

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA TURBULENCIA SOBRE EL ESPECTRO DE TAMAÑO DE GOTAS DE NUBE

EXPERIMENTAL STUDY OF THE TURBULENCE EFFECT ON THE CLOUD DROPLET SPECTRUM

D. Stoler Flores^a, G. Aguirre Varela^{a,b}, *

^a Facultad de Matemáticas, Astronomía y Física (FaMAF) – Universidad Nacional De Córdoba Av. Medina Allende s/n, Ciudad Universitaria – Prov. Córdoba – Argentina

^b Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – Instituto de Física Enrique Gaviola (IFEG) – Universidad Nacional De Córdoba Av. Medina Allende s/n, Ciudad Universitaria – Prov. Córdoba – Argentina X5016LAE Córdoba, Argentina.

Recibido: 24/12/16; Aceptado: 23/04/17

El propósito de este trabajo es estudiar empíricamente el efecto sobre el espectro de tamaños de gotas en una nube cálida, sometida a perturbaciones que afectan el movimiento de la parcela de aire en donde se encuentra. Con este estudio se intenta aportar datos relacionados al efecto de la turbulencia en el desarrollo del espectro de tamaños de gotas de nube, junto con los mecanismos de crecimiento de gotas en nubes cálidas. El diseño experimental consta de una nube producida mediante el uso de un generador ultrasónico, este provee de un ingreso continuo de gotas micrométricas dentro de una caja acrílica. Primero se determina que la nube es estable (el espectro de tamaño de las gotas no varía) a tiempos cortos. Adicionalmente, la nube es caracterizada mediante su contenido de agua líquida y tasa de disipación energética. Posteriormente se comparan los espectros de tamaño de las gotas en la nube en ausencia y presencia de perturbaciones bruscas.

Palabras clave: turbulencia, lluvia cálida, tasa de disipación.

The purpose of this work is to study empirically the evolution of droplet size spectrum in a warm cloud under perturbations that affect the movement of the air parcel where the cloud is located. This study attempts to provide data regarding the effect of turbulence on the development of the size spectrum of cloud droplets, along with growth mechanisms of drops in warm clouds. The experimental design consists of a cloud produced by using an ultrasonic generator, this provides a continuous income of micrometric droplets within an acrylic box. First it is determined that the cloud is stable (the spectrum of droplet size does not change) at short times. Additionally, the cloud is characterized by its liquid water content and energy dissipation rate. Subsequently, the spectra of droplet size in the cloud are compared in the absence and presence of sudden perturbations.

Keywords: turbulence, warm rain, dissipation rate.

I. INTRODUCCIÓN

Entre las partículas que forman las nubes atmosféricas se cuentan las gotas de agua, llamadas también: gotas de nube. Estas gotas pueden alcanzar diámetros hasta de 80 μm . En nubes cálidas, i.e. sobre el punto de congelamiento, las gotas pueden crecer por colisión con coalescencia hasta varios milímetros para formar gotas de rocío o en general de precipitación¹.

Jonas² muestra que el crecimiento de gotas de nube a gotas de lluvia es un proceso que no puede ser explicado mediante el mecanismo de condensación solamente ya que los tiempos requeridos serían superiores a los tiempos de vida de nubes atmosféricas, Notó también que para que el mecanismo de crecimiento por colisión y coalescencia de resultados acordes a los tiempos de nube, son necesarios diámetros mayores que 40 μm . De esta forma queda evidente la brecha de crecimiento entre los 15 μm y 60 μm de diámetro en tiempos de vida promedio para nubes que producen

lluvia. En este trabajo se evaluó el impacto de la turbulencia sobre el crecimiento de las gotas de agua estudiando el efecto sobre los kernel de colección.

También Grabowski & Wang³ en su review ponen de manifiesto la existencia del gap de crecimiento en el que los mecanismos de difusión y de colisión-coalescencia puramente gravitacional no son lo suficientemente eficientes para resolver el problema del ensanchamiento del espectro de gotas de nube y la posterior formación de gotas de lluvia en los tiempos observados en la naturaleza. Y si bien hoy en día es aceptado que la turbulencia tiene papel en esto, sus efectos no están cuantificados ni comprendidos completamente y aun no se pueden incorporar mediante parametrizaciones realistas a los modelos de nubes.

Vohl y colaboradores⁴ reportan resultados de mediciones del crecimiento por colisión con coalescencia de gotas individuales mayores a los 50 μm de radio dentro de una nube de gotas más pequeñas, obtenidas con pulverización. Las mediciones fueron

* email: damian.stoler@gmail.com

realizadas en un túnel de viento vertical bajo condiciones de flujo de aire laminar y turbulento. Concluyen que sus resultados son consistentes con un incremento en la tasa de colisión y por lo tanto en la tasa de crecimiento de las gotas como consecuencia de la turbulencia. Sin embargo no avanzan en lo referido a los diferentes efectos de la turbulencia como ser el solapamiento de torbellinos, efectos de inercia, etc.

En un trabajo más reciente, Pinsky & Khain⁵ reportan que debido a la turbulencia, la eficiencia de colección para gotas con radios mayores a 10 μm puede incrementarse hasta en un 25% para un $\varepsilon = 200 \text{ cm}^2\text{s}^{-3}$, y hasta un 250% para $\varepsilon = 1000 \text{ cm}^2\text{s}^{-3}$.

Pinsky & Khain⁶, Falkovich y colaboradores⁷, Wang y colaboradores⁸, Xue y colaboradores⁹, concluyen, a partir de modelos y simulaciones, que la turbulencia incrementa la tasa de crecimiento de las gotas; en particular Pinsky y colaboradores¹⁰ reportan que por efectos de la turbulencia se producen gotas de lluvia a los 30 minutos.

A pesar de la abundancia de trabajos teóricos al respecto, no es el caso para los trabajos experimentales. Tennekes y Woods¹¹, Jonas y Goldsmith¹², y Neizvestny y Kobzunenko¹³, todos concluyen a partir de sus experimentos que la turbulencia aumenta la tasa de colisión entre gotas aunque en sus experimentos utilizaron gotas colectoras relativamente grandes.

El rol de la turbulencia en la tasa de colisiones de gotas de nubes ha atraído la atención de los físicos de nubes por un largo tiempo. El propósito de este trabajo es estudiar empíricamente el efecto de la turbulencia sobre el espectro de tamaños de gotas en una nube. En los experimentos se utilizó una nube producida mediante un generador ultrasónico. Se la caracterizó mediante su contenido de agua líquida y tasa de disipación energética. Se compararon los espectros de tamaño de las gotas en la nube en ausencia y presencia de perturbaciones. Con este estudio se intenta aportar datos para entender los mecanismos de crecimiento de gotas en nubes cálidas.

II. MÉTODO

En la fig. 1 se presenta un esquema del dispositivo experimental utilizado. La nube se genera mediante un nebulizador ultrasónico, el ingreso de nube es desde la izquierda (A). Mediante cuatro orificios iguales (B) se divide el caudal de entrada (C) que va desde el nebulizador hacia la caja. La fracción relativa del caudal que ingresa a la caja (Q_{in}), vale 1/4 para todos los orificios destapados, 1/3 para tres orificios destapados, 1/2 para dos orificios destapados y 1 cuando solamente el orificio de ingreso de la manguera está habilitado.

La nube queda contenida dentro de una caja de acrílico (30x30 cm^2 de base y 60 cm de altura) y mantenida mediante un ingreso permanente Q_{in} . Por medio del tubo F y el ventilador de extracción G, coaxiales entre sí y con una separación de ~ 0.5 cm, se consigue un estado estacionario de la nube, i.e. LWC constante.

A los efectos de cambiar el grado de perturbación, se disponen de dos ventiladores (D), ubicados en caras opuestas de la caja, con sus flujos enfrentados; esto es, con la misma dirección y sentidos opuestos. Para que las paletas de los ventiladores no arrojen gotas modificadas por contacto con las aspas, se coloca papel secante detrás de cada ventilador y también por debajo de las paletas. El grado de perturbación se controla mediante el voltaje CT que se aplica a los ventiladores.

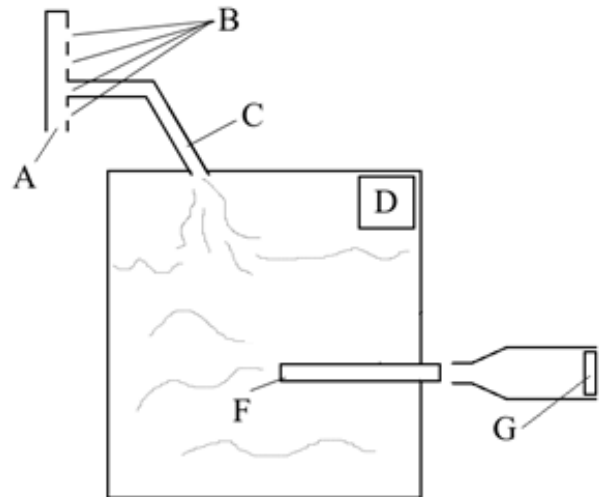


Figura 1. Esquema del dispositivo experimental. A: entrada de nube; B: orificios; C: manguera de ingreso; D: ventiladores de perturbación; F: tubo de extracción; G: ventilador de extracción.

El LWC de la nube presente dentro de la caja se determina mediante la captura y pesado de la masa de gotas presentes en un dado volumen de aire.

La tasa de disipación energética ε , que se usa para caracterizar el estado de perturbación de la nube, se estima mediante la medición de la velocidad del aire dentro de la caja en función del tiempo, para un valor dado de CT y un valor dado Q_{in} (sin gotas). Para realizar las mediciones de la velocidad del aire, se utiliza un anemómetro de hilo caliente.

El método para determinar los espectros de diámetros de las gotas de nube, consiste básicamente en capturar las gotas dentro de una solución de formvar al 3% (líquido). Para esto, se deposita una capa de solución de formvar sobre una placa de vidrio. Dado que el espesor de la capa de formvar usada en los experimentos realizados en este trabajo es del orden de 200 μm , que es mayor que los diámetros de las gotas de agua presentes en la nube utilizada, las gotas capturadas no dejan de ser esféricas¹⁴. Por lo tanto cuando ha solidificado el formvar (i.e. ha evaporado el solvente), y posteriormente ha evaporado el agua que constituía la gota, la huella que permanece en el formvar conserva la forma y tamaño de la gota que la produjo.

III. RESULTADOS

A partir de los resultados de las mediciones de velocidad dentro de la caja se determinó que ε es aproximadamente $40 \text{ cm}^2\text{s}^{-3}$ para un voltaje $CT = 12 \text{ V}$

y aproximadamente $4 \text{ cm}^2/\text{s}^3$ para un voltaje $CT = 8 \text{ V}$. A estas tasas le corresponden un valor aproximado de escala interna de turbulencia $\lambda_0 = 900 \text{ }\mu\text{m}$ y $\lambda_0 = 1700 \text{ }\mu\text{m}$, respectivamente, para los turbulos más pequeños. Esta longitud correspondería al valor para el cual se produce la disipación de energía ya que la dinámica está determinada por las fuerzas viscosas; ambas escalas son mayores que el diámetro a de las gotas de nube muestreadas ($8 \leq a \leq 50 \text{ }\mu\text{m}$).

Distribución de población en el régimen perturbado

Se determinaron los espectros de tamaños de gotas para los distintos flujos de entrada de nube y para los diferentes estados de perturbación. En la fig. 2 se presenta el espectro promedio de nube correspondiente al sistema sin perturbar.

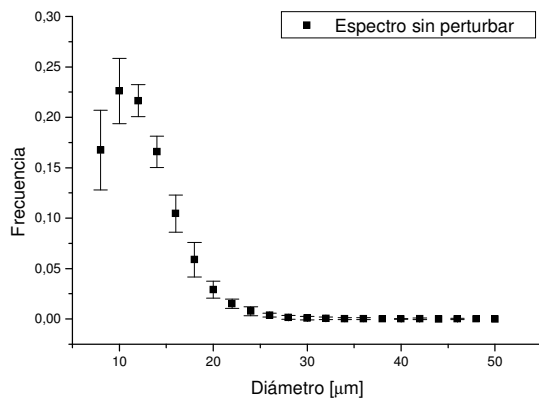


Figura 2. Espectro promedio de nube sin perturbación.

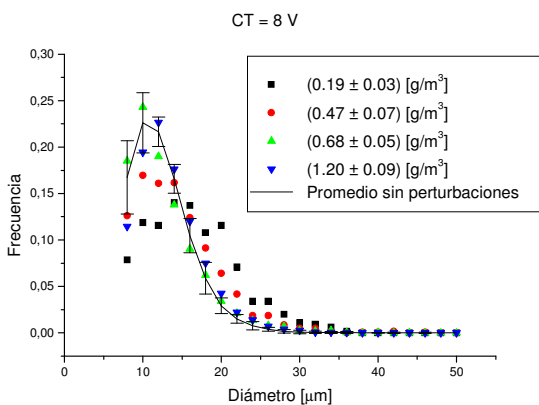


Figura 3. Espectros de nube hallados en las mediciones correspondientes al sistema perturbado con $\epsilon = 4 \text{ cm}^2/\text{s}^3$; en línea llena el promedio sin perturbar.

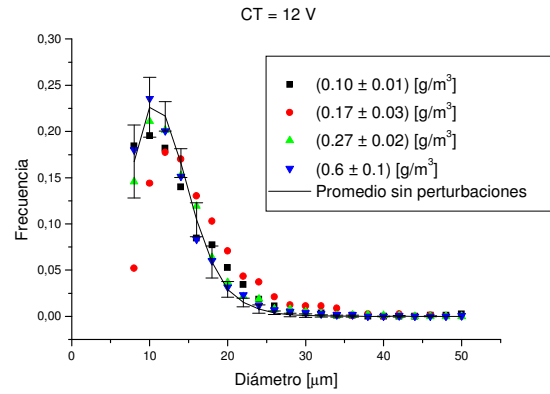


Figura 4: Espectros de nube hallados en las mediciones correspondientes $\epsilon = 40 \text{ cm}^2/\text{s}^3$; en línea llena el promedio sin perturbar.

En la fig. 3 se presentan los espectros de nube hallados en las mediciones correspondientes al sistema perturbado con $\epsilon = 4 \text{ cm}^2/\text{s}^3$ ($CT = 8 \text{ V}$). En la fig. 4 se presentan los espectros de nube hallados en las mediciones correspondientes $\epsilon = 40 \text{ cm}^2/\text{s}^3$ ($CT = 12 \text{ V}$).

En la fig. 5 se presenta el acumulado de gotas de diámetros mayores a $20 \text{ }\mu\text{m}$, correspondientes a cada una de las mediciones realizadas, en función del LWC de la medición.

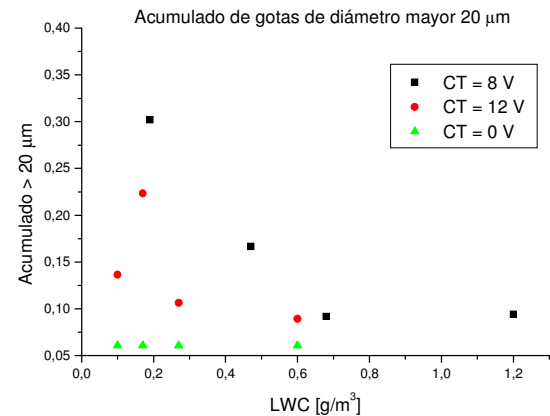


Figura 5. Acumulado de gotas con diámetros mayores a los $20 \text{ }\mu\text{m}$ para perturbaciones con voltaje de turbulencia correspondientes a 0 V , 8 V y 12 V .

Discusión de datos

El espectro de tamaños de gotas no evidenció correlación con el LWC de la nube para bajas tasas de disipación ($CT = 0$) y para el rango de LWC utilizados. De la figura 2 se desprende que el 99% de las gotas son menores que $22 \text{ }\mu\text{m}$. En este gráfico también se observa que la dispersión decrece con el diámetro de las gotas.

En la fig. 3 se presentan el espectro de nube sin perturbar y los espectros perturbados correspondientes a $\epsilon = 4 \text{ cm}^2/\text{s}^3$ para los distintos LWC . Como se puede ver,

los espectros correspondientes a mayor *LWC* son más semejantes al espectro sin perturbar, no así los casos con *LWC* de 0,19 g/m³ y 0,47 g/m³. En estos últimos casos se observa un incremento en la población de gotas con diámetros mayores a 20 μm y un decrecimiento en la población de gotas que rondan los 15 μm de diámetro. Esto podría estar asociado a un incremento en el número de colisiones en este rango de tamaños, producto de un incremento en el valor de la turbulencia. Es notable el hecho de que el aumento en el *LWC* no se relacione con un cambio en el espectro de nube.

En la fig. 4 se presentan el espectro de nube sin perturbar y los espectros perturbados correspondientes a $\varepsilon = 40 \text{ cm}^2\text{s}^{-3}$ para los distintos *LWC*. Para este valor de turbulencia el comportamiento es similar al caso anterior. Es decir mayor similitud de los espectros perturbados respecto al no perturbado, para mayor *LWC*. En el comportamiento de los correspondientes a 0,10 g/m³ y a 0,17 g/m³ se observa un incremento en el número de gotas con diámetros mayores a 20 μm y un decrecimiento del número de gotas de 15 μm de diámetro.

Finalmente, en la fig. 5 se observa que el acumulado de gotas con diámetros mayores a 20 μm siempre es mayor para los espectros perturbados que para el caso del espectro sin perturbar. Además se puede ver el que el acumulado de gotas mayores a 20 μm decrece al aumentar el *LWC*.

Como se desprende de los resultados, el espectro de nube en régimen turbulento es más afectado por el cambio de *LWC* que en el régimen no turbulento.

No está completamente claro el comportamiento observado en la población de gotas de mayor tamaño ($a \geq 20 \mu\text{m}$) al incrementar ε . Como se puede observar en la fig. 5, un incremento en la tasa de disipación por turbulencia no tuvo asociado un incremento en el número de gotas grandes. Se puede conjeturar que esto está asociando al tamaño de los turbulos presentes en la nube. Los que serían menores al incrementarse el ε y no afectarían a las velocidades relativas entre gotas de mayor tamaño que estos, no afectando así la colección respecto de cuando hay turbulencia asociada a turbulos de mayor tamaño.

Conclusiones

En este trabajo se presentan resultados de mediciones experimentales en los que se estudió el efecto de la turbulencia sobre el espectro de tamaños de gotas de nube.

No se encontró para el rango de *LWC* utilizado, que el espectro de tamaños este correlacionado con el *LWC* en nubes con baja tasa de disipación.

Aunque hay que tener en cuenta que las tasas de disipación utilizadas en el presente trabajo son más bajas de las que generalmente se encuentran en nubes cálidas. Los resultados de las mediciones realizadas indican que el espectro de tamaño de gotas que se establece en la nube es afectado por las condiciones de turbulencia presentes. Produciendo la aparición de un

mayor número de gotas “grandes”, por lo que podría influir en el desarrollo de lluvias cálidas

Se encontró, bajo las condiciones de trabajo, que el efecto de la turbulencia sobre el espectro de tamaño de gotas era más notorio en las mediciones con menor contenido de agua líquida.

III. REFERENCIAS

- 1 – Pruppacher, H.R., J.D. Klett: Microphysics of Clouds and Precipitation (Segunda edición, págs. 13-17). Kluwer Academic Publishers. ISBN 0-7923-4211-9, (2004).
- 2 – Jonas, P.R.: Turbulence and cloud microphysics. Atmos. Res., 40, 283 – 306, (1996).
- 3 – Grabowski, W.W., L.P. Wang. Growth of Cloud Droplets in a Turbulent Environment. En Annual Review of Fluid Mechanics (Vol. 45, págs. 293-324). Annual Reviews, (2013).
- 4 – Vhol, O., S.K. Mitra, S.C. Wurzler, H.R. Pruppacher: A Wind Tunnel Study of the Effects of Turbulence on the Growth of Cloud Drops by Collision and Coalescence. J. Atmos. Sci., **56**, 4088-4099, (1999).
- 5 – Pinsky, M.B., A.P. Khain: Collisions of small drops in a turbulent flow. Part II. Effects of flow accelerations. J. Atmos. Sci., **61**, 1926–1939, doi: 10.1175/1520-0469(2004)061<1926:COSSDIA>2.0.CO;2, (2004).
- 6 – Pinsky MB, A.P. Khain: Effects of in-cloud nucleation and turbulence on droplet spectrum formation in cumulus clouds. Q. J. R. Meteorol. Soc. 128:501–33, (2002).
- 7 – Falkovich, G., A. Fouxon, M.G. Stepanov: Acceleration of rain initiation by cloud turbulence. Nature 419:151–154, (2002).
- 8 – Wang, L.P., Y. Xue, W.W. Grabowski: A bin integral method for solving the kinetic collection equation. J. Comput. Phys. 225:51–73, (2007).
- 9 – Xue, Y., L.P. Wang, W.W. Grabowski: Growth of cloud droplets by turbulent collision-coalescence. J. Atmos. Sci. 65:331–56, (2008).
- 10 – Pinsky, M., A.P. Khain, H. Krugliak: Collisions of cloud droplets in a turbulent flow. Part V: Application of detailed tables of turbulent collision rate enhancement to simulation of droplet spectra evolution. J. Atmos. Sci. 65: 357–74, (2008).
- 11 – Tennekes, H., D. Woods: Coalescence in a weakly turbulent flow. Q. J. R. Meteorol. Soc. 99:758-763, (1972).
- 12 – Jonas, P.R., Goldsmith P.: The collection efficiencies of small droplets falling through a sheared air flow. J. Fluid Mech. 52,p3:593-608, (1972).
- 13 – Neizvestny, A.I., A.G. Kobzunenko: Effect of small scale turbulence on the coagulation growth rate of cloud droplets. Izv. Atm. Ocean. Phys., 22: 481–487, (1986).
- 14 – McCreedy, P.B., Todd C.J.: Continuous Particle Sampler. En Journal of Applied Meteorology (Vol. 3, págs. 450-460), (1964).