

EL CLIMA DE LAS CIUDADES¹

Antonio LÓPEZ GÓMEZ

Las ciudades ocasionan notables alteraciones atmosféricas. Además de la contaminación, muy grave y espectacular, por ello más conocida, también se modifican los elementos del clima, debido esencialmente a la masa y disposición de las edificaciones. La absorción de calor solar por ellas durante el día y la lenta irradiación posterior (en lugar muy secundario calefacciones, industrias, vehículos) determinan, sobre todo en las noches en calma, el fenómeno de la «isla urbana de calor», con varios grados más de temperatura (5 ó 10 y aún más, especialmente en el centro) que en el campo abierto y notorias diferencias según la topografía, volumen de los edificios, existencia de parques, etc. Se modifica también la intensidad y dirección del viento y la inestabilidad atmosférica; aumentan las lluvias, por mayor abundancia de núcleos de condensación y movimientos ascendentes del aire, aunque disminuyen las nevadas a causa de la temperatura más alta. Tales cambios respecto al clima de la región circundante son fundamentales para el estudio del ambiente urbano, de tanta importancia en la actualidad.

Las ciudades constituyen los paisajes humanizados más espectaculares. Es allí donde la acción del hombre alcanza expresión e intensidad máximas, incluso se alteran la composición del aire y los mismos elementos del clima (temperatura, precipitaciones, vientos), con honda repercusión ecológica puesto que afectan de forma directa e inmediata a todos los habitantes. La contaminación es de fácil percepción sensorial y ha atraído mucho más la atención por sus nefastos resultados sobre la salud; en cambio, la alteración del clima es más difícil de precisar por los sentidos y tiene menor influencia sanitaria, aunque es notoria sobre el bienestar psicofísico y por tanto en las actividades. Ahora acucia la necesidad de establecer una relación más armónica hombre-medio y es evidente que el problema adquiere graves caracteres para las grandes masas urbanas, ya que cerca de un quinto de la humanidad vive en ciudades mayores de 100.000 habitantes. No debe extrañar el auge de la Geografía urbana, como de todas las disciplinas que se ocupan de la ciudad, y es evidente que la climatología de esas aglomeraciones no puede quedar al margen. Aquí no nos referimos a la contaminación en sí misma, que alargaría demasiado estas páginas, sino al otro aspecto, menos divulgado, a la modificación que experimenta el clima en la ciudad.

Como recuerda Landsberg, Séneca ya se refería a los pestilentes humos de Roma y desde el siglo XIII hay prohibiciones sobre el uso de carbón en Londres, pero el primer estudio se debe a Evelyn, en el siglo XVI, en un curioso opúsculo sobre el clima londinense, en el cual afirma que el azufre producido por el carbón dificulta la llegada del sol. En 1787, el alemán Epp, en una comunicación

¹ Este artículo fue publicado en la revista *Arbor*, el año 1985 (pp.13-32).

a la Academia de Ciencias bávara, describe el olor y el polvo originados en Munich, así como la difusión y lavado de los contaminantes. En 1818, el químico Howard publica la primera edición de su libro sobre el clima de Londres utilizando datos meteorológicos; habla de la niebla urbana («fog city»), concediendo gran influencia a los combustibles, y señala, por primera vez, la temperatura más alta durante la noche que en el campo, 3,7°F (2,2°C), mientras que de día es ligeramente menor en éste. Más tarde, el francés Renou (1855-1868) afirma que la ciudad es un grado más cálida, en promedio, y atribuye gran importancia al humo. En nuestro siglo, en 1927, W. Schmidt utiliza en Viena, y también Pepler en Karlsruhe, vehículos para transportar aparatos y obtener numerosas medidas simultáneas; con ello se inaugura una nueva metodología que permite trazar mapas con isolíneas de los fenómenos. En 1937 Kratzer publica la primera obra general bajo el título *El clima de la ciudad (Das Stadtklima)* y en 1965, Chandler, un libro clásico sobre el clima de Londres. Las investigaciones se multiplican a ritmo acelerado y alcanzan ya más de tres millares de títulos, con buenos resúmenes en las obras generales de Geiger (1966) y Yoshino (1975); excelentes obras de conjunto son las específicas de la WMO (Simposio de 1968), Chandler (1978) y Landsberg (1981). En España, en cambio, apenas ha merecido atención el clima urbano como tal, aparte de la contaminación.

Esta, además de nociva, es importante para el clima, puesto que altera la llegada de la radiación solar e intercepta la radiación terrestre, origina núcleos de condensación, etc., pero otros hechos decisivos se deben a la forma, tamaño y actividades de la ciudad misma.

Aunque el análisis de los elementos del clima se realice por separado, todos ellos están ligados por interrelaciones mutuas y forman el «sistema climático urbano». El nivel de análisis supone la mesoescala, o escala local, según los autores, a diferencia del clima regional; los diversos sectores urbanos corresponden ya al topoclima y los espacios menores y edificaciones al microclima, según Monteiro (12, p. 92 y ss.)².

Los observatorios meteorológicos habituales, establecidos para conocer el clima regional, muchas veces sólo son de utilidad como término de referencia, ya que, precisamente para evitar el efecto de las ciudades, se han situado en las afueras o en parques; ello exige observaciones específicas dentro de los núcleos urbanos con estaciones especiales o, lo que es más frecuente, mediante vehículos; también se utiliza la fotografía con rayos infrarrojos para conocer la temperatura de la superficie, medidas directas en altura con globos o helicópteros, etcétera. La temperatura es el elemento mejor conocido; más difícil es el análisis de la radiación solar, las precipitaciones y el viento. Un aspecto importante es que las variaciones parecen aumentar con el desarrollo de la ciudad, por lo cual las cifras medias de series largas pueden resultar afectadas por tal hecho, aparte de posibles alteraciones generales, como el aumento térmico en la primera mitad de nuestro siglo. Intentamos aquí resumir los aspectos básicos, indicando también algunos de los resultados obtenidos en Madrid, publicados in *extenso* en otro lugar (10), en un avance de una investigación detallada que realiza un equipo del Instituto Elcano de Geografía.

La temperatura. La «isla urbana de calor»

Rasgos generales.- La diferencia de temperatura es uno de los hechos más relevantes; en general la ciudad es más cálida que el campo y ello ha conducido a la expresiva denominación del fenómeno como la «isla urbana de calor» que utilizó Mailey en inglés (“the urban heat island”) por vez primera

² Los números entre paréntesis corresponden a la bibliografía incluida al final.

en 1958. La ciudad recibe un 10-30 por 100 menos de radiación solar debido a la contaminación, pero esa pérdida está considerablemente sobrepasada por la radiación de onda larga emitida por la superficie urbana y por la capa de contaminación y, sobre todo, porque la gran masa de edificios almacena el calor solar y el originado por el hombre y lo emite después, mientras que el campo tiene una inercia térmica mucho menor. Además, en la ciudad hay escaso consumo de energía por evapotranspiración, ya que el suelo es impermeable y son reducidos los espacios verdes, especialmente en el centro. También ha de contarse el calor producido por el hombre: industrias, calefacción, automóviles; la cantidad es muy grande en Nueva York, en invierno, el doble que el recibido del sol, pero sólo un sexto en verano, en Hamburgo igual que el calor solar en invierno, etc.; sin embargo, la mayoría de los autores coincide en que se difunde con rapidez y no tiene mucha importancia en la «isla de calor». Otro argumento es que ésta aparece en muchas ciudades en verano, cuando la generación de calor antrópico tiene poca relevancia.

La diferencia de temperatura entre la urbe y el área rural se aprecia tanto en momentos determinados como en las medias. En las cifras anuales es del orden de 1 ó 1,5 °C; como ejemplo de gran metrópoli se cita Londres. Según el período 1931-60 en el centro la media anual es de 11 °C, en los barrios periféricos 10,3 y en el campo 9,6, siendo la diferencia mayor en las mínimas que en las máximas; en París, en el centro, 12,3 °C y en los aeropuertos de Le Bourget y Orly 10,7 y 10,9, respectivamente (Fig. 1). En ocasiones concretas las diferencias son de 5 y hasta 10°, especialmente en noches despejadas; en Londres las mínimas en el centro y en el exterior difieren 5 ó 6° (Fig. 2); en San Francisco y Montreal llegan a 11°, etc. También ocurre en ciudades medianas y pequeñas; por ejemplo, 4,4° en Leicester (Inglaterra), con 270.000 habitantes; más de 6° en varias de Estados Unidos, de 20.000 habitantes, unos 4° en diversas del Japón, etc.; incluso en algún centro comercial

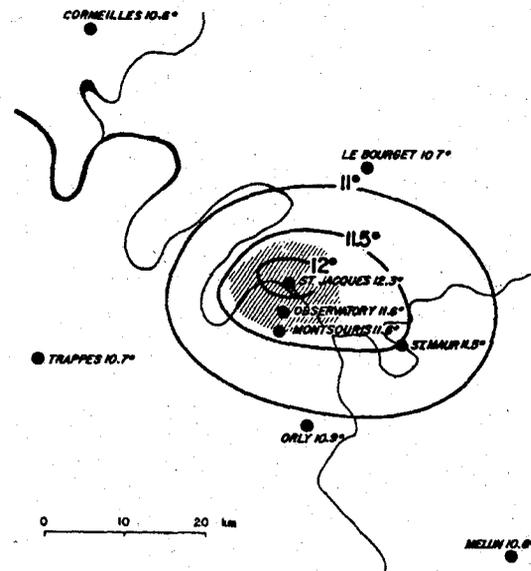


Fig. 1.- Isotermas anuales en el área de París (según Dettwiller).

aislado del primer país se han registrado por la noche 2° más que en sus alrededores (Norwin). En Madrid, al amanecer, en invierno, hemos detectado 6 ó 7° más en el ensanche (calle Alcalá, Castellana) que en el campo abierto.

La mayoría de los estudios se han realizado en latitudes medias, pero el fenómeno parece que se acentúa en zonas subárticas; en cambio se atenúa en las regiones tropicales.

Un hecho bien perceptible en mapas detallados es la aproximación de las isotermas en la periferia urbana (Fig. 2) o el desnivel rápido en perfiles térmicos, que refleja un cambio brusco, como si la ciudad originase un frente cálido a su alrededor, con gradiente de varios grados por kilómetro; por ejemplo, en Madrid se han registrado 2,5° de diferencia entre la Puerta del Sol y la plaza de Isabel II en menos de 500 m.

El intenso efecto en las noches invernales tiene repercusión muy notable en las heladas, se retarda



Fig. 2.- "Isla de Calor" en Londres. Temperaturas mínimas el 4 de junio de 1959. En el centro, más de 15°C; en la periferia, 10'6 (entre paréntesis, grados F) (según Chandler).

la fecha de las otoñales y se acortan también las de primavera, con lo cual la temporada libre se alarga en unos treinta días más en Washington y Moscú, sesenta días en Munich, etc. Modalidades diferentes se introducen a causa de factores naturales o urbanos, como tipo de tiempo, ritmo diario y estacional, tamaño y morfología de la ciudad, topografía, etc., que indicaremos brevemente.

Tipo de tiempo.- Los valores máximos se alcanzan con aire en calma y cielo despejado; con viento ligero la «isla de calor» se atenúa y desplaza hacia sotavento, con viento fuerte llega a desaparecer; igual ocurre con ciclo cubierto o precipitaciones. En el caso del viento se ha podido establecer una estrecha relación entre su intensidad y el tamaño de la ciudad, existiendo una velocidad límite para que se manifieste la «isla de calor»: en un par de ciudades pequeñas de Estados Unidos y Japón, de 30.000-50.000 hab., esa velocidad es de 4-5 m/seg.; en Reading (Inglaterra), Hamilton (Canadá) y Brema (120.000- 400.000 hab.) es de 6-8 m/seg.; en Montreal (2 millones) y Londres (8,5 millones), 11-12 m/seg.; así, Oke y Hannell han señalado una relación empírica para la velocidad límite (u) en: $3,4 \log P - 11,6$, en que P es la población.

Ritmo diario y estacional.- La mayor diferencia respecto al campo se verifica generalmente dos o tres horas después de la puesta del sol, aunque en algunos casos parece que en verano es a medianoche; se debe a la gran inercia calórica de la masa urbana, mientras que en campo se enfría más deprisa; en grandes urbes el contraste se mantiene hasta el amanecer y, por tanto, afecta a las temperaturas mínimas. Durante el día, las áreas rurales, de baja capacidad térmica y expuestas al sol, se calientan más deprisa y la diferencia respecto a la ciudad es menor; incluso algunos estudios señalan que la ciudad puede ser más fresca. Por ejemplo, Londres, un día de cada tres, según Chandler, debido al efecto de retardo del centro, de alta capacidad térmica (gran volumen y densidad de edificios) y también la sombra proyectada en calles y patios.

Difíciles de explicar son las diversidades estacionales. En muchas ciudades del Reino Unido y Oeste de Estados Unidos son mayores en verano, de lo que se deduce poca influencia de las calefacciones; en el Japón son mayores en invierno y en varias localidades de Escandinavia, Europa Central y América Central no se aprecia un ritmo claro.

Parece existir una tendencia a disminuir los domingos en invierno, lo cual estaría en relación con menor contaminación y emisión de calor (industria, calefacción en lugares públicos).

Topografía.- En ciudades de relieve acusado, con tiempo anticiclónico invernal y aire en calma, se produce acumulación de aire frío y pesado en las partes bajas con inversión térmica, es decir, temperatura menor que en los sitios elevados; el hecho es bien conocido en los valles respecto a las montañas, igual ocurre en las ciudades. Muy citado por su carácter pionero es el estudio de Middleton y Millar en Toronto (1956) en una noche de febrero; aparte de otras menores registraron una inversión espectacular: en una vaguada de sólo 50 m de desnivel, un descenso de temperatura de 13°. En Madrid, entre la Puerta del Sol y el Puente de Segovia, en el Manzanares, con 65 m de desnivel, hemos detectado diferencias de 6° en invierno. Estas inversiones son distintas de las que, con amplitud regional, se establecen en invierno cuando hay una advección de aire cálido superior y las mínimas son varios grados más bajas en Madrid que en la sierra de Guadarrama, como hemos analizado en otro lugar (8).

La «isla de calor» puede también resultar dividida en dos por un río importante que atraviese la ciudad, como ocurre en Washington, cruzada por el Potomac; entre Bonn y Buel, separadas por el Rin; en Londres se percibe una tendencia parecida, con entrantes fríos por el Támesis, en el E y en el W, etc.

Edificación.- El centro, con altas construcciones, es de gran capacidad térmica, mientras que la difusión del calor es lenta por las calles relativamente estrechas, los llamados «cañones urbanos»

y los angostos huecos interiores con un balance de energía peculiar, en cambio en la periferia disminuye el volumen urbano, sobre todo en los países con frecuente vivienda unifamiliar. Así, en un perfil de Londres la curva de temperatura por la noche sigue con mucha aproximación la densidad de las casas. Especial importancia tienen los espacios abiertos y los parques. Por ejemplo, Chandler midió las temperaturas más bajas en el centro de Londres, precisamente en Hyde Park; en Madrid los datos del observatorio del Retiro indican una microisla de frescor, etc.

Tamaño y crecimiento de las ciudades.- Hay acuerdo casi general en estimar que acentúan la «isla de calor»; la eliminación de un posible cambio general del clima se consigue comparando con estaciones próximas aisladas o en núcleos que no hayan crecido. Con los datos de 77 localidades norteamericanas, Mitchell señaló en 1953 que la elevación de temperatura por el crecimiento urbano sería de más de 1°F (0,55°C) en un siglo, pero sin clara relación con el ritmo de desarrollo, como indicamos en un comentario en 1954 (6). En Japón, entre 1936-65, en tres urbes de notable crecimiento (Tokio, Osaka y Kioto), la media indicaba un aumento de 0,9°, pero en otras tres menores y sin notable desarrollo, sólo 0,3°. Un caso típico, estudiado por Landsberg, es Columbia (Maryland), cuando tenía 1.000 hab., en un día concreto registró un grado de diferencia respecto al campo (salvo un inicio de centro de negocios con 3°); diez años después, con 20.000 hab., el contraste era de 7°.

Para comparar ciudades y su evolución, a falta de otros parámetros de difícil medida, se utiliza la población. En un trabajo posterior al citado antes, Mitchell indica que la raíz cuadrada de aquella es el factor más representativo de la contribución urbana al cambio de temperatura. Para las máximas diferencias urbano-rurales, Oke obtiene una ecuación de regresión respecto al logaritmo de la población (P); para nueve ciudades de América del Norte sería $3,06 \log P - 6,79$, y para once europeas, $2,01 \log P - 4,06$, es decir, el incremento de la «isla de calor» sería menor en Europa. Sin embargo, Chandler apunta que, en situaciones concretas, el tamaño de la ciudad no es muy importante, y estima que los mayores contrastes se deben a la morfología urbana muy compacta; el crecimiento lo que lleva aparejado es, precisamente, un centro más voluminoso, además se debilita el viento que actúa contra la «isla de calor».

Distribución vertical de las temperaturas.- Muestra también notables anomalías, sobre todo nocturnas. Un trabajo clásico de Duckworth y Sandberg, en San Francisco (1954), mediante globos cautivos, indica que en la ciudad apenas varía la temperatura hasta 100 m, mientras que en el campo hay una fuerte inversión térmica, por irradiación, hasta 30 m y luego cambia poco; con ello las gráficas se cruzan arriba (el llamado efecto *crossover*) y la temperatura encima es menor en la ciudad que en el campo. Otros estudios en Viena, en torres, muestran hechos análogos y también una «segunda superficie urbana» al nivel medio de los tejados que debe ser importante si hay cierta uniformidad de altura en las casas; en Nueva York la diferencia de temperatura se manifiesta a unos 300-400 m; en Madrid, hasta unos 300-400 m la temperatura es unos 4° más alta que en el aeropuerto de Barajas.

La explicación del aire urbano más frío arriba es compleja, se ha pensado en la pérdida de calor por radiación de onda larga desde la capa de contaminación, en los efectos adiabáticos de mezcla vertical en la ciudad, en la circulación celular entre ésta y el campo, etc.

Un trabajo clásico de Clarke, en Cincinnati (1969), con inversión térmica regional manifiesta hasta 300 m en la ciudad -debido a la «isla de calor»-, apenas aparece a los 250 en el centro y a la mitad de altura en la periferia.

En general parece que, en días soleados, el gradiente vertical de temperatura (descenso con la altitud) aumenta rápidamente en la ciudad, sobre todo en verano, mientras que en invierno es menor y arriba pueden persistir condiciones de isoterminia o inversión a alturas relativamente pequeñas.

Estabilidad y vientos

En el aire de la ciudad la inestabilidad es mayor a consecuencia de la «isla de calor» y si en ésta hay variaciones notables también se traducen en aquéllas. La investigación se realiza mediante radiosondeos especiales de baja altitud o con globos de volumen constante (*tetroons*, abreviatura de *tetraedral plastic balloons*), que se desplazan a nivel uniforme si no hay cambios en el aire. Un caso muy llamativo es el de Nueva York: a mediodía, los núcleos adyacentes, más cálidos que el campo, provocan en el globo una ascensión desde 200 a 600 m y a más de 800 m en la isla de Manhattan, para descender otra vez a unos 200 m sobre ambos brazos del río Hudson, donde las aguas más frescas estabilizan el aire. Esa inestabilidad creada por el calor urbano es factor decisivo en el aumento de nubosidad y precipitaciones que se analiza después.

El estudio del viento es muy complejo. Hecho especial es la rugosidad que suponen los edificios, la cual afecta hasta tinos 600 m, la llamada «capa límite» (*boundary layer*), desde un plano de referencia correspondiente a la altura media de las construcciones u otros elementos de rugosidad. Por debajo, en el interior de la ciudad, hasta unos 40 m en general, las velocidades y direcciones son muy diversas según el trazado de las calles y el volumen de las casas: hay calma en el fondo de espacios cerrados, por el contrario intensidades notables cuando el viento se canaliza por las calles orientadas en la misma dirección, remolinos en los cruces con vías perpendiculares y en éstas vórtices de eje horizontal. Estos últimos son fundamentales para evacuación de contaminantes producidos al nivel del suelo, especialmente el monóxido de carbono de los automóviles; experiencias en Francfort, en calles de unos 20 m y edificios de 30 m, muestran, según Georgii, que la evacuación es completa con viento mayor de 5 m/seg., regular por encima de 2 m/seg. y muy mala con velocidad inferior, siempre con diferencia notable entre el lado de barlovento y el de sotavento.

El hecho general más importante es la menor velocidad por el rozamiento y el obstáculo frontal que supone la pantalla de edificios, con una disminución del 10-20 por 100 en los vientos máximos y mayor número de calmas. Otro efecto es el retardo en el avance, como se ha demostrado con la brisa marina en Nueva York; sería muy interesante analizar esto en las aglomeraciones de las playas, donde es frecuente una cortina de altos bloques en primera línea.

Se producen también cambios de dirección. En diversas ciudades norteamericanas durante el día hay un giro anticiclónico sobre el centro, luego ciclónico en la periferia a sotavento; por la noche, si existe, sólo afecta hasta unos 300 m, más arriba desaparece y tiene lugar una difluencia a ambos lados de la ciudad y quizás también por encima a causa de la «isla de calor».

Muchas observaciones indican un movimiento ascensional del aire urbano, sin duda por el calor y la rama ascendente de una circulación celular que enlaza el aire fresco del campo con el cálido urbano; así, de noche sobre todo, puede haber en superficie un aflujo de aire exterior, una especie de «brisa del campo», como investigó Stummer en Francfort (Fig 3) y luego se ha comprobado en otras ciudades, pero las direcciones son muy irregulares debido al trazado de las calles, pulsátiles, muy ligeras (menos de 4 m/seg.) y en seguida desaceleradas por la fricción de la periferia. Landsberg atribuye a esa convergencia urbana la mayor intensidad del viento que se manifiesta a veces en la ciudad, en contra de la norma general.

Efectivamente, Chandler, en Londres, y otros en Nueva York, han señalado que en la superficie la velocidad es mayor en el campo con vientos fuertes, pero si son débiles ocurre a la inversa, situando el umbral en 3-5 m/seg.; así, de día, es frecuente la mayor velocidad en las áreas rurales, mientras que de noche ocurre en la ciudad. Esto último sucede, sobre todo, cuando hay inversión térmica en el campo, que amortigua el viento, pero en el espacio urbano el aire es relativamente inestable, la mayor temperatura y la turbulencia mecánica (por el rozamiento) determinan un flujo

que aumenta la velocidad y es más que suficiente para compensar la fricción. Se han realizado diversos modelos matemáticos de temperatura y viento en la atmósfera urbana, pero las condiciones iniciales y los valores límite casi nunca son conocidos con la suficiente precisión y densidad de datos, por lo cual las soluciones sólo son aproximadas.

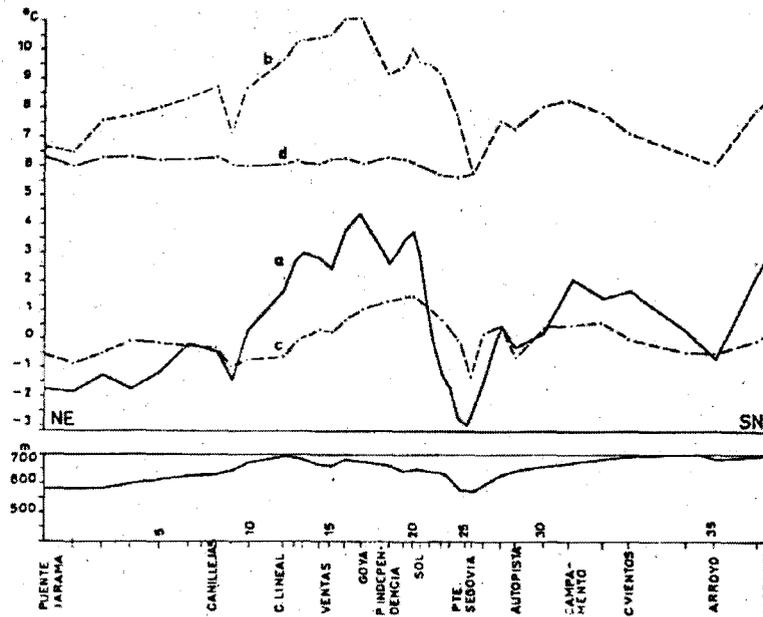


Fig. 3.- Perfiles térmicos y topográficos NE-SW en Madrid (Puente del Jarama-Alcorcón), mediante 37 puntos de observación, febrero-marzo 1984: a) media de tres días a las 7 h., aire en calma; b) recorrido a las 23 h.; c) recorrido con ligero viento del NE y cielo nuboso; d) recorrido parcial a las 8 h. con lluvias y viento (según López Gómez y Fernández García).

Humedad

También ofrece rasgos propios en la ciudad. Esta es esencialmente impermeable y la escorrentía de las precipitaciones es muy rápida; además hay pocas superficies con suelo natural y vegetación, sobre todo en las áreas internas, por tanto es reducida la evapotranspiración. Sin embargo, se ha subestimado la acción de los espacios verdes y también la absorción de lluvia por ladrillos y tejas de los edificios, que dará lugar a evaporación posterior.

Por el contrario, diversas actividades producen vapor de agua: los automóviles al nivel del suelo, a mayor altura calefacciones, industrias diversas, centrales termoeléctricas; aunque no hay evaluaciones adecuadas parece que no compensan los aspectos negativos citados antes, así- algún estudio en Nueva York indica que la evaporación es solamente el 25 por 100 de la que tiene lugar en la costa inmediata.

La humedad relativa se reduce aproximadamente en un 5 por 100, pero en noches despejadas y en calma la disminución puede llegar al 20-30 por 100; se estima que la mitad se debe a la «isla de calor» y el resto a la baja evapotranspiración. En algún caso se ha visto que en días claros, con diferencias notorias, el valor máximo en la ciudad es después de medianoche, cae notablemente un par de horas después del amanecer y el mínimo tiene lugar a mediodía, mientras que en el campo el máximo es a la puesta del sol y el mínimo a la salida. Las zonas con mayor densidad de edificios y falta de espacios verdes son, lógicamente, las más secas; por ejemplo, un estudio en Washington muestra con toda claridad cómo aumenta el rocío desde el centro a los alrededores.

Nubosidad y precipitaciones

La formación de nubes es favorecida por dos causas: convección y contaminación. La primera, debida al calor, actúa sobre todo en verano, así a mediodía y hasta finales de la tarde hay mayor nubosidad media en el aeropuerto neoyorquino de La Guardia que en el más exterior de Kennedy. La contaminación, mayor en invierno, sobre todo con inversión térmica, aumenta los núcleos de condensación de nubes por transformación del bióxido de azufre (SO_2) en ácido sulfúrico y sulfatos higroscópicos; también el óxido de nitrógeno (NO) se puede convertir en ácido nítrico, etc. Pero se atribuye más importancia a los núcleos de hielo que transforman gotas sobreenfriadas en cristales de hielo, esenciales en el comienzo de la precipitación; tales núcleos son producidos por las acérras y el plomo de la gasolina de los coches, que se combina con yodo, procedente del mar o de las combustiones de materias orgánicas, para originar yoduro de plomo muy efectivo.

La concentración de aerosoles determina visibilidad menor y más fácil formación de nieblas, así éstas eran el doble en Londres que en el campo antes de la Ley de «aire limpio» de 1956, pero las más densas no ocurren en el centro mismo, más cálido, sino a su alrededor. La combinación de humo, niebla y gases o *smog* (abreviatura de *smoke* y *fog*) es sobre todo invernal, nociva para la salud y de carácter reductor; en cambio, el *smog*, llamado «fotoquímico» -típico en Los Angeles-, en que interviene el ozono, necesita energía solar, es más frecuente en verano y de acción oxidante. La medida de las lluvias es difícil porque requiere pluviómetros urbanos y muestra gran variabilidad entre lugares próximos. En conjunto parece seguro que en grandes ciudades y también en algunas medias llueve un 5-10 por 100 más que en el campo (Fig. 4). Los motivos son tres: 1) El efecto de obstáculo determina más lentitud en el paso de los procesos originadores de lluvias y, por tanto, mayor caída total. 2) La «isla de calor» ocasiona movimientos ascendentes del aire, que incluso pueden iniciar la precipitación. 3) Los productos de la contaminación pueden iniciar la lluvia en nubes sobreenfriadas.

Se discute la importancia de cada factor y es posible que la mayor turbulencia térmica y mecánica sea más decisiva que la contaminación. Sin embargo, ciertos ritmos semanales parecen confirmar la importancia de ésta, como ya indicó Ashwort en Rochdale, en 1929, con una disminución de lluvias del 13 por 100 los domingos; en París, según Detwiller, sería el 25 por 100 menos que en día laboral medio; en Estados Unidos sólo se percibe descenso del 8 por 100 en invierno, pero no en verano.

También parece positiva la influencia urbana en lluvias copiosas y tormentas estivales. Observaciones de Schmauss en Munich, en 1927, fueron confirmadas por Kratzer en Nuremberg (1956) y después en otros lugares, por ejemplo en Chicago y St. Louis hay 5-7 por 100 más tormentas en verano, en Omaha y Kansas City el granizo es 8 y 14 por 100 más frecuente que en el campo; en Washington, en Londres, etc., se han registrado lluvias de 25 hasta más de 100 mm en el centro y nada o muy poca en las áreas rurales. Sin embargo, algunas investigaciones en Berlín han dado resultados contradictorios.

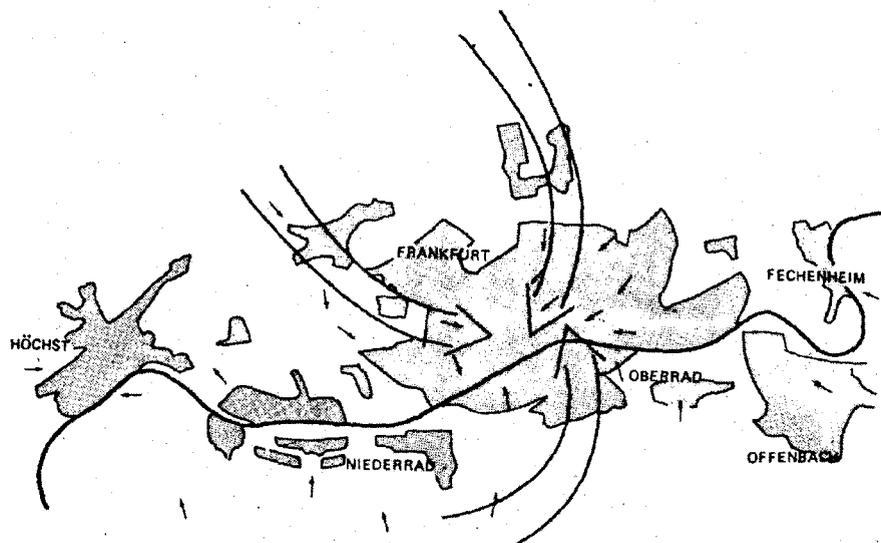


Fig. 4.- *Convergencia nocturna del viento en situación de calma, en Frankfurt am Main (adaptada de Stummer, según Landsberg).*

En cambio, las nevadas disminuyen en general a causa del calor urbano. Ya Kassner suponía que en Berlín eran un 28 por 100 menos numerosas que en el campo, también el 30 por 100 menos en París; en Nueva York la cantidad de nieve disminuye el 16 por 100 y en Chicago el 30 por 100. Sin embargo, puede haber nevadas ligeras específicamente urbanas, debido a los núcleos de hielo ya citados, con capas de estratos bajos sobreenfriados, como se ha estudiado en Mannheim y en varias centrales termoeléctricas norteamericanas.

Finalmente, el aumento de precipitaciones por el desarrollo urbano ha sido indicado en ciertos casos con valores del 5 al 20 por 100, pero en varias ciudades de Estados Unidos no se perciben.

Notas sobre Madrid

Aunque ya se ha hecho alguna referencia a Madrid, vamos a resumir los resultados esenciales de una investigación inicial, aludida al principio, expuestos con detalle en otro lugar (10). En 1961 ya indicamos que los tres aeropuertos de Barajas (civil) al NE., Cuatro Vientos y Getafe (militares) al S., mostraban semejante temperatura media anual que el observatorio del parque urbano del Retiro; en cambio, eran claramente menores en éste las máximas de julio y de enero y mayores las mínimas de enero, con lo cual resultaba una amplitud de 2-3° menor, es decir, una mayor templanza, y apuntábamos la posible influencia del parque (7, p.12). Lo mismo se aprecia con datos de la serie 1948-79 (10, p.11). En cuanto a las precipitaciones los datos disponibles en 1961 eran contradictorios y hemos de esperar la realización de nuevos estudios; sin embargo, el efecto de la contaminación parece manifestarse ya, según Catalá, en los años 40; cuando era escasa, no había diferencias semanales en los días de lluvia, pero en los 70 son mucho menos en los fines de semana (1).

Desde los últimos años será posible utilizar también los datos del nuevo observatorio del Instituto Nacional de Meteorología en la Ciudad Universitaria, aunque en zona abierta y arbolada, y sobre todo los tres intraurbanos en las plazas de Castilla, España y Manuel Becerra (Roma), de la red municipal para la contaminación; comparando con los del Retiro, Ciudad Universitaria y Barajas, en tres años solamente, aquéllos resultan 4° más cálidos en invierno y en verano, lo cual refleja bien la «isla de calor».

Hemos realizado además mediciones en unos treinta puntos en cada uno de los tres itinerarios (ida y vuelta) cruzando la ciudad y sus alrededores en fin de semana, con tiempo despejado y en calma, a las siete de la mañana en invierno. Los perfiles son muy significativos, con diferencias de 6-7° respecto al campo abierto. En la dirección N-S destaca la «isla de calor» en el paseo de la Castellana, entre las plazas del Cuzco y Cibeles, con disminución rápida en el paseo del Prado, posiblemente por menor volumen de los edificios e influencia de jardines. En dirección NE-SW la mayor temperatura se registra en la calle de Alcalá, entre Ventas y Sol (Fig. 5); en el itinerario NW-SE, en las inmediaciones de Sol-tramo medio de Gran Vía.

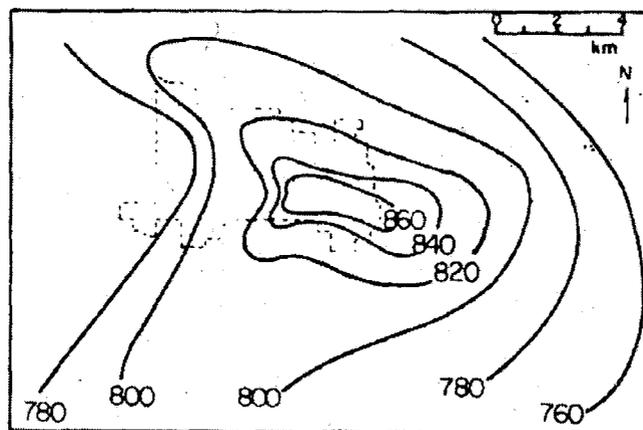


Fig. 5.- Isoyetas de precipitación anual (mm) en Urbana (Illinois, Estados Unidos). La línea de trazos indica el límite urbano (según Changnon).

Detalles interesantes son, por ejemplo: un abrupto máximo junto al alto edificio de la Telefónica, con gran fachada orientada al S; una inversión térmica en el puente de las Ventas, al cruzar la vaguada del antiguo arroyo Abroñigal (hoy autopista M-30); otro mínimo en la plaza de la Independencia (Puerta de Alcalá) que debe ser influencia del inmediato Retiro. Especialmente intenso es el fenómeno en la vaguada del río Manzanares, en el puente de Segovia, con un desnivel de 65 m respecto a la Puerta del Sol, la temperatura baja casi 6° (vid. figura 5); además del efecto de inversión debe intervenir la penetración de aire frío exterior, puesto que en el puente de Praga, aguas abajo y ya más dentro de la ciudad, la diferencia respecto a ésta es de 4°. A causa de ello aparece una «isla de calor» secundaria en los barrios al otro lado del río. También se apreciaron «microislas de calor», de unos 4°, en las localidades de los alrededores, entre 10.000-140.000 hab., como Alcobendas-San Sebastián de los Reyes al N., Alcorcón al SW y Getafe al S. Finalmente, ha

de apuntarse que con viento NE la «isla de calor» se atenúa considerablemente y en día de lluvia y viento desaparece por completo.

Aunque solamente son notas provisionales indican que el clima urbano de Madrid ofrece notable interés y exige un extenso programa de trabajo.

Conclusiones

La consecuencia más importante se refiere a la sensación de bienestar, con serias implicaciones laborales y por tanto económicas. Se han establecido diversos modelos climáticos, desde los más simples, como el de Taylor, a los más complejos, de Olgyay o Givoni, y los índices obtenidos se aplican también a la construcción, para conseguir las mejores condiciones con el menor consumo de energía, es decir, la llamada «arquitectura solar», como el estudio realizado bajo nuestra dirección por E. Jiménez Alvarez. Pero los observatorios meteorológicos están en las afueras de las ciudades y para las zonas urbanas de alta densidad son necesarios estudios específicos.

Considerando el calor el problema mayor, Landsberg indica los resultados en una docena de ciudades de Estados Unidos, comparadas con sus aeropuertos, tomando como límite la temperatura de 18°. En invierno se restan las medias diarias por debajo y esas diferencias se suman, obteniendo los grados-días que es necesario compensar con calefacción; la ciudad exige un 8 por 100 menos, tiene cierta ventaja; en verano se consideran los grados-día por encima de 18°, las ciudades exceden en 12 por 100 y la desventaja se acentúa porque el gasto de energía es mayor para la refrigeración. En el centro de Londres los grados-día por debajo de 15,6° son el 15 por 100 menos que en el campo, etc.

Pueden añadirse otras cuestiones como la influencia de las heladas en la construcción o en los jardines, la evacuación de precipitaciones copiosas, cantidad y perduración de la nieve, la aireación para mejorar las temperaturas y la contaminación al nivel de las calles, etc.

En resumen, el clima urbano no sólo tiene interés científico indudable, sino también gran valor humano y económico. Unas relaciones ecológicas más correctas en las ciudades exigen, entre otros, un estudio geográfico profundo, y en el aspecto fundamental es el ambiente climático.

Bibliografía*

- (1) CATALÁ, J.: *Ozonosfera y posibles cambios climáticos*. Discurso Real Acad. Ciencias Ex., Fís. y Nat., Madrid, 1981, 36 pp.
- (2) CHANDLER, T. J.: *The climate of London*, Londres, Hutchinson, 1965, 292 pp.
- (3) CHANDLER, T. J.: *Urban climatology and its relevance to urban design*. Ginebra, WMO, 1976, 61 pp. Nota técnica 149.
- (4) GEIGER, R.: *The climate near ground*. Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1966, XIV-611 pp.
- (5) LANDSBERG, H. E.: *The urban climate*. New York, Academic Press, 1981, 275 pp.
- (6) LÓPEZ GÓMEZ, A.: «La ciudad y el clima», *Estudios Geográficos*, 1954, pp. 601-602.

- (7) LÓPEZ CÓMEZ, A.: «El clima de Madrid», en *Plan General de Ordenación Urbana*, Madrid, Ministerio de la Vivienda, 1962, I, pp. 68-90.
- (8) LÓPEZ GÓMEZ, A.: «Las inversiones de temperatura entre Madrid y la Sierra de Guadarrama», *Estudios Geográficos*, 1975, pp. 567-604.
- (9) LÓPEZ GÓMEZ, A., y FERNÁNDEZ GARCÍA, F.: «La contaminación atmosférica. Distribución espacial y variaciones estacionales», en *Madrid. Estudios de Geografía Urbana*, Madrid, Instituto Sebastián Elcano (C. S. I. C.), pp. 71-100.
- (10) LÓPEZ GÓMEZ, A., y FERNÁNDEZ GARCÍA, F.: «La isla de calor en Madrid. Avance de un estudio de clima urbano», *Estudios Geográficos*, 1984, XLV, pp. 5-34.
- (11) LOWRY, W.: «El clima de las ciudades», en *El hombre y la ecosfera*, Barcelona, Scientific American-Blume, pp. 202-210.
- (12) MONTEIRO, C. A. de F.: *Teoría e clima urbano*. São Paulo, Instituto de Geografía, 1976, 181pp.
- (13) WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION: *Urban climates*, Ginebra, WMO, 1970, 390 pp. Nota técnica 106.
- (14) YOSHINO, M. M.: *Climate in a small area*. Tokio, Univ. Press, 1975, XVI-549 pp.

* Las obras citadas contienen copiosa bibliografía; por ello se prescinde aquí de los numerosos artículos consultados, especialmente en las revistas *Bull. American Meteorological Soc.*, *Journal of Applied Meteorologie*, *Monthly Weather Rev.*, *Japanese Progress in Meteorologie*, *Quarterly Journ. Meteorological Soc.*, etc.