

ESTUDIO DE LA EVAPORACIÓN DE UNA POBLACIÓN DE GOTAS

M.A. Madrid *, G.G. Aguirre Varela, N.E. Castellano and E.E. Avila

Facultad de Matemática, Astronomía y Física - Universidad Nacional de Córdoba
Ciudad Universitaria -Córdoba - Argentina

En este trabajo se presentan mediciones de la evaporación de una gota de agua sobre una superficie de vidrio, a una dada temperatura y humedad relativa del ambiente. En particular se determina la variación del diámetro de la superficie de contacto agua-vidrio en función del tiempo. Se reportan resultados correspondientes a la evaporación de una única gota y también para una población de gotas de agua sobre una superficie de vidrio. Se contrastan los resultados con el fin de determinar la influencia de las gotas vecinas sobre la evaporación de gotas individuales. Se comparan los resultados con los reportados por otros autores.

Palabras Claves: gotas, evaporación, nubes

Measurements of the evaporation of a water droplet over a glass surface at controlled temperature and relative humidity are presented in this work. The diameter of the water-glass surface contact as a function of time is determined. Results belonging to a single droplet and a population of droplets are reported. These results are compared in order to determine the influence of the neighboring drops on the evaporation of individual drops. The results are also compared with those reported by other authors.

Key Word: drops, evaporation, clouds

I. INTRODUCCIÓN

La evaporación de una gota de agua, tanto suspendida como apoyada sobre diferentes sustratos, ha sido el objeto de estudios de muchos investigadores, ya sea por estar vinculada a procesos atmosféricos, por relacionarse con procesos de transferencia de calor y ventilación o por requerimientos durante el diseño de sistemas de combustión^{1,2,3,4}. Sin embargo el proceso de evaporación de gotas no está completamente descrito y menos aún cuando se tiene una nube constituida por gotas de diferentes tamaños.

Es conocido que el sustrato sobre el cual se asienta la gota influye en el desarrollo de su evaporación. Esto es, la interacción entre la gota y el sustrato es determinante en el valor del ángulo de contacto que la gota adopta y, también, en la variación que dicho ángulo tiene mientras se desarrolla el proceso de evaporación.

En este trabajo se presentan resultados de experimentos en los que se estudió la evaporación de gotas individuales con el objeto de realizar el control del sustrato de vidrio utilizado, y también se presentan resultados de evaporación de nubes de gotas depositadas sobre el mismo sustrato. En particular, los resultados corresponden a gotas individuales o inmersas en nube, con diámetros de algunas decenas de micrómetros.

II. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES

El dispositivo utilizado cuenta con un microscopio óptico al cual se le adaptó una cámara filmadora, una

PC con placa de adquisición de imágenes, un termómetro, un higrómetro, un generador de gotas de Abbot-Cannon y un nebulizador ultrasónico.

El generador Abbot-Cannon permite obtener, en forma individual, gotas de agua tridestilada con diámetros comprendidos entre 80 μ m y 500 μ m. El nebulizador ultrasónico permite producir una nube de gotas de agua, con diámetros entre 5 μ m y 60 μ m y un diámetro medio de unos 20 μ m.

Se realizaron dos tipos diferentes de experimentos. En los primeros se estudió la evaporación de gotas de agua individuales depositadas sobre un sustrato de vidrio. Las gotas, de tamaños del orden de los cientos de micrómetros, fueron producidas mediante el generador Abbot-Cannon.

En los segundos se estudió la evaporación de una nube de gotas depositada sobre un sustrato de vidrio. La nube fue producida mediante el nebulizador ultrasónico.

Las temperaturas y las humedades relativas del ambiente en el que se desarrollaron ambos tipos de experimentos, tuvieron valores similares. Además, se constató la repetitividad de los resultados obtenidos.

Antes de comenzar cada medición, se realizaba una minuciosa limpieza del sustrato de vidrio a emplear, haciéndose numerosos enjuagues del mismo, con agua tridestilada, a los efectos de eliminar todo tipo de partículas asentadas sobre la superficie.

* marcosamadrid@googlemail.com

Mediante el microscopio y la cámara se filmó el proceso de evaporación en ambos tipos de experimentos. Las grabaciones se realizaron con una tasa de adquisición de 25 cuadros por segundo y los datos fueron almacenados en la PC.

Para realizar el análisis de los resultados se realizó una selección de los cuadros correspondientes a la filmación de cada experimento, en los que se apreciaban los cambios producidos por la evaporación. De esta manera se pudo estudiar la variación en el tiempo de los diámetros correspondientes a la superficie apoyada sobre el sustrato, para cada gota. En la Figura 1, y a modo de ejemplo, se muestran dos secuencias de fotos, una correspondiente a la evaporación de una gota individual (Fig.1,a) y la otra correspondiente a la evaporación de una nube (Fig.1,b).

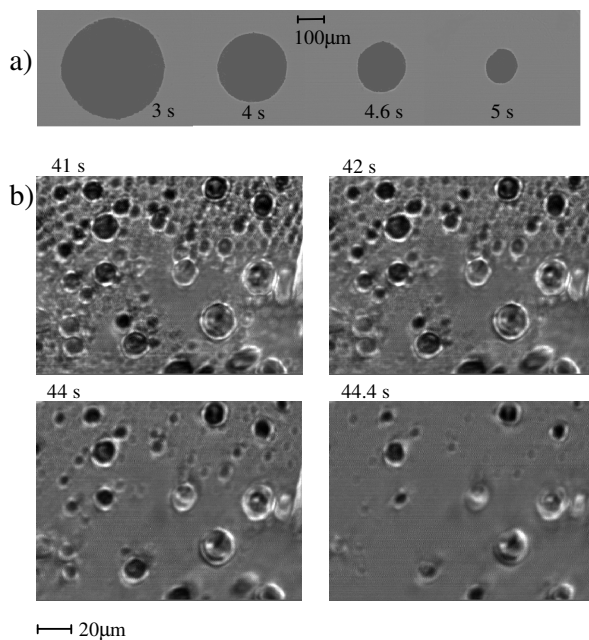


Figura 1. a) secuencia temporal de evaporación de una gota individual.

b) secuencia temporal de evaporación de un espectro de gota.

III. ANTECEDENTES Y RESULTADOS

En trabajos anteriores se ha reportado que en la evaporación de gotas depositadas sobre un sustrato es posible distinguir dos diferentes etapas. En la primera el radio de la interfase gota-sustrato (R) permanece aproximadamente constante en el tiempo, mientras que el ángulo de contacto, θ , experimenta grandes variaciones. En la segunda, el radio de la interfase gota sustrato (R) responde a una ley de potencia con el tiempo, del tipo: $R(t) \propto (t_0 - t)^y$, donde t_0 es el tiempo en el que la gota desaparece completamente. En lo que respecta al ángulo de contacto, en esta última fase de la evaporación, algunos autores argumentan y

muestran resultados que indican que el ángulo de contacto se mantiene aproximadamente constante en el transcurso del tiempo, mientras que otros reportan una ley de potencias $\theta(t) \propto (t_0 - t)^x$, en la que el valor de x es chico ^(1,2,3).

En el presente trabajo se han observado evidencias que están en acuerdo con los comportamientos reportados por los autores antes citados. En lo que respecta a la primera etapa de la evaporación, se encontró que el radio de contacto entre la gota y el sustrato se mantenía aproximadamente constante con el tiempo. Al comienzo se apreciaba en la gota una región central de mucho brillo, dando evidencias de una gran curvatura de su superficie, la gota funciona como una lente. Luego de transcurrido un tiempo la luminosidad de la gota se tornaba menos intensa y más homogénea en toda su extensión. Esto último indicaría que la curvatura de la gota disminuye en esta etapa.

Así, estos cambios en la refracción de la luz ponen de manifiesto cambios en la forma de la superficie de la gota asociados a la primera etapa de evaporación.

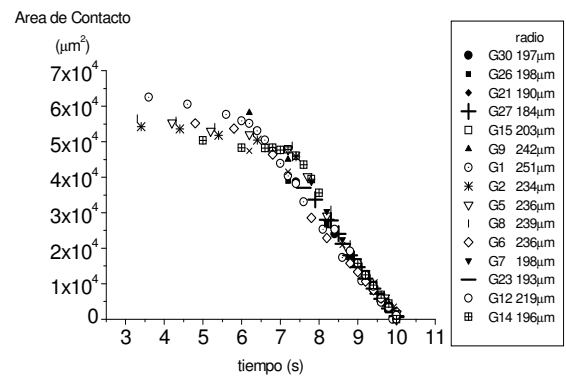


Figura 2: superficie del área de contacto de gotas individuales en función del tiempo.

Por otro lado, la respuesta a la luz que se observó cuando se presentan cambios apreciables del radio de contacto gota-sustrato, segunda etapa, indican que la gota no sufre cambios apreciables en la curvatura de su superficie en esta etapa.

En la Figura 2 se muestra el comportamiento del área de la superficie de contacto de gotas individuales en función del tiempo. Los valores se han graficado normalizando el tiempo final de evaporación. En la figura es posible visualizar las dos etapas de la evaporación de las gotas: una primera hasta alrededor de los 6s, y la etapa final, hasta los 10s. En la última parte del gráfico, se evidencia que la forma en que evaporan todas las gotas es independiente del tamaño inicial de cada una de ellas.

Cuando se depositó sobre el vidrio una nube compuesta por gotas de agua de distintos tamaños, se observó que no todas experimentaban cambios de radio en forma simultánea. En una primera etapa las gotas más pequeñas del espectro completaban su evaporación, mientras las demás permanecían sin evidenciar cambios en el radio ni en la forma en que refractaban luz (ver Figura 1). En la Figura 3 se muestra el comportamiento de la superficie de contacto de algunas gotas pertenecientes a la nube depositada sobre el vidrio. En particular se presentan resultados correspondientes a dos mediciones en las que cambió la densidad de nube depositada sobre el sustrato: a) menor densidad, b) mayor densidad; es por ese motivo que el proceso de evaporación mostrado en la presente mayor duración que el presentado en la fig.3a. A pesar de los distintos tiempos empleados por cada nube para evaporar, el comportamiento cualitativo de las gotas pertenecientes a cada medición es similar.

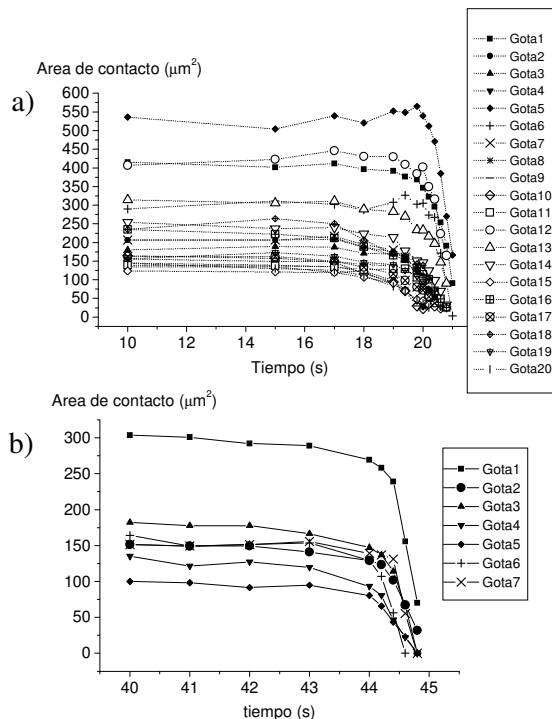


Figura 3: variación temporal de la superficie de contacto de gotas de una nube.
a) menor densidad de gotas depositadas,
b) mayor densidad de gotas depositadas

IV. COMENTARIOS

El modelo más simple del perfil de una gota evaporando sobre un sustrato es el llamado de copa esférica. Según este modelo el volumen de la gota viene dado por:

$$V = \frac{\pi}{3} r_b^3 \frac{(2 + \cos \theta)}{(1 + \cos \theta)} \operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2} \right)$$

donde r_b es el radio de la interfase gota sustrato y θ es el ángulo de contacto.

Suponiendo que en la segunda etapa de evaporación el ángulo de contacto se mantiene constante, se tendría que:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial r} \frac{dr}{dt} = \pi r_b^2 \frac{(2 + \cos \theta)}{(1 + \cos \theta)} \operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2} \right) \frac{dr}{dt} \quad (1)$$

Suponiendo que el gradiente de concentración de vapor (ρ) sobre la superficie de la gota es radial ⁽¹⁾ la tasa de evaporación se podría expresar como:

$$\frac{dV}{dt} = \oint \nabla \rho \cdot \vec{n} da = \frac{2\pi D}{\delta} r_b (\rho_{\text{ambiente}} - \rho_s) \operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (2)$$

donde: D es el coeficiente de difusión del vapor de agua en aire, δ es la densidad del agua, ρ_{ambiente} es la concentración de vapor de agua en el ambiente y ρ_s es la correspondiente a la saturación a temperatura ambiente sobre una superficie de agua. Con las ecuaciones (1) y (2) se puede determinar la variación de la superficie de contacto (A_b), entre la gota y el sustrato, en función del tiempo (t):

$$A_b = A_{b0} + 2\pi D (\rho_{\text{ambiente}} - \rho_s) \frac{(2 + \cos \theta)}{(1 + \cos \theta)} t \quad (3)$$

Este modelo tiene un buen acuerdo con los resultados para gotas individuales (Figura 2) ya que el comportamiento del área con el tiempo es lineal. Además, a partir de este modelo la dependencia del radio con el tiempo, en la etapa final de evaporación, respondería a una ley de potencia como la sugerida en otros trabajos, con exponente 0,5.

Si bien nuestros resultados con gotas individuales están en acuerdo con la dependencia temporal del área de contacto, dada por la Ec. 3, no es así para los resultados en los que se utilizaron espectros de gotas. Esto queda en evidencia cuando se observan las diferentes formas en las que varía el área de contacto cuando la gota está completando su evaporación (Figura 3).

En la figura 4 se presentan resultados del área de contacto en función del tiempo, en su etapa final de evaporación. Se observa en esta figura que el comportamiento temporal se aparta notablemente del observado para gotas individuales. Se debe notar, al realizar este análisis, que en los experimentos con nubes de gotas existen dos efectos que diferencian a este de aquellos en los que se consideraban gotas individuales: la presencia de gotas vecinas y el tamaño de las gotas utilizadas.

Para visualizar el efecto del tamaño de las gotas basta con observar el comportamiento de la gota rotulada como G5 en la figura 4. Esta gota, en su etapa final de evaporación, se puede considerar como una gota aislada ya que el resto de la nube había evaporado. En la figura mencionada se observa que el área de contacto no sigue

una dependencia lineal con el tiempo como lo predice el modelo de copa esférica.

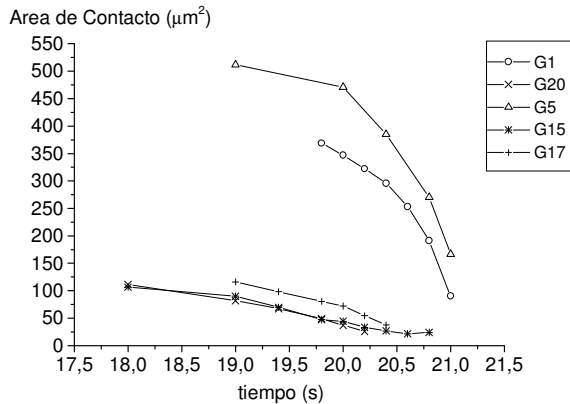


Figura 4: etapa final de evaporación de algunas gotas reportadas en la Figura 3a.

En lo que respecta al comportamiento de la evaporación de una gota inmersa en una nube, se ha observado que las gotas pequeñas evaporan antes que las grandes, proveyendo a estas, posiblemente, suficiente vapor como para que estén inmersas en un ambiente próximo al de saturación. Por este motivo, no se observan

cambios en el diámetro de contacto ni en la forma en la que refractan la luz las gotas de mayor tamaño.

Además, con esta hipótesis de trabajo se podría explicar como la densidad de nube depositada influye en el tiempo de evaporación de la nube. Una mayor cantidad de gotas por unidad de superficie tendría asociada una mayor concentración de vapor de agua en el ambiente inmediato en el que están inmersas las gotas. En consecuencia cada gota evaporaría con una tasa menor que la correspondiente al caso de una menor densidad de gotas. Esto devendría en una mayor duración del proceso de evaporación, en acuerdo con lo reportado en otros trabajos en donde se muestra que en el seno de una nube de gotas la concentración de vapor es mayor que la correspondiente a la periferia de la nube ⁽⁴⁾.

Referencias

- 1 - Asan Meric R. and Yildirim Irbil H Langmuir, **14**, 1915-1920 (1998)
- 2 - Guéna G., Poulard C. and Cazabat A.M. J. Colloid. Interface Sci., **312**, 164-171, (2007)
- 3 - Crafton E.F. and Black W.Z. Int. J. Heat Mass Transfer , **47**, 1187-1200, (2004)
- 4 - Castellano N.E., Gandi S. and Ávila E.E. *Atmospheric Research*, **84**, 353-361, (2007)