

# CONTRASTE CIUDAD/DESIERTO DEL BALANCE DE ENERGÍA EN LA ATMÓSFERA SUPERFICIAL EN EL NW DE MÉXICO

O. Rafael GARCÍA CUETO\*; Adalberto TEJEDA MARTINEZ\*\* y  
Ernesto JÁUREGUI OSTOS\*\*\*

\* *Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, México*

\*\* *Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana (UV)*

\*\*\* *Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)*

## RESUMEN

Se analizaron mediciones de balance de energía de la atmósfera superficial en un lugar suburbano de la ciudad de Mexicali (campus universitario), y un lugar rural, distante 30 km al oriente de la ciudad (Villa Emiliano Zapata), durante días despejados (17 de febrero al 3 de abril de 2001, y del 15 al 24 de junio de 2003). Alrededor del campus universitario se tienen calles anchas ( $H/W = 0,5$ ) con camellones centrales con vegetación y edificios de uno a cuatro pisos en promedio, mientras que el lugar rural se caracteriza por tener vegetación xerófita muy dispersa y suelo arenoso. En el sitio suburbano -como corresponde a un ambiente seco con poca evaporación- la radiación neta ( $Q^*$ ) es disipada principalmente por el calor sensible ( $Q_H$ , 61%), seguido por el almacenamiento de calor en el suelo ( $\Delta Q_S$ , 25%), dejando sólo 14% para evaporación de áreas vegetadas ( $Q_E$ ). Al comparar estos resultados con los observados en el sitio rural, se muestra que  $Q_H$  es más pequeño que en la ciudad;  $Q_E$  es similar (14 y 13%), y  $\Delta Q_S$ , de manera inesperada, es una vez y media más grande que en la ciudad (0,43). La razón de Bowen se estimó de 4,4 y 3,3, en el área urbana y el área rural, respectivamente. Para periodos diurnos durante el verano, una comparación con otras ciudades muestra que la zona suburbana de Mexicali usa una cantidad mayor de la energía disponible para calentar el aire urbano (72%) que Tucson, AZ (26%) o que Barcelona, España (34%).

Usando promedios de cinco días de las componentes del balance energético, se ve que en el desierto el almacenamiento de calor en el suelo supera al calor sensible turbulento durante el invierno, pero ambas cantidades se aproximan al iniciar la primavera.

**Palabras clave:** Balance de energía atmosférico, radiación neta, calor sensible, calor latente, almacenamiento de calor en el suelo, isla urbana de calor.

## ABSTRACT

*Surface energy balance measurements were analyzed in suburban site of Mexicali city (university campus), and a rural site distant some 30 km to the east of the city, during two sunny period (February 17 to April 3, 2001; 15 to 24 June, 2003). Wide streets ( $H/W=0,5$ ) with vegetated dividers and one to four-high storey buildings are typical around the university site, while very sparse xerophyte vegetation and sandy soil characterize the rural environment. In the suburban site, the most important finding, as would be expected in a dry environment with small evaporation, is that net radiation ( $Q^*$ ) was mainly dissipated by sensible heat ( $Q_H$ , 61%), followed by soil storage heat ( $\Delta Q_S$ , 25%), leaving only 14% for evaporation of vegetated areas ( $Q_E$ ). Comparing this results with those observed at the rural site, is shown that  $Q_H$  is smaller in the desert (44%), but  $Q_E$  (with larger urban irrigation) is very similar (13%), and  $\Delta Q_S$  is 43% in the rural site. The calculated Bowen ratio was 4.4 and 3.3, in urban and rural areas, respectively. For daytime during the summer, Mexicali suburban site uses a higher quantity of the available energy to heat the urban air (72%) in comparison with Tucson, AZ (26%), which is a desert city on the other side of the Mexico-US border; and than Barcelona, Spain(34%), a port in the Mediterranean Sea.*

*Using averages of energy balance components for period of five days (daytime), can be see that the trends of net radiation consumptions are not significant. In the desert, during winter the heat soil storage is higher that the sensible heat flux, but at beginning of the spring both energy consumptions are very close.*

**Key words:** *Atmospheric energy balance, net radiation, sensible heat, latent heat, soil heat storage.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La urbanización produce cambios radicales en la naturaleza de la superficie y las propiedades atmosféricas de una región. Tiene que ver con la transformación de las características radiativas, térmicas, higroscópicas y aerodinámicas, de ahí que afecte los balances solares e hidrológicos, que ocurren de manera natural (OKE, 1987). En varias ciudades de latitudes medias se han realizado estudios orientados a conocer el balance energético superficie/atmósfera, por la importancia que reviste para explicar las alteraciones climáticas inducidas por la urbanización (CLEUGH y OKE, 1986; GRIMMOND y OKE, 1995). Para México, se pueden mencionar los trabajos realizados por OKE *et al.* (1992); JÁUREGUI (1997); OKE *et al.* (1999); BARRADAS *et al.* (1999), TEJEDA (1996) y TEJEDA y JÁUREGUI (2003), orientados a conocer la climatología urbana y la forma en que es repartida la ganancia neta de energía en el tejido urbano de la ciudad de México.

Sin embargo, para el noroeste del país, que es una zona árida, no se ha realizado este tipo de estudios, a pesar de que las áreas urbanas en esta región han crecido considerablemente en los últimos veinte años ([www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)) de modo que sobresalen las siguientes ciudades con poblaciones cuantiosas: en el Estado de Baja California, Tijuana (1.380.742 habitantes) y Mexicali (764.902 habitantes), y en el de Sonora, Hermosillo (608.697 habitantes), Ciudad Obregón (345.222 habitantes) y San Luis Río Colorado (145.276 habitantes).

En particular, en este artículo se describen los resultados de una evaluación energética atmosférica, a partir de campañas de mediciones efectuadas del 17 de febrero al 3 de abril de 2001 y del 15 al 24 de junio de 2003, en una zona suburbana de Mexicali (de aquí en adelante MXLI), y se contrastan los resultados con los obtenidos en una comunidad rural distante 30 km, al oriente de la zona urbana, llamada Villa Emiliano Zapata (de aquí en adelante VEMZA), en la que prácticamente no ha habido modificación de las condiciones nativas de la región. El propósito es documentar los contrastes entre ambos ambientes.

## 2. UBICACIÓN E INSTRUMENTACIÓN

### 2.1. Ubicación geográfica

La ciudad de Mexicali (32°40'N, 115°27'W), se localiza en el valle de Mexicali, a 4 m, en el noroeste de la República Mexicana, en el Estado de Baja California y limita al norte con el Estado de California, USA (Fig. 1). Tiene un clima cálido seco con lluvias en invierno, y oscilación de temperaturas medias anuales muy extremosa. Se presentan grandes contrastes térmicos, ya que en el verano se tienen temperaturas máximas cercanas a los 50°C, mientras que en el invierno las temperaturas mínimas ocurren alrededor de los 0°C. El promedio anual de lluvias es de 75 mm (GARCÍA, 1995). El área urbana de MXLI tiene una extensión de 113,7 km<sup>2</sup>; es una ciudad

relativamente nueva -fue fundada en 1903-, de rápido crecimiento donde han prosperado las actividades comerciales, industriales y de servicios.

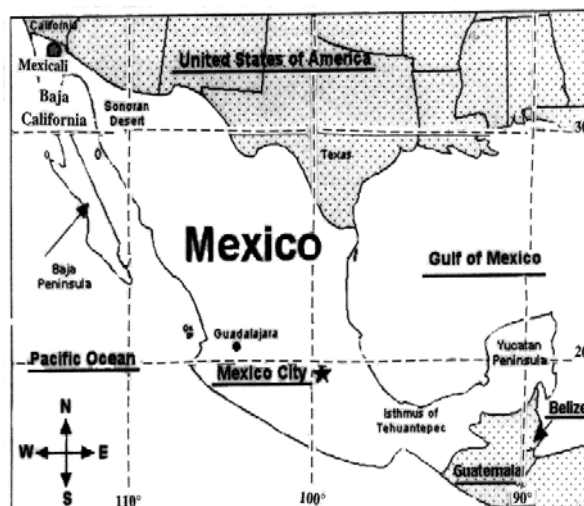


Fig. 1. Ubicación de Mexicali, al NW de la República Mexicana

Este crecimiento de la ciudad y los diversos usos del suelo, han modificado algunas variables climáticas, y el desarrollo de la isla de calor se ha evidenciado con el análisis de datos termométricos de dos estaciones, una ubicada en la zona urbana, y la otra en la zona rural (Fig. 2; GARCÍA y DÁVALOS, 2000). La ciudad surgió históricamente a partir de actividades agrícolas, y comparte su espacio geográfico con los vecinos de Valle Imperial, CA, lo que permitió el nacimiento de un oasis en una amplia zona desértica, gracias a la infraestructura hidráulica con la que se aprovecha las aguas del río Colorado. La transformación sustancial de cambio de uso del suelo, de áreas agrícolas a urbanas, en un tiempo relativamente corto, ha modificado las actividades de subsistencia en la ciudad de Mexicali, con actividades de manufactura y de servicios, con el consecuente cambio de variables ambientales (aparte de contaminación por partículas, ahora se tiene el problema por gases), y uno de los patrones más altos del Estado de Baja California en consumo energético; en Mexicali los consumos son de alrededor de 650 kWh/usuario-mes, y llegará ser del orden de 1.000 kWh/usuario-mes para el año 2010, mientras que en el resto de los municipios se presentan consumos del orden de 150 a 200 kWh/usuario-mes, los cuales seguirán estables en los próximos años (PÉREZ y CAMPBELL, 2003).

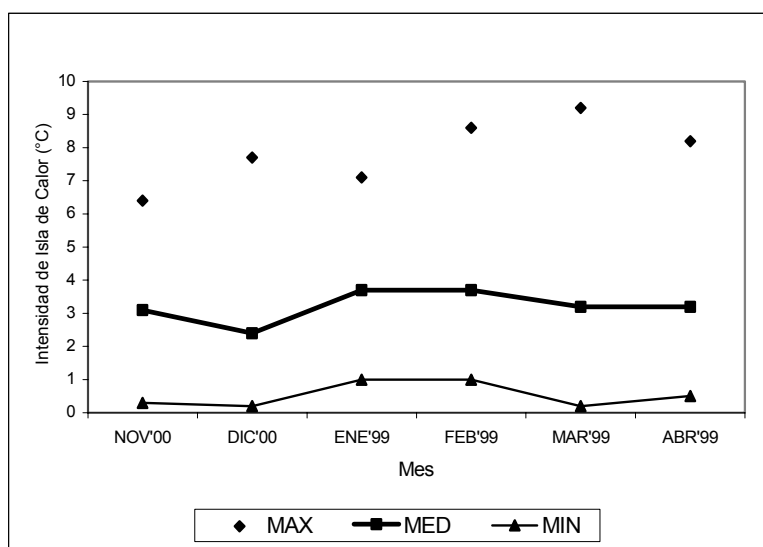


Fig. 2. Valores promedio y extremos de la intensidad de la isla de calor entre las 18 y 8 horas (noche)

## 2.2. Localización y descripción de sitios estudiados

En la zona urbana se instaló el equipo de medición en la azotea del Instituto de Ingeniería de la UABC; en un sector de 270°, y a 1 km aproximadamente, el lugar se caracteriza por amplias calles con camellones centrales con vegetación. Alrededor de la zona universitaria se tienen construcciones que en promedio son de 1 a 4 pisos (algunos de los edificios más altos de la ciudad se encuentran en esta zona y en el Centro Cívico, donde residen los poderes gubernamentales, que se localiza a 6 km al noroeste de la UABC). La mayor parte de esta zona está destinada al uso educativo, residencial y comercial. En dirección oriente se encuentra la Unidad Deportiva de la zona universitaria, un área verde importante. La vegetación consiste en césped (*Stenotaphrum secundatum*), árboles yucatecos (*Ficus microcarpa*) y eucaliptos (*Eucalyptus sp.*), mantenidos con irrigación artificial (Fig. 3).

El material de las construcciones es de ladrillo ó block para paredes y losa de concreto o madera para techos, la mayoría cubiertos con material aislante/impermeabilizante y pintura reflectora. La relación entre el tamaño del lote y el área construida es en promedio 2/3, mientras que la relación altura de las construcciones/ancho de las calles (H/W) es de 0,5.

El lugar rural (VEMZA), situado a 30 km al oriente de la zona urbana, es altamente contrastante con respecto a la zona urbana, tanto en usos como en la morfología superficial; el sitio se caracteriza por estar desprovisto de calles pavimentadas, las tiene trazadas pero conserva su suelo nativo, de características arenosas, con casas dispersas y vegetación arbustiva como mesquites (*Prosopis sp.*) y cachanillas (*Pluchea sericea*). Al estar desprovisto de electricidad, las pocas familias, alrededor de 150, que tiene este lugar, hacen uso de dispositivos fotovoltaicos para satisfacer necesidades mínimas en sus casas (iluminación, radio). Los árboles que el habitante local ha plantado con éxito son del tipo pino salado (*Tamarix aphylla*), los cuales se encuentran en mayor proporción al sur de donde se realizaron las mediciones (Fig. 4).



Fig. 3. Ubicación de la estación de balance en la zona urbana de Mexicali



Fig. 4. Estación de balance en Villa Zapata (área rural)

### 2.3. Instrumentación

La instrumentación fue similar en ambos lugares. En MXLI los sensores se colocaron en el techo del edificio (de 9 m de altura) del Instituto de Ingeniería de la UABC, en una torre de 10 m de altura, por lo que desde el suelo hasta la parte más alta de la torre en donde se pusieron los instrumentos se tuvo una altura de 19 m. La radiación neta se midió con pirradiómetros netos REBS (Radiation Energy Balance Systems) modelo Q\*7,1, y los flujos de calor sensible y calor latente se obtuvieron usando la aproximación de correlación turbulenta. Los instrumentos, separados entre sí unos 15 cm, consistieron de un anemómetro sónico tridimensional (Campbell Scientific, modelo CSAT3), para medir la velocidad del viento en sus tres componentes (x,y,z) y la temperatura virtual. Un termopar de respuesta rápida (Campbell Scientific) se instaló dentro del volumen de muestreo del anemómetro sónico para proveer un método alternativo en el cálculo de flujos de calor, y un higrómetro de krypton (Campbell Scientific Inc., modelo KH20) para medir fluctuaciones de vapor de agua. Se midió también la temperatura del aire, humedad relativa (a 2 m de altura sobre la azotea), y la velocidad del viento y su dirección (a 10 m de altura sobre la azotea) con instrumentación estándar.

Las fluctuaciones con los instrumentos de respuesta rápida se muestrearon a 10 Hz. Los flujos de radiación neta, calor sensible y calor latente se calcularon en intervalos de media hora. Este período provee un balance entre estacionaridad y razón de muestreo para reducir incertidumbre en las medidas (OFFERLEE *et al.*, 2002).

El flujo de calor almacenado ( $\Delta Q_s$ ) se determinó como el residual del balance de energía de las observaciones de radiación neta ( $Q^*$ ), y los flujos convectivos de calor sensible ( $Q_H$ ) y calor latente ( $Q_E$ ):  $\Delta Q_s = Q^* - (Q_H + Q_E)$ . Este procedimiento tiene el problema de que todos los errores de medida de los otros flujos se acumulan en este término ( $\Delta Q_s$ ).

La instrumentación en VEMZA se colocó en un mástil de 5 m de altura en un área completamente libre de obstáculos y con un *fetch* apropiado para efectuar las mediciones. El equipo instalado y la programación para obtener los flujos energéticos y medidas climatológicas estándar fue similar al de MXLI, y por tanto la diferencia fue la altura a la que se obtuvieron los datos. Las observaciones se registraron del 17 de febrero al 3 de abril de 2001 y del 15 al 24 de junio de 2003. En este artículo no se tienen en cuenta eventos de lluvia, solamente días despejados.

El área fuente del radiómetro neto se estimó considerando un ángulo de  $85^\circ$ , respecto a la vertical, de tal manera que el radio máximo se calcula como  $R_{\max} = \text{tg } 85^\circ (h - h_d)$ , donde  $h$  es la altura del sensor, y  $h_d$  es la altura de desplazamiento. De acuerdo a lo anterior, y siguiendo un procedimiento iterativo, el radio máximo para MXLI fue de 190 m, y para VEMZA fue de 57 m. Se estimaron las áreas fuente del flujo vertical de calor sensible y calor latente mediante el modelo de Schmid (1997) llamado SAM\_2win (Source Area Model). De acuerdo con las áreas analizadas para el sensor de kriptón y sónico comparada con el área del radiómetro neto, se calculó un error de aproximadamente  $0,00692 \text{ km}^2$  para VEMZA, y de  $0,63 \text{ km}^2$  para MXLI.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las medidas se analizaron para un período sin lluvias, por lo que un promedio horario del conjunto de datos, da una imagen representativa de la partición de energía en los términos del balance de energía (Figs. 5 y 6) para el caso de días despejados. La tabla 1 muestra una comparación de los flujos de energía entre VEMZA y MXLI para todas las condiciones de cielo, en promedio del 17 de febrero al 3 de abril de 2001. La disponibilidad de radiación neta es mayor en VEMZA que en MXLI, en  $1,1 \text{ MJm}^{-2}$ . Las diferencias más importantes en la repartición de energía neta se da en los flujos de calor sensible y flujo de calor del suelo, ya que en el flujo de calor latente son prácticamente iguales (14% en MXLI, 13% en VEMZA). Hay una diferencia de 17%, a favor de MXLI en el flujo normalizado de calor sensible ( $Q_h/Q^*$ ), mientras que hay una mayor disponibilidad de flujo de calor del suelo normalizado ( $Q_s/Q^*$ ), 18% más, en VEMZA, comparado con MXLI. La razón de Bowen, por la diferencia en calor sensible en ambos lugares, es mayor (1,05 unidades), en MXLI, que en VEMZA. Es 1,47 veces mayor la disponibilidad de flujo de calor sensible, con respecto al flujo de calor del suelo ( $Q_h/Q_s$ ) en MXLI, que en VEMZA, donde los flujos son prácticamente iguales. Comparadas las adiciones de flujo de calor sensible y flujo de calor del suelo, dividido por el flujo de calor latente es ligeramente mayor en VEMZA que en MXLI.

Tabla 1. Flujos de calor y relaciones de flujos (todas las condiciones de cielo). Los flujos están en  $\text{MJm}^{-2}$  y en paréntesis en  $\text{Wm}^{-2}$ , con los cocientes adimensionales. 17 de febrero a 3 de abril de 2001

|              | UABC       | Villa Zapata |
|--------------|------------|--------------|
| <b>Q*</b>    | 5,7 (66,0) | 6,8 (78,7)   |
| <b>Qe</b>    | 0,8 (9,3)  | 0,9 (10,4)   |
| <b>Qh</b>    | 3,5 (40,5) | 3,0 (34,7)   |
| <b>Qs</b>    | 1,4 (16,2) | 2,9 (33,6)   |
| <b>Qh/Q*</b> | 0,61       | 0,44         |
| <b>Qe/Q*</b> | 0,14       | 0,13         |
| <b>Qs/Q*</b> | 0,25       | 0,43         |
| <b>Qh/Qe</b> | 4,38       | 3,33         |
| <b>Qh/Qs</b> | 2,5        | 1,03         |

Para el periodo diurno (Tabla 2,  $Q^* > 0$ ), la radiación neta  $Q^*$  es mayor en VEMZA que en MXLI, con una diferencia de  $1,6 \text{ MJm}^{-2}$ . Con respecto a los flujos normalizados por la radiación neta ( $Q_h/Q^*$ ,  $Q_e/Q^*$ ,  $Q_s/Q^*$ ), se encuentra que las principales diferencias se dan en el flujo de calor sensible y en el flujo de calor del suelo, ya que en el flujo de calor latente no se dan diferencias (en ambos lugares el valor es de 7%). Respecto a  $Q_h/Q^*$ , es un 10% mayor en MXLI que en VEMZA (0,44 vs 0,34), mientras que los valores de la razón  $Q_s/Q^*$  indican que en VEMZA es mayor que en MXLI, en un 10% (0,59 vs 0,49). La razón de Bowen es mayor en MXLI que en VEMZA (6,3 vs 5,0), sin embargo ambos valores caen razonablemente dentro de áreas semidesérticas. Con respecto a la relación  $Q_h/Q_s$ , en ambos lugares el valor calculado es menor de la unidad con lo que se observa que el flujo de calor en el suelo es importante, más aún en VEMZA, cuyo valor es más pequeño que en MXLI (0,58 vs 0,91). La relación de  $(Q_h+Q_s)/Q_e$  es muy parecida (13,3 vs 13,6), por lo que se puede inferir que el flujo de calor evapotranspirativo es pequeño, comparado a la suma de los otros dos flujos, en ambos lugares.

Tabla 2. Flujos de calor y relaciones de flujos cuando  $Q^* > 0$  (todas las condiciones de cielo). Los flujos están en  $\text{MJm}^{-2}$  y en paréntesis en  $\text{Wm}^{-2}$ , con los cocientes adimensionales. 17 febrero a 3 abril de 2001

|              | UABC        | Villa Zapata |
|--------------|-------------|--------------|
| <b>Q*</b>    | 8,6 (217,2) | 10,2 (257,6) |
| <b>Qh</b>    | 3,8 (95,9)  | 3,5 (88,4)   |
| <b>Qe</b>    | 0,6 (15,2)  | 0,7 (17,7)   |
| <b>Qs</b>    | 4,2 (106,1) | 6,0 (151,5)  |
| <b>Qh/Q*</b> | 0,44        | 0,34         |
| <b>Qe/Q*</b> | 0,07        | 0,07         |
| <b>Qs/Q*</b> | 0,49        | 0,59         |
| <b>Qh/Qe</b> | 6,3         | 5,0          |
| <b>Qh/Qs</b> | 0,91        | 0,58         |

Para periodos nocturnos (Tabla 3,  $Q^* < 0$ ), la pérdida de energía en forma de  $Q^*$  y  $Q_s$  es mayor en MXLI que en VEMZA; los flujos de calor latente ( $Q_e$ ) son iguales, y la pérdida de calor sensible es mayor en VEMZA en un 10%, comparada con MXLI.

Tabla 3. Flujos de calor y relaciones de flujos cuando  $Q^* < 0$  (todas las condiciones de cielo). Los flujos están en  $\text{MJm}^{-2}$  y en paréntesis en  $\text{Wm}^{-2}$ , con los cocientes adimensionales. 17 febrero a 3 abril de 2001

|              | UABC         | Villa Zapata  |
|--------------|--------------|---------------|
| <b>Q*</b>    | -2,5 (-53,4) | -2,2 (-47,0)  |
| <b>Qe</b>    | -0,2 (-4,3)  | -0,3 (-6,4)   |
| <b>Qh</b>    | 0,2 (4,3)    | 0,2 (4,3)     |
| <b>Qs</b>    | -2,5 (-53,4) | -2,12 (-44,9) |
| <b>Qh/Q*</b> | 0,08         | 0,14          |
| <b>Qe/Q*</b> | -0,08        | -0,09         |
| <b>Qs/Q*</b> | 1,0          | 0,95          |
| <b>Qh/Qe</b> | -1,0         | -1,5          |
| <b>Qh/Qs</b> | 0,08         | 0,14          |

Una manera gráfica de ver lo comentado en los párrafos anteriores, relativo a las tablas 1, 2 y 3, se aprecia en las figuras 5 y 6, que muestran la marcha diaria promedio del balance energético durante una semana (18 al 22 de marzo) de la campaña de 2001 en MXLI y en VEMZA. En resumen, en orden descendente de importancia, los máximos flujos salientes (es decir, eliminación de energía desde la superficie) fueron  $Q_H$  y  $\Delta Q_s$ , en el área urbana, y en el caso del área rural fueron  $\Delta Q_s$  y  $Q_H$ ; en ambos casos seguido por valores muy pequeños de  $Q_E$ . Los flujos convectivos alcanzan sus valores máximos alrededor del mediodía, mientras que  $\Delta Q_s$  con el clásico patrón de histéresis: valores altos en la mañana, y bajos en la tarde.

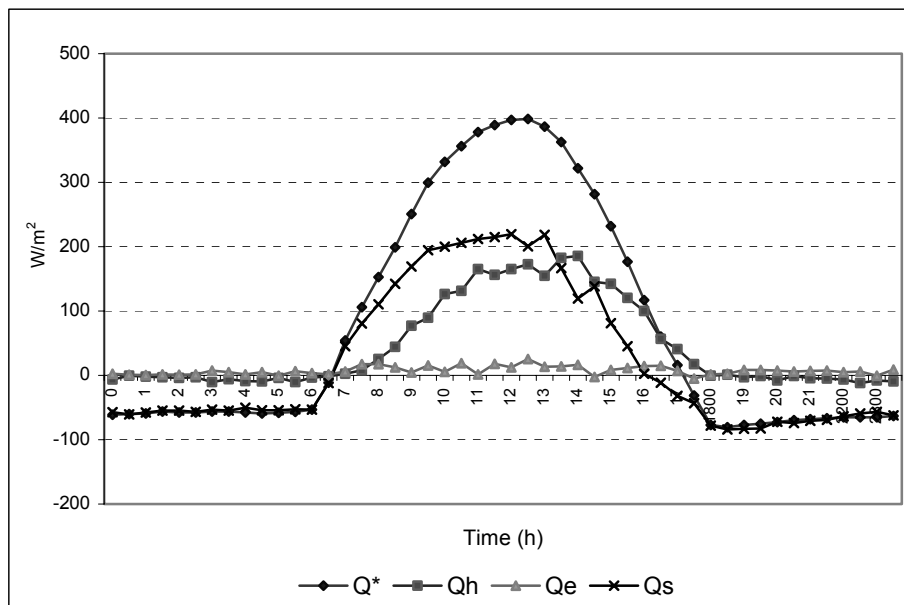


Fig. 5. Flujos promedio en Mexicali, 18-22 marzo 2001 en condiciones despejadas

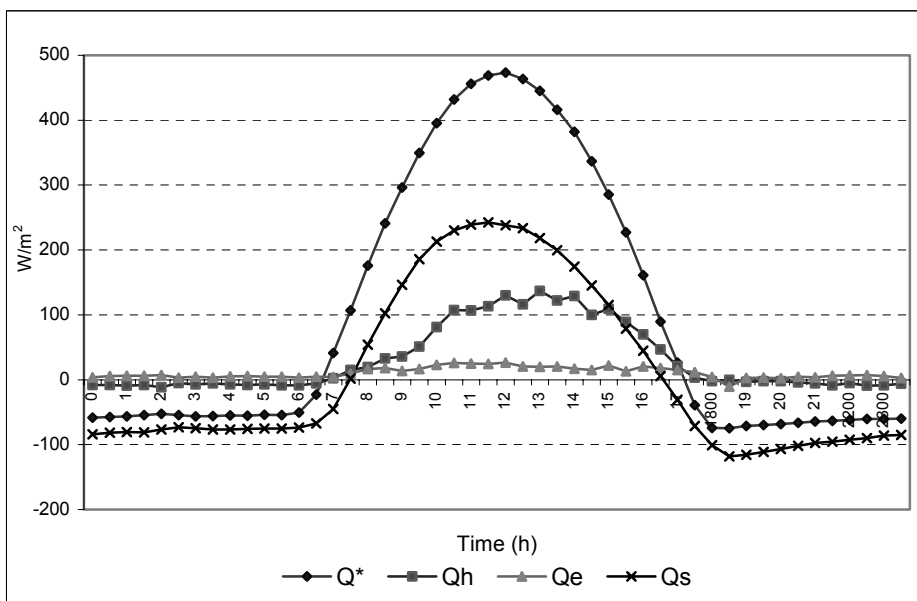


Fig. 6. Flujos promedio en Villa Zapata, 18-22 marzo 2001 en condiciones despejadas



Las figuras 7 y 8, muestran la tendencia de los flujos normalizados (dividido cada uno entre la radiación neta) a fines del invierno e inicios de la primavera durante el año 2001. Ni en MXLI ni en VEMZA se aprecia una tendencia significativa en el consumo de calor por evaporación. En el área suburbana el almacenamiento de calor en el suelo y el calor sensible turbulento se mantienen muy próximos (igualmente sin tendencia), pero a inicios de la primavera el segundo (calor sensible) empieza a superar al primero (calor almacenado). No se tienen datos del verano, excepto los de la campaña de 2003 que se comentará más adelante, pero para entonces esa diferencia se ve muy acentuada (Tabla 4). Para el desierto, la llegada de la primavera coincide con la cercanía de los valores del calor almacenado y el sensible turbulento, mientras que en el invierno claramente el primero era alrededor de dos veces el segundo.

Tabla 4. Sumario de componentes del balance energético en  $Wm^{-2}$  para Mexicali, Tucson y Barcelona, en periodos diurnos de verano con cielos despejados

|       | <b>MXLI</b><br>(suburbio)<br>Junio 19 al 25,<br>2003 | <b>VEMZA</b><br>(desierto)<br>Junio 19 al 25,<br>2003 | <b>Tucson</b><br>(suburbio)<br>mayo 18 a junio 8,<br>1990+ | <b>Tucson</b><br>(desierto)<br>mayo 18 a junio 8,<br>1990+ | <b>Barcelona</b><br>(urbano)<br>Junio 16 y 19 a 21,<br>2001++ |
|-------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Q*    | 280,0                                                | 297,2                                                 | 379,1                                                      | 287,1                                                      | 275,0                                                         |
| Qh    | 202,9                                                | 152,6                                                 | 96,7                                                       | 176,2                                                      | 94,0                                                          |
| Qe    | 7,7                                                  | 3,7                                                   | 85,3                                                       | 11,9                                                       | 27,0                                                          |
| Qs    | 69,5                                                 | 140,9                                                 | 197,1                                                      | 99,0                                                       | 154,0                                                         |
| Qh/Qe | 26,4                                                 | 41,2                                                  | 1,13                                                       | 14,7                                                       | 7,1                                                           |
| Qh/Q* | 0,72                                                 | 0,51                                                  | 0,26                                                       | 0,61                                                       | 0,34                                                          |
| Qs/Q* | 0,25                                                 | 0,47                                                  | 0,52                                                       | 0,35                                                       | 0,56                                                          |
| Qe/Q* | 0,03                                                 | 0,01                                                  | 0,22                                                       | 0,04                                                       | 0,10                                                          |

+GRIMMOND *et al.* (1993)

++ JAUREGUI *et al.* (2002)

La segunda campaña de mediciones de balance energético en MXLI y VEMZA se realizó en junio de 2003. Sus resultados se comparan con un sitio muy similar a Mexicali (Tucson, GRIMMOND y OKE, 1995) y con uno muy diferente pero familiar para los lectores españoles, Barcelona (JAUREGUI *et al.*, 2002), todos ellos con mediciones en el verano. En la tabla 4 se aprecia que la razón de Bowen en MXLI -tanto en el medio desértico como en el suburbano- son sensiblemente mayores que en Tucson y que, desde luego, en Barcelona. El riego y la vegetación urbanas de los suburbios de Tucson pueden explicar el bajo valor de esa razón. En el ambiente suburbano de Tucson y en Barcelona el consumo mayoritario de la energía es en el calentamiento de la superficie, seguido del calor sensible turbulento, mientras que el calor latente de evaporación es marginal excepto en el suburbio de Tucson e indican que en MXLI, comparativamente con VEMZA, más energía está disponible para calentar el aire que para evaporar el agua.

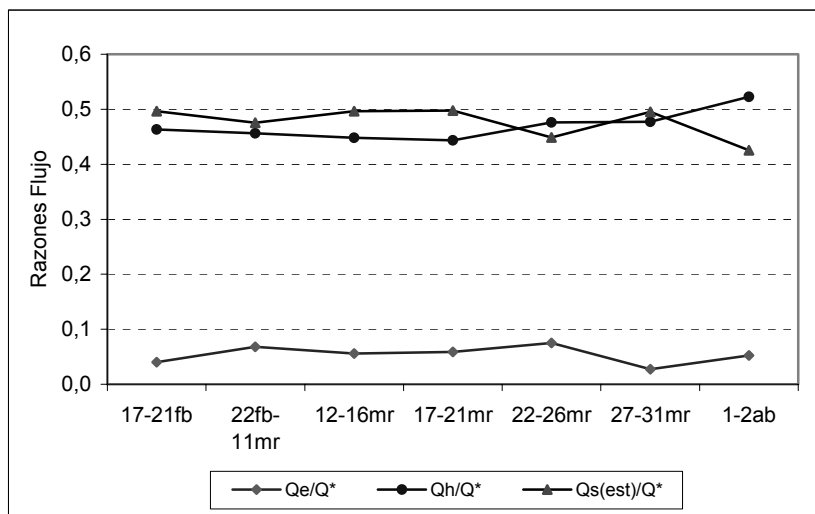


Fig. 7. Razones directas flujos promedio c/5 días secos. Instituto UABC ( $Q^* > 0$ ), 2001

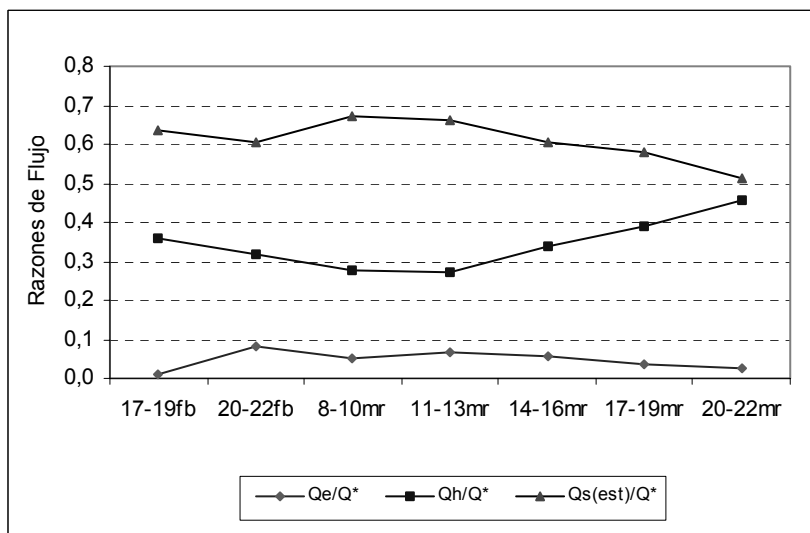


Fig. 8. Razones directas flujos promedio c/5 días secos. Villa Zapata ( $Q^* > 0$ ), 2001

#### 4. CONCLUSIONES

Este estudio ha propiciado un acercamiento para entender la manera en que la disponibilidad de energía neta de la interfaz suelo/atmósfera, es utilizada en un área urbana y un área rural de una zona desértica. Se encontró que, en el período diurno, hay mayor disponibilidad de radiación neta en el área rural (17% mayor), en comparación con la zona urbana; en cambio se encontró que no hay diferencia significativa en el flujo energético de calor latente en ambos lugares. En el área urbana se tiene más flujo de calor sensible que en el área rural, 54% y 32% respectivamente, mientras que el almacenamiento de calor en el suelo, urbano y rural, fue de 37% y 58% cuando  $Q^* > 0$ . Para el período de 24 horas, nuevamente el almacenamiento de calor en el suelo fue mayor en el área rural que en el área urbana.

Para el periodo diurno ( $Q^* > 0$ ) los flujos normalizados indican que la aportación de energía para calentamiento del aire (flujo de calor sensible) es mayor en el área urbana que en el área rural,

mientras que las aportaciones para evaporación (flujo de calor latente) son prácticamente iguales; la contribución de energía para calentamiento del suelo es mayor en el área rural que en el área urbana. Se observa también que el área urbana se comporta como una isla fría durante la mayor parte del día, y como una isla de calor durante la noche; parece ser que las propiedades biofísicas superficiales (albedo, admitancia) de ambas áreas estudiadas, la inercia térmica diurna en la zona urbana, el rápido calentamiento superficial del área rural y la turbulencia térmica propicia esta conducta en las temperaturas del aire. Respecto a las áreas fuente se tiene que en la zona urbana se comete un error mayor, comparada al área rural, en el cálculo de las superficies que el radiómetro neto “ve”, contrastada con las del anemómetro sónico y el higrómetro de kriptón, es entonces posible que en la estimación del flujo de calor almacenado en el suelo se cometa un error mayor en MXLI que en VEMZA.

En tanto que este estudio ha estado orientado a mostrar las diferencias entre el área urbana y rural de una ciudad de tamaño medio (113,7 km<sup>2</sup>), y la comparación de los valores encontrados con otros estudios, un detallado análisis de las características biofísicas urbanas, que dan lugar a la partición de energía encontrada, es un tema pendiente por analizar.

## 5. REFERENCIAS

- BARRADAS, V.L.; TEJEDA-MARTINEZ, A. y JÁUREGUI, E. (1999). “Energy balance measurements in a suburban vegetated area in Mexico City”. *Atmos. Environ.*, 33, pp. 4109-4113.
- CLEUGH, H.A. and OKE, T.R. (1986). “Suburban-rural energy balance comparisons in summer for Vancouver, B.C.”. *Boundary Layer Meteorology*, 36, pp. 351-369.
- GARCÍA-CUETO, R. (1995). *Climatología Sinóptica de Mexicali*. Reporte Técnico, Instituto de Ingeniería, UABC, 45 pp.
- GARCÍA-CUETO, R. y DÁVALOS G.E. (2000). *Estudio de la Isla de Calor en Mexicali, B.C.* Reporte Técnico, Instituto de Ingeniería, UABC, 60 pp.
- GRIMMOND, C.S.B. and OKE, T.R. (1995). “Comparison of Heat Fluxes from Summertime Observations in the Suburbs of Four North American Cities”. *J. Appl. Meteor.*, 34, pp. 873-889.
- JÁUREGUI, E. (1997). “Heat island development in Mexico city”. *Atmospheric Environment*, 31, pp. 3821-3831.
- JÁUREGUI, E.; MORENO, M.C. y TEJEDA-MARTINEZ, A. (2002). The energy balance of central Barcelona (Spain). In: *Fourth Symposium on Urban Environment*, AMS, pp. 100-102.
- OFFERLEE, B. et al. (2002). Analysis of Long Term Observations of Urban Surface-Atmosphere Energy Exchange. In: *Fourth Symposium on Urban Environment*, AMS, 133-134.
- OKE, T.R.; ZEUNER, G. and JÁUREGUI, E. (1992). “The Surface Energy Balance in Mexico City”. *Atmos. Environ.*, 26B, 4, pp. 433-444.
- OKE, T.R. (1987). *Boundary Layer Climates*. Routledge, 435 pp.
- OKE, T.R. et al. (1999). “The energy balance of Central Mexico City during the dry season”. *Atmos. Environ.*, 33, pp. 3919-3930.
- PÉREZ, T.C. y CAMPBELL, R.H. (2003). *Escenarios para el servicio de energía eléctrica en Baja California*. Reporte Técnico, Instituto de Ingeniería UABC, 10 pp.
- TEJEDA, A. (1996). *Sobre mediciones y parametrizaciones del balance energético y la estabilidad atmosférica en la ciudad de México*. Tesis Doctoral, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- TEJEDA, A. and JÁUREGUI, E. (2003). “Surface energy balance measurements in the Mexico City region: a review”. Submitted to *Atmósfera*.

