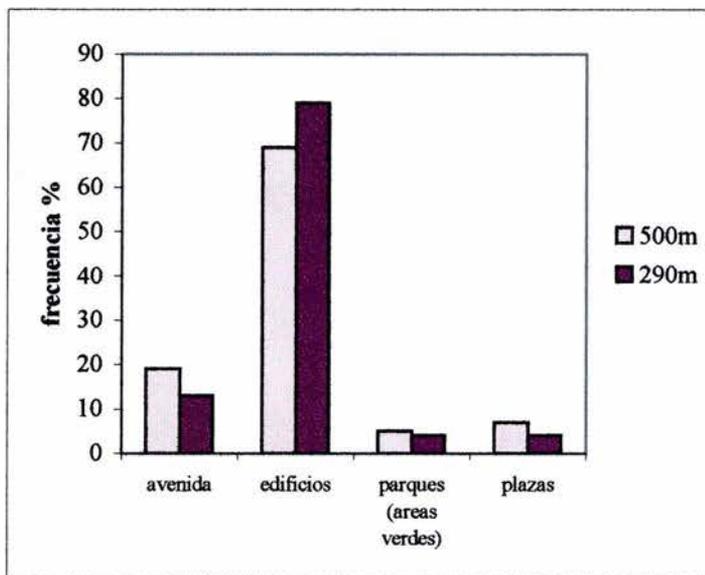
En la Figura 5.6 se muestra un histograma de uso del suelo para radios de 500 m y 290 m. En ambos casos, los edificios tienen una frecuencia mayor que los otros usos de suelo: la presencia de avenidas es menos importante en el radio de 290 m, aunque con relativa poca diferencia. La presencia de parques y plazas es mínima. Ambas áreas comprendidas en los distintos radios son semejantes (una está contenida en la otra) pero queda claro que la diferencia restante es homogénea con respecto al área más cercana al sensor y que la altura de los edificios es también similar (ver Fig. 5.1 y Tabla 5.4 de tipos y características de cubierta). La disminución del radio visual inferior en un 42% con respecto al tomado inicialmente (de 500m a 290m) indica la predominancia de un porcentaje elevado de edificaciones a pesar de la altura considerable en que se colocó el sensor (41 m sobre la calle) pues, a mayor altura de colocación del instrumento, mayor debería ser el radio visual, esto por tratarse de un área rodeada de edificios.

Tabla 5.8 Resultados de los cálculos realizados para Barcelona (junio de 2001) para la estimación del área visual inferior del radiómetro neto (Nava, 2003).

Paso en la iteración	Radio inicial (m)	$R_{\max}$ calculado (m)	Altura de desplazamiento $h_d$ (m)
1	500	288.7	15.7
2	290	293.6	15.3



**Figura 5.5** Usos del suelo a 1 kilómetro de radio de la Universidad de Barcelona y radio calculado (293 m, círculo rojo) del radiómetro neto.



**Figura 5.6** Histograma de usos de suelo para un radio visual inferior del radiómetro neto de 500 m y 290 m (Barcelona, junio de 2001).

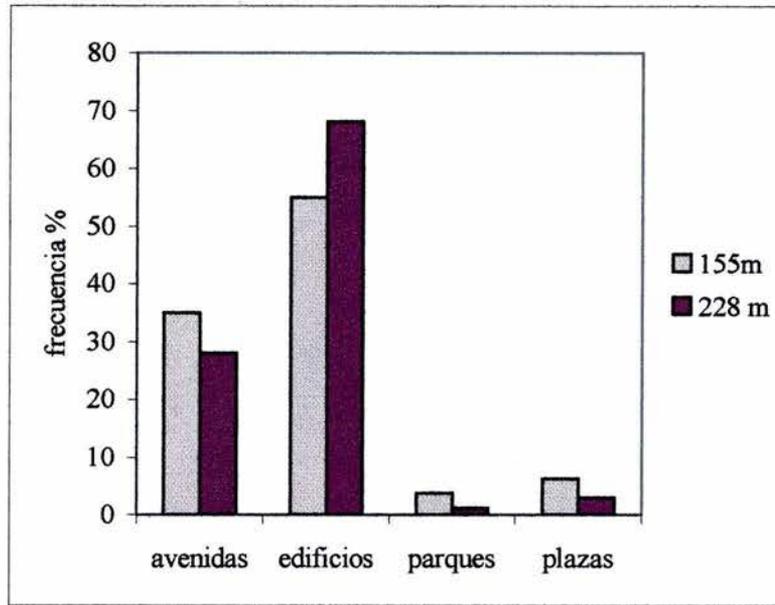
#### 5.4.4 Cálculo del Área Visual del Radiómetro Neto para Preparatoria 7, D.F.

El área visual inferior del radiómetro neto en la campaña de Preparatoria 7 (diciembre de 1998) se calculó aplicando el procedimiento antes mencionado, partiendo de un radio inicial de 210 m y una altura de colocación del instrumento (**h**) de 20 m sobre el nivel de la calle, tomando el área de cada elemento de uso de suelo a partir de la Figura 5.2. En la Tabla 5.9 se observa cómo la tercera iteración muestra una solución satisfactoria tomando en cuenta que  $|R_{\max j} - R_{\max j+1}| \leq \delta r$ , con  $\delta r = 18$  m, que es la resolución que permite la Figura 5.2. De este modo, el  $R_{\max final}$  resultante es de 155 m, con una altura de desplazamiento ( $h_d$ ) de 6.4 metros. También para esta estación se elaboró un histograma (Figura 5.7) para mostrar gráficamente las posibles diferencias en cuanto a uso del suelo, tomando en cuenta radios diferentes.

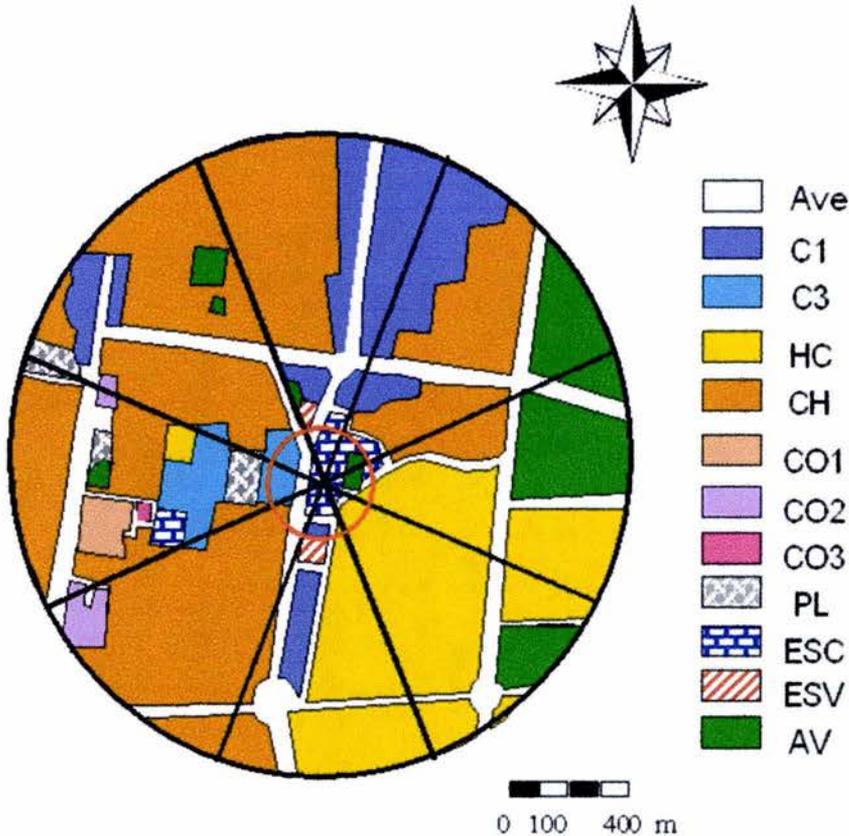
Tomando como base la Fig. 5.2, que muestra el área alrededor de la estación Preparatoria 7, y también a la Fig. 5.7 con el histograma de usos de suelo, se puede observar cómo los dos radios (el inicial de 228 m y el final de 155m) muestran frecuencias semejantes en cuanto a la mayor proporción de edificios. Sin embargo, la parte correspondiente a avenidas adquiere importancia. El radiómetro neto en los sectores suroeste, oeste y noroeste está viendo a 155m, en una gran parte de la calzada de La Viga, una avenida ancha y de importancia por el continuo flujo vehicular (Figura 5.8). La disminución del radio visual inferior con respecto al radio inicial (de 228 m) es de 32%, un radio que podría considerarse corto a pesar de la poca altura de las edificaciones que hay alrededor y de la presencia importante de avenidas anchas en las cercanías. Cabe recordar que, a mayor altura de colocación del sensor, mayor debería ser el radio visual.

Tabla 5.9 Resultados de los cálculos realizados en Preparatoria 7 (diciembre de 1998) para la estimación del área visual inferior del radiómetro neto.

Paso en la iteración	Radio inicial (m)	$R_{\max}$ calculado (m)	Altura de desplazamiento $h_d$ (m)
1	228.6	154.3	6.5
2	154.3	155.4	6.4



**Figura 5.7** Histograma de usos de suelo para un radio visual inferior del radiómetro neto de 500 m y 155 m (Preparatoria 7, Cd. de México, diciembre de 1998).



**Figura 5.8** Usos del suelo alrededor de la estación Preparatoria 7 con el radio calculado del radiómetro neto (círculo rojo) de 155 m.

## 5.5 EL ÁREA FUENTE DEL ANEMÓMETRO SÓNICO E HIGRÓMETRO DE KRYPTÓN

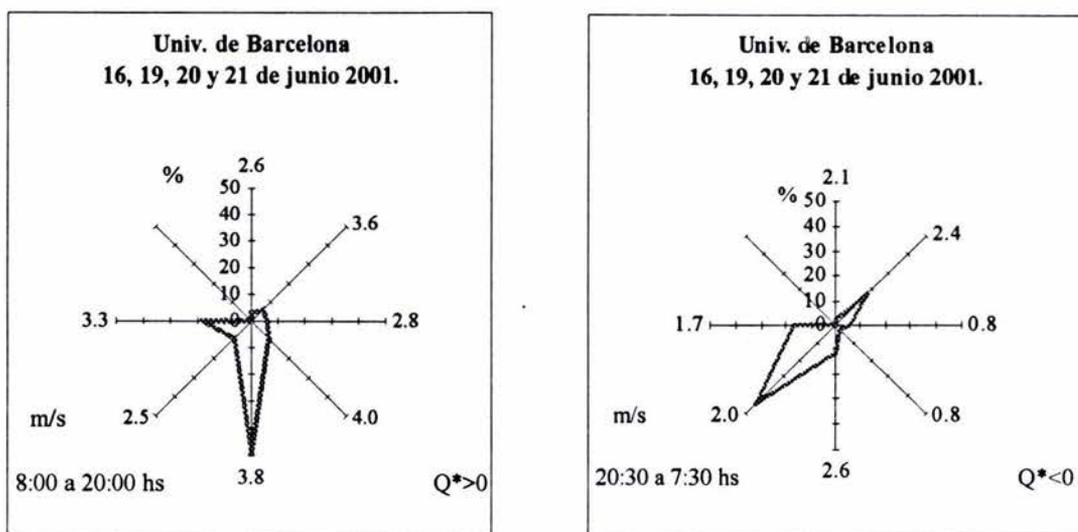
En los casos de las campañas llevadas a cabo en Barcelona y Preparatoria 7, ciudad de México, los flujos verticales de calor sensible ( $Q_h$ ) y calor latente ( $Q_e$ ) fueron medidos con un anemómetro sónico asociado a una termocupla y a un higrómetro de kryptón colocados en una torre a alturas y en condiciones ya mencionadas anteriormente en el capítulo 3. Las áreas fuente de los flujos turbulentos no pueden medirse directamente, sólo se calculan y, a diferencia del área fuente de los flujos radiativos (área fuente del radiómetro neto), donde está fija en el tiempo y por el campo de visión de los instrumentos (por la geometría), el área fuente de los flujos turbulentos no está fija y varía a través del tiempo.

### 5.5.1 El Viento: Elemento Fundamental Para el Cálculo de las Áreas Fuente

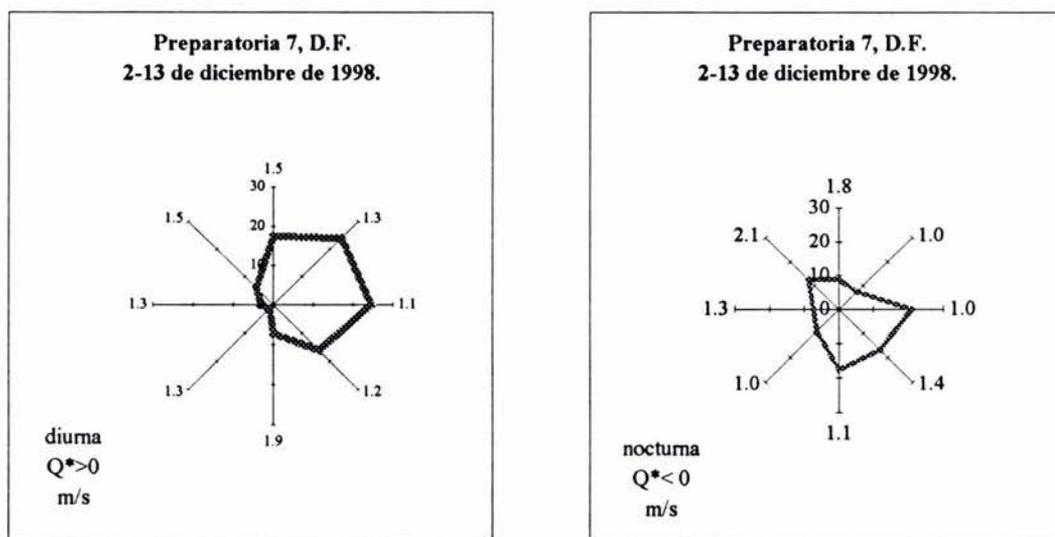
Los límites en un área fuente o área de influencia de flujos turbulentos ( $Q_h$  y  $Q_e$ ) viento arriba, viento abajo y laterales con respecto a la ubicación del sensor, dependen de las características del viento en la capa entre la superficie y el nivel del sensor. En el caso del área fuente del radiómetro neto, donde lo que se calcula es el área que el sensor ve para determinar ( $Q^*$ ), el viento no es un elemento que intervenga en las mediciones: incluso el instrumento se protege por medio de un hemisferio de vidrio que permite el paso de la radiación, pero evita el enfriamiento (Campbell Scientific, Inc., 1996).

Conocer cuáles son las direcciones del viento más frecuentes es conocer qué áreas son las que los sensores están midiendo, es decir, sobre qué superficies se está obteniendo la mayor parte de los datos que se registran.

Para tener conocimiento de las áreas que más influencia ejercen en las mediciones de balance energético de Universidad de Barcelona y de Preparatoria 7, ciudad de México, ha sido preciso elaborar las rosas de viento correspondientes a los días en que se llevaron a cabo las campañas. Las rosas de viento que se muestran a continuación (Figuras 5.9 y 5.10) corresponden a la dirección y rapidez del viento en periodo diurno y nocturno, cuando la radiación neta ( $Q^*$ ) fue mayor y menor que cero, respectivamente.



**Figura 5.9** Rosas de viento de la Universidad de Barcelona para el periodo diurno ( $Q^* > 0$ ) y nocturno ( $Q^* < 0$ ), para los días de la campaña de mediciones.



**Figura 5.10** Rosas de viento para Preparatoria 7, D.F., durante el periodo diurno ( $Q^* > 0$ ) y nocturno ( $Q^* < 0$ ), para los días de la campaña de mediciones.

Como se puede observar, Barcelona muestra durante el periodo diurno una predominancia de viento del sur por efecto de la brisa del mar y, por la noche, del suroeste como brisa de tierra. La intensidad del viento se reduce considerablemente por la noche con respecto a los valores en el periodo diurno. Sin duda, los efectos de la cercanía del mar en una ciudad como

Barcelona deben presentarse con frecuencia; sin embargo, el cálculo de las áreas fuente mostrará si la presencia del mar influye en las mediciones del balance energético o las mediciones son sólo representativas de los flujos sobre el área urbana.

En el caso de Preparatoria 7, el viento no tiene predominio de una dirección en específico, siendo de día variable entre el norte y las componentes del este y, en la noche, del sur, este y sureste. La ventilación en la capital obedece tanto al influjo de los vientos locales (de valle y de montaña) como también a la circulación de los vientos a escala regional. Esta interacción entre uno y otro sistema de vientos produce una gran variedad de tipos de circulación en la ciudad (Jáuregui, 2000). La rapidez del viento es débil, como se puede observar en la Figura 5.9, como usualmente se presenta en el Centro Histórico de la Ciudad de México, excepto durante los vendavales (Jáuregui, 2000). La ciudad, como se ha mencionado en el capítulo 2, desalienta la circulación del viento (ver Tabla 2.1).

Después de conocer el viento dominante durante los días de campaña, se tomarán en cuenta, para cada sector del viento, las mediciones de los flujos simultáneamente con las características del viento. El conocimiento del balance energético por sectores (Tablas 5.10 y 5.11) nos ayudará a constatar más adelante si el área fuente calculada (y que supone el área que está ejerciendo influencia en los sensores y de la cual se conocen sus características de uso de suelo) se corresponde con los datos obtenidos.

En Barcelona, durante el día hay un predominio de viento del sur (49%), proviniendo de una gran parte de la ciudad vieja, con características de calles angostas y escasa vegetación. Casi la mitad del tiempo de observaciones se está obteniendo información de este sector del viento. Los datos del balance son coherentes si se observa el tipo de superficie: una  $Q_s$  (calor retenido por la superficie) elevada, y una  $Q_h$  (energía para calentar el aire) mayor que la  $Q_e$  (calor latente de vaporización) por la escasa vegetación.

En el caso de Preparatoria 7, los vientos dominantes durante el día son los de la componente del este, las mayores frecuencias se encuentran repartidas en cuatro direcciones principalmente. Los resultados del balance pueden considerarse coherentes (sobre todo hacia el este y sureste) aunque, por las características de la superficie, lo más lógico hubiese sido esperar una  $Q_e$  (calor latente de vaporización) mucho menor dada la escasa vegetación, como se puede observar en la Tabla 5.6 y en la distribución de estos usos del suelo en la Figura 5.2.

**Tabla 5.10** Elementos del balance energético por sectores para la Universidad de Barcelona, simultáneamente a la frecuencia del viento.

Universidad de Barcelona

Sector	<i>Diurno <math>Q' &gt; 0</math></i>				<i>Nocturno <math>Q' &lt; 0</math></i>			
	$Q_h$ W/m <sup>2</sup>	$Q_e$ W/m <sup>2</sup>	$Q_s$ W/m <sup>2</sup>	Frecuencia del viento %	$Q_h$ W/m <sup>2</sup>	$Q_e$ W/m <sup>2</sup>	$Q_s$ W/m <sup>2</sup>	Frecuencia del viento %
N	214.2	-458.1	483	2	-85	8.2	-6.1	1
NE	126.3	45.9	77.6	6	25.5	-11.3	-86.7	20
E	189.5	34.5	199.6	6	10.5	-9.4	-75.3	6
SE	202.9	7.6	422.2	9	11.3	-4.5	-71.9	2
S	141.4	15.8	248	49	21.8	22.7	-109.9	9
SW	96.7	37.5	210.8	11	11.4	17.5	-102.2	46
W	95.2	22.8	252.3	18	2.4	-0.5	-78	16
NW	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tabla 5.11** Elementos del balance energético por sectores para Preparatoria 7, D.F., simultáneamente a la frecuencia del viento.

Preparatoria 7, Cd. de México

Sector	<i>Diurno <math>Q' &gt; 0</math></i>				<i>Nocturno <math>Q' &lt; 0</math></i>			
	$Q_h$ W/m <sup>2</sup>	$Q_e$ W/m <sup>2</sup>	$Q_s$ W/m <sup>2</sup>	Frecuencia del viento %	$Q_h$ W/m <sup>2</sup>	$Q_e$ W/m <sup>2</sup>	$Q_s$ W/m <sup>2</sup>	Frecuencia del viento %
N	89.6	32.6	153.8	17.5	-1.9	14.3	-84.2	8.7
NE	90.5	26.9	121.8	24.0	4.0	5.4	-70.7	7.4
E	85.2	14.3	107.5	24.4	4.2	5.7	-77.4	20.7
SE	119.3	17.9	92.4	16.1	5.4	9.7	-89.7	16.6
S	152.9	13.5	13.1	7.4	24.5	5.0	-105.2	17.4
SW	102.5	18.2	133.9	1.4	1.3	3.0	-82.5	9.3
W	102.1	21.5	152.5	3.2	-1.1	2.2	-76.9	7.4
NW	114.2	38.9	136.4	6.0	19.7	5.9	-91.3	12.5

Más adelante se verá a qué áreas precisas de la superficie se están refiriendo las mediciones cuando, a través de un modelo, se hayan obtenido las dimensiones de las áreas fuente.

### **5.5.2 El Modelo de Schmid Para el Cálculo de las Áreas Fuente**

Mejor conocido como SAM (Source Area Model; Schmid, 1997a), este modelo estima el área fuente que contribuye al intercambio turbulento en la capa superficial sobre cubiertas que pueden llegar a ser heterogéneas. Básicamente se trata de un modelo que utiliza una distribución de probabilidad tipo gaussiana para trazar isopletras de acuerdo al nivel de la propiedad que se está midiendo. Al aplicar un modelo como éste, se obtienen áreas fuente en forma de elipses ponderadas o pesadas con dimensiones que están claramente en función de la altura del sensor, de la estabilidad y de la rugosidad de la superficie. Las contribuciones de los elementos de la superficie son tratados como "plumas" de calor o vapor, por lo que el autor del modelo se ha basado en teorías y modelos de difusión de pluma para estimar el área fuente, dependiendo de la escala de los parámetros meteorológicos y del lugar de referencia. Este modelo identifica el lugar de "máximo efecto de la fuente" y las dimensiones viento arriba, viento abajo y laterales de regiones que contienen varios niveles del efecto total de la contribución.

La elección de un modelo de difusión de pluma es básico porque contiene toda la física y las parametrizaciones de la capa límite que se reflejan en los resultados del área fuente. Este modelo se utiliza en forma invertida, es decir, el área fumigada calculada se convierte en el área de influencia y la fuente puntual de emisiones, en el sensor. El modelo de pluma define a cualquier nivel el campo de concentraciones de una fuente de puntos continuos. Consecuentemente, la concentración puede ser determinada para cualquier punto una vez que los parámetros meteorológicos han sido definidos.

#### **Datos de Entrada del Modelo SAM 2 win**

Las propiedades meteorológicas del lugar de medición, que son las variables de entrada para correr el modelo, son:

**Velocidad de fricción ( $u^*$ ):** Es la velocidad mínima necesaria para que el viento rompa la resistencia de la rugosidad de la superficie (Jacobson, 1999). Puede calcularse por medio de:  $u^* = \sqrt{-\text{cov}(v, w)}$ , donde  $v$  es la magnitud del viento en la horizontal,  $w$  es la magnitud del viento en la vertical, y  $\text{cov}$  es la covarianza.

**Altura de rugosidad ( $Z_0$ ):** Se define como la altura por debajo de la cual la velocidad del viento es cero (Stull, 1988). Se calcula con la ecuación:  $Z_0 = (h - h_d) / \exp(k v/u^*)$ , donde  $h$  es la altura del sensor,  $h_d$  es la altura de desplazamiento (calculada para el radio del radiómetro neto),  $k$  es la constante de Von Karman (0.4),  $v$  es la rapidez del viento en la horizontal, y  $u^*$  es la velocidad de fricción.

**Longitud de Monin-Obukhov ( $L$ ):** Es la altura sobre una superficie donde la turbulencia, por flotación, empieza a dominar a la turbulencia producida mecánicamente. Con esta metodología se puede estimar la altura de la capa límite superficial, es decir, la capa de aire que está afectada por la interacción con la superficie (Jacobson, 1999). Se calcula como:

$L = -(\rho C_p T u^{*3}) / (k g Q_h)$ , donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $C_p$  es el calor específico del aire a presión constante (1004 J/ kg K),  $T$  es la temperatura en K;  $u^*$  es la velocidad de fricción,  $k$  es la constante de Von Karman,  $g$  es la aceleración de la gravedad (9.8 m/s<sup>2</sup>), y  $Q_h$  es el flujo turbulento de calor sensible.

Además, también como dato de entrada, se necesita conocer la desviación estándar de la magnitud del viento horizontal entre la velocidad de fricción ( $\sigma v / u^*$ ).

El modelo se puede obtener en la dirección de internet de la Universidad de Indiana ([http:// www.indiana.edu/~climate/SAM/model/](http://www.indiana.edu/~climate/SAM/model/); Schmid, 1997a).

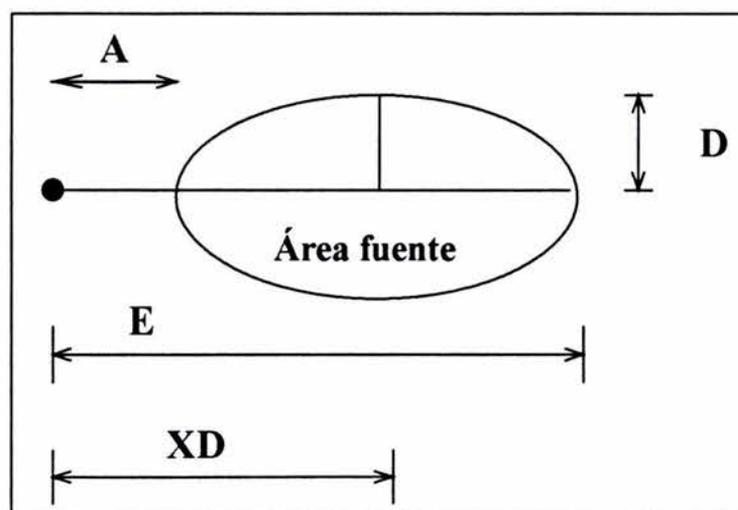
Este modelo requiere que los datos de entrada anteriores se encuentren entre ciertos valores (Tabla 5.12). De no ser así, se modifica el dato al valor más cercano y, de esa manera, puede correr sin que marque como dato irreal. Estas condiciones y las características de entrada y salida del modelo las establecen Schmid y Oke (1981), en un artículo referente a la utilización del modelo para estimar el área fuente sobre superficies heterogéneas.

**Tabla 5.12** Intervalos de entrada del modelo SAM\_2win (Schmid y Oke, 1981).  
Aquí,  $h$  es la altura de colocación del sensor y  $\sigma v$  es la desviación estándar de la magnitud del viento horizontal.

Variables	Límite inferior	Límite superior
$h$ (m)	2.0	64
$Z_0$ (m)	0.005	0.8
$-L$ (m)	5	5,000
$\Sigma v/u^*$	1	6

### Datos de Salida del Modelo SAM 2 win

Los datos de salida del modelo están conformados en una tabla que contiene las características precisas para dibujar la elipse, es decir, el área fuente según los datos de entrada que se le hayan dado y en la dirección del viento indicada. El elemento de la tabla que se denomina *efecto* se refiere al porcentaje de captura del campo visual del instrumento, y va de diez en diez unidades. La columna de área da la superficie de la elipse (área fuente) en kilómetros cuadrados ( $\text{km}^2$ ). El resto de las columnas dan las coordenadas para poder dibujar la elipse (Fig. 5.11). En la figura,  $A$  es la distancia entre el sensor y el inicio de la elipse, es decir, el extremo más próximo del eje mayor al sensor;  $XD$  es la distancia desde el sensor hasta el centro de la elipse;  $E$  es la distancia desde el sensor hasta el extremo opuesto de la elipse; y  $D$  es el semieje menor de la elipse. Las dimensiones son dadas en metros.



**Figura 5.11** Coordenadas de la elipse o área fuente (Schmid y Oke, 1981).

### 5.5.3 Cálculo del Área Fuente del Anemómetro Sónico e Higrómetro de Kryptón Para las Campañas de Mediciones en la Universidad de Barcelona y Preparatoria 7

#### Barcelona

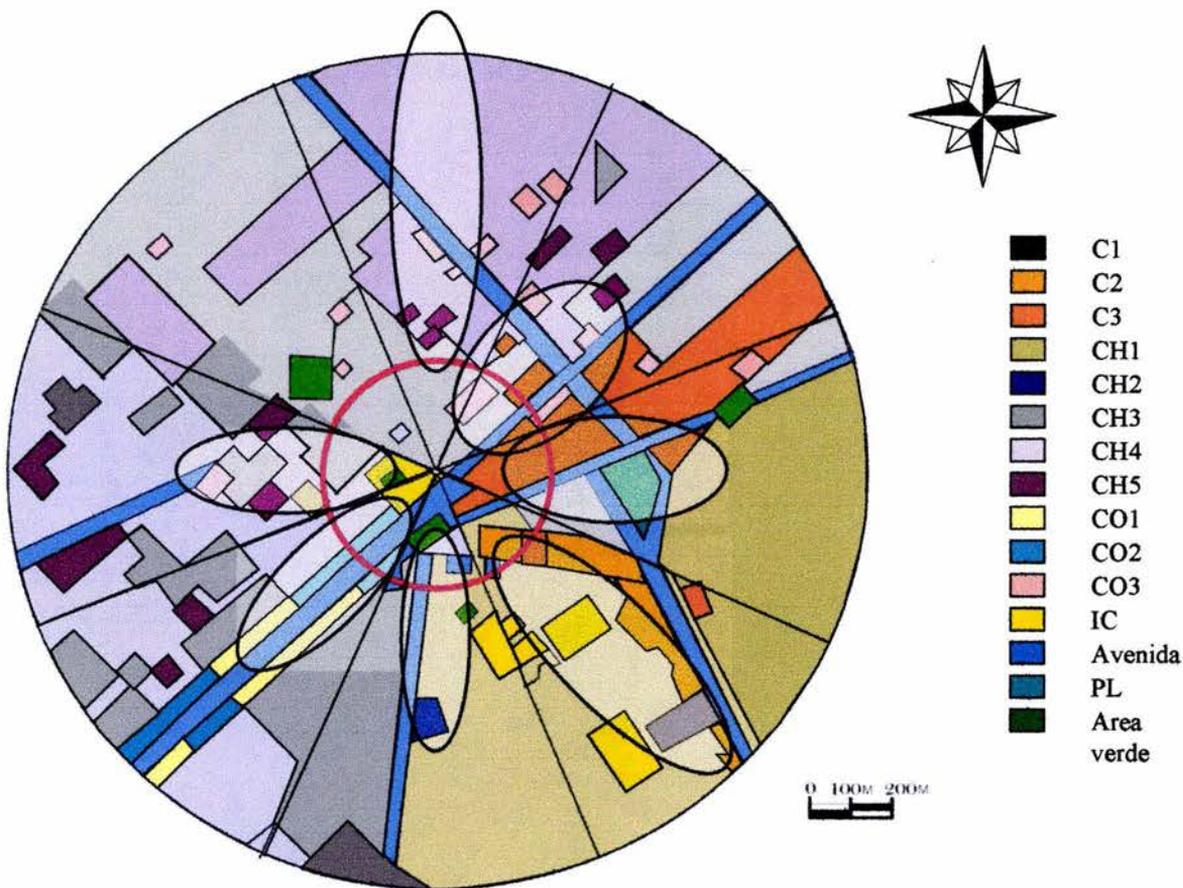
Con el modelo de Schmid (1997a) explicado anteriormente, se obtuvieron las áreas fuente correspondientes a los días de medición del balance energético en el edificio de la Universidad de Barcelona del 16 y 19 al 21 de junio del 2001, con datos promedio de cada 15 minutos para cada uno de los sectores de viento. Para ello, hubo que dar entrada al modelo con las variables presentadas en la Tabla 5.12. Algunos de los datos (N, NE, E, SE en  $\sigma v/u^*$ ; y N, SW, W en  $Z_o$ ) tuvieron que ser modificados según se especificó en la sección anterior, para quedar en los rangos que el modelo exige para poder realizar la simulación, adaptando el número original al extremo que más se acerque (Tabla 5.13). No hubo presencia de viento del noroeste en los días elegidos para el cálculo de las áreas fuente, por lo tanto no existe influencia de ese sector en las mediciones.

Tabla 5.13 Datos de entrada para el modelo SAM\_2 win correspondientes a la Universidad de Barcelona (16 y 19 al 21 de junio del 2001).

Altura del sensor: 41m

Rumbos del viento	L (m)	$\sigma v/ u^*$	$Z_o$ (m)
N	-65.62	6	0.005
NE	-314.9	6	0.604
E	-133.1	6	0.199
SE	-99.97	6	0.015
S	-255.64	3.25	0.40
SW	-779.54	3.47	0.8
W	-645.08	3.52	0.8
NW	-	-	-

Una vez aplicado el modelo con los datos de entrada de la Tabla 5.13, se obtienen las elipses para cada rumbo del viento y se elige el efecto indicado que encuentre una correspondencia con el área calculada para el radiómetro neto (ver Figura 5.5), es decir, se elige el área fuente (elipse) cuyas dimensiones se acerquen lo más posible al radio máximo calculado para el radiómetro neto. Los resultados se pueden observar en la Figura 5.12.



**C** = Comercial

**CH** = Comercial/  
Habitacional

**CO** = Comercial/  
Oficinas

**AV** = Áreas verdes

**PL** = Plazas

**IC** = Instalaciones  
culturales

**Ave** = Avenidas

**Figura 5.12** Área fuente del radiómetro neto (interior del círculo rojo) y áreas fuente del anemómetro sónico e higrómetro de kryptón (elipses) para la Universidad de Barcelona. La simbología del uso del suelo y de los subtipos se puede ver en la Tabla 5.4.

Los efectos elegidos son del 10% para todas las direcciones. Las elipses, todas, sobrepasan el límite del radio máximo del radiómetro neto, siendo la más alejada la correspondiente al norte, que incluso rebasa el kilómetro sugerido como área de mayor contribución. En algunas direcciones, la existencia de la porción de superficie que el radiómetro neto ve (área inmediata al sensor) y que el anemómetro sónico e higrómetro de kriptón no registran, es casi del tamaño del radio máximo, como es el caso del sector norte y en gran medida el sureste. Sin embargo, hay que considerar un elemento importante: si se observan las rosas de viento correspondientes a Barcelona de los días de mediciones (Figura 5.9) la frecuencia de viento del norte no llega siquiera al 2%, y en el sureste al 9%, siendo entonces de poca importancia el aporte que esos sectores representan en el balance energético atmosférico.

Haciendo un análisis comparativo entre el área fuente del radiómetro neto y las características de superficie que posee el área fuente de los flujos turbulentos, se obtiene que, a pesar de no contemplar la misma superficie (error calculado de  $0.076 \text{ km}^2$ ), el uso del suelo entre ellas guarda semejanzas suficientes para considerar áreas homogéneas en los dos tipos de áreas fuente. Esto se aprecia en la Figura 5.13, donde se hace un promedio de los porcentajes del uso de suelo de las elipses de todos los sectores del viento excepto del NW, de donde no se obtuvo influencia alguna por ausencia de viento de esa dirección.

El porcentaje de área construida con edificios y el porcentaje de avenidas en las elipses por sectores no dista mucho de la proporción que se tiene en el área fuente del radiómetro neto (Fig. 5.14). Cuando se toman en cuenta las alturas de las edificaciones, comparando el área fija del radiómetro neto y las elipses obtenidas con el modelo de Schmid, la proporción no siempre se conserva cuando se toman las elipses de forma aislada. El área fija contiene una variedad más amplia de usos del suelo y la proporción entre edificios altos y bajos es semejante (Fig. 5.15). Sin embargo, las áreas fuente de los flujos turbulentos (elipses) que no guardan esta proporción, al promediarse, resultan tener porcentajes semejantes al área fija.

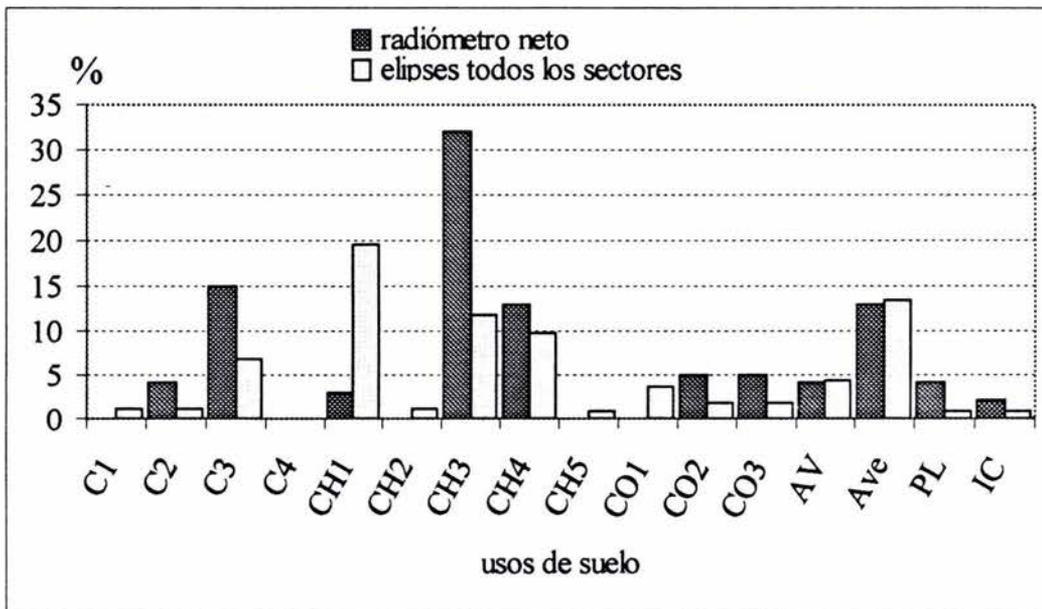


Figura 5.13 Porcentajes de uso de suelo para el radiómetro neto, en comparación con las áreas fuente del anemómetro sónico e higrómetro de krypton (promedio de todos los sectores del viento) para la Universidad de Barcelona. Las características de cada uso de suelo se pueden ver en la Tabla 5.4.

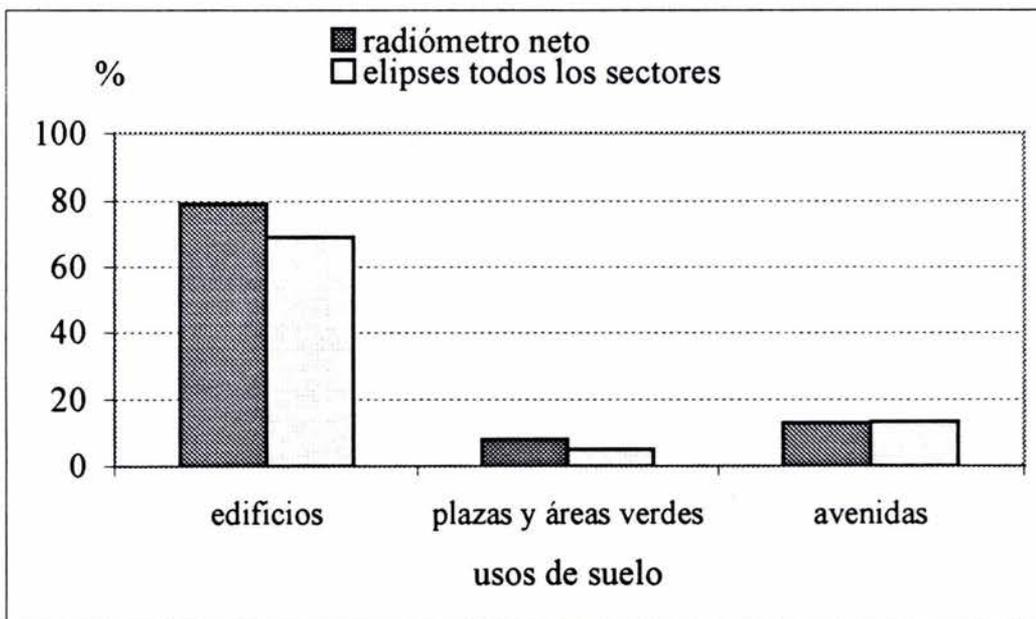


Figura 5.14 Porcentaje de edificios, zonas abiertas y avenidas para el radiómetro neto, en comparación con el promedio de las elipses de todas las direcciones para la Universidad de Barcelona.

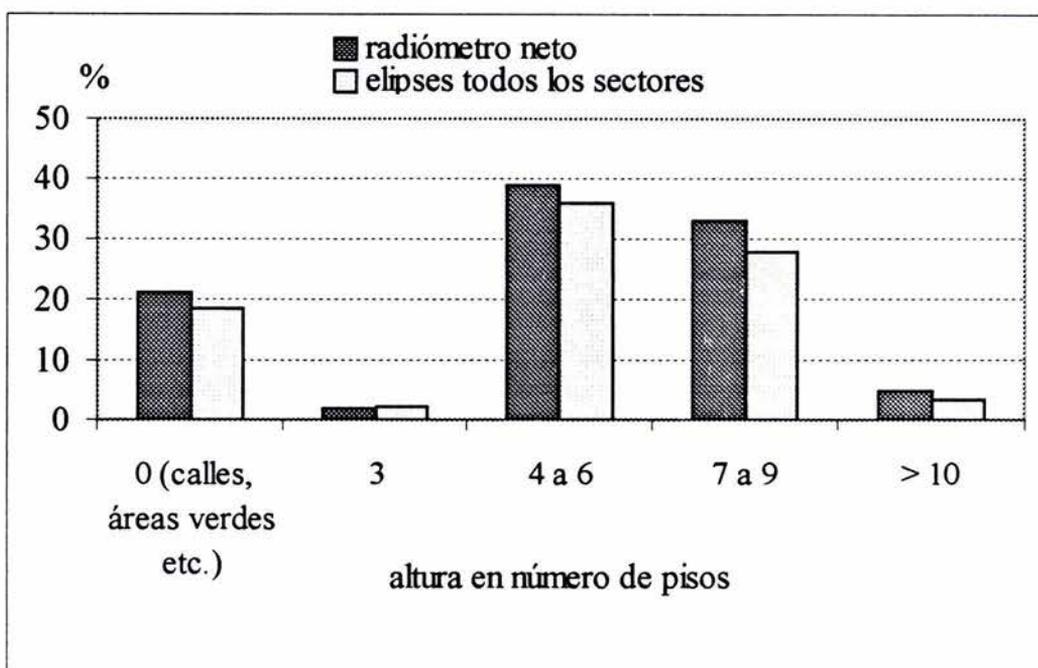


Figura 5.15 Alturas de los edificios en las áreas fuente calculadas para la Universidad de Barcelona (porcentaje de área que cubren) y comparación con el área fija del radiómetro neto.

Para que las mediciones de balance energético resulten representativas del área que se desea estudiar, cabría esperar que estén referidas a superficies que, dentro de la heterogeneidad por la existencia de una intermitencia entre edificios y calles, representen al fin y al cabo una superficie homogénea en su conjunto. En las mediciones llevadas a cabo en Barcelona, aunque las áreas fuente se extienden con diversas dimensiones muy lejos del radio máximo del radiómetro neto, las diferencias en los usos de suelo sobre los que se encuentran las elipses nos muestran diferencias marcadas. En este caso, podría considerarse que las mediciones de balance energético en la campaña de Barcelona son representativas de los usos de suelo que los instrumentos perciben. Sin embargo, no debe descartarse la sugerencia hecha por Schmid (1997b) en el sentido de que es necesario conocer cuáles son las áreas que los instrumentos registran antes de empezar la medición, si éstas son homogéneas y si la colocación de los sensores es la indicada para que las áreas fuente sean las mismas, en lo posible.

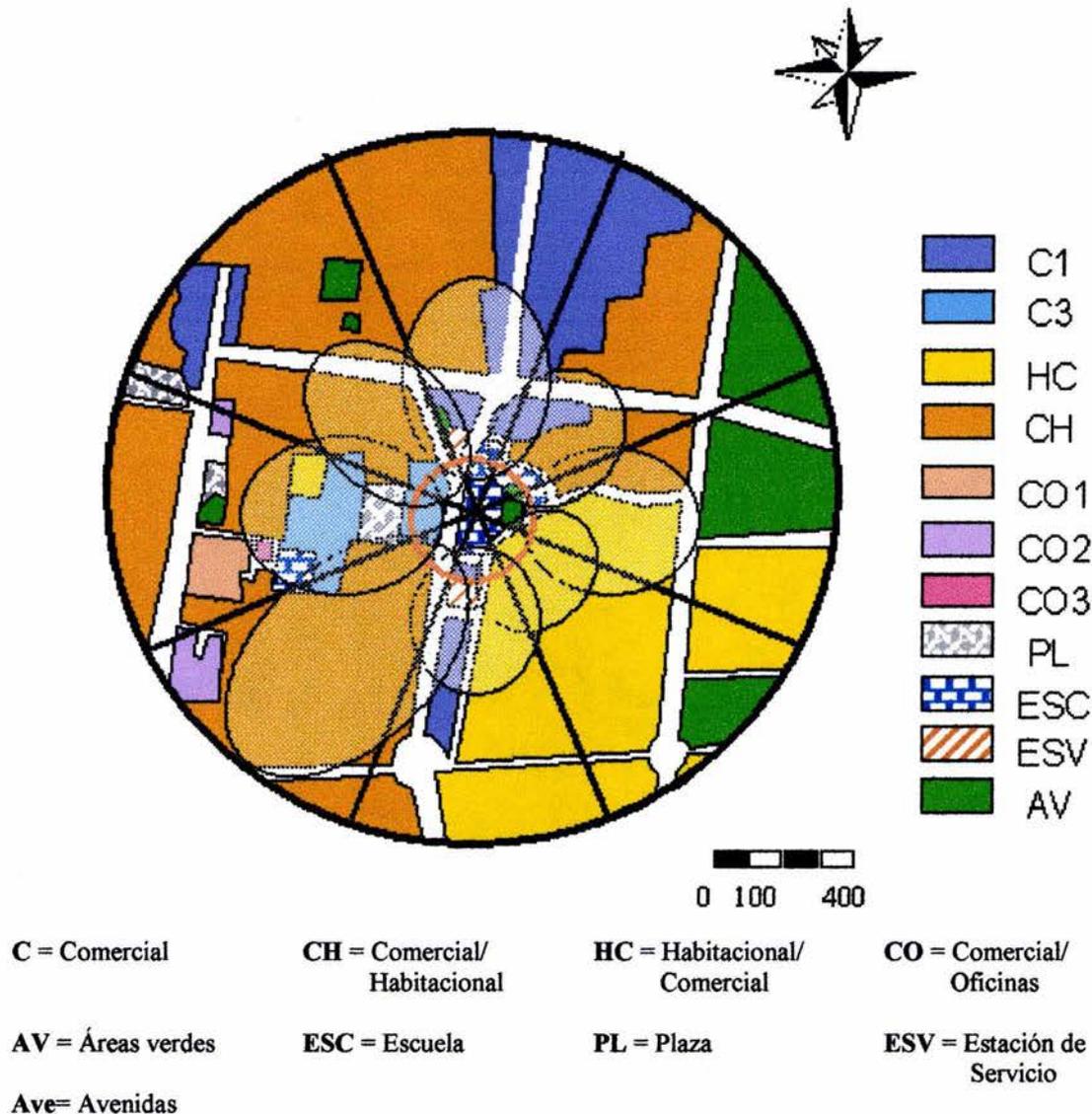
### **Preparatoria 7, Cd. de México**

Se obtuvieron las áreas fuente correspondientes a los días de medición del balance energético en el edificio de la Preparatoria 7, en el centro de la Ciudad de México, con datos promedio de cada 30 minutos para cada uno de los sectores de viento. Los datos de entrada al modelo se calcularon según se explicó anteriormente (sección 5.5.2) y se muestran en la Tabla 5.14. Una vez aplicado el modelo con los datos de entrada de esta Tabla, se obtienen las elipses para cada rumbo del viento y se elige el efecto indicado que encuentre una correspondencia con el área calculada para el radiómetro neto (Figura 5.8).

Los resultados se pueden observar en la Figura 5.16, donde los efectos elegidos son del 10% para todas las direcciones del viento. Las elipses trazadas tienen una mínima área en común con el área fuente del radiómetro neto. El error en las dimensiones entre los dos tipos de área fuente es de  $0.106 \text{ km}^2$ , es decir, hay una diferencia muy grande entre una y otra área. Como puede observarse en la figura, algunas de las elipses prácticamente comienzan donde termina el área fuente del radiómetro neto debido a la existencia de la porción de superficie que el radiómetro neto sí ve (área inmediata al sensor) y que el anemómetro sónico y el higrómetro de kryptón no registran.

**Tabla 5.14** Datos de entrada para el modelo SAM 2\_win correspondientes a la Preparatoria 7, Ciudad de México (2 al 14 de diciembre de 1998). Altura del sensor: 20m.

<b>Rumbos del viento</b>	<b>L (m)</b>	<b><math>\sigma v/u^*</math></b>	<b><math>Z_o</math> (m)</b>
N	-427.2	6	0.05
NE	-266.9	5.3	0.12
E	-356.2	6	0.08
SE	-490.1	5.6	0.38
S	-829.5	5.2	0.21
SW	-1035.0	6	0.002
W	-608.37	6	0.07
NW	-667.45	5	0.09



**Figura 5.16** Área fuente del radiómetro neto (interior del círculo rojo) y áreas fuente del anemómetro sónico y del higrómetro de kriptón (elipses) para Preparatoria 7, D.F. La simbología del uso del suelo se puede ver con detalle en la Tabla 5.6.

El área que cubre el radiómetro neto abarca un menor número de usos de suelo dada su relativamente reducida extensión, y las diferencias con las áreas obtenidas con el modelo de Schmid se pueden observar en la Figura 5.17.

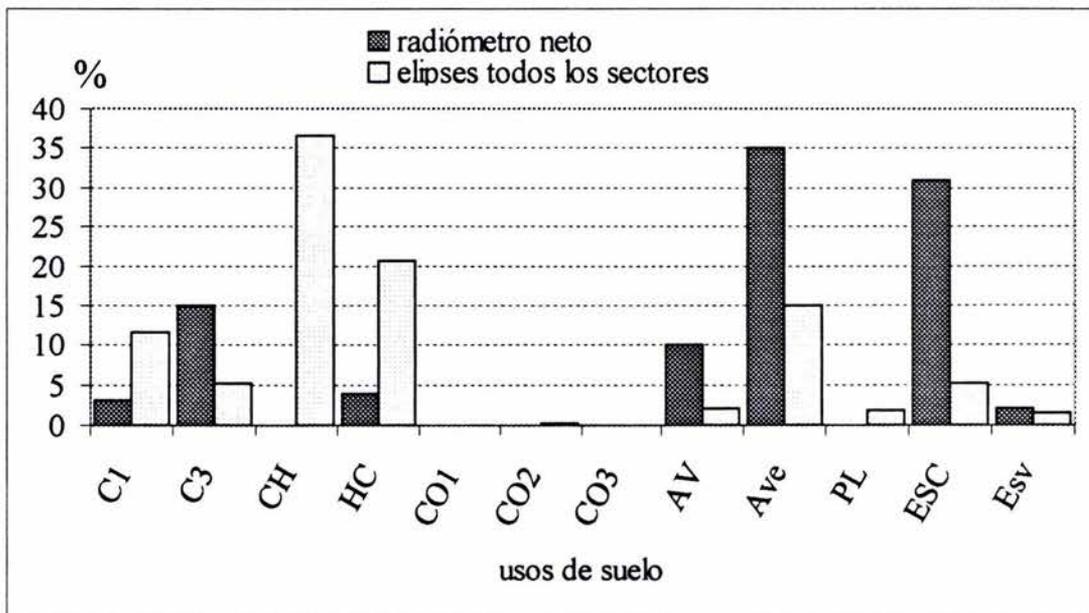
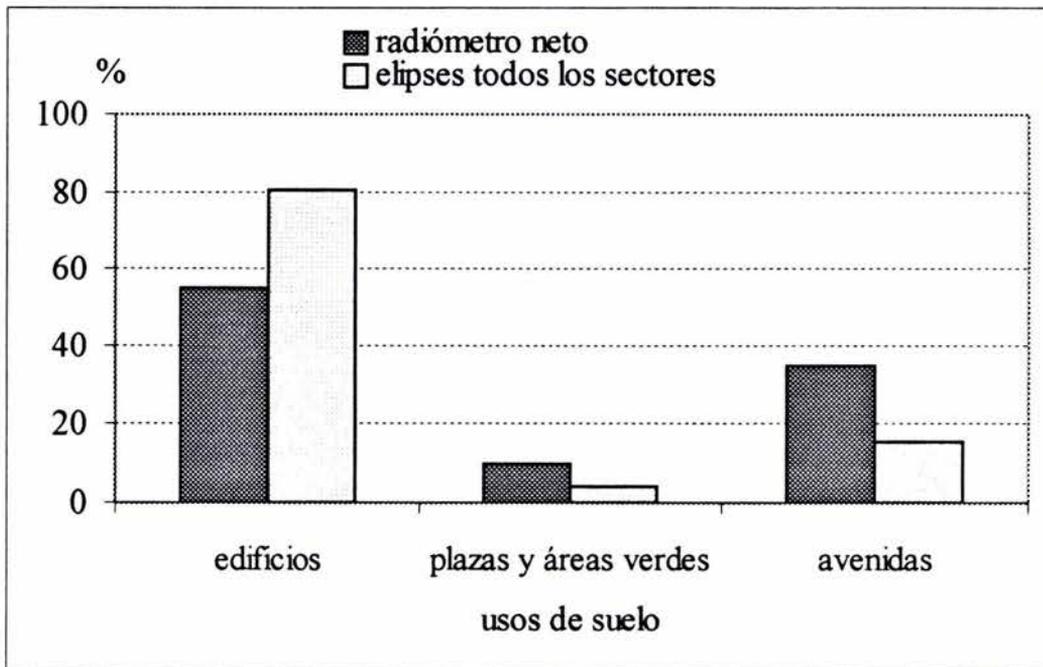
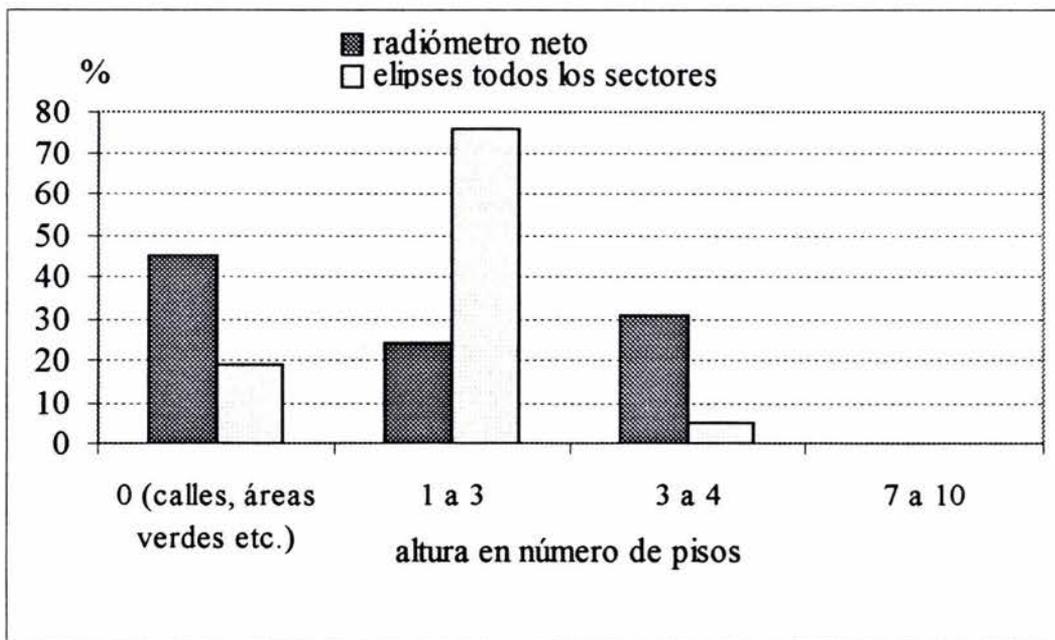


Figura 5.17 Porcentajes de uso de suelo para el radiómetro neto en comparación con el promedio de las áreas fuente del anemómetro sónico y del higrómetro de kryptón (por sectores de viento) en la Preparatoria 7, D.F. Las características de cada uso de suelo se pueden ver en la Tabla 5.6.

El área fuente del radiómetro neto muestra las características de la superficie que domina en el área fuente (Figura 5.18), con un alto porcentaje de uso de suelo sin edificar (45%) y sólo un 55% de presencia de edificios; esto debido a las avenidas, calles y áreas abiertas comunes en planteles escolares. Las características de uso de suelo en las áreas fuente del anemómetro sónico y del higrómetro de kryptón difieren ampliamente con el área fija del radiómetro neto, debido a que la superficie que ve este último (en parte por su muy limitada extensión) no guarda semejanza con el resto de las áreas fuente y porque comparten una porción mínima de superficie. La Figura 5.19 muestra de forma más precisa esa diferencia: las alturas de las edificaciones dentro del área visual del radiómetro neto y de las elipses resultantes (aún en promedio) no guardan semejanza.



**Figura 5.18** Porcentaje de edificios, zonas abiertas y avenidas para el radiómetro neto en comparación con el promedio de las elipses de todas las direcciones para la Preparatoria 7, Ciudad de México.



**Figura 5.19** Alturas de edificios en las áreas fuente calculadas para la Preparatoria 7, Ciudad de México (porcentaje del área que cubren).

## 5.6 DISCUSIÓN

Las áreas fuente correspondientes a los dos sitios de mediciones, Barcelona y Preparatoria 7 en la ciudad de México, distan mucho de ser semejantes, aunque ambas representan “el centro” de la ciudad, es decir, un uso de suelo con alta densidad de construcción y escasez de áreas verdes. Sin embargo, las características de las edificaciones son muy diferentes en el tipo de construcción, la altura y la distribución. Las áreas fuente resultantes en Barcelona (del radiómetro neto, y del higrómetro y del anemómetro sónico), aún con la diferencia de extensión entre una y otra, sugieren un uso del suelo semejante y representativo de toda el área. La altura a la que fueron colocados los sensores, a pesar de ser de 41 m sobre el nivel de la calle, no permite una gran correspondencia entre áreas.

Comparándolo con el método explicado en el capítulo 5.3 propuesto por Tejeda (1996) y basado en el de Grimmond y Souch (1994), en el cual se otorgaba una aportación distinta a cada tipo de uso del suelo dado que no toma en consideración la altura a la que se colocan los sensores, éste resulta inconveniente si no se trata de un área que pueda tomarse como homogénea. Sin embargo, si se conocen las principales direcciones del viento, este método puede dar idea clara del tipo de superficie que puede estar aportando o que puede ser más efectiva a la variable medida cuando no se tienen o se desconocen las variables de entrada para la utilización de un modelo de área fuente como el de Schmid. En el caso de Barcelona, el viento predominante (Figura 5.9) es del sur y suroeste (Ciudad Vieja y Ensanche, Figura 5.1). El aporte en el sector sur (Tabla 5.5), según el método propuesto por Tejeda (1996), es semejante al porcentaje de área que cubren los edificios por su altura en la elipse correspondiente a ese sector, resultado del modelo de Schmid. Aquí la homogeneidad de los usos de suelo permite que esta semejanza exista y que el método simple de dar peso a las fracciones de área de los tipos de cubierta tenga validez. En el caso del sector suroeste, la semejanza es menor: el uso del suelo en la superficie comprendida dentro de la elipse no abarca todos los usos de suelo y porcentajes de cubierta que representa el sector entero.

En el caso de Preparatoria 7, las áreas fuente resultado de la colocación de los instrumentos a una menor altura (20 m sobre el nivel de la calle) dan muestra de la importancia que debe tener el análisis del uso del suelo antes de medir para obtener resultados representativos de la superficie que se está analizando. Las mediciones de balance energético

en este sitio urbano pueden no ser confiables en los sectores en que las áreas fuente del radiómetro neto y del anemómetro sónico e higrómetro de kryptón apenas tienen una fracción de aproximadamente el 30% del total del sector donde se sobreponen (SW, N y E, principalmente; ver Fig. 5.16), y donde las áreas tienen una porción de superficie mayor en común pero el uso de suelo es heterogéneo entre el área fuente fija del radiómetro neto y la elipse resultante del modelo empleado (sector W, por ejemplo). En este caso, el viento es de las componentes del este principalmente, aunque no hay una dirección dominante (Fig. 5.10). A pesar de la diferencia que existe entre los usos de suelo entre el área del radiómetro neto y las elipses resultantes del modelo de Schmid (1997b), lo cual no es favorable para los resultados de las mediciones del balance energético en el área, el método propuesto por Tejeda (1996, ver Tabla 5.7) y las elipses resultantes (Fig. 5.16) guardan una semejanza considerable en los sectores de viento dominante.

Tomando en cuenta la importancia de la correspondencia que debe existir entre las áreas fuente del radiómetro neto y las del anemómetro sónico e higrómetro de kryptón, Nava (2003) establece una relación entre la altura de los instrumentos con respecto al nivel de la calle y la altura de separación de los instrumentos entre ellos. Siempre existirá la porción de superficie que el higrómetro de kryptón no verá (Figura 5.20). Lo esencial radica entonces en poder colocar el radiómetro neto a una mayor altura de manera que el radio de observación se amplíe, o bien colocar el anemómetro sónico y el higrómetro debajo del radiómetro neto y que, de esta forma, coincidan las áreas lo mejor posible, habiendo tomado en cuenta para ello el cálculo de alturas efectivas y características de la capa superficial (altura de rugosidad, velocidad de fricción, longitud de Monin-Obukov).

Nava (2003) establece que, si  $R_{sónico} = R_{neto}$  para cada sector del viento (N, NE, E, SE, S, SW, W y NW), donde  $R_{sónico}$  es el radio del anemómetro sónico e higrómetro de kryptón y  $R_{neto}$  es el radio del radiómetro neto, entonces:

$$\epsilon A_{sónico} = 1/8 A_{neto} \quad 5.13$$

donde  $\epsilon$  es la fracción de captura del campo visual del anemómetro sónico e higrómetro de kryptón, semejante al radio máximo del radiómetro neto (efecto del 10 % en todas las elipses de Barcelona y Preparatoria 7), y  $A_{sónico}$  y  $A_{neto}$  son las áreas de los campos visuales

inferiores del anemómetro sónico y del higrómetro de kriptón, respectivamente. Como el área visual de cualquier sensor es función del cuadrado del radio de influencia ( $R_{\text{visual}}$ ) y, a su vez, éste depende de la altura efectiva de colocación del instrumento ( $h_{\text{efectiva}}$ ), entonces:

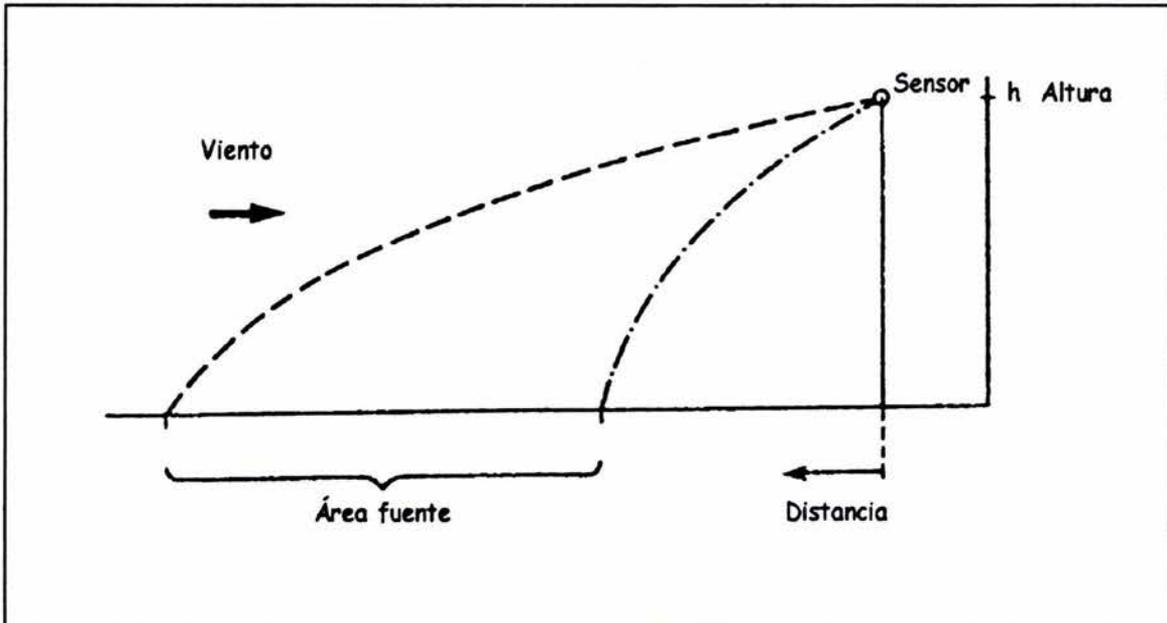
$$f(R_{\text{visual}})^2 = f(h_{\text{efectiva}})^2 \quad 5.14$$

y, como se están considerando ocho rumbos del viento:

$$\varepsilon (h_{\text{efectiva\_sónico}})^2 = 1/8 (h_{\text{efectiva\_neto}})^2 \quad 5.15$$

La relación que hay entre las alturas efectivas del radiómetro neto y del anemómetro sónico e higrómetro de kriptón es:

$$h_{\text{efectiva\_neto}} / h_{\text{efectiva\_sónico}} = (8 \varepsilon)^{1/2} \quad 5.15$$



**Figura 5.20** Cobertura del higrómetro de kriptón y anemómetro sónico, utilizados para evaluar, respectivamente, el calor latente de evaporación y el calor sensible turbulento (Schmid y Oke, 1981).

Con esta relación se obtiene en el caso de Barcelona que, para todas las direcciones, debería haber una relación de 0.89. La recomendación es que las alturas de los sensores sean las mismas conforme la relación se acerca a 1.0. En los casos de Barcelona y Preparatoria 7, el efecto del 10% elegido en las elipses dista marcadamente del radio del radiómetro neto, lo cual sugiere colocar los sensores a diferentes alturas. Una pre-campaña de observaciones podría establecer esta diferencia y, dados los resultados observados en Barcelona y Preparatoria 7, la diferencia radicaría en colocar el radiómetro neto a una mayor altura (ampliando el radio visual) con respecto al anemómetro sónico y al higrómetro de krypton.

Por lo anterior, antes de realizar campañas de medición de balance energético atmosférico se recomienda hacer un estudio de alturas efectivas y características de la capa superficial (altura de rugosidad, velocidad de fricción, longitud de Monin-Obukov) para ubicar los instrumentos en las alturas más adecuadas.

## CAPÍTULO 6:

### CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

El balance energético atmosférico muestra la forma en que la radiación solar incidente es distribuida y cómo, al quedar atrapada en el sistema suelo- atmósfera (radiación neta), pueden variar los procesos para disipar esa energía según el uso de suelo, urbano o rural, siendo la principal diferencia entre estos dos usos el consumo energético para evaporar agua ( $Q_e$ ). Aun en superficies urbanas, el papel que juega la evapotranspiración se ejerce de acuerdo al impacto y modificación del medio por la presencia de calles y la densidad de las edificaciones, lo cual es otra manera de explicar la formación e intensidad de fenómenos urbanos muy estudiados como es la isla de calor (ver Jáuregui, 1973, 1987).

La realización de campañas de medición en una misma ciudad con diferentes usos del suelo (en situaciones sinópticas semejantes) podría permitir la extrapolación de aquellos resultados representativos a lugares donde ya no sea necesario realizar tales mediciones por encontrarse incluidos dentro de los usos de suelo ya estudiados. El tener un conocimiento cada vez mayor del papel que juega el uso del suelo en las ciudades, con respecto al uso y disipación de la energía solar, podrá explicar fenómenos climáticos urbanos y, de esta forma, relacionarse con el bioclima.

En ambos casos, Barcelona y Preparatoria 7 (aunque de esta última los resultados no sean satisfactorios) el comportamiento de las componentes del balance energético, a pesar de las diferencias latitudinales y altitudinales de una ciudad con respecto a la otra, corresponden a las de sitios con un centro densamente construido y poblado. En el caso de Barcelona, cuando menos durante los días del experimento, tuvo un impacto mayor la presencia de áreas compactas de edificaciones y el carácter masivo de algunos de sus edificios que la cercanía al mar y la llegada de brisa conteniendo humedad. En particular, en ambos sitios hay un dominio de la energía acumulada ( $Q_s$ ), y la escasa vegetación disminuye las posibilidades de disipar energía por evaporación. Es importante recordar también que los resultados de estos experimentos no son representativos de las ciudades completas, sólo de algunos sectores.

Pero antes de realizar campañas de mediciones de balance de energía, es importante analizar la superficie y el tipo de cubierta sobre la cual se va a llevar a cabo el experimento. En el caso de México, no fue hasta una campaña realizada en Minería (Oke *et al.*, 1999) que el uso del suelo se tomó en cuenta para el cálculo de las áreas fuente en la ciudad. En una campaña posterior, la de Preparatoria 7 que ha ocupado este trabajo, se analizó el uso de suelo en los alrededores y se calcularon las áreas fuente como se mostró en el desarrollo de esta tesis. Los resultados sin lugar a dudas muestran la importancia de la colocación de los instrumentos (a mayor altura, se tendrá un mayor alcance visual). El balance energético medido en sitios con un uso de suelo heterogéneo y donde los instrumentos perciben áreas diferentes, no será representativo, ni la ecuación de balance energético contará con todos los términos requeridos. Para mejorar los resultados de las mediciones de la Preparatoria 7 (y de todos los lugares en que se quiera llevar a cabo un experimento de balance de energía), se requiere que se tome en cuenta la altura de los instrumentos respecto a la calle y también la separación entre ellos. De esta manera podrá existir una correspondencia entre las áreas fuente del radiómetro neto y las del anemómetro sónico e higrómetro de kryptón. Las mediciones, por lo tanto, serán representativas de los usos de suelo que se pretendan analizar.

En el caso de Barcelona, a pesar de la altura de 41 metros sobre el nivel de la calle en que fueron colocados los sensores, y siendo ésta una altura apropiada para monitorear el dosel urbano, las áreas fuente tampoco coincidieron en el espacio. Sin embargo, la homogeneidad en los usos de suelo en la parte referente a El Ensanche, con manzanas completas de edificios semejantes en altura y construcción, y la Ciudad Vieja de calles angostas, construcción antigua y escasísima vegetación, dan muestra de mediciones de balance energético representativas del uso del suelo que se analiza. En este caso, el alcance visual del radiómetro neto abarca casi todos los usos del suelo que las áreas fuente calculadas para el anemómetro sónico e higrómetro de kryptón abarcan también.

Otros métodos para analizar los tipos de cubierta y su influencia, como el propuesto por Tejeda (1996), pueden ser de utilidad en situaciones de homogeneidad en cada sector del viento. Cuando se carece de información necesaria para aplicar modelos como el de Schmid, este método da una aproximación a la realidad que los instrumentos deberían percibir, si estuvieran. Se da importancia a la contribución de los muros en el área estudiada y no sólo a la extensión horizontal de determinado tipo de uso de suelo.

Experimentos como los llevados a cabo en Barcelona y la Ciudad de México pueden contribuir a un mejor conocimiento del papel que juega la energía solar en ambientes urbanos, muchos de ellos habiendo crecido sin ajustarse a ningún tipo de planificación y donde los efectos pueden ser, por lo tanto, adversos a obtener mejores condiciones de vida de la población. Una gran parte de la investigación que se hace en climatología urbana ha sido básicamente descriptiva. El estudio de los procesos físicos debería llevar a tener una mejor comprensión de los problemas ambientales. Quizá los estudios específicos de determinados lugares sirven poco para mostrar la importancia práctica de tales procesos y el papel respecto a la situación bioclimática, pero las escasas campañas de mediciones realizadas en países en vías de desarrollo debido a la complicación relativa a la adquisición de equipo especializado y las técnicas de análisis, pueden hacer de campañas como estas el comienzo de la incorporación de las zonas menos favorecidas al conocimiento de la climatología urbana no únicamente descriptiva. En el caso de Barcelona, este tipo de limitaciones están quedando de lado y seguramente se tendrá un acelerado desarrollo del conocimiento del clima urbano conforme aumente el interés por estos temas y su aplicación, por las ventajas económicas de la utilización de la información climática en los procesos de planificación, como es ya bien sabido en los países desarrollados de las latitudes medias.

## REFERENCIAS

- Anthoni, P.M., B.E. Saw, M.H. Unsworth and R.J. Vong, 2000. Variation of net radiation over heterogeneous surfaces: measurements and simulation in a juniper-sagebrush exosystem. *Agricultural Forest Meteor.*, **102**, 275-286.
- Barr, S., 1987. Deploy measurements systems to meet experimental objectives. *Prepr. 6th Symp. Meteorol. Obs. Instr.*, New Orleans, LA, Jan. 12-16 1987, Amer. Meteor. Soc., Boston, 411-412.
- Barradas, V., A. Tejeda-Martínez and E. Jáuregui, 1999. Energy balance measurements in a suburban vegetated area in Mexico City. *Atmos. Environ.*, **33**, 4109-4113.
- Brunet, M., 1989. Los Efectos de la Urbanización en el Clima Local. Un Ensayo de Climatología Urbana: el Caso de Tarragona. Tesis Doctoral, Universidad de Tarragona, 3 vols.
- Carreras, C., 1990. *Modificaciones Térmicas en las Ciudades. Avance Sobre la Isla de Calor en Barcelona*. Documents d'Analisi Geogràfica, Universidad Autónoma de Barcelona.
- Campbell Scientific, Inc., 1996. Q – 7.1 Net radiometer. Manual del radiómetro neto.
- Espinoza L., E., 1991. *Ciudad de México. Compendio Cronológico de su Desarrollo Urbano. 1521-1980*. 265 pp..
- Grimmond, C.S.B., and C. Souch, 1994. Surface description for urban climate studies: a GIS based methodology. *Geocarto. Int.*, **1**, 47-58.
- Grimmond, C.S.B., and T. Oke, 1991. An evapotranspiration-interception model for urban areas. *Water Resources Res.*, **27** (7), 1739-1755.
- Guía Roji, 1997, Ciudad de México, área metropolitana y alrededores, ed. 1996.
- <http://mexicochannel.net/maps/mxcvalley.gif>
- <http://www.bcn.es/urbanisme>
- [http://www.france.diplomatie.fr/label\\_france](http://www.france.diplomatie.fr/label_france)
- <http://www.indiana.edu/~climate/SAM/model/>
- Jáuregui, E., 1973. The urban climate of Mexico City. *Erdkunde*, **27**, 298-306.

- Jáuregui, E., 1987. Urban heat island development in medium and large urban areas in Mexico. *Erkunde*, 41, 48-51.
- Jáuregui, E., 1988. Local wind and air pollution interaction in the Mexico Basin. *Atmósfera*, Vol. 1, 131-140, México.
- Jáuregui, E., 1989. The dust storms of Mexico City. *Int. Jour. of Climat.*, Vol. 9, 169-180, Londres, Inglaterra.
- Jáuregui, E., 1990/91. Effects of revegetation and new artificial water bodies on the climate of northeast Mexico City, *Energy and Buildings*, 15-16, 447-455.
- Jáuregui, E., 1999. Balance energético atmosférico y bioclimatología de la ciudad de México. Informe técnico final del proyecto CONACYT/CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA UNAM 2130P-T.
- Jáuregui, E., 2000. *El Clima de la Ciudad de México*. Temas Selectos de Geografía de México. Textos Monográficos. Plaza y Valdés Editores. 131 pp.
- Jáuregui, E., y A. Tejeda, 1997. Urban-rural humidity contrasts in Mexico City. *Int. Jour. of Climat.*, 17, 187-196.
- Jáuregui, E., and E. Luyando, 1999. Global radiation attenuation by air pollution and its effects on the thermal climate in Mexico City. *Int. J. Climate*, 19, 683-694.
- Jáuregui, E., M.C. Moreno and A. Tejeda, 2003. The energy balance of central Barcelona (Spain). *J. Appl. Meteor.* Aceptado para publicación.
- Jacobson, 1999. *Fundamentals of atmospheric modeling*. Cambridge University Press. 656pp.
- Landsberg, H. 1981. *The Urban Climate*. Academic Press, New York. 275 pp.
- Lombardo, S., 1978. *Desarrollo Urbano de México Tenochtitlán*, SEP - INAH.
- López-Gómez, A., 1991. *El Clima Urbano de Madrid: La Isla de Calor*. Centro de Investigaciones Sobre la Economía, la Sociedad y el Medio, CSIC, Madrid, 166 pp.
- López-Gómez, A., y F. Fernández-García, 1984. La isla de calor en Madrid, avance de un estudio de clima urbano. *Estudios Geográficos*, 174, 5-34.
- Moreno, M.C., 1988. Frecuencias de la precipitación según los días de la semana en Barcelona. *Revista Geografía*, XXI-XXII. España, pp. 5-10.
- Moreno, M.C., 1991. La intensidad de la isla de calor en Barcelona. Comparación con otras ciudades españolas. *Alisios* (Universidad de La Laguna), 1, 47-53.

- Moreno G., M.C., 1993. *Estudio del Clima Urbano de Barcelona: la "Isla de Calor"*. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona. 193 pp.
- Moreno, M.C., 1998. Las investigaciones sobre el clima urbano de las ciudades españolas, en *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas*. Parteluz, Madrid. pp. 177-196.
- Nava, Y.G., 2003. *Sobre la caracterización de las áreas fuente en el balance energético atmosférico*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Instrumentación Electrónica, Universidad Veracruzana. 93 pp.
- Obasi, G.O.P, 1999. *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millennium. Selected Papers from the Conference ICB-ICUC'99, Sydney, 8-12 November 1999*. pp. xvii-xx.
- Oke, T.R. 1984. La climatología urbana y las ciudades tropicales: una introducción al tema. En: *La climatología Urbana y sus aplicaciones con especial referencia a las regiones tropicales*. Documentos de la Conferencia Técnica, MMM, México D.F. 1984.
- Oke, T.R., 1987. *Boundary-Layer Climates*. Mathuen Ed. New York. 435 pp.
- Oke, T.R., 1987. The surface energy budgets of the urban areas. *Modeling the Urban Boundary Layer*. AMER. Meteor. Soc. Boston, 1-52.
- Oke 1988. *Boundary layer climates*. Mathuen Ed. New York. 435 pp.
- Oke, T.R., 1993. Comunicación personal (según Tejeda, 1996).
- Oke, T.R., B.D. Kalanda and D.G. Steyn, 1981, Parametrisation of heat storage in urban areas. *Urban Ecology*. **5**, 45-54.
- Oke, T.R., G. Zeuner and E. Jáuregui, 1992. The surface energy balance in Mexico City. *Atmos. Environ.*, **26B**, 433-444.
- Oke, T. R., A. Spronken-Smith, E. Jáuregui and C.S.B. Grimmond, 1999. The energy balance of central Mexico City during the dry season. *Atmos. Environ.*, **33**, 3919-3930.
- Pérez-Cueva, A.J., E. López Baeza y J. Tamayo, 2001. *El Tiempo del Clima*. II Congreso de la Asociación Española de Climatología. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC), Serie A, No. 2. Valencia, España. 574 pp.
- Reifsnyder, W.E., 1967. Radiation geometry in the measurement and interpretation of radiation balance. *Agricultural Forest Meteor.*, **4**, 255-265.
- Schmid, H.P., 1994. Source areas for scalar fluxes. *Boundary-Layer Meteor.*, **67**, 293-318.

- Schmid, H.P., 1997a. [www.indiana.edu/~climate/SAM/model/](http://www.indiana.edu/~climate/SAM/model/). University of Indiana-Bloomington, EUA.
- Schmid, H.P., 1997b. Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes. *Agricultural Forest Meteor.*, **87**, 179-200.
- Schmid, H.P., and D. Bünzli, 1995. The influence of surface texture on the effective roughness length. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **121**, 1-21.
- Schmid, H.P., and C. Lloyd, 1999. Spatial representativeness and the location bias of flux footprints over inhomogeneous areas. *Agricultural Forest Meteor.*, **93**, 195-209.
- Schmid, H.P. and T. Oke, 1981. A model to estimate the source area contributing to surface layer turbulence at a point over a patchy surface. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **116**: 965-988.
- Schmid, H.P., and T. Oke, 1990. A model to estimate the source area contributing to turbulent exchange in the surface layer over patchy terrain. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **116**, 965-988.
- Schmid, H.P., H.A. Cleught, C.S.B. Grimmond and T.R. Oke, 1991. Spatial variability of energy fluxes in suburban terrain. *Boundary-Layer Meteor.*, **54**, 249-276.
- SEP, 1995. Distrito Federal, Monografía Estatal. 87 pp.
- Sozzi, R., A. Salcido, R. Saldaña and T. Georgiadis, 1999. Daytime radiation parametrisation for Mexico City suburban areas. *Atmos. Res.*, **50**, 53-68.
- Stull, 1988. *An introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers 670pp.
- Tejeda, A., 1996. *Sobre Mediciones y Parametrizaciones del Balance Energético y la Estabilidad Atmosférica en la Ciudad de México*. Tesis Doctoral. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. 87 pp.
- Tejeda, A., y J. Cervantes, 2001. Una Revisión Bibliográfica de la Climatología del Valle de México. Instituto de Geografía, UNAM. 51 pp.
- Triangle Postals. *Barcelona*. Triangle Postals Edició, ISBN 84-604-2645-9.