

-Trabajo Especial de Licenciatura en Física-

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

POR DAMIÁN STOLER FLORES

Director de trabajo: Dr. Guillermo Aguirre Varela.  
Córdoba, Marzo de 2015

**Universidad Nacional de Córdoba**  
Facultad de Matemática, Astronomía y Física



Estudio Experimental del Efecto de la Turbulencia Sobre el Espectro de Tamaño de Gotas de Nube. Por Damián Stoler Flores se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/arg/).



## AGRADECIMIENTOS

**S**e agradece la colaboración en este trabajo a Guillermo Aguirre Varela por su gran dedicación docente, a José Barcelona por su colaboración en el desarrollo experimental, a Miguel A. Ré por sugerir la divergencia de Jensen Shannon para la diferenciación de espectros, y a Rodolfo G. Pereyra por sugerir el uso de un método mecánico de captura para la medición del contenido de agua líquida.



## RESUMEN

**E**l propósito de este trabajo es estudiar empíricamente el efecto sobre el espectro de tamaños de gotas en una nube cálida sometida 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. El parámetro de comparación entre espectros es la divergencia de Jensen Shannon.

**Palabras clave:** turbulencia, tasa de disipación, espectro de tamaño de gotas, espectro de diámetro de gotas, lluvia cálida, nube cálida.



## ABSTRACT

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. The parameter of comparison between spectra is the Jensen Shannon Divergency.

**Keywords:** turbulence, dissipation rate, spectra of droplet size, spectra of droplet diameter, warm rain, warm cloud.





# LISTA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	7
LISTA DE CONTENIDOS.....	9
LISTA DE TABLAS.....	10
LISTA DE FIGURAS.....	11
1- INTRODUCCIÓN.....	15
1.1- Formación de Lluvias Cálidas.....	16
1.1.1- Crecimiento de gotas de agua por difusión de vapor.....	17
1.1.2- Crecimiento por colección (colisión con coalescencia).....	19
1.1.3- La brecha entre los rangos de mecanismos del crecimiento.....	20
1.2- Turbulencia.....	21
1.2.1- Caracterización de la turbulencia.....	22
1.2.2- El efecto de la turbulencia en la eficiencia de colección.....	23
1.2.3- Gotas afortunadas.....	24
1.2.4- Impacto de la turbulencia sobre el desarrollo de lluvias cálidas.....	25
1.3- Entropía Como Medida de Diferencia.....	25
2- MÉTODO.....	27
2.1- Instrumental, Materiales y Software.....	27
2.2- Disposición Experimental.....	27
2.3- Medición del Contenido de Agua Líquida.....	29
2.4- Tasa de Disipación Energética.....	31
2.5- Medición de Diámetro de gotas.....	32
2.5.1- Estacionalidad a corto plazo del espectro.....	32

LISTA DE CONTENIDOS

2.5.2- Captura de gotas para medición de sus diámetros..... 33

2.5.3- Muestreo de placas..... 33

2.5.4- Conteo y medición de gotas..... 34

3- TRATAMIENTO Y DISCUSIÓN DE DATOS..... 41

3.1- Software Usado..... 41

3.2- Medición del Contenido de Agua Líquida..... 41

3.3- Estimación de la Tasa de Disipación..... 42

3.4- Espectro Interno de Población..... 43

3.4.1- Evolución temporal del espectro..... 43

3.4.2- Distribución de población en el régimen turbulento..... 44

3.5- Comparación del Espectro bajo un similar Contenido de Agua Líquida..... 57

CONCLUSIÓN..... 61

REFERENCIAS..... 63

ANEXO A- TABLAS..... I

A.1- Evolución Temporal del Espectro..... I

A.2- Distribución de Diámetros..... II

A.3- Determinación del Contenido de Agua Líquida..... VI

A.4- Estimación de la Tasa de Disipación..... VII

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 3.4.1- JSD de los histogramas de comparación para en el rango con un tamaño de paso de .....56

Tabla 3.5.1- Comparación de espectros para LWC similares ante distintos voltajes de turbulencia.....58

Tabla A.1.1- Densidad de distribución diámetro de gotas para  $Q_{in} = 1$  a distintos tiempos de toma de muestra sin perturbación..... I

Tabla A.1.2- Ajuste gaussiano de los histogramas para  $t = (40''; 1' 27''; 2' 38''; 4' 39''; 6' 09'')$  y  $Q_{in} = 1$ ; donde  $x_c$  es el centro y su error es  $err_{xc}$ ,  $w$  es el ancho y  $err_w$  su error,  $\chi^2_{red}$  es chi reducido y  $R^2$  es el coeficiente de determinación..... II

Tabla A.1.3- Divergencia de Jensen Shannon entre los histogramas para  $t = (0' 40''; 1' 27''; 2' 38''; 4' 39''; 6' 09'')$  y ..... II

Tabla A.2.1- Distribución normalizada de diámetros en  $\mu m$  (rango  $7 \mu m \leq \text{diámetro} \leq 52 \mu m$  y tamaño de

paso de ) para CT = (0,00 V -gris-; 8,11 V -blanco-) y Qin = (1/4; 1/3; 1/2; 1).....	III
Tabla A.2.2- Distribución normalizada de diámetros en $\mu\text{m}$ (rango $7 \mu\text{m} \leq \text{diámetro} \leq 52 \mu\text{m}$ y tamaño de paso de 2,1 $\mu\text{m}$ ) para CT = (0,00 V -gris-; 12,28 V -blanco-) y Qin = (1/4; 1/3; 1/2; 1).....	IV
Tabla A.2.3- Ajuste gaussiano de los histogramas para CT =(0,00 V -gris-; 8,11 V -blanco-) y Qin =(1/4; 1/3; 1/2; 1); donde xc es el centro y su error es errxc, w es el ancho y errw su error, $\chi^2_{\text{red}}$ es chi reducido y R <sup>2</sup> es el coeficiente de determinación.....	IV
Tabla A.2.4- Ajuste gaussiano de los histogramas para CT =(0,00 V -gris-; 12,28 V -blanco-) y Qin =(1/4; 1/3; 1/2; 1); donde xc es el centro y su error es errxc, w es el ancho y errw su error, $\chi^2_{\text{red}}$ es chi reducido y R <sup>2</sup> es el coeficiente de determinación.....	V
Tabla A.2.5- JSD de las mediciones entre el régimen con CT = 8,11 V (T1) junto con su respectivo CT = 0,00 V (N1) y CT = 12,28 V (T2) junto con sus respectivo CT = 0,00 V (N2).....	V
Tabla A.2.6- JSD para N1 en los distintos Qin.....	V
Tabla A.2.7- JSD para T1 en los distintos Qin.....	V
Tabla A.2.8- JSD para N2 en los distintos Qin.....	VI
Tabla A.2.9- JSD para T2 en los distintos Qin.....	VI
Tabla A.2.10- Histogramas de comparación para en el rango con un tamaño de paso de En gris para CT=8,11 V y en blanco para CT=8,11 V.....	VI
Tabla A.3.1- Cálculo del LWCA con su respectiva desviación estándar sLWC y desviación estándar relativa erLWC para distintos caudales de entrada a partir de la velocidad media u y el incremento de masa m. ....	VII
Tabla A.4.1- Primer set de mediciones de velocidad cuadrática media y tasa de disipación para CT = 12,28 V y Qin = 1 ante distintas perturbaciones del sistema, con .....	VII
Tabla A.4.2- Segundo set de mediciones de velocidad cuadrática media y tasa de disipación para CT = 12,28 V y Qin = 1 ante distintas perturbaciones del sistema, con .....	VIII
Tabla A.4.3- Velocidad cuadrática media y tasa de disipación para CT = 8,11 V y Qin = 1 ante distintas perturbaciones del sistema, con .....	VIII

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Tamaños relativos, y velocidades terminales de aerosoles CCN9, gotas de nube y gotas de lluvia. (Adaptación de McDonald 1958).....	15
Figura 1.2- Esquema de una nube cálida (izquierda) y gradiente adiabático aproximado (derecha).....	16
Figura 1.3- Tamaños relativos de moléculas de agua frente a un núcleo de condensación de 1 $\mu\text{m}$ . (NOAA 2015).....	17
Figura 1.4- Geometría de colisión de partículas, donde R es el radio del colector, r es el radio de la partícula colectada, y x es la distancia de la partícula colectada desde la línea de caída de la partícula mayor. (Rogers & Yau 1989) .....	19
Figura 1.5- Curvas esquemáticas de crecimiento de gotas (a) por condensación de la fase vapor y (b) por colección de gotas. (Wallace & Hobbs 2006).....	21
Figura 1.6- Esta foto es una imagen en falso color del campo lejano de un jet turbulento sumergido, hecho visible por medio de fluorescencia inducida por láser (LIF). (Fukushima & Westerweel 2007).....	22
Figura 2.1- Esquema de disposición experimental del equipo para la toma de placas. Arriba a la derecha se presenta una vista en perspectiva donde se indican la posición de la manguera y los cooler fan de turbulencia.....	28
Figura 2.2- Esquema de uno de los cooler de turbulencia. Entre los dos bornes se aplica un voltaje CT, el sentido del flujo es la del cooler sin papel secante (al colocar el papel, no hay flujo que atraviese el cooler en la dirección del eje de giro de las aspas). En la parte posterior se adosa papel secante, como también debajo de las paletas.....	29
Figura 2.3- Esquema del dispositivo de pesaje para la medición de LWC, en el interior colocamos una gasa para atrapar mecánicamente las gotas. La nube ingresa por A y son atrapadas por la gasa de captura. ....	30
Figura 2.4- Esquema del tubo de extracción para la medición de LWC. El conector B' se adosa al dispositivo de pesaje para la medición de LWC en el extremo B (fig. 2.2). La sonda del anemómetro se alinea en el centro para medir el viento en dirección paralela al eje de simetría.....	30

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.5- Las gotas de agua se sumergen dentro de la solución de formvar-cloroformo y dado que el cloroformo se evapora rápidamente quedan atrapadas en la capa de formvar.....	32
Figura 2.6- Esquema temporal para la toma de muestras. Para cada toma se apaga el nebulizador y CT = 0,00 V.....	33
Figura 2.7- Imagen de la sección de una placa en fondo oscuro y zoom de pasada a binario sin mejora previa.....	35
Figura 2.8- Paso 1, imagen de la sección de una placa en fondo oscuro y zoom de 40x en escala de grises (8-bit).....	36
Figura 2.9- Paso 2, la misma imagen con substracción de fondo .....	36
Figura 2.10- Paso 3, la imagen sin fondo multiplicada un factor 1,75 para eliminar ruido.....	37
Figura 2.11- Paso 4, la imagen multiplicada ahora en binario. Notemos que la gota de arriba a la izquierda tiene una apertura en la parte superior de su borde, lo que evita que se pinte en el paso siguiente....	37
Figura 2.12- Paso 5, la imagen pintada y con watershed. Notemos que en la gota de arriba a la izquierda se produjeron mas aperturas en su borde y las gotas de abajo a la derecha se encuentran separadas.....	38
Figura 2.13- Paso 6, las áreas de las partículas analizadas (resaltadas) de manera automática por el programa. La sección de la gota de arriba a la izquierda es un falso positivo que se borra para un nuevo conteo.....	38
Figura 2.14- Superposición del resultado final del conteo de las áreas (en blanco) sobre la imagen de partida de 8-bit para comparar.....	39
Figura 3.1- Establecimiento del contenido de agua líquida [ $g/m^3$ ] en función de la fracción del caudal de entrada $Q_{in}$ para distintos voltajes de turbulencia. El error es la desviación estándar de los resultados. ....	41
Figura 3.2- Para CT = (0 V; 8,11 V) y $Q_{in} = 1$ .....	42
Figura 3.3- Para CT = (0 V; 12,28 V) y $Q_{in} = 1$ .....	42
Figura 3.4- Densidad de población de gotas de distintos diámetros para $Q_{in} = 1$ a distintos tiempos de toma de muestra.....	43
Figura 3.5- Divergencia de Jensen Shannon entre distintos tiempos de toma de muestra. Notar que solamente al comparar una muestra consigo misma.....	44
Figura 3.6- Comparación de distribución de diámetros para $Q_{in} = 1/4$ y CT = (0,00 V; 8,11 V) y sus respectivos ajustes gaussianos (la curva gaussiana es a modo de visualización; no se propone ningún modelo en particular para la distribución de los espectros).....	45
Figura 3.7- Comparación de distribución de diámetros para $Q_{in} = 1/3$ y CT = (0,00 V; 8,11 V) y sus respectivos ajustes gaussianos (la curva gaussiana es a modo de visualización; no se propone ningún modelo en particular para la distribución de los espectros).....	46
Figura 3.8- Comparación de distribución de diámetros para $Q_{in} = 1/2$ y CT = (0,00 V; 8,11 V) y sus respectivos ajustes gaussianos (la curva gaussiana es a modo de visualización; no se propone ningún modelo en particular para la distribución de los espectros).....	46
Figura 3.9- Comparación de distribución de diámetros para $Q_{in} = 1$ y CT = (0,00 V; 8,11 V) y sus respectivos ajustes gaussianos (la curva gaussiana es a modo de visualización; no se propone ningún modelo en particular para la distribución de los espectros).....	47
Figura 3.10- Comparación de distribución de diámetros para $Q_{in} = 1/4$ y CT = (0,00 V; 12,28 V) y sus respectivos ajustes gaussianos (la curva gaussiana es a modo de visualización; no se propone ningún modelo en particular para la distribución de los espectros).....	47
Figura 3.11- Comparación de distribución de diámetros para $Q_{in} = 1/3$ y CT = (0,00 V; 12,28 V) y sus respectivos ajustes gaussianos (la curva gaussiana es a modo de visualización; no se propone ningún modelo en particular para la distribución de los espectros).....	48
Figura 3.12- Comparación de distribución de diámetros para $Q_{in} = 1/2$ y CT = (0,00 V; 12,28 V) y sus respectivos ajustes gaussianos (la curva gaussiana es a modo de visualización; no se propone ningún modelo en particular para la distribución de los espectros).....	48
Figura 3.13- Comparación de distribución de diámetros para $Q_{in} = 1$ y CT = (0,00 V; 12,28 V) y sus respectivos ajustes gaussianos (la curva gaussiana es a modo de visualización; no se propone ningún modelo en particular para la distribución de los espectros).....	49
Figura 3.14- Distribución de población de gotas para CT = 8,11 V y los distintos $Q_{in}$ .....	50
Figura 3.15- Distribución de población de gotas para CT = 12,28 V y los distintos $Q_{in}$ .....	50
Figura 3.16- Posición de la mediana para sets de mediciones a un mismo $Q_{in}$ con CT = (0,00 V; 8,11 V) (negro) y CT = (0,00 V; 12,28 V) (rojo).....	51
Figura 3.17- Ancho $2\sigma$ para sets de mediciones a un mismo $Q_{in}$ con CT = (0,00 V; 8,11 V) (negro) y CT = (0,00 V; 12,28 V) (rojo).....	51

Figura 3.18- JSD de las mediciones entre el régimen con CT = 8,11 V (T1) junto con su respectivo CT = 0,00 V (N1) y CT = 12,28 V (T2) junto con sus respectivo CT = 0,00 V (N2)..... 52

Figura 3.19- JSD para N1 en los distintos Qin..... 53

Figura 3.20- JSD para T1 en los distintos Qin..... 53

Figura 3.21- JSD para N2 en los distintos Qin..... 54

Figura 3.22- JSD para T2 en los distintos Qin..... 54

Figura 3.23- Superposición de las JSD para N2 y T2 en función del LWC..... 55

Figura 3.24- Distribución de diámetro de gotas para en el rango con un tamaño de paso de ..... 56

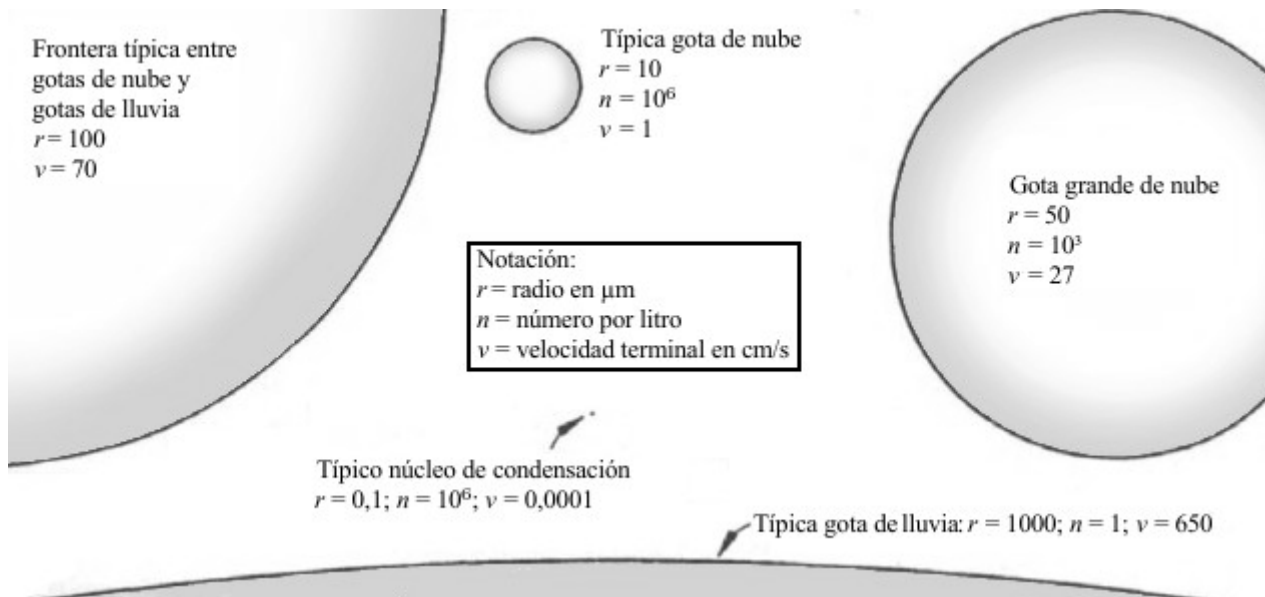
Figura 3.25- Comparación de espectros a distinto grado de turbulencia con LWC = (0,25 ± 0,06) g/m<sup>3</sup> y LWC = (0,27 ± 0,02) g/m<sup>3</sup>, en azul y con franjas respectivamente..... 57

Figura 3.26- Comparación de espectros a distinto grado de turbulencia con LWC = (0,48 ± 0,08) g/m<sup>3</sup> y LWC = (0,5 ± 0,1) g/m<sup>3</sup>, en azul y con franjas respectivamente..... 58



## 1- INTRODUCCIÓN

Las lluvias *cálidas*<sup>1</sup> conforman el 31% de precipitaciones en todo nuestro planeta y el 72% del total de lluvia en el área entre los trópicos (Lau & Wu 2003). Típicamente las gotas de agua que forman estas nubes tienen una distribución de tamaños entre 5 y 40  $\mu\text{m}$  de diámetro. Estas gotas pueden crecer por coalescencia<sup>2</sup> para formar rocío o lluvia<sup>3</sup>, en la fig. 1.1 se representan los diferentes tipos de gotas, para dar una idea de la relación de tamaños.



**Figura 1.1-** Tamaños relativos, y velocidades terminales de aerosoles CCN<sup>9</sup>, gotas de nube y gotas de lluvia. (Adaptación de McDonald 1958)

Los modelos numéricos aplicados a la predicción y estudio del clima no pueden resolver todas las escalas espaciales relevantes, i.e. desde la microescala (longitudes del orden del centímetro o menores) a la escala global (longitudes del orden de miles de kilómetros).

La representación microfísica que se hace de nubes<sup>4</sup> es de manera frecuente una fuente de significativa incerteza. Por ejemplo, las parametrizaciones de la tasa de autoconversión<sup>5</sup> por gravedad para núcleos de colección pueden diferir en un factor de 10 para que una nube produzca lluvia en su tiempo de vida o no (Hsieh et al. 2009). La representación del albedo en modelos climáticos mediante cúmulos superficiales no da cuenta de las mediciones satelitales (Bender et al. 2006). Stevens et al. (2003), por medio de la reflectividad de radar en capas de nube, sugieren que nubes aparentemente uniformes pueden presentar enormes variaciones en la estructura microfísica, y se plantean la pregunta de porqué algunos estratocúmulos producen lluvia y otros no.

- 1 **Lluvia cálida:** Lluvia formada a partir de una nube que en todos sus niveles tiene temperaturas superiores a 0 °C, y es el resultado de la coalescencia de gotas. (Glosario AMS 2015)
- 2 **Coalescencia:** En física de nubes, la unión de dos gotas de agua en una sola gota mayor luego de una colisión. (Glosario AMS 2015)
- 3 **Gotas de lluvia y gotas de rocío:** Una gota de agua de diámetro mayor a 0,5 mm cayendo a través de la atmósfera. Gotas que precipitan con diámetros entre 0,2 y 0,5 mm son llamadas gotas de rocío [...]. (Glosario AMS 2015)
- 4 **Microfísica de nubes:** Procesos de nubes (crecimiento, evaporación, etc.) que toman lugar en la escala de los aerosoles o partículas de precipitación individuales en oposición a la escala de la nube visual. (Glosario AMS 2015)
- 5 **Autoconversión:** Estadío inicial del proceso de colisión-coalescencia donde las gotas de nube colisionan y coalescen para formar gotas de rocío [...]. (Glosario AMS 2015)

## 1.1- Formación de Lluvias Cálidas

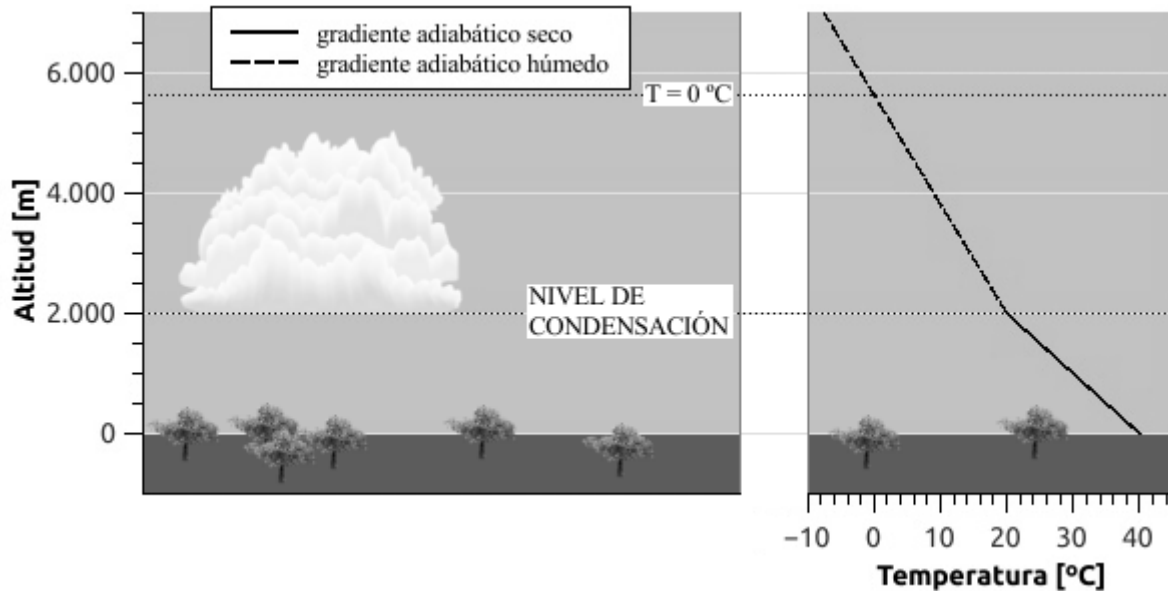


Figura 1.2- Esquema de una nube cálida (izquierda) y gradiente adiabático aproximado (derecha).

A medida que una parcela<sup>6</sup> de aire asciende (ascenso que se puede considerar adiabático) y conforme baja su presión, también lo hace su temperatura. La tasa de cambio de temperatura  $T$  con el ascenso se denomina gradiente adiabático y depende de la humedad relativa<sup>7</sup> HR del ambiente. Este decremento térmico se considera lineal a nivel de la troposfera y es de unos  $\sim 9,8$  °C/km para aire no saturado ( $HR < 100\%$ ) y este caso se denomina gradiente adiabático seco (fig. 1.2).

Cuando la parcela en su ascenso alcanza el punto de rocío<sup>8</sup>, el vapor de agua condensa sobre los núcleos de condensación de nube<sup>9</sup> CCN resultando en la formación de gotas. A partir de este tramo, la tasa de cambio térmico se denomina gradiente adiabático húmedo y el decremento es de unos  $\sim 5$  °C/km (fig. 1.2).

Una vez formadas las gotas, éstas pueden seguir creciendo por difusión de vapor y eventualmente por coalescencia (ambos mecanismos de crecimiento se explican con más detalle en las secciones 1.1.1 y 1.1.2). Esto no debe confundirse con las nubes que se extienden a alturas con  $T < 0$  °C; en este caso, las precipitaciones pueden formarse a partir de la fase hielo como también por coalescencia de gotas.

Conforme las gotas aumentan su tamaño, el efecto de la gravedad prevalece sobre el arrastre del aire y de esta manera las gotas con suficiente tamaño precipitan en forma de lluvia.

6 **Parcela:** Un volumen imaginario de fluido al cual pueden asignarse varias cantidades termodinámicas y cinemáticas [...]. (Glosario AMS 2015)

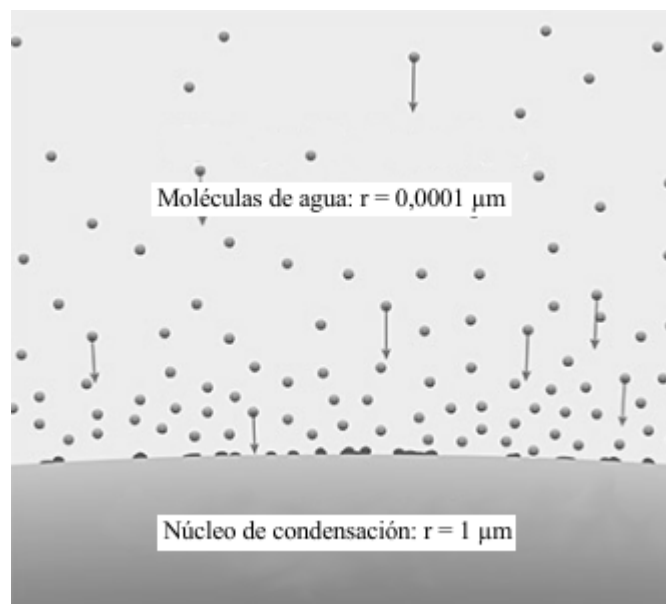
7 **Humedad relativa:** El cociente entre la presión de vapor de agua del ambiente y la presión de saturación líquido-vapor (y multiplicado por cien si se quiere el valor porcentual).

8 **Punto de rocío:** La temperatura a la cual el aire húmedo debe ser enfriado para que ocurra la saturación del vapor de agua ( $HR=100\%$ ) (esto correspondiente a una determinada presión atmosférica).

9 **Núcleo de condensación de nube (CCN):** [...] Partícula sobre la cual condensa (se activa) el agua en supersaturaciones típicas de formaciones nubosas [...]. (Glosario AMS 2015)



### 1.1.1- Crecimiento de gotas de agua por difusión de vapor



**Figura 1.3-** Tamaños relativos de moléculas de agua frente a un núcleo de condensación de 1  $\mu\text{m}$ . (NOAA 2015)

El aire húmedo, purificado de todo núcleo extraño, puede ser expandido en cámaras de nube con una humedad relativa de hasta el 400 % sin que la condensación ocurra. La nucleación<sup>10</sup> homogénea del agua es muy poco probable como para formar gotas de nube, siendo necesario algún objeto de por lo menos una décima de micrómetro sobre el cual puedan formar enlaces (fig. 1.3). En la naturaleza el proceso de nucleación predominante es el heterogéneo, donde este cambio toma lugar en pequeñas partículas de diferente composición y estructura (CCN), como es el caso de la formación de nubes en la atmósfera. Aquí la condensación ocurre con una HR  $\sim 100\%$ , ya que la naturaleza provee de una cantidad abundante de núcleos de condensación.

Para el cálculo de la tasa de crecimiento por difusión se parte de considerar una gotita aislada, de radio  $r$  al tiempo  $t$ , en un ambiente sobresaturado<sup>11</sup> donde la densidad del vapor de agua solamente depende de la coordenada radial, que a grandes distancias de la gotita es  $\rho_v(\infty)$  y el vapor de agua adyacente a la gotita es  $\rho_v(r)$ . La tasa de incremento en la masa  $M$  de la gotita al tiempo  $t$  es igual al flujo de vapor de agua a través de cualquier superficie esférica de radio  $r' > r$  centrada en la gotita:

$$\frac{dM}{dt} = 4\pi r'^2 D \frac{d\rho_v}{dr'} \quad (1.1);$$

donde  $D$  es la difusividad<sup>12</sup> del vapor de agua en el aire y  $\rho_v$  es la densidad de vapor de agua a una

10 **Nucleación:** El proceso de iniciación de una nueva fase en un ambiente superenfriado (para líquido) o sobresaturado (para solución o vapor); la iniciación de un cambio de fase de una sustancia a un estado termodinámico de menor energía (condensación de vapor a líquido, deposición de vapor a sólido, congelamiento de líquido a sólido) [...]. (Glosario AMS 2015)

11 **Sobresaturación:** En meteorología, la condición existente en la atmósfera (u otro espacio) cuando HR  $> 100\%$ , i.e., cuando contiene mas vapor de agua del necesario para producir saturación con respecto a una superficie plana de agua pura o hielo puro [...]. (Glosario AMS 2015)

12 **Difusividad:** Coeficiente que indica la facilidad que ofrece un material A al paso de otro B, expresada en permios,

## 1 INTRODUCCIÓN

distancia  $r' > r$  de la gota y se puede escribir como

$$\frac{dM}{dt} = 4\pi r D [\rho_V(\infty) - \rho_V(r)] \quad (1.2),$$

Considerando el vapor de agua como un gas ideal, que  $T(r) = T(\infty)$  y que no hay ventilación inmediatamente se tiene

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{r} \frac{D\rho_V(\infty)}{\rho_L e(\infty)} [e_V(\infty) - e_V(r)] \quad (1.3);$$

donde  $\rho_L$  es la densidad del agua líquida,  $e(\infty)$  es la presión de vapor de agua lejos de la gota y  $e(r)$  es la presión de vapor adyacente a la gota.

Cuando las gotas cumplen  $r \gtrsim 1 \mu\text{m}$ , el efecto de la curvatura sobre la presión de vapor pierde importancia y se puede aproximar  $e(r) \simeq e_s$ ; siendo  $e_s$  la presión de vapor de saturación sobre una superficie plana de agua pura. Y como depende solamente de  $T$  se puede considerar  $e_s \simeq e(\infty)$ . Lo último implica

$$\frac{e(\infty) - e(r)}{e(\infty)} \simeq \frac{e(\infty) - e_s}{e_s} = S \quad (1.4);$$

donde  $S$  es la sobresaturación del aire ambiente.

Finalmente, el crecimiento por difusión viene dado por (Wallace & Hobbs 2006)

$$r \frac{dr}{dt} = G_L S \quad (1.5);$$

donde

$$G_L = \frac{D\rho_V(\infty)}{\rho_L} \quad (1.6).$$

El coeficiente  $G_L$  tiene un valor constante para un dado ambiente. Se puede ver de la fórmula 1.5 que durante el crecimiento por difusión, para un dado valor de  $G_L$  y una sobresaturación  $S$ , la tasa a la cual se incrementa el radio de la gota es inversamente proporcional al mismo. Esto implica que las gotas grandes (radio grande) crecen mas lentamente que otras mas pequeñas. En condiciones realistas de nubes, el crecimiento por difusión produce gotas de radios entre los 10 y los 20  $\mu\text{m}$  (Wallace & Hobbs 2006; Grabowski & Wang 2013).

que se define como la cantidad de A que se transmite a través de la unidad de superficie del material B de un espesor unitario, cuando la diferencia de presión entre ambas caras es la unidad. También llamada permeabilidad. (Diccionario de Arquitectura y Construcción 2015)

La difusividad del vapor de agua para temperaturas entre -40 y 40 °C es (Pruppacher & Klett 1997):

$$D = 0,211 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1,94} \left( \frac{p_0}{p} \right);$$

con  $T_0 = 273,15 \text{ K}$ ;  $p_0 = 1013,25 \text{ mb}$ ;  $[D] = \text{cm}^2/\text{s}$ .

### 1.1.2- Crecimiento por colección (colisión con coalescencia)



**Figura 1.4-** Geometría de colisión de partículas, donde  $R$  es el radio del colector,  $r$  es el radio de la partícula colectada, y  $x$  es la distancia de la partícula colectada desde la línea de caída de la partícula mayor. (Rogers & Yau 1989)

Las gotas al caer sufren deformaciones debido al rozamiento del aire; la deformación es una función del tamaño de la gota. Si las gotas son pequeñas (menores del orden del milímetro) pueden ser consideradas esféricas. Se asume entonces dos gotas de nube como dos esferas de radios  $r_L$  (colectora) y  $r_S$  (colectada), con  $r_L > r_S$  (fig. 1.4). Se asume el aire en reposo y que ambas gotas caen con sus respectivas velocidades terminales.

La velocidad terminal de caída  $v_T$  se da cuando el peso iguala a la resultante entre la fuerza de empuje y la fuerza de arrastre:

$$\rho_L Vg = \rho_{aire} Vg + F_a \quad (1.7);$$

donde  $V$  es el volumen de la gota,  $F_a$  es el módulo de la fuerza de arrastre y  $g$  es el módulo de la aceleración de la gravedad. Para esferas con  $r \leq 20 \mu\text{m}$ , el arrastre es (Wallace & Hobbs 2006)

$$F_a = 6\pi\eta rv_T \quad (1.8);$$

donde  $\eta$  es la viscosidad del aire y dado que  $\rho_L \gg \rho_{aire}$  se obtiene que

$$v_T = \frac{2}{9} \frac{g \rho_L r^2}{\eta} \quad (1.9).$$

Este resultado, aunque es una aproximación para gotas pequeñas, sirve para ilustrar la dependencia  $v_T = v_T(r)$  y pone de manifiesto que la velocidad relativa entre gotas de distinto tamaño no es nula. En Pruppacher & Klett (1997) se puede encontrar una generalización de esto para partículas de mayores tamaños.

A medida que la gota colectora cae, el área geométrica de barrido o sección eficaz total es  $\pi(r_L + r_S)^2$ ; con lo que el volumen de barrido por segundo viene dado por

$$\text{volumen de barrido por segundo} = \pi(v_{TL} - v_{TS})(r_L + r_S)^2 \quad (1.10);$$

Donde  $v_{TL}$  y  $v_{TS}$  son las velocidades terminales de las gotas mayor y menor respectivamente, cuando se toma en cuenta la viscosidad del aire es fácil ver que  $v_{TL} > v_{TS}$ . El incremento de volumen de la gota grande  $V_L$  (y consecuente aumento de  $v_{TL}$ ) lo da el número  $N_S$  de gotitas que colecta en su camino. Suponiendo todas las gotitas de igual tamaño, se puede escribir

$$\frac{dV_L}{dt} = \pi(r_L + r_S)^2(v_{TL} - v_{TS})\frac{4}{3}\pi r_S^3 N_S \quad (1.11).$$

Este es un modelo altamente simplificado ya que no se toman en cuenta las fuerzas aerodinámicas de presión, que pueden alejar a las gotitas de la gota colectora.

Con un poco de álgebra (Straka 2011), la tasa de crecimiento del radio de la gota colectora se puede expresar como

$$\frac{dr_L}{dt} = \pi N_S \left(\frac{r_S^3}{r_L^2}\right)^2 (r_L + r_S)^2 (v_{TL} - v_{TS}) \quad (1.12);$$

donde se puede incorporar la eficiencia de colección como un factor  $E(r_L, r_S)$ , tal que

$$\frac{dr_L}{dt} = \pi N_S \left(\frac{r_S^3}{r_L^2}\right)^2 (r_L + r_S)^2 (v_{TL} - v_{TS}) E(r_L, r_S) \quad (1.13).$$

La eficiencia de colección se computa como la eficiencia de colisión<sup>13</sup> multiplicada por la eficiencia de coalescencia<sup>14</sup>. Es posible que no todas las colisiones de gotas resulten en una unión permanente (pueden ocurrir colisiones elásticas, como también puede haber disrupción de gotas).

Este mecanismo de crecimiento de gotas, en el cual las gotas grandes (colectoras) crecen por captura de otras más pequeñas, es efectivo a partir de cuando los radios de las gotas grandes alcanzan los 40  $\mu\text{m}$  (Pruppacher & Klett 1997).

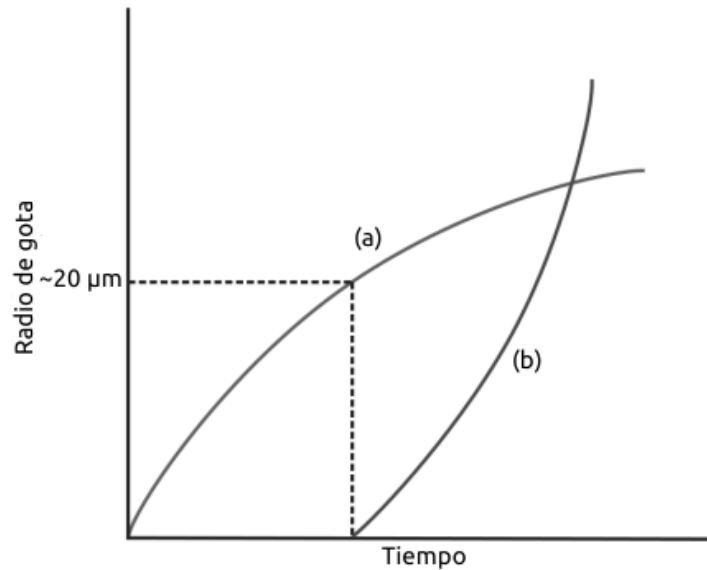
### 1.1.3- La brecha entre los rangos de mecanismos del crecimiento

En general, es difícil explicar el crecimiento de gotas de nube en el rango 15-40  $\mu\text{m}$  de radio para los cuales ni el mecanismo de difusión ni el de coalescencia son efectivos. En la figura 1.5 se representa (no a escala) el crecimiento de una gota por difusión de vapor y por coalescencia.

13 **Eficiencia de colisión:** La fracción de todas las gotas de agua en el camino de una gota mayor que precipita y hacen contacto con ésta [...]. (Glosario AMS 2015)

14 **Eficiencia de coalescencia:** La fracción de todas las colisiones entre gotas de agua de un tamaño especificado que resultan en la unión de dos gotas en una sola gota mayor [...]. (Glosario AMS 2015)

### 1.1.3 La brecha entre los rangos de mecanismos del crecimiento



**Figura 1.5-** Curvas esquemáticas de crecimiento de gotas (a) por condensación de la fase vapor y (b) por colección de gotas. (Wallace & Hobbs 2006)

Muchos mecanismos se han propuesto para explicar el rápido desarrollo de lluvia que se observa en nubes convectivas bajas. Por ejemplo, mecanismos que involucran la entrada de aire ambiental seco en la nube, aerosoles gigantes, fluctuaciones de la sobresaturación de vapor de agua, incrementos en la eficiencia de colisión-coalescencia debido a turbulencia, etc. (Grabowski & Wang 2013). El problema de cómo las gotas pasan este filtro de eficiencia entre la difusión y la colección con coalescencia sigue sin resolverse. Hay estudios teóricos que sugieren a la turbulencia como la responsable y se estudia con más detalle (la turbulencia) en la sección siguiente.

## 1.2- Turbulencia

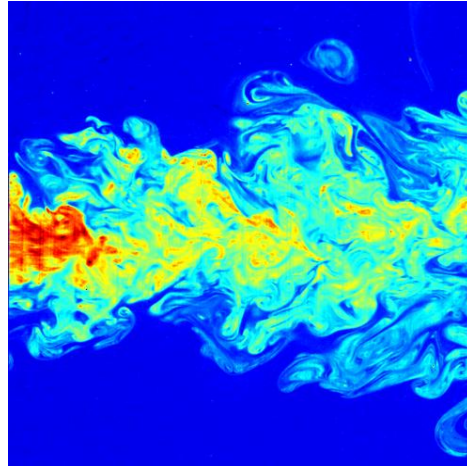
Se denomina *turbulencia* (Fleagle & Businger 1980) a las fluctuaciones azarasas de la velocidad de las partículas y sus características asociadas son:

- movimiento impredecible en detalle,
- fluctuaciones tridimensionales,
- las propiedades del fluido se mezclan eficientemente a través del mismo,
- la energía debe ser administrada para mantener la turbulencia.

Dado que algún grado de turbulencia siempre está presente en las nubes, es importante considerar su efecto en las colisiones entre las partículas de nube. Una pregunta que aún no se ha respondido es: ¿cómo afecta la turbulencia a las etapas iniciales de la evolución del espectro de gotas en nubes cálidas?.

Los remolinos de pequeña escala pueden desplazar las gotas de una zona con alta concentración (de las mismas) y menor sobresaturación (y viceversa), estos cambios ocurren rápidamente y el crecimiento por difusión es reversible (Grabowski & Wang 2013) con lo que su efecto es despreciable, en contraste con el crecimiento por coalescencia.

Lanotte et al. (2009) por medio de simulaciones numéricas dinámicas consideran una tasa de



**Figura 1.6-** Esta foto es una imagen en falso color del campo lejano de un jet turbulento sumergido, hecho visible por medio de fluorescencia inducida por láser (LIF). (Fukushima & Westerweel 2007)

disipación<sup>15</sup> del orden de  $10 \text{ cm}^2/\text{s}^3$  (cantidad no atípica para núcleos de pequeños cúmulos), con un número creciente de celdas en las grillas (de  $64^3$  a  $512^3$ ), incrementando en consecuencia el número de Reynolds<sup>16</sup> (de 40 a 185) y el número de gotas arrastradas por el flujo (de  $10^5$  a  $3,2 \times 10^7$ ). Sus resultados confirman las simulaciones de Vaillancourt et al. (2002) siendo que el ancho del espectro de gotas se incrementa en valores inferiores a  $0,01 \mu\text{m}$  por una vuelta completa de un remolino a gran escala. De todos modos Lanotte et al. documentan un incremento sistemático del ancho del espectro con números de Reynolds crecientes, esto es, con el incremento del tamaño del dominio computacional y por lo tanto el rango de las escalas espaciales impuestas.

## 1.2.1- Caracterización de la turbulencia

Esta sección es un resumen (extremadamente condensado) de las notas de Landau & Lifshitz (1987) sobre mecánica de fluidos.

Se introduce el concepto de velocidad media, obtenido de promediar sobre largos períodos de tiempo la velocidad en cada punto. A través de este promedio la variación irregular de la velocidad es suavizada, y la velocidad media varía suavemente de punto a punto. En lo que sigue, se denota la velocidad media por  $\mathbf{u}$ . La diferencia  $\mathbf{v}' = \mathbf{v} - \mathbf{u}$  entre la velocidad y la velocidad media varía irregularmente en la manera característica de la turbulencia.

Este movimiento agregado al flujo medio puede ser cualitativamente atribuido a la superposición de *remolinos turbulentos* de diferentes tamaños y para números de Reynolds grandes tenemos torbellinos en todo el rango de tamaños. Un rol importante es llevado a cabo por los remolinos grandes, *cuyo tamaño es del orden de las dimensiones de la región en la que el flujo toma lugar*; en lo que sigue se denota por  $l$  a este orden de magnitud para cualquier flujo turbulento. Estos torbellinos grandes tienen las mayores amplitudes. La velocidad en ellos es comparable con la variación de la velocidad media sobre la distancia  $l$  y se denota por  $\Delta u$  al orden de magnitud de esta variación. Las frecuencias correspondientes a estos remolinos son del orden de  $u/l$ .

Por otro lado los pequeños remolinos, que corresponden a frecuencias mas altas, participan en el flujo turbulento con amplitudes mucho mas pequeñas. Estos quedan relacionados como una fina estructura detallada superpuesta sobre los grandes remolinos fundamentales. Solo una parte comparativamente pequeña de la energía cinética total del fluido reside en los pequeños torbellinos.

Para distancias grandes (comparadas con  $l$ ), la variación de la fluctuación de velocidad de punto a punto en cada

15 **Tasa de disipación:** Ver sección 1.2.1.

16 **Número de Reynolds:** cociente de la magnitud de la fuerza inercial dividida la magnitud de la fuerza viscosa en un fluido dado.

instante está dada por la variación de la velocidad de los torbellinos grandes, y por lo tanto comparable con  $\Delta u$ . A distancias pequeñas (comparadas con  $l$ ), está determinada por los pequeños remolinos y por lo tanto pequeña (comparada con  $\Delta u$ ) (pero grande comparada con la variación de la velocidad media sobre esas pequeñas distancias). De manera similar, a períodos cortos de tiempo (comparados con  $T \sim l/u$ ) la velocidad no varía apreciablemente; sobre intervalos grandes varía en una cantidad del orden de  $\Delta u$ .

La longitud  $l$  aparece como una dimensión característica en el número de Reynolds  $R$ , que determina las propiedades de un fluido. Si  $\lambda$  es del orden de magnitud del tamaño de un remolino dado, y  $v_\lambda$  el orden de magnitud de su velocidad, entonces el correspondiente número de Reynolds está definido como  $R_\lambda \sim v_\lambda \lambda / \nu$  donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática<sup>17</sup>. Este número decrece con el tamaño del remolino.

Los remolinos mas pequeños tienen un tamaño  $\lambda_0$  y la energía pasa hacia estos desde los mas grandes prácticamente sin disipación.

Dado que la viscosidad del fluido es importante sólo para los remolinos pequeños, podemos decir que ninguna de las cantidades pertenecientes a los remolinos de tamaño  $\lambda \gg \lambda_0$  pueden depender de  $\nu$ .

Se define como  $\varepsilon$  a la disipación media de energía por unidad de masa de fluido, la cual se obtiene de los torbellinos grandes y es gradualmente transferida a los mas pequeños hasta que se disipa en remolinos de tamaño  $\sim \lambda_0$ . Dado entonces que la disipación es principalmente debida a la viscosidad, el orden de magnitud de  $\varepsilon$  puede ser determinado solo por aquellas cantidades que caracterizan los remolinos grandes. Estas son la densidad del fluido  $\rho$ , la dimensión  $l$  y la velocidad  $\Delta u$ . De estas tres cantidades se puede formar solo una que tiene las dimensiones de  $[\varepsilon] = \text{m}^2/\text{sec}^3$ . Así se encuentra que

$$\varepsilon \sim \frac{(\Delta u)^3}{l} \quad (1.14);$$

y esto determina el orden de magnitud de la disipación energética en un flujo turbulento.

Para determinar la escala interna  $\lambda_0$ , se considera

$$R_\lambda \sim \frac{v_\lambda}{\nu} \sim \Delta u \cdot \frac{\lambda^{4/3}}{\nu^{1/3}} \sim R \left( \frac{\lambda}{l} \right)^{4/3} \quad (1.15);$$

con el número de Reynolds  $R \sim l\Delta u/\nu$  para el flujo como un todo. El orden de magnitud de  $\lambda_0$  es aquel para el cual  $R_\lambda \sim 1$ :

$$\lambda_0 \sim \frac{l}{R^{3/4}} \sim \left( \frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (1.16).$$

El rango de escalas  $\lambda \sim l$  se llama *rango de energía*; y es donde se concentra la mayor parte de la energía cinética del fluido. Valores con  $\lambda \lesssim \lambda_0$  forman el *rango de disipación*, donde la energía cinética es disipada. Finalmente el *rango inercial* es el comprendido en  $\lambda_0 \ll \lambda \ll l$ .

## 1.2.2- El efecto de la turbulencia en la eficiencia de colección

La turbulencia altera las distribuciones del ángulo de aproximación y velocidad relativa de colisiones entre gotas (Wang et al. 2006); por lo tanto en forma cualitativa se puede esperar que la turbulencia modifique la eficiencia de colisión. Simulaciones numéricas sugieren que la eficiencia de gotas colectoras excediendo los  $10\mu\text{m}$  puede incrementarse de un 25 % a un 40 % para una tasa de disipación  $\varepsilon = 200 \text{ cm}^2/\text{s}^3$ , y 2,5 a 5 para  $1000 \text{ cm}^2/\text{s}^3$  (Pinsky & Khain 2004).

Pinsky et al. (1999) proponen una formulación matemática para estudiar el efecto de las

<sup>17</sup> **Viscosidad cinemática:** Es el cociente de la viscosidad dinámica de un fluido dividida en la densidad [...]. (Glosario AMS 2015)

## 1 INTRODUCCIÓN

turbulencias de campo lejano sobre las interacciones aerodinámicas de las gotas. La principal conclusión de ese trabajo es que durante las turbulencias del flujo la eficiencia de colección es una variable aleatoria con una media mayor a la eficiencia de colección por gravedad (i.e. solo componente vertical en la velocidad).

Para gotas menores a  $20 \mu\text{m}$  en radio, Pinsky et al. (2007) encuentran que la turbulencia puede incrementar la eficiencia de colección en un factor de 4 para altas tasas de disipación y números de Reynolds correspondientes a turbulencia de nubes, que es mucho mas grande que el efecto de la turbulencia sobre la velocidad relativa entre gota y gota (i.e., menos de un factor de 1,6) (Pinsky et al. 2006).

Se define como núcleo de colisión (o colección)  $K_{12}$  a la tasa de colisión normalizada por el par de concentraciones relevantes  $n_1$  y  $n_2$ :

$$K_{12} = \frac{\langle \dot{N}_{12} \rangle}{\langle n_1 \rangle \langle n_2 \rangle} \quad (1.17);$$

donde  $\langle \dot{N}_{12} \rangle$  es el número promedio de colisiones observadas por unidad de tiempo.

Usando simulaciones numéricas dinámicas, Wang et al. (2008) y Wang & Grabowski (2009) encuentran que la turbulencia puede mejorar significativamente la eficiencia de colección. El factor de mejora está típicamente en un rango de 1 a 5 respecto de un régimen no turbulento; se vuelve mayor cuando las gotas tienen tamaños muy distintos ( $r_1/r_2 \ll 1$ ) o son casi iguales en tamaño ( $r_1/r_2 \rightarrow 1$ ). Cuando  $r_1/r_2 \rightarrow 1$ , el núcleo de colección por gravedad es pequeño debido a pequeñas sedimentaciones diferenciales. Cuando  $r_1/r_2 \ll 1$ , el núcleo de colección por gravedad puede tener baja colección. Por lo tanto la turbulencia del aire juega un papel importante en la colección gravitacional cuando la eficiencia es pequeña.

### 1.2.3- Gotas afortunadas

A modo de ejemplo y para tener una idea general, Kostinsky y Shaw (2005) nos sugieren un modelo sencillo para la formación de lluvias cálidas por *gotas afortunadas* (una por cada millón). Tomando en cuenta que la iniciación de rocío o lluvia es un reminisciente de moléculas de gas colisionando entre sí hasta formar gotas de 1mm en una lluvia cálida, y que requiere la coalescencia de un millón de gotas de  $10 \mu\text{m}$ . Se considera una nube con gotas del mismo radio  $r$  y perfectamente distribuidas al azar en el espacio, donde una gota del doble de volumen es introducida (debido a una coalescencia). Dada la distribución azarosa, siendo el tiempo medio  $\tau$  de coalescencia, la función densidad de probabilidad respecto del tiempo  $t$  para una coalescencia es

$$p(\tau) = \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1.18).$$

Konstinsky y Shaw proponen entonces un movimiento en turbulencia para las gotas análogo al de las moléculas en un gas ideal, donde recalcan la importancia de colisiones tempranas para la formación de grandes núcleos de colección, los cuales a su vez reducen el elemento estocástico para la coalescencia (i.e. a mayor tamaño de los núcleos de colección, menos se parecen las colisiones a las de las moléculas en un gas). Para que una gota crezca de  $10$  a  $50 \mu\text{m}$ , el radio debe incrementarse en cinco, con lo que hacen falta  $5^3 = 125$  eventos de coalescencia. Entonces en este modelo, el tiempo medio acumulado para la  $n$ -ésima coalescencia es  $T_n \equiv \langle t_1 + t_2 + \dots + t_n \rangle = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n$ , aproximando con una suma infinita (los primeros 125 términos equivalen al 99,5 % de la suma infinita) tenemos



$$T_n = \sum_{n=1}^{125} \tau_n \approx \sum_{n=1}^{\infty} \tau_n = \tau \left( 1 + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \dots + \frac{1}{n^2} \right) = \tau \left( \frac{\pi^2}{6} \right) \approx 1,6 \tau \quad (1.19).$$

Este modelo lleva a la conclusión de que una turbulencia vigorosa (aunque realista) puede desencadenar una lluvia en un intervalo de 30 minutos, para una nube con gotas de 10  $\mu\text{m}$  de diámetro y un  $LWC^{18}$  de 1g/m. Esto es por mas que no haya dispersión de tamaños, ni acumulación, ni núcleos gigantes. De hecho, torbellinos rápidos y escasos, pueden llegar a ser mas efectivos para formar lluvias cálidas que núcleos gigantes de condensación escasos.

## 1.2.4- Impacto de la turbulencia sobre el desarrollo de lluvias cálidas

Pinsky & Khain (2002) calculan por modelado que una mejora turbulenta media de 2 o 3 en los núcleos de colisión acelera significativamente el proceso de formación de lluvias. Falkovich et al. (2002) encuentran mediante simulaciones que los efectos inerciales inducidos por turbulencias pueden acelerar substancialmente el crecimiento de gotas sobre la brecha de crecimiento entre condensación-coalescencia. Específicamente, indican que la concentración de gotas recién formadas después de interacciones de colisión de 10 minutos se incrementa de 0,64  $\text{cm}^{-3}$  a 1,06  $\text{cm}^{-3}$  por efectos de turbulencia, cuando  $\varepsilon = 2,880 \text{ cm}^2/\text{s}^3$ .

Wang et al. (2007) repite los cálculos de Xue et al. (2008) pero incorporando turbulencia concluyen que incluso un incremento moderado de los núcleos de colección por turbulencia puede impactar significativamente en la fase de crecimiento de autoconversión.

Pinsky et al. (2008) modelan nubes en un amplio rango de turbulencias donde encuentran que el núcleo de colección por turbulencia lleva a la producción de gotas de lluvia después de 30 minutos para casi todos los casos, excepto uno con una alta concentración de gotas y tasa de disipación baja.

Los modelos también dicen que la eficiencia de colisión turbulenta tiende a ser significativamente mayor que la eficiencia de colisión gravitacional Falkovich et al. (2002), Wang & Grabowski (2009), especialmente para gotas de tamaños diferentes. No sorprende entonces ver que los efectos turbulentos de magnitudes moderadas llevan a una aceleración significativa de iniciación de lluvias cálidas.

Resumiendo, estudios recientes aplicando simulaciones numéricas dinámicas y modelos estocásticos de turbulencia han establecido firmemente que la turbulencia puede causar un incremento moderado en los núcleos de colisión. Y por ende, favorecer el desarrollo de lluvias cálidas.

## 1.3- Entropía Como Medida de Diferencia

El texto a continuación es un resumen de Lin J (1991).

Sean  $\pi_1, \pi_2 \geq 0$ ,  $\pi_1 + \pi_2 = 1$ , los pesos de las dos distribuciones de probabilidad  $p_1$  y  $p_2$ , respectivamente. La divergencia de entropía puede definirse como

$$JSD_{\pi}(p_1, p_2) = H(\pi_1 p_1 + \pi_2 p_2) - \pi_1 H(p_1) - \pi_2 H(p_2) \quad (1.20).$$

18 **LWC**: contenido de agua líquida, es la cantidad de masa de agua líquida contenida en una unidad de volumen.

## 1 INTRODUCCIÓN

Donde  $H$  es la entropía de Shannon. Dado que  $H$  es una función cóncava, de acuerdo a la desigualdad de Jensen,  $JSD_{\pi}(p_1, p_2)$  es no negativa e igual a cero cuando  $p_1 = p_2$ . Una de las mayores características es que se puede asignar distintos pesos a las distribuciones involucradas de acuerdo a su importancia. Esta es de particular importancia en problemas uso en los estudios de problemas de decisión.

La mayoría de medidas de diferencia, incluyendo la divergencia de Jensen-Shannon, son definidas para dos distribuciones de probabilidad. Para ciertas aplicaciones tales como en el estudio de taxonomía en biología y genética, puede ser necesario medir la diferencia total de mas de dos distribuciones. La divergencia de Jensen-Shannon puede ser generaliza para proveer tal medición para cualquier número finito de distribuciones. Esto es útil para el estudio de problemas de decisión con mas de dos clases involucradas.

Sean  $p_1, p_2, \dots, p_n$  las  $n$  distribuciones de probabilidad con pesos  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n$  respectivamente. La divergencia de Jensen-Shannon puede ser definida como

$$JSD_{\pi}(p_1, p_2, \dots, p_n) = H\left(\sum_{i=1}^n \pi_i p_i\right) - \sum_{i=1}^n \pi_i H(p_i) \quad (1.21).$$

Si se utiliza el logaritmo en base 2 para definir la entropía de Shannon; las cotas son

$$0 \leq JSD(p_1, p_2) \leq 1 \quad (1.22);$$

si en cambio se utiliza (como es común en termodinámica) el logaritmo natural para definir la entropía, entonces la cota superior es  $\ln(2)$ .

## 2- MÉTODO

El desarrollo experimental del trabajo consiste en la generación de una nube cálida, sobre la cual se mide el espectro del diámetro de las gotas que la conforman a distintos grados de turbulencia (sección 2.5.2). Subsidiariamente, se establece que el espectro de distribución de tamaño de gotas no varía a tiempos cortos (sección 2.5.1), también y a modo de caracterización del tipo de nube que se tiene se miden el *LWC* (sección 2.3) y la  $\epsilon$  (sección 2.4). Todo el diseño del equipo fue realizado en el laboratorio ex profeso para este trabajo.

### 2.1- Instrumental, Materiales y Software

- balanza analítica *Sartorius*® mod. BP210D;
- anemómetro térmico *Testo* mod. 425;
- nebulizador ultrasónico *Respirex*® mod. no disponible;
- microscopio *Motic*® mod. BA200;
- multímetro *Metex*® mod. 3800 (error asociado en el rango usado  $\sigma_v = \pm 0,01$  V);
- termohigrómetro *Center*® mod. 311 para control de humedad relativa y temperatura;
- *formvar*®<sup>19</sup> 15/95E marca *Fluka*®;
- cloroformo para análisis marca *Dorwil*®;
- agua destilada para la formación de la nube;
- gasa quirúrgica;
- tres fuentes variables de voltaje continuo;
- dos cooler fan (ventiladores) de PC *Tida*® mod. 80x80x25 de 8 cm de lado para extracción;
- dos cooler fan (ventiladores) de PC *Tida*® mod. VD5010HS de 5 cm de lado para generación de turbulencia;
- *Motic Images Plus 2.0 ML* para la captura de microfotografías;
- *ImageJ 1.46a* para muestreo de las imágenes;
- *Testo Comfort Software Basic v3.4*.

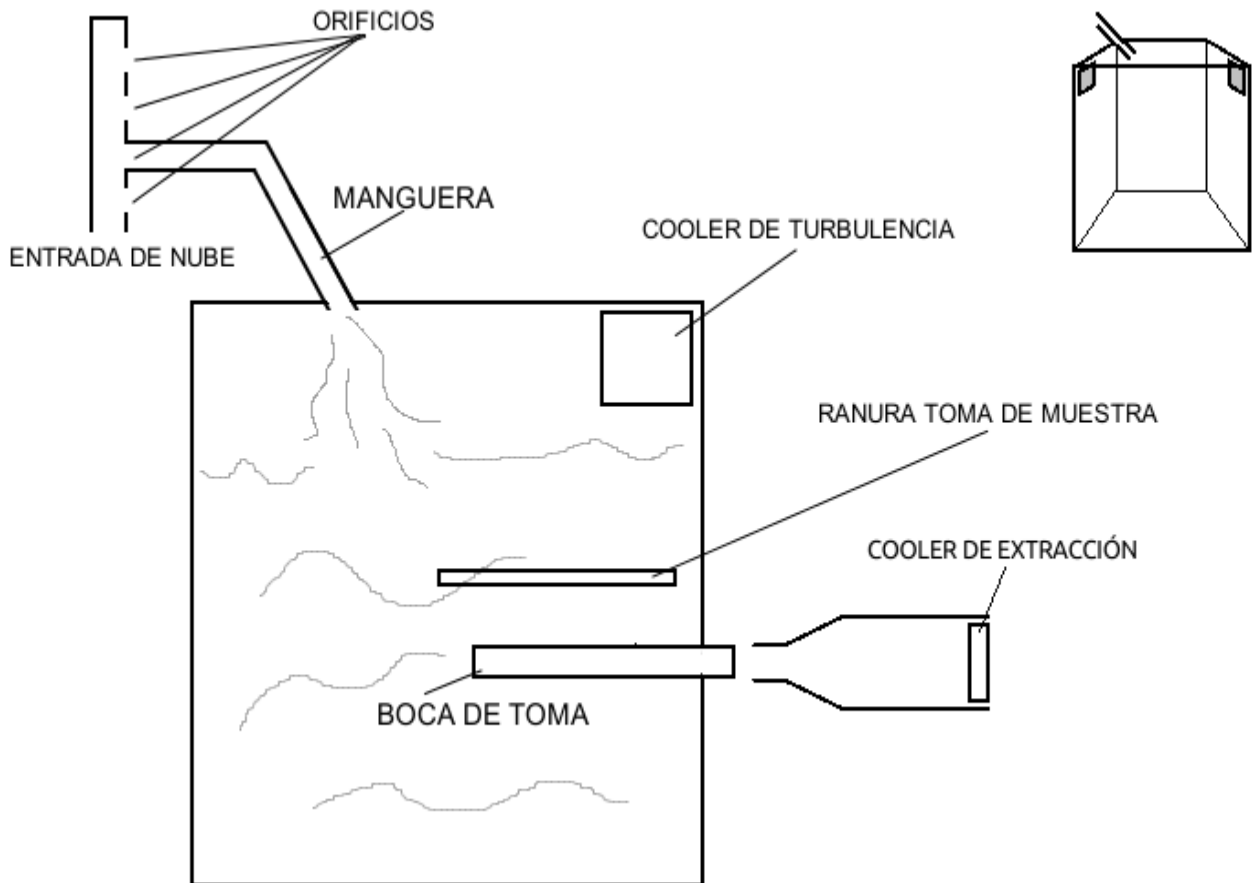
### 2.2- Disposición Experimental

En la figura 2.2 se esquematiza el dispositivo experimental utilizado, donde se genera nube mediante un nebulizador y el ingreso es desde la izquierda. En el ingreso hay cuatro orificios iguales que sirven para dividir el caudal de entrada desde el nebulizador a la caja. Se llama  $Q_{in}$  a la fracción (sin unidades) del caudal de ingreso a la caja, que 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.

---

<sup>19</sup> **Formvar:** Nombre comercial del polivinilo formal, que es una familia de resinas de acetato de polivinilo modificado.

## 2 MÉTODO

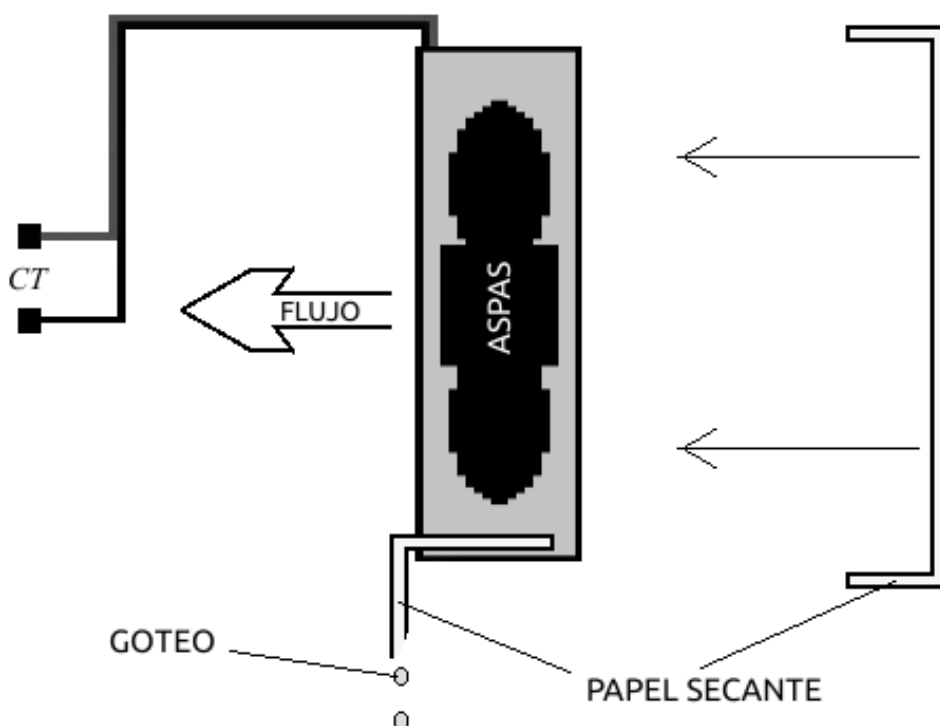


**Figura 2.1-** Esquema de disposición experimental del equipo para la toma de placas. Arriba a la derecha se presenta una vista en perspectiva donde se indican la posición de la manguera y los cooler fan de turbulencia.

La nube queda contenida dentro de una caja de acrílico y mantenida mediante un  $Q_{in}$  constante. Las dimensiones de la caja son  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  de base y 60 cm de altura. Esta caja se tapa para conseguir la saturación de humedad del sistema.

La boca de toma y el tubo del cooler de extracción (coaxiales entre sí) se separan una distancia de  $\sim 0,5 \text{ cm}$  para un voltaje de  $\sim 4,10 \text{ V}$ , de manera que los caudales de entrada de nube y extracción de la misma sean comparables. Esto se hace para conseguir un estado estacionario de la nube, i.e  $LWC$  constante.

Se ubican dos ventiladores (cooler fan) con flujos enfrentados en la misma dirección (y sentido opuesto) en las esquinas superiores de la caja. Estos son los encargados de generar turbulencia, se les entrega un voltaje  $CT$  con lo que se establece el valor de  $\epsilon$ . Con el objetivo de que las paletas de los ventiladores no arrojen gotas que hayan sido modificadas mediante contacto por las aspas, se coloca papel secante detrás de cada ventilador y también por debajo de las paletas (fig. 2.2).



**Figura 2.2-** Esquema de uno de los cooler de turbulencia. Entre los dos bornes se aplica un voltaje  $CT$ , el sentido del flujo es la del cooler sin papel secante (al colocar el papel, no hay flujo que atraviese el cooler en la dirección del eje de giro de las aspas). En la parte posterior se adosa papel secante, como también debajo de las paletas.

### 2.3- Medición del Contenido de Agua Líquida

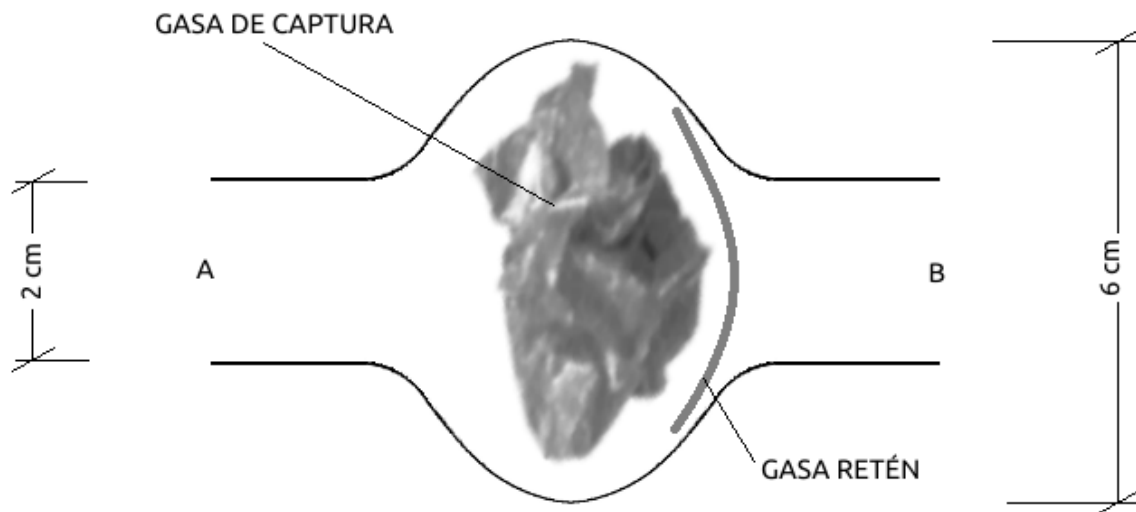
Se dispone de un tubo en el que se coloca una gasa fija estirada en su interior (fig. 2.3). Esta sirve de retén para una segunda gasa intercambiable, dispuesta de manera que ocupe el mayor volumen posible. Cada extremo del tubo se cierra herméticamente para evitar pérdida de vapor de agua. Las tapas se quitan únicamente para succión de nube.

Se conecta el extremo A en el lado externo de la boca de toma (ver fig. 2.2). Se succiona aire por el extremo B (i.e. en el sentido  $A \rightarrow B$ ), notar que es importante la velocidad de aire para arrastrar la mayor cantidad de gotas hasta la gasa. El aire se extrae con la ayuda de un cono que tiene adosado un cooler de computadora trabajando a 12,23 V, para obtener la mayor velocidad de aire posible sin alterar en exceso la nube dentro de la caja. Las gotas ingresan por A quedando atrapadas en la gasa de captura y se mide el incremento de masa  $m$ . Cada cuatro o seis mediciones se recambia la gasa de captura a medida que esta se va mojando cuando atraviesa la nube, de esta manera se desprecia la pérdida de gotas que pueda inferir en un error en el incremento de masa. Considerando prudente un recambio de gasa cada dos o cuatro mediciones a lo sumo dependiendo de cuanta agua haya absorbido, ya que cuando la gasa se humedece demasiado puede reducir su sección y las líneas de flujo con gotas la rodean.

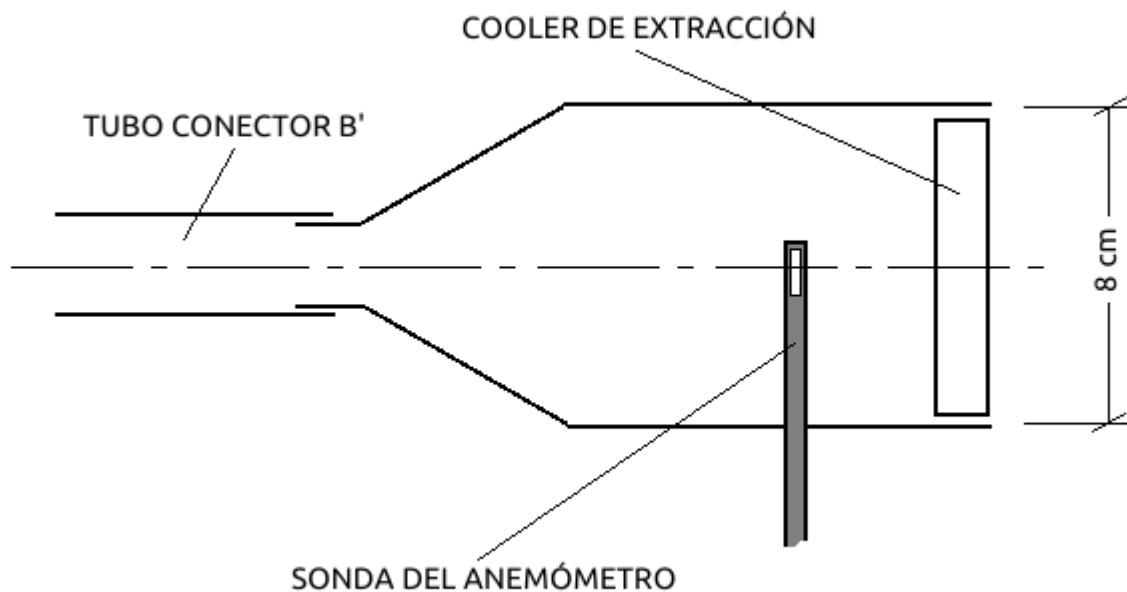
Con un anemómetro de hilo caliente<sup>20</sup> se mide la velocidad del aire a la salida (fig. 2.5) y

<sup>20</sup> **Anemómetro de hilo caliente:** Un anemómetro que utiliza el principio de que la convección de calor de un cuerpo es una función de su ventilación. En su forma usual consiste de un delgado cable de platino calentado a aproximadamente 1000 °C tal que su temperatura es relativamente independiente de la variación de temperatura ambiental. La velocidad del viento es determinada ya sea por medición de la corriente requerida para mantener el

## 2 MÉTODO



**Figura 2.3-** Esquema del dispositivo de pesaje para la medición de LWC, en el interior colocamos una gase para atrapar mecánicamente las gotas. La nube ingresa por A y son atrapadas por la gase de captura.



**Figura 2.4-** Esquema del tubo de extracción para la medición de LWC. El conector B' se adosa al dispositivo de pesaje para la medición de LWC en el extremo B (fig. 2.2). La sonda del anemómetro se alinea en el centro para medir el viento en dirección paralela al eje de simetría.

con este valor se puede calcular el caudal  $\varnothing_T$  que atraviesa el dispositivo

hilo caliente a una temperatura constante o la variación de resistencia del hilo caliente mientras una corriente constante es mantenida a través del hilo. El tiempo de respuesta constante del cable puede ser hecho muy pequeño. (Glosario AMS 2015)

$$\varnothing_T = A_T v \quad (2.1);$$

donde  $A_T$  es el área de la sección perpendicular al eje azimutal donde se mide la velocidad  $v$  del aire. El volumen del aire con nube que atraviesa la gasea al tiempo  $t$  entonces viene dado por

$$V = \varnothing_T t \quad (2.2).$$

Finalmente el  $LWC$  es

$$LWC = \frac{m}{A_T vt} \quad (2.3).$$

Establecidos y fijados los valores de voltaje  $CT = (8,11 \text{ V}; 12,23 \text{ V})$  y  $Q_{in} = (1/4; 1/3; 1/2; 1)$  se mide el  $LWC$ . Esta medición se repite cuatro o cinco veces y se calcula un  $LWC$  promedio correspondiente a la nube. Conforme la gasea absorbe agua se modifica la tortuosidad al deformarse dentro del tubo y consecuentemente también la velocidad a la salida donde se calcula  $\varnothing_T$ . Por esto último se debe determinar  $\varnothing_T$  para cada toma de nube individual.

Los valores de los parámetros medidos para la determinación del  $LWC$  se encuentran en la tabla A.3.1.

## 2.4- Tasa de Disipación Energética

Establecidos y fijados  $CT = (8,11 \text{ V}; 12,23 \text{ V})$  y  $Q_{in} = 1$  se miden las velocidades sobre el eje vertical de la caja a 5 cm por debajo de los coolers de turbulencia en altura, variando los siguientes factores en distintas combinaciones:

- nebulizador sin agua encendido/apagado,
- coolers de turbulencia encendidos/apagados y
- cooler de extracción encendido/apagado,

Dado que se usa un anemómetro de hilo caliente no se puede medir la velocidad del aire en presencia de gotas, por lo que el nebulizador no puede contener agua (las gotas alterarían la medición). El anemómetro usado toma el módulo de la velocidad del aire en intervalos de un segundo en una dirección (no sentido) determinada, girando la dirección de la sonda entonces se conoce el módulo de la velocidad del aire para las distintas componentes cartesianas. Esta medición resulta un poco imprecisa, ya que el paso de aire a través de la sonda permite un ángulo en torno de la dirección en la que el aire atraviesa el hilo caliente de la sonda y además no se conoce el sentido de la velocidad, pero permite acotar un rango para la tasa de disipación  $\varepsilon$  en el sistema a partir de la fórmula 1.14, donde la longitud  $l$  corresponde al lado de la caja (en la sección 1.2.1 se especifica que  $l$  corresponde a la dimensión en donde el flujo toma lugar).

Se mide con Test Comfort Software durante intervalos de tiempo de  $\sim 100$  s. Luego se promedia la velocidad cuadrática media en cada componente y se despeja  $\varepsilon$  a partir de la ecuación 1.18. El error que se usa es la desviación estándar. También se puede estimar  $\lambda_0$  a partir de la ecuación 1.16.

## 2 MÉTODO

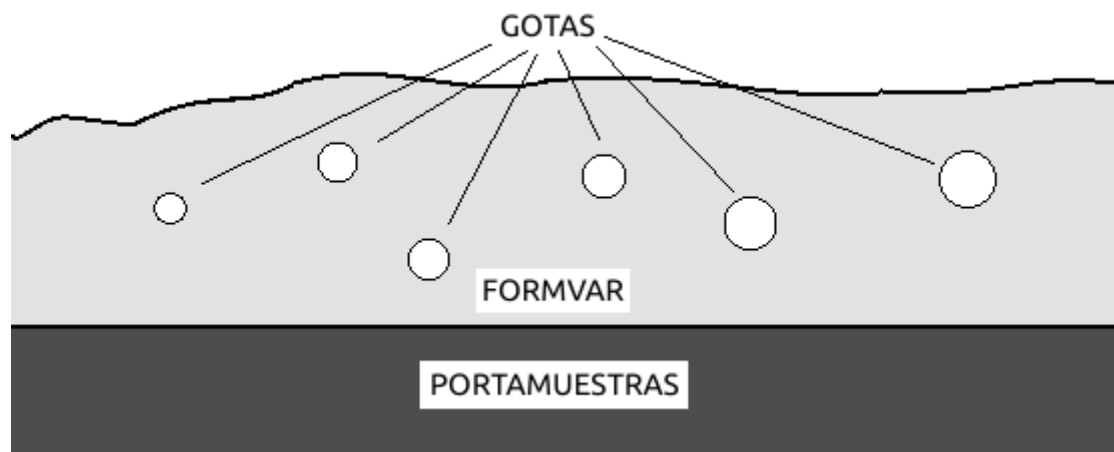
Los valores obtenidos se encuentran a disposición en las tablas A.4.1, A.4.2 y A.4.3.

### 2.5- Medición de Diámetro de gotas

Las gotas se capturan con una solución de formvar al 3 % en cloroformo, que se esparce con un pincel sobre la semisección longitudinal de un portamuestras. El portamuestras es previamente cortado longitudinalmente para reducir las corrientes de arrastre a su alrededor y optimizar la captura de gotas.

La solución de formvar se prepara en una microbalanza con un error de  $\pm 0,00001$  g debido a la evaporación del cloroformo. La preparación tiene por lo menos un día de antelación ya que la disolución no es inmediata y se guarda en un recipiente de color caramelo para evitar la descomposición del solvente.

Cuando la placa barre la nube, las gotas se sumergen en el film de formvar (fig. 2.5) donde se asume que no se deforman, el cloroformo se evapora rápidamente y quedan atrapadas en la capa de formvar ahora sólida, posteriormente el agua difunde a través de la resina y quedan los huecos con la forma original de la gota.



**Figura 2.5-** Las gotas de agua se sumergen dentro de la solución de formvar-cloroformo y dado que el cloroformo se evapora rápidamente quedan atrapadas en la capa de formvar.

#### 2.5.1- Estacionalidad a corto plazo del espectro

Para determinar si el espectro es estacionario a plazos cortos, se toman muestras de la población de gotas a distintos tiempos del ingreso de nube sin interrupción. Dado que en el momento inicial de entrada de nube, ésta no se encuentra distribuida de manera homogénea dentro de la caja, la toma de muestras se realiza barriendo la placa entre la boca de toma y el cooler de extracción (figura 2.1). Si bien el método favorece una captura homogénea de nube desde el inicio y es repetitivo, el número de gotas capturadas de esta manera es bajo.

Las mediciones se realizaron con  $Q_{in} = 1$ , cuando la fracción  $Q_{in}$  fue menor que 1, la población de



gotas colectadas en la placa fue muy pequeña por lo que se desestimó su uso.

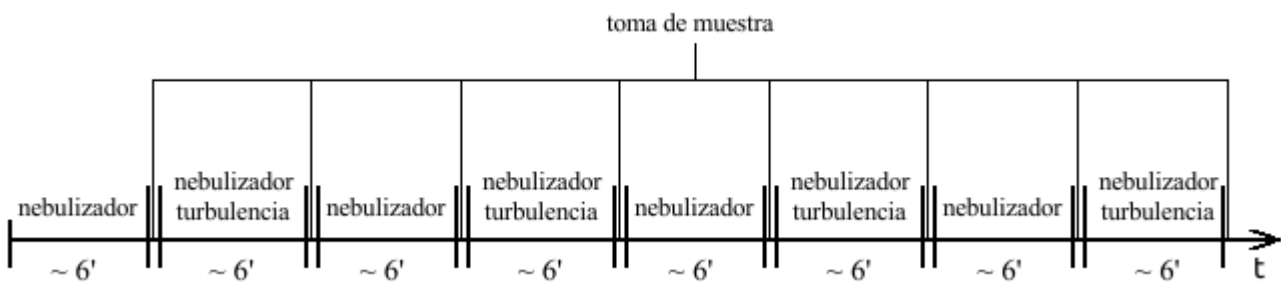
Los resultados se presentan en la tabla A.1.1 y su comparación en distintos tiempos en la tabla A.1.3.

## 2.5.2- Captura de gotas para medición de sus diámetros

Se establece el rango de fracción del caudal de ingreso a la caja  $Q_{in}$  como se ha explicado previamente en la sección 2.2.

A media altura se dispone de una ranura (fig. 2.2) para la toma de muestras del espectro de nube, y esta toma de muestra se realiza mediante un soporte largo en forma de “L” que tiene adosada una placa con una capa de formvar.

Para una configuración de  $Q_{in}$  que se mantiene fija en cada set de ciclos (fig. 2.6), se pone en marcha el cronómetro y se enciende el nebulizador. Transcurridos  $\sim 6$  minutos se apaga el nebulizador y se detiene la extracción desde la boca de toma. Alrededor de 10 segundos después, se introduce la placa con formvar con el lado pincelado orientado hacia abajo (el formvar hacia abajo para no atrapar gotas en la introducción de la placa) y se le imprime un giro para una toma de muestra en el centro de la caja al tiempo  $t_m$ . Finalmente se vuelve a disponer el equipo en la



**Figura 2.6-** Esquema temporal para la toma de muestras. Para cada toma se apaga el nebulizador y  $CT = 0,00$  V.

configuración inicial. Se puede decir que todo este ciclo se realizó en un tiempo  $t_c$ .

Inmediatamente se enciende el nebulizador y se aplica turbulencia a un voltaje  $CT$ . Al tiempo  $t_c + (6 \text{ minutos})$  se toma otra muestra de gotas. Se repite hasta tener cuatro ciclos intercalados con  $CT = 0,00$  V y  $CT \neq 0,00$  V. Cada vez que se toma muestra con una placa, se la almacena luego al resguardo de impurezas.

Todo este proceso (o set de ciclos) se repite para distintos caudales de entrada modificando el  $Q_{in}$ .

## 2.5.3- Muestreo de placas

Las placas de formvar con gotas se fotografían con un aumento de  $40 \times$  en un microscopio de campo oscuro usando el diafragma de 20 y máxima iluminación. Se toman (de ser posible) por lo menos unas 100 fotos barriendo la muestra en zonas de gotas, dejando que el mismo programa de captura de imágenes (Motic Images) mejore automáticamente la exposición. Entre toma y toma se debe verificar que se mantiene el foco ya que el relieve del formvar varía. Las fotos se guardan en formato *Joint Photographic Experts Group* (JPEG) con una resolución de  $1024 \times 768$  pixel usando

una carpeta individual para cada placa.

## 2.5.4- Conteo y medición de gotas

El conteo de las muestras se realiza de manera automática con el ImageJ. Para que el programa cuente (y analice) de manera automática las microfotografías, las imágenes deben ser binarias (i.e. blanco y negro). El paso a binario no puede ser en crudo (fig. 2.7) ya que se incurre en un gran error, por lo tanto el contraste gota-formvar se debe mejorar previamente.

Lo negativo de este proceso de mejora es que cuando se aplican ciertos filtros para el realzado de la imagen (pasos 1 y 2) y consecuente pase a binario, se pueden perder mas de un 30 % de gotas. Si la placa se moja en exceso puede haber bastante ruido alrededor de las gotas (cambiando ligeramente el área) y también puede llegar a haber coalescencia (sucede en muy pocos casos, las gotas pueden perder forma y hay que eliminarlas).

El gran punto a favor es que el uso de este programa optimiza enormemente el tiempo de muestreo de días a horas, aumentando el número de mediciones que se pueden realizar. Otra gran ventaja es que es un proceso repetitivo y se reduce el error humano.

Dado que las imágenes no pueden ser procesadas en crudo, se detalla a continuación los filtros con sus parámetros y pasos a seguir que se consideraron óptimos durante el trabajo:

1. Se coloca la carpeta de fotos de la respectiva placa en un *stack*<sup>21</sup> y se transforma la imagen a 8-bit, i.e. escala de grises de  $2^8$  niveles (fig. 2.8).
2. Se elimina el fondo<sup>22</sup> usando un *rolling ball* de por lo menos 500 pixel en algoritmo de paraboloides (fig. 2.9).
3. Se multiplica<sup>23</sup> por un factor de entre 1,25 y 1,75 dependiendo de la cantidad de ruido presente en las fotos (fig. 2.10).
4. El stack de imágenes se convierte a binario. Se realiza la primer inspección visual a lo largo de todo el stack para eliminar impurezas y gotas que pueden haberse deformado por exceso de ruido al convertirlas a binario (fig. 2.11).
5. Se rellenan los huecos y se pasa un *watershed*<sup>24</sup>, este separa la mayoría de las gotas pegadas y también elimina parte de ruido que pueda haber alrededor de gotas con borde difuso (fig. 2.12).
6. Se realiza un conteo automático de todas las partículas de área mayor o igual a  $27 \mu\text{m}^2$  en un

21 **Stack:** Conjunto o set de imágenes. [...] en los stacks, un píxel (que representa un dato de imagen 2-dimensional) se convierte en un voxel (píxel volumétrico), i.e. un valor de intensidad sobre una grilla regular en un espacio 3-dimensional [...]. (Ferreira & Rasband 2012)

22 **Substract Background:** Remueve el fondo suave continuo de los geles y otras imágenes. Basado en el concepto de “rolling ball” descrito en Sternberg Stanley, Biomedical image processing, *IEEE Computer*, Jan 1983. [...] Para 8-bit el radio de curvatura debe ser al menos tan grande como el radio del objeto de mayor tamaño en la imagen que no es parte del fondo. [...] El paraboloides típicamente produce correcciones mas confiables [...]. (Ferreira & Rasband 2012)

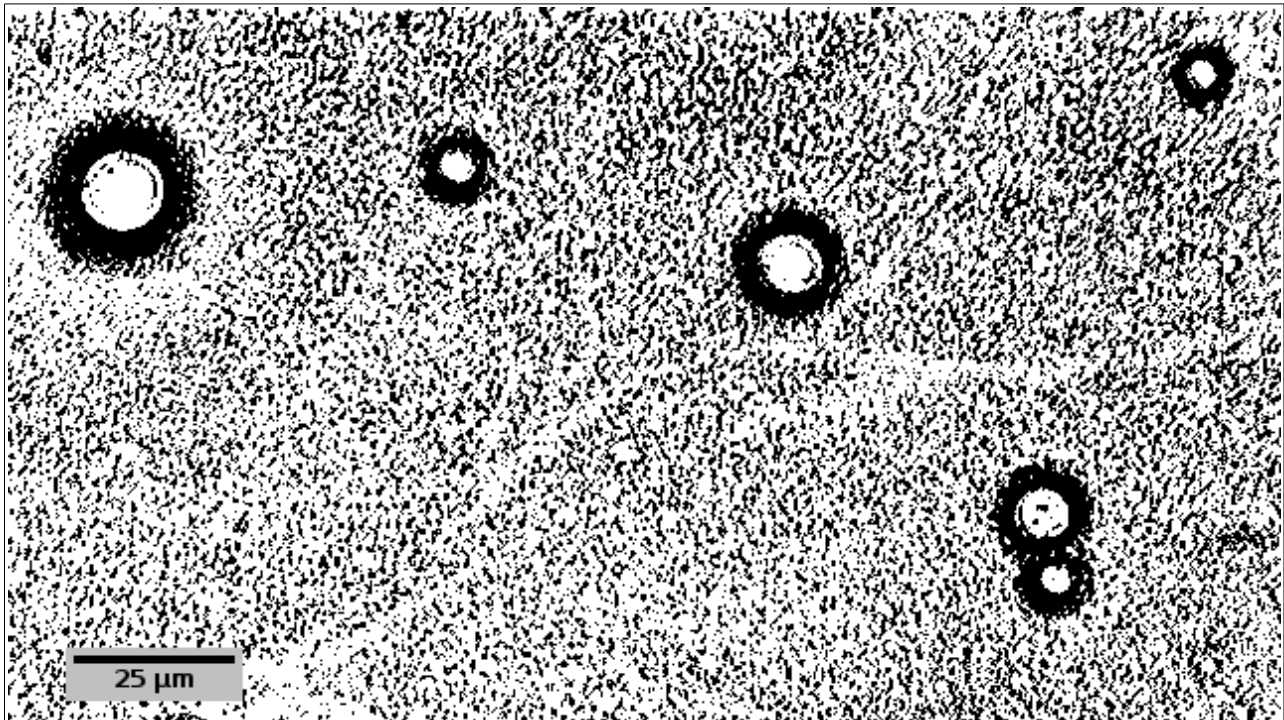
23 **Multiply:** Multiplica la imagen o selección por la constante real especificada. Con imágenes de 8-bit, resultados mayores que 255 son seteados en 255. Con imágenes de 16-bit, resultados mayores a 65.535 son seteados a 65.535. (Ferreira & Rasband 2012)

24 **Watershed:** Es una manera de separar o cortar automáticamente partículas que se tocan. Primero calcula el mapa de distancia euclídea (EDM) y encuentra los máximos puntos erosionados (UEP). Luego dilata cada uno de los UEP (los picos o máximos locales de la EDM) tanto como sea posible, puede ser hasta que el borde de la partícula es alcanzado o el borde toca una región con otro UEP (creciente). La segmentación watershed trabaja mejor para objetos suaves convexos que no se solapan demasiado. (Ferreira & Rasband 2012)

rango de circularidad comprendido entre 0,10 y 1,00 para seguir excluyendo impurezas. Finalmente, luego de una segunda inspección visual se eliminan todos los falsos positivos como ser gotas mal pintadas o mal separadas (fig. 2.13).

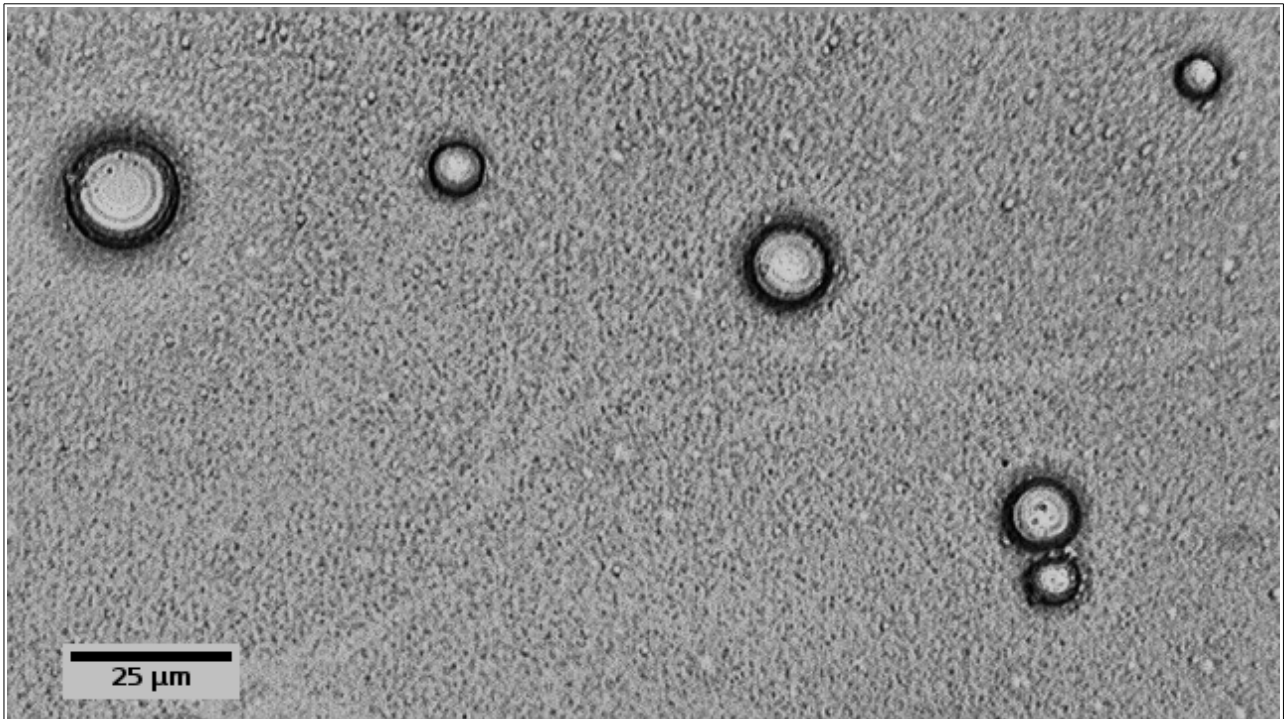
7. Se realiza el conteo definitivo con los parámetros definidos en el paso anterior.

Notar que para el conteo es preferible obtener el diámetro de las gotas a partir del área y no del perímetro por el ruido que a veces está presente en el contorno de las siluetas (fig. 2.14). La elección de un área mayor a  $27 \mu\text{m}^2$  es para reducir el costo computacional ya que las partículas menores no son tomadas en cuenta mas adelante.

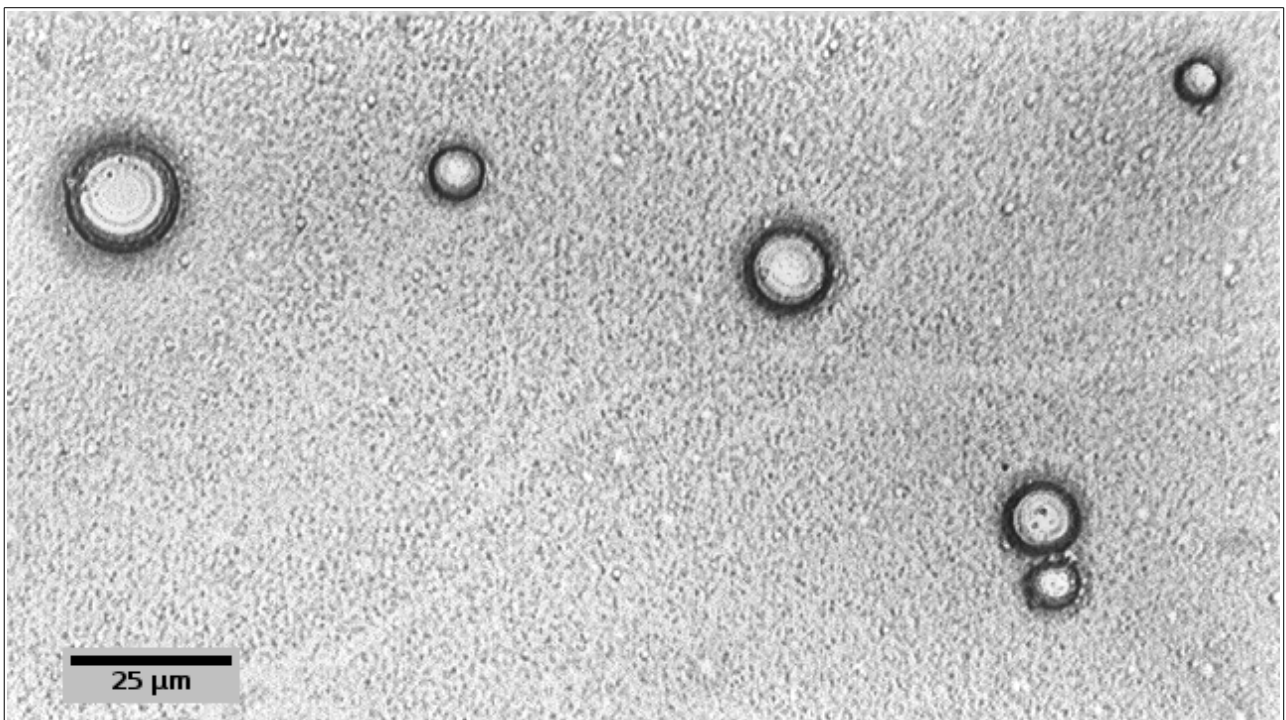


**Figura 2.7-** Imagen de la sección de una placa en fondo oscuro y zoom de  $40\times$  pasada a binario sin mejora previa.

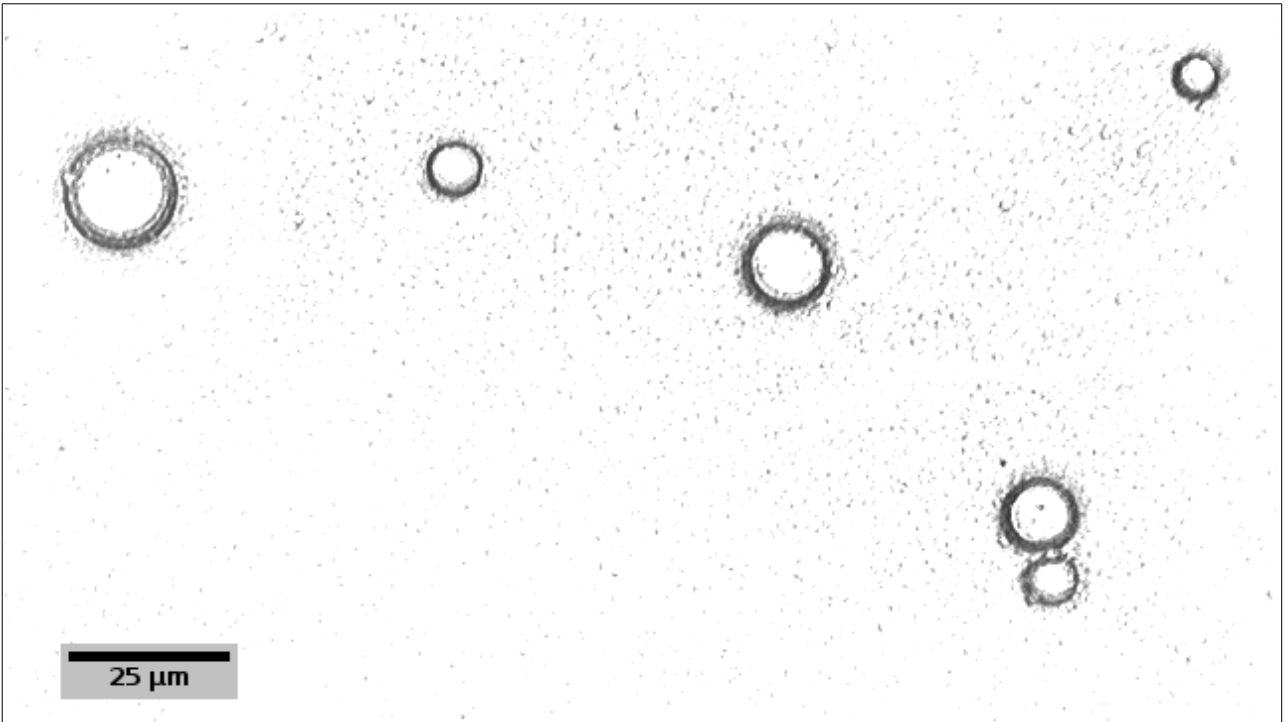
## 2 MÉTODO



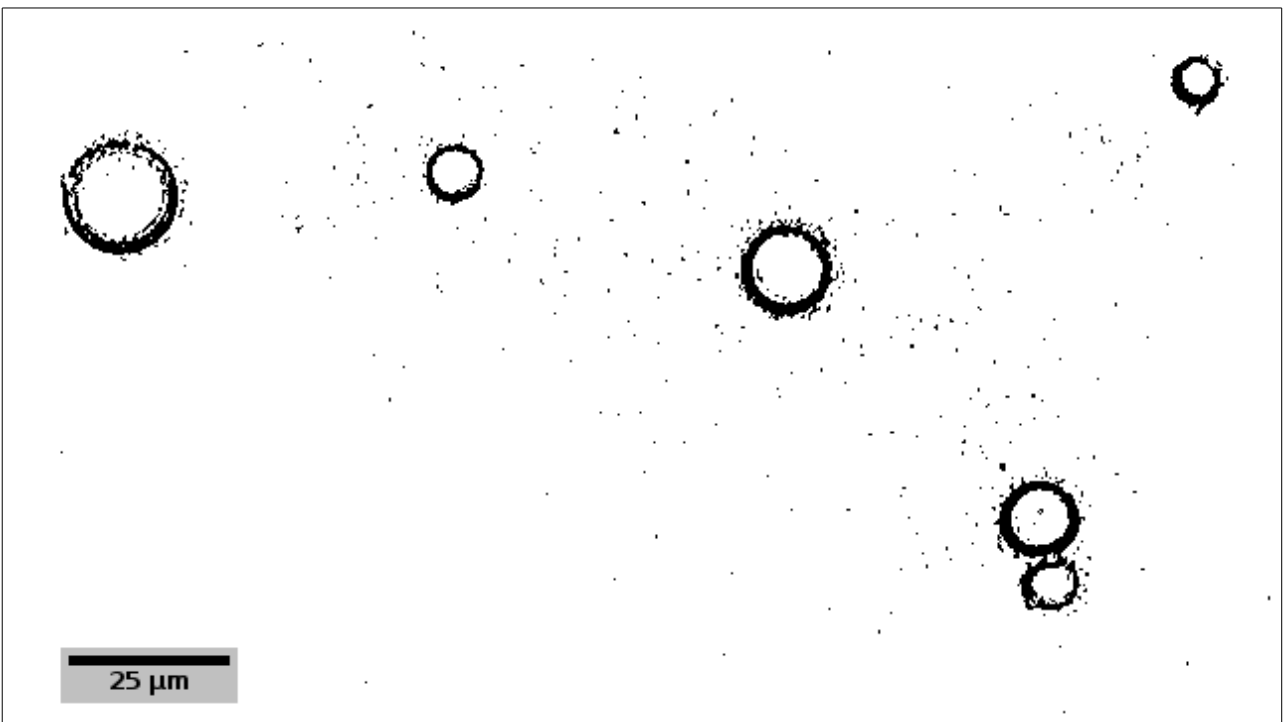
**Figura 2.8-** Paso 1, imagen de la sección de una placa en fondo oscuro y zoom de 40x en escala de grises (8-bit).



**Figura 2.9-** Paso 2, la misma imagen con sustracción de fondo (rolling ball=750 pixel).

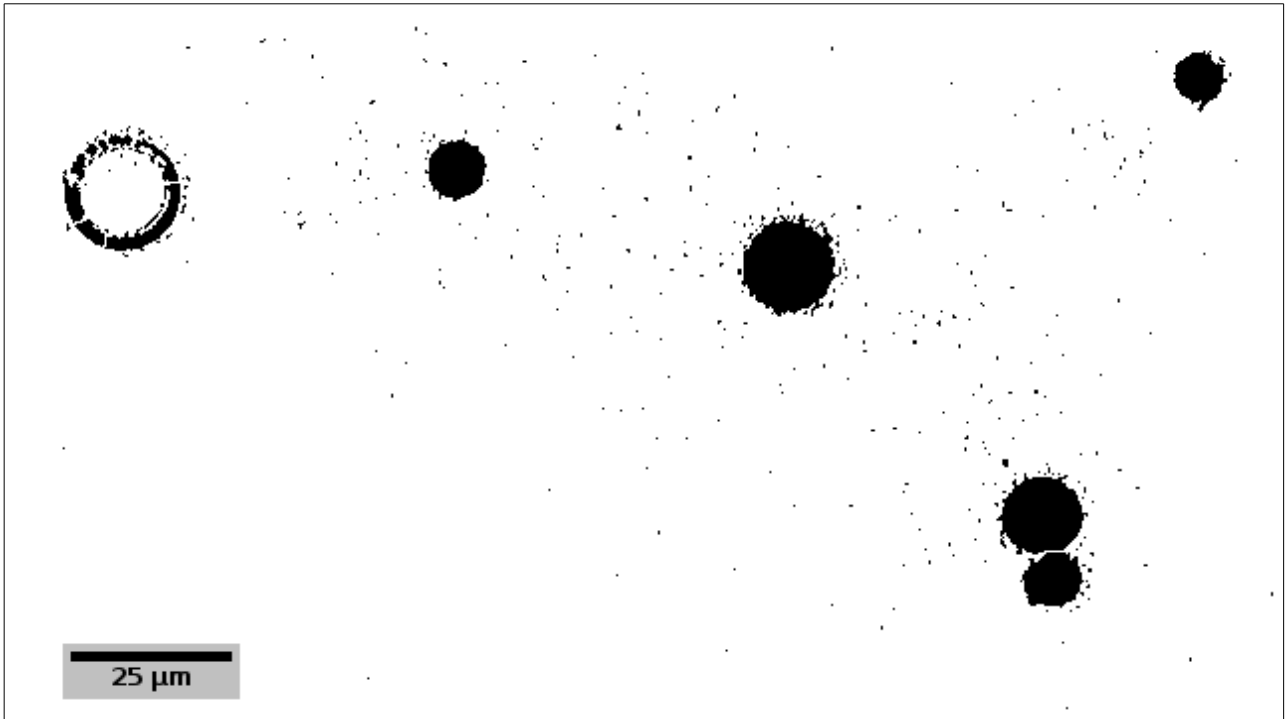


**Figura 2.10-** Paso 3, la imagen sin fondo multiplicada un factor 1,75 para eliminar ruido.

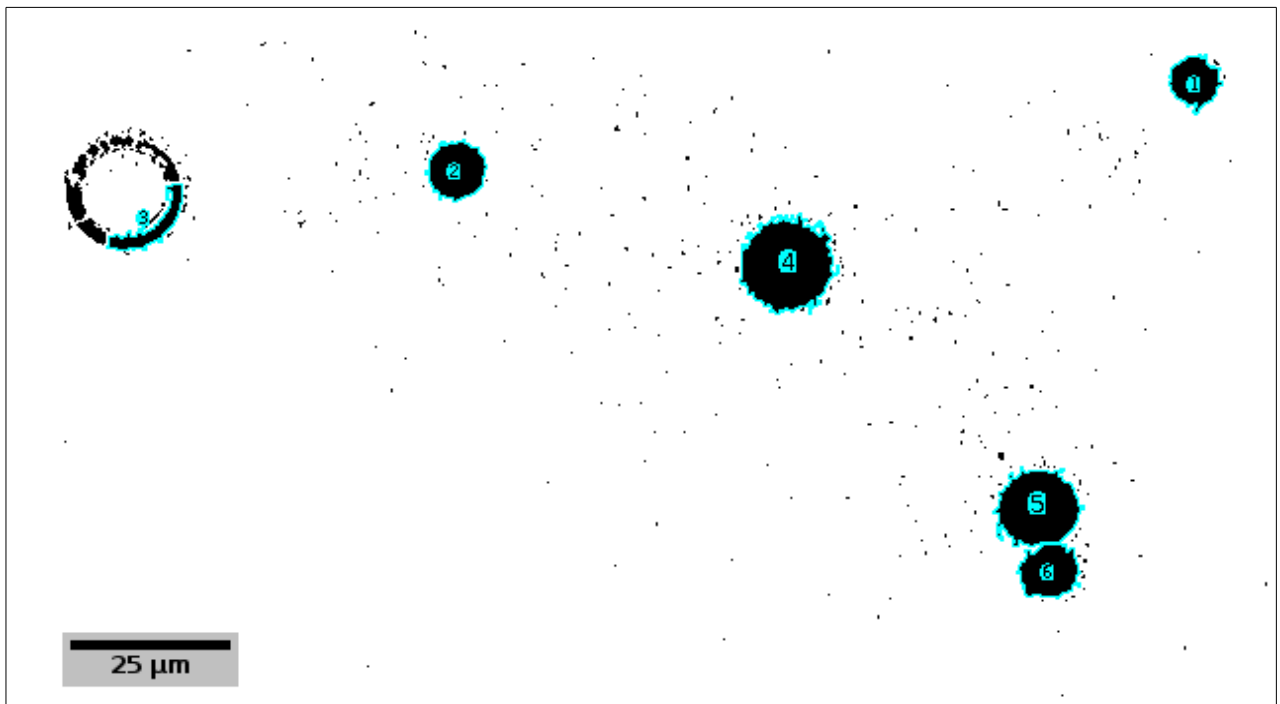


**Figura 2.11-** Paso 4, la imagen multiplicada ahora en binario. Notemos que la gota de arriba a la izquierda tiene una apertura en la parte superior de su borde, lo que evita que se pinte en el paso siguiente.

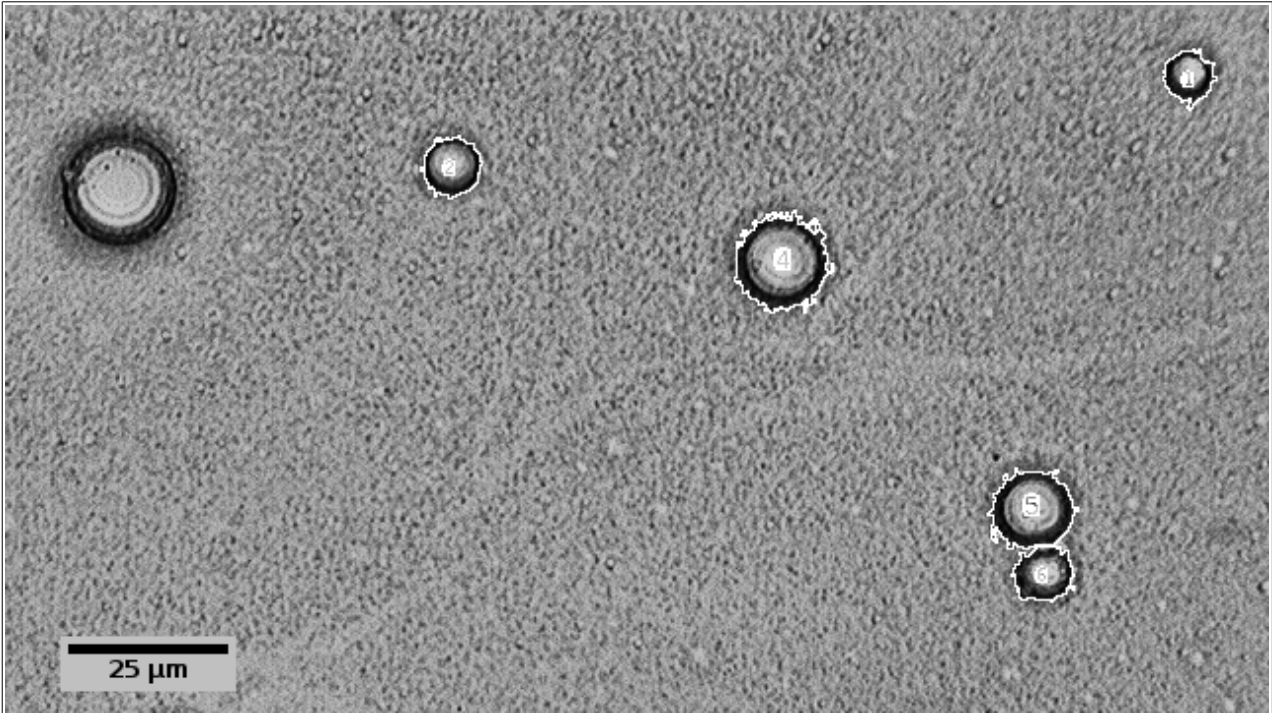
## 2 MÉTODO



**Figura 2.12-** Paso 5, la imagen pintada y con watershed. Notemos que en la gota de arriba a la izquierda se produjeron mas aperturas en su borde y las gotas de abajo a la derecha se encuentran separadas.



**Figura 2.13-** Paso 6, las áreas de las partículas analizadas (resaltadas) de manera automática por el programa. La sección de la gota de arriba a la izquierda es un falso positivo que se borra para un nuevo conteo.



**Figura 2.14-** Superposición del resultado final del conteo de las áreas (en blanco) sobre la imagen de partida de 8-bit para comparar.

El error relativo del diámetro obtenido por este método presenta una correlación negativa con el diámetro  $a$  de las gotas, siendo para las mas pequeñas

$$er_a = \pm 4 \% \quad (2.4);$$

error que se obtiene de comparar gota a gota sucesivas mediciones manuales vs mediciones automáticas mediante el ImageJ.

La poblaciones normalizadas de los espectros a dos valores distintos de  $Q_{in}$  están a disposición en las tablas A.2.1 y A.2.2, sus ajustes gaussianos están en las tablas A.2.3 y A.2.4, la tabla comparativa para su  $JSD$  es la A.2.5.





### 3- TRATAMIENTO Y DISCUSIÓN DE DATOS

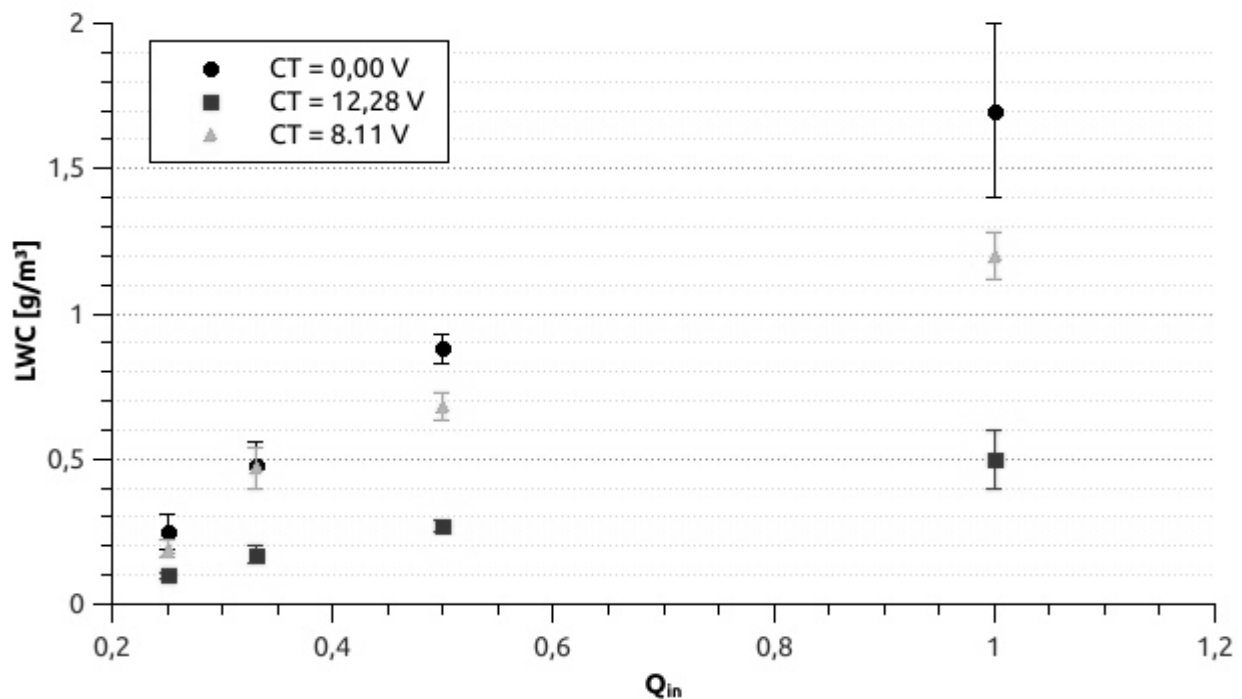
Los datos obtenidos del conteo de gotas (sección 2.5.4) se califican y cotejan de acuerdo a sus condiciones de  $LWC$  y  $\varepsilon$  como se indica en las secciones 2.3 y 2.4 respectivamente.

#### 3.1- Software Usado

- *Qtiplot*® 0.9.8.8 svn 225 para los ajustes y gráficos;
- *Origin*® v6.1052, *Origin*® v5.0 para las tablas de los histogramas.

#### 3.2- Medición del Contenido de Agua Líquida

De la medición sucesiva de velocidades e incrementos de masa, se puede estimar el  $LWC$  para distintas condiciones de fracción de caudal de entrada y voltaje de turbulencia, que se ve en la figura 3.1 y donde se puede notar la correlación negativa de  $LWC$  respecto de  $CT$ .



**Figura 3.1-** Establecimiento del contenido de agua líquida [g/m³] en función de la fracción del caudal de entrada  $Q_{in}$  para distintos voltajes de turbulencia. El error es la desviación estándar de los resultados.

Como se observa en la figura 3.1, el contenido de agua líquida no se incrementa de manera lineal con  $Q_{in}$ .

### 3.3- Estimación de la Tasa de Disipación

Para las distintas perturbaciones dentro del sistema se tienen las figuras 3.2 y 3.3:

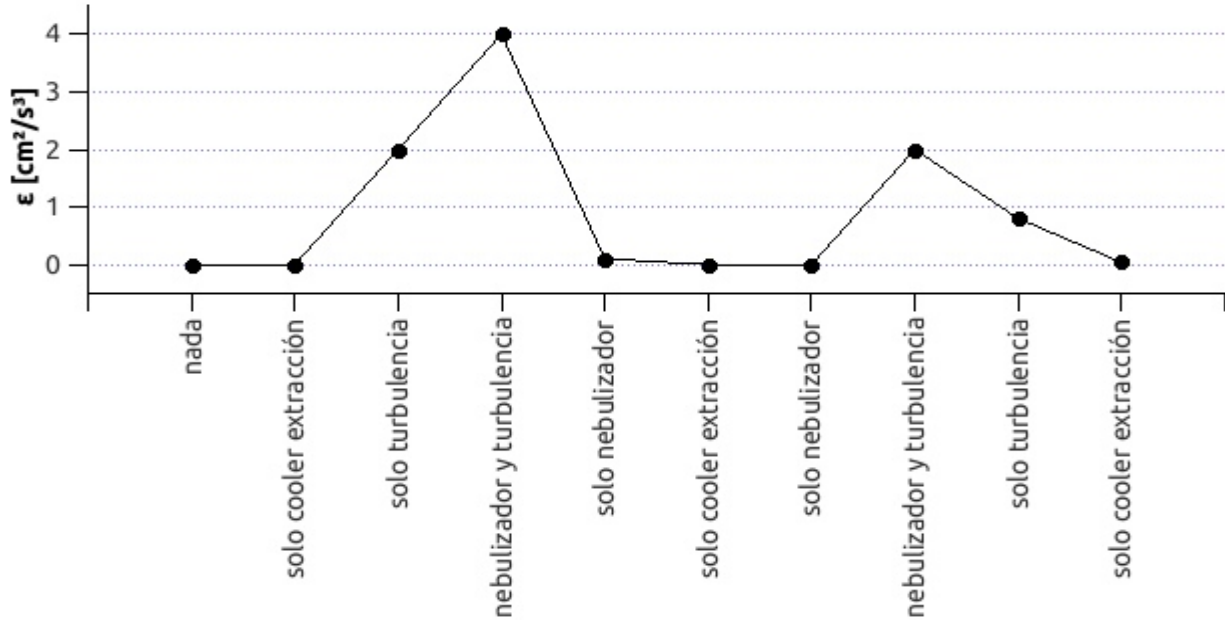


Figura 3.2- Para  $CT = (0 \text{ V}; 8,11 \text{ V})$  y  $Q_{in} = 1$ .

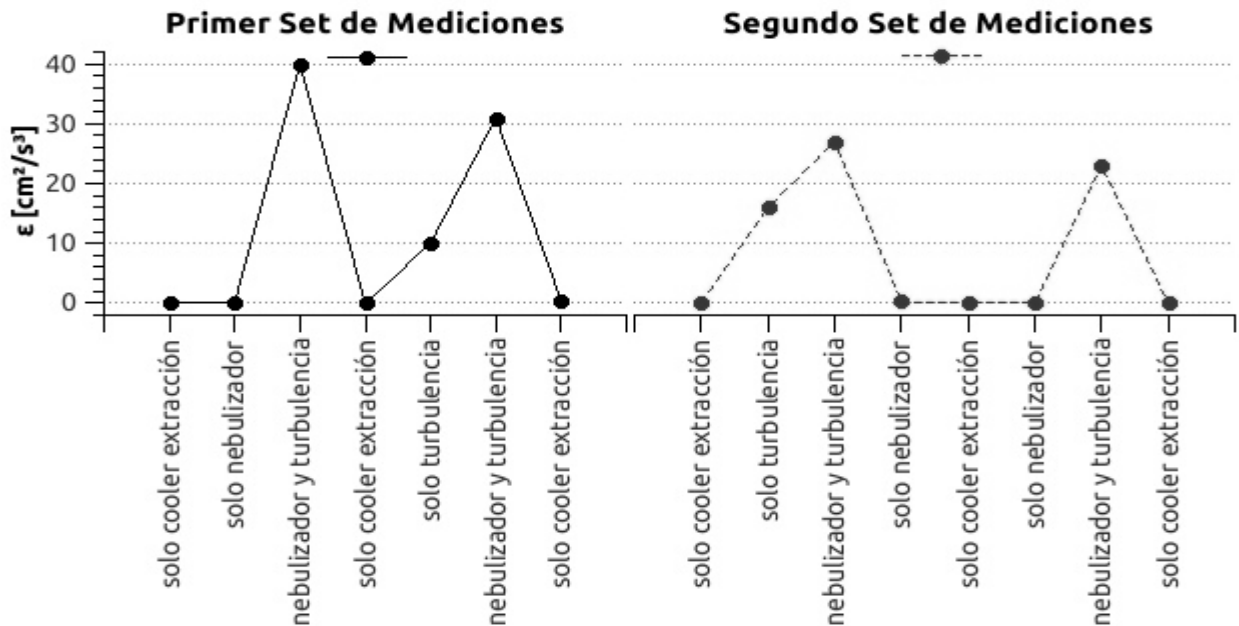


Figura 3.3- Para  $CT = (0 \text{ V}; 12,28 \text{ V})$  y  $Q_{in} = 1$ .

De las figuras 3.2 y 3.3, se tiene que la tasa de disipación es a lo sumo de  $40 \text{ cm}^2/\text{s}^3$  para un voltaje de turbulencia de  $12,28 \text{ V}$  y le corresponde un tamaño  $\lambda_0 = 900 \mu\text{m}$  (tabla A.4.1) para los turbulos más pequeños. Esta longitud corresponde al valor en donde se produce la disipación de energía en flujo laminar y se puede ver que es mayor que el diámetro de las gotas de nube muestreadas

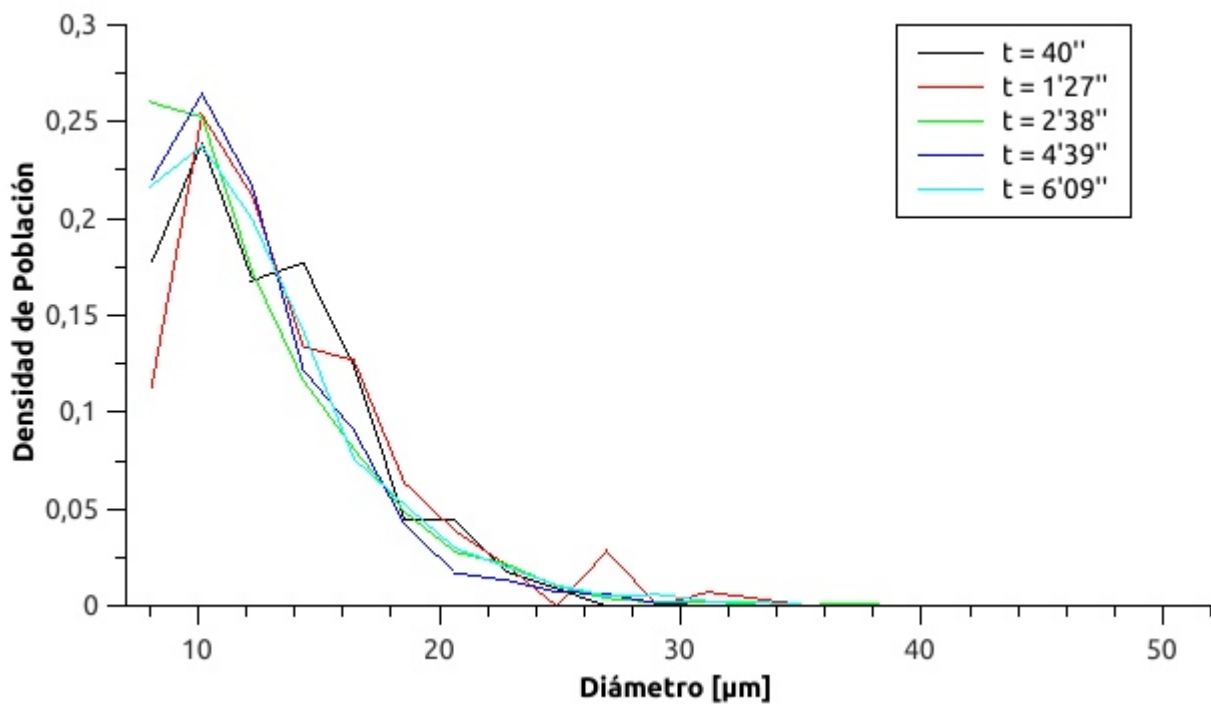
( $7 \leq a \leq 52 \mu\text{m}$ ).

### 3.4- Espectro Interno de Población

Primero se determina la estabilidad temporal (sección 3.4.1) y después el cambio frente a turbulencias (sección 3.4.2).

#### 3.4.1- Evolución temporal del espectro

Para distintos tiempos de evolución dentro del sistema se tiene el gráfico de la figura 3.4:



**Figura 3.4-** Densidad de población de gotas de distintos diámetros para  $Q_{in} = 1$  a distintos tiempos de toma de muestra.

A partir de la tabla A.1.1 se pueden obtener las entropías y calcular las distancias relativas a partir de sus divergencias:

### 3 TRATAMIENTO Y DISCUSIÓN DE DATOS

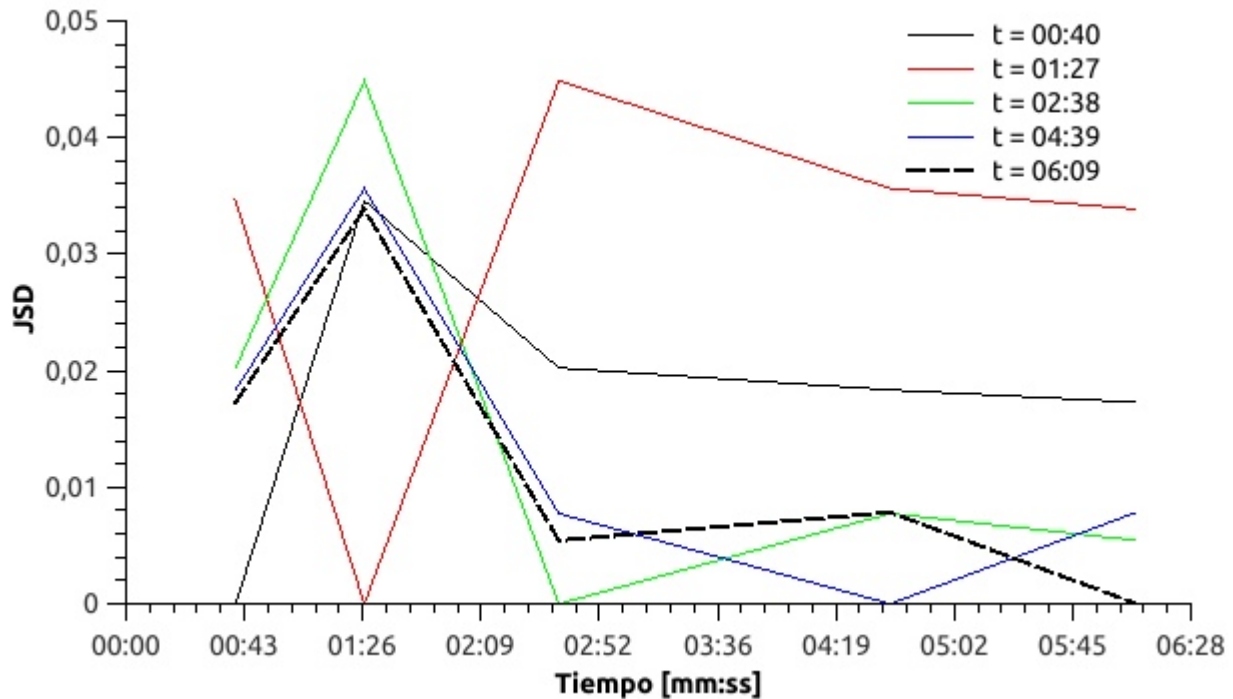


Figura 3.5- Divergencia de Jensen Shannon entre distintos tiempos de toma de muestra. Notar que  $JSD=0$  solamente al comparar una muestra consigo misma.

Se observa que la tasa de disipación asociada al nebulizador y a los cooler fan de turbulencia, actuando en forma conjunta, es mayor que la suma de los efectos individuales asociados al nebulizador y a los cooler fan. Posiblemente esto sea debido a la no linealidad de las fluctuaciones.

Cuando se comparan las distribuciones de diámetros en las figuras 3.4 y 3.5, y se observa el comportamiento de la  $JSD$  correspondiente a los tres últimos intervalos de tiempo, se ve la posibilidad de asumir que se ha alcanzado un estado estacionario para el espectro de nube. Además, es razonable considerar indistinguibles a espectros asociados a un valor de divergencia  $JSD \leq 0,008$ .

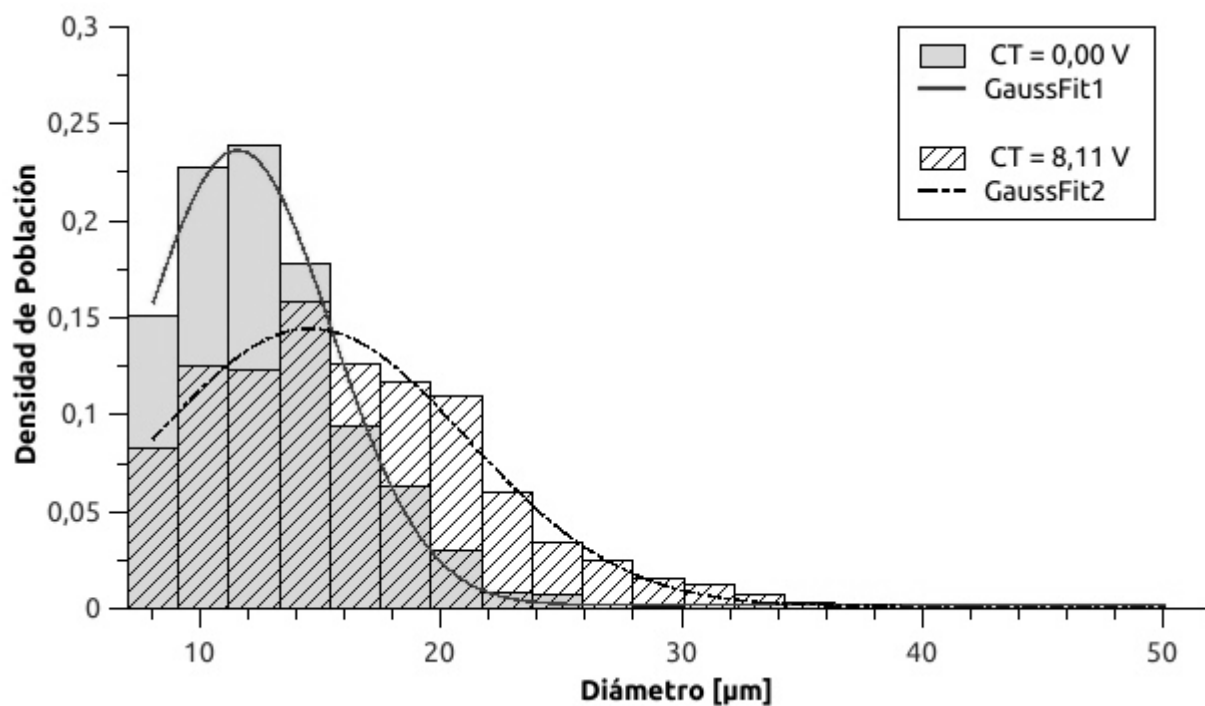
No se debe perder de vista el hecho de que cuando recién se ha comenzado con el ingreso de nube en la caja, la situación de baja humedad relativa ( $HR \sim 60\%$ ) produce una rápida evaporación de las gotas, que mayormente afecta a las más pequeñas por la relación área-volumen que tienen y por que el grado de saturación requerido para que estas estén en equilibrio es mayor (presión de vapor afectada por la curvatura). Este fenómeno disminuye su efecto luego de un tiempo corto, cuando la humedad dentro de la caja ha alcanzado valores próximos al 100%. Es en estas condiciones en las que se alcanzaría el estado estacionario; esto también se hace visible en los valores de  $JSD$ . Finalmente se considerará con este criterio que el sistema es estacionario para tiempos entre los 2'38" y ~7'.

#### 3.4.2- Distribución de población en el régimen turbulento

Para los distintos flujos de entrada de nube (consecuentemente distintos  $LWC$ ) se calcula el diámetro  $a$  de las gotas para obtener los histogramas que van en el rango  $7 \leq a \leq 52 \mu\text{m}$  con un tamaño de paso de  $2,1 \mu\text{m}$ .

### 3.4.2 Distribución de población en el régimen turbulento

La primera comparación que se hace es manteniendo el caudal de entrada y aplicando para la generación de turbulencia un  $CT=8,11$  V (fig. 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9). A simple vista se puede notar que el desplazamiento en la distribución de población tiene una correlación negativa con  $Q_{in}$ :



**Figura 3.6-** Comparación de distribución de diámetros para  $Q_{in} = 1/4$  y  $CT = (0,00$  V;  $8,11$  V) y sus respectivos ajustes gaussianos (la curva gaussiana es a modo de visualización; no se propone ningún modelo en particular para la distribución de los espectros).

### 3 TRATAMIENTO Y DISCUSIÓN DE DATOS

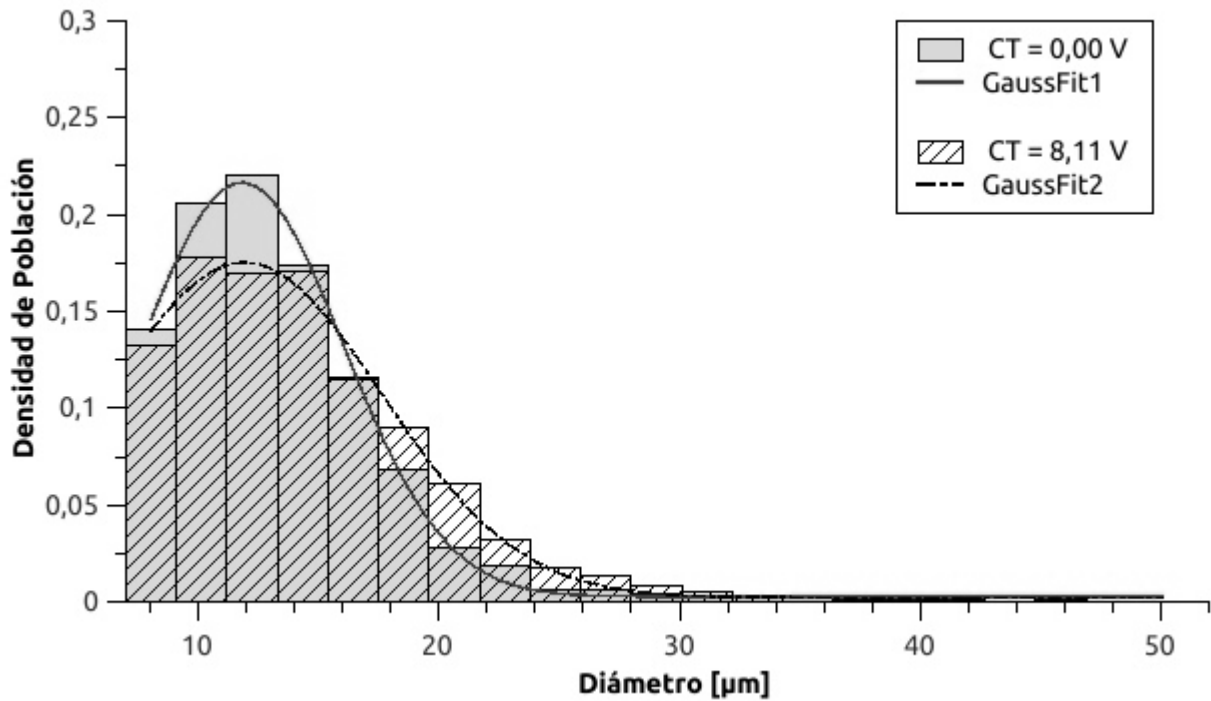


Figura 3.7- Comparación de distribución de diámetros para  $Q_{in} = 1/3$  y  $CT = (0,00 \text{ V}; 8,11 \text{ V})$  y sus respectivos ajustes gaussianos (la curva gaussiana es a modo de visualización; no se propone ningún modelo en particular para la distribución de los espectros).

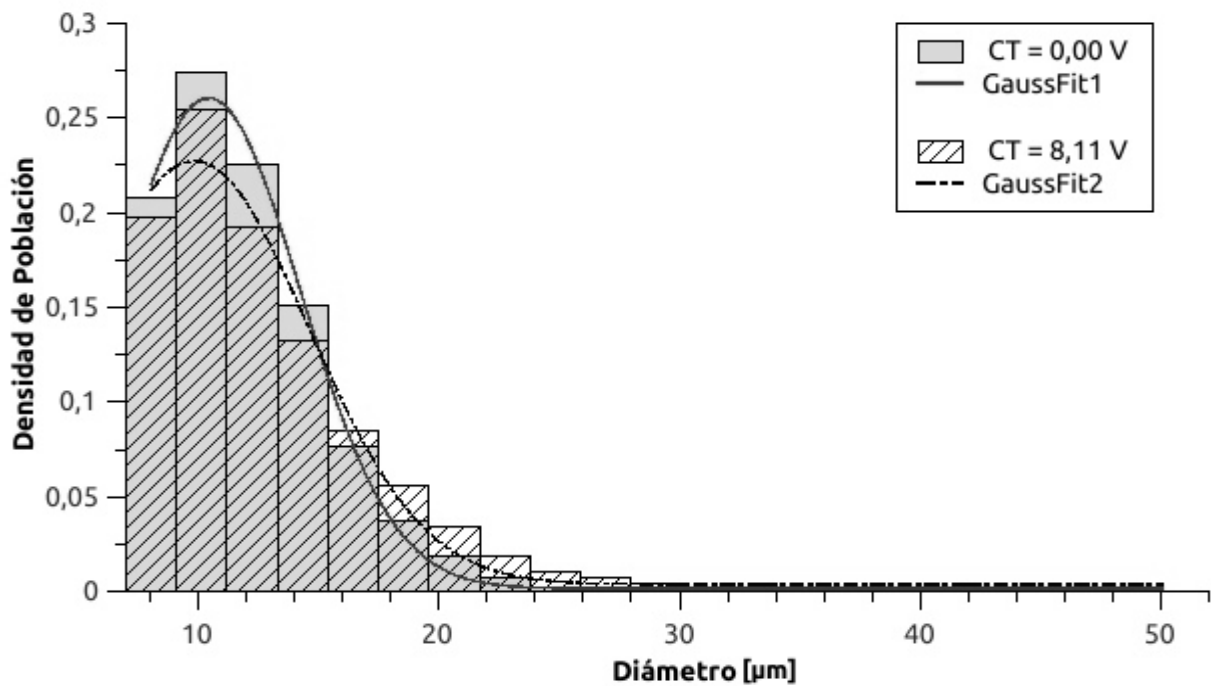


Figura 3.8- Comparación de distribución de diámetros para  $Q_{in} = 1/2$  y  $CT = (0,00 \text{ V}; 8,11 \text{ V})$  y sus respectivos ajustes gaussianos (la curva gaussiana es a modo de visualización; no se propone ningún modelo en particular para la distribución de los espectros).

3.4.2 Distribución de población en el régimen turbulento

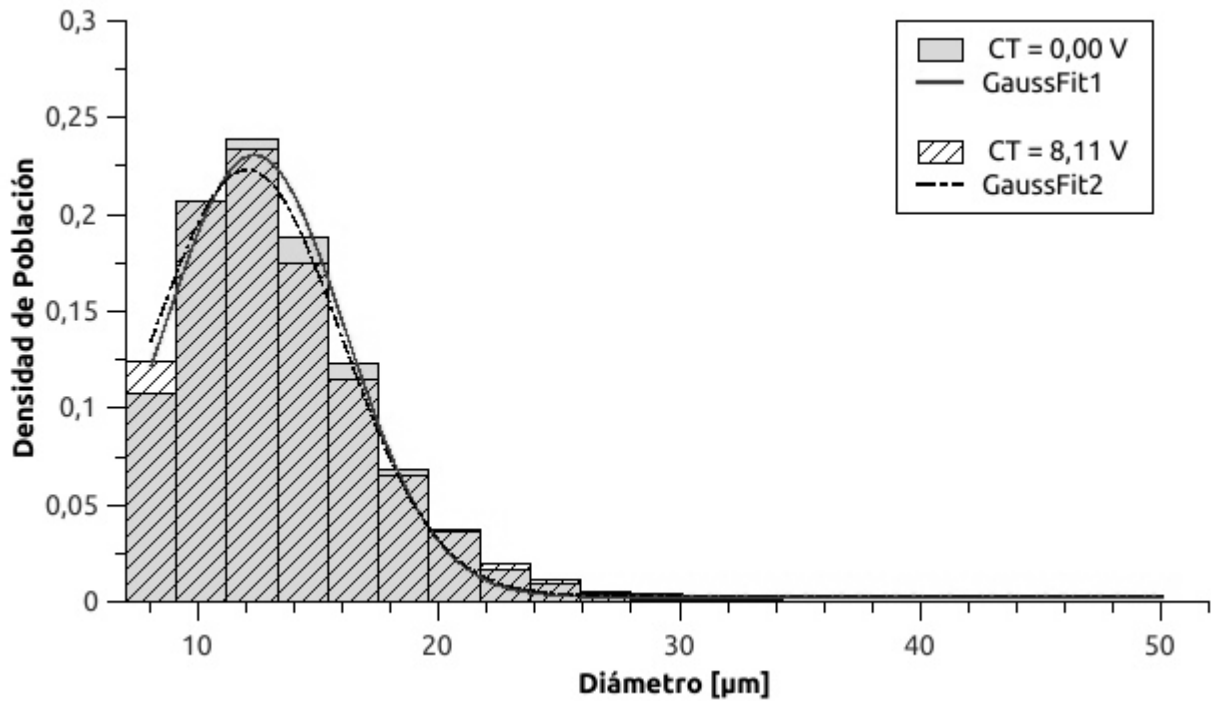


Figura 3.9- Comparación de distribución de diámetros para  $Q_{in} = 1$  y  $CT = (0,00 \text{ V}; 8,11 \text{ V})$  y sus respectivos ajustes gaussianos (la curva gaussiana es a modo de visualización; no se propone ningún modelo en particular para la distribución de los espectros).

Se aplica luego un voltaje  $CT = 12,28 \text{ V}$  (fig. 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13):

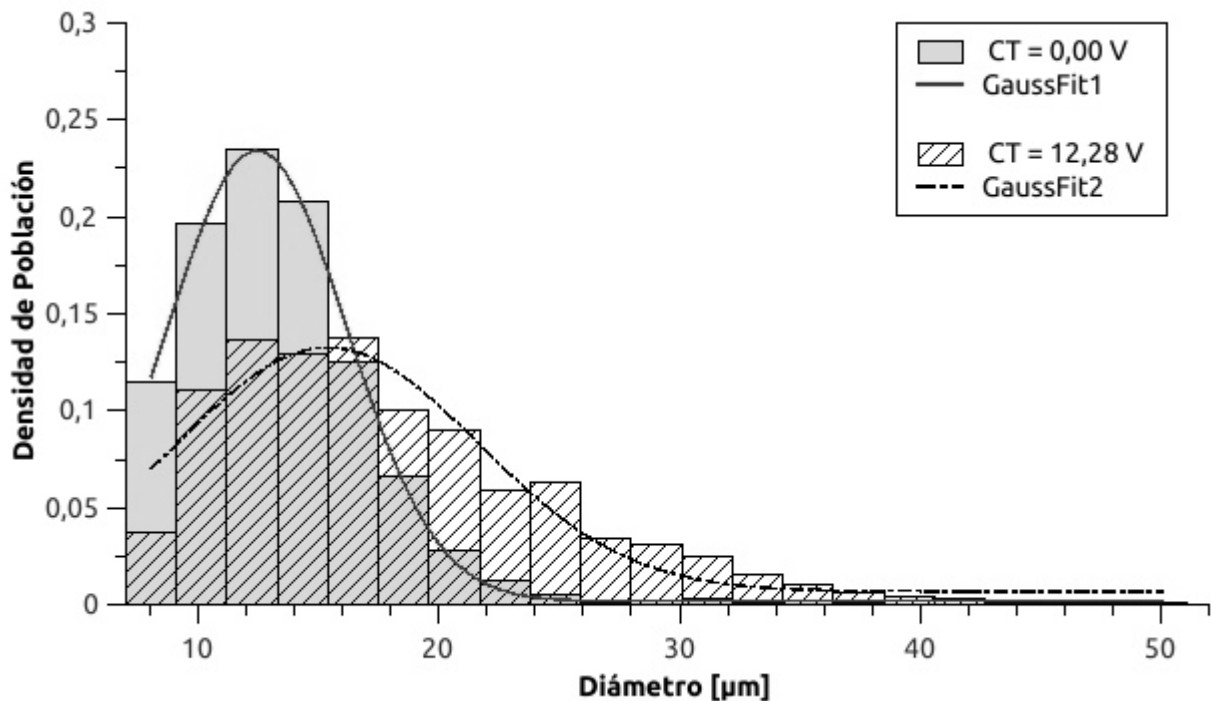


Figura 3.10- Comparación de distribución de diámetros para  $Q_{in} = 1/4$  y  $CT = (0,00 \text{ V}; 12,28 \text{ V})$  y sus respectivos ajustes gaussianos (la curva gaussiana es a modo de visualización; no se propone ningún modelo en particular para la distribución de los espectros).

### 3 TRATAMIENTO Y DISCUSIÓN DE DATOS

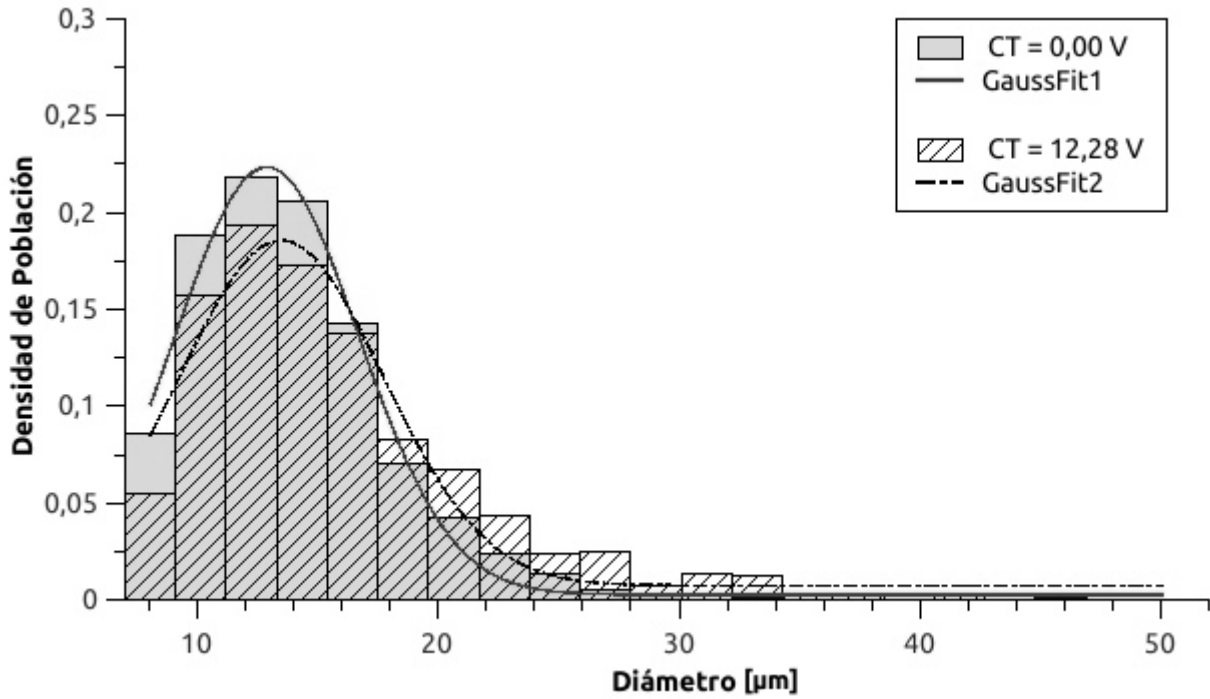


Figura 3.11- Comparación de distribución de diámetros para  $Q_{in} = 1/3$  y  $CT = (0,00 \text{ V}; 12,28 \text{ V})$  y sus respectivos ajustes gaussianos (la curva gaussiana es a modo de visualización; no se propone ningún modelo en particular para la distribución de los espectros).

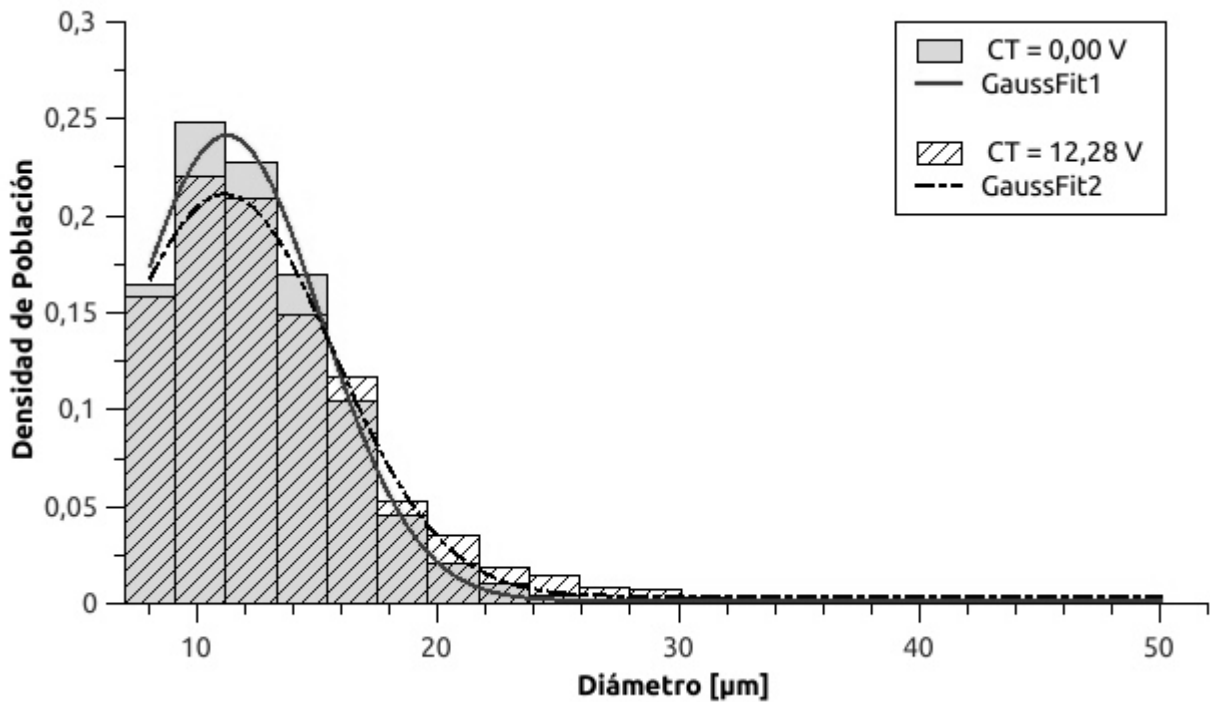
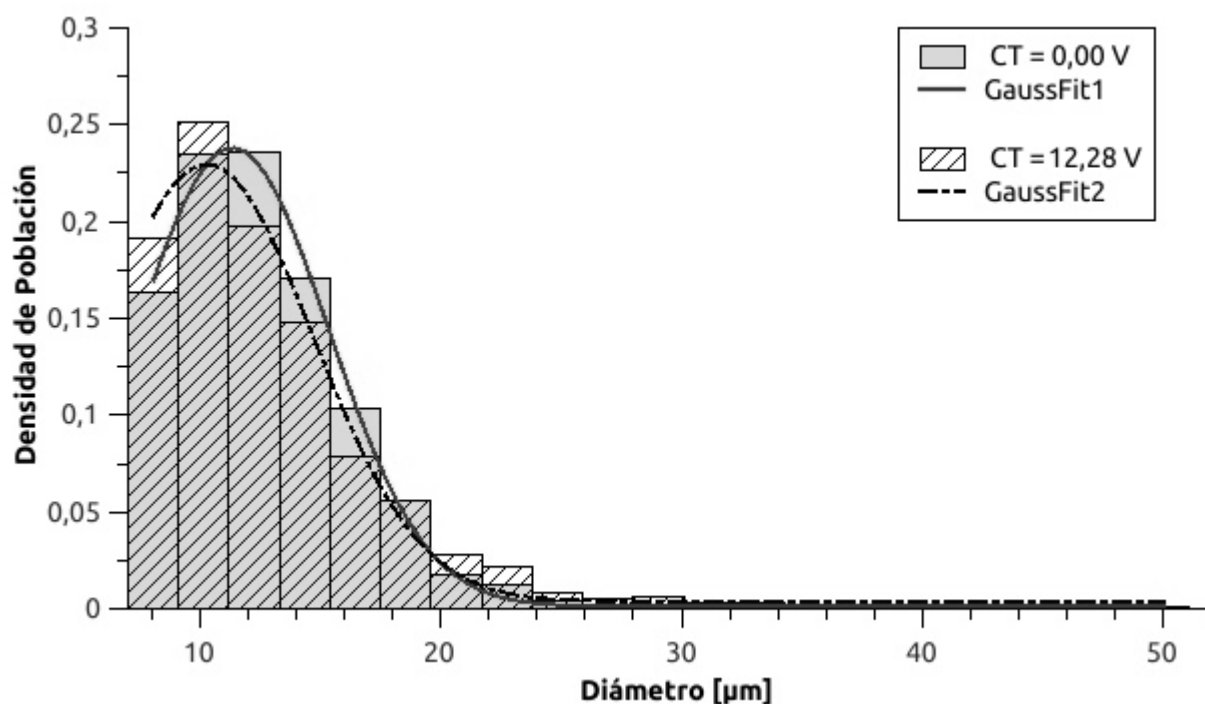


Figura 3.12- Comparación de distribución de diámetros para  $Q_{in} = 1/2$  y  $CT = (0,00 \text{ V}; 12,28 \text{ V})$  y sus respectivos ajustes gaussianos (la curva gaussiana es a modo de visualización; no se propone ningún modelo en particular para la distribución de los espectros).





**Figura 3.13-** Comparación de distribución de diámetros para  $Q_{in} = 1$  y  $CT = (0,00 \text{ V}; 12,28 \text{ V})$  y sus respectivos ajustes gaussianos (la curva gaussiana es a modo de visualización; no se propone ningún modelo en particular para la distribución de los espectros).

En las figuras 3.6 a la 3.13 se presentan los espectros de tamaños correspondientes a gotas de nube utilizadas en las mediciones con  $CT = 0,00 \text{ V}$ . Las curvas gaussianas son a modo de visualización, no se propone ningún modelo en particular para la distribución de los espectros. Se puede ver, en forma cualitativa, que todos estos son similares entre sí, aunque correspondan a diferentes  $LWC$ . También se presentan los espectros correspondientes a las situaciones en las que se forzó la turbulencia ( $CT \neq 0 \text{ V}$ ). Se puede observar que en los espectros correspondientes a las situaciones con  $CT \neq 0 \text{ V}$  hay un incremento en la proporción de gotas de mayor tamaño para  $Q_{in}$  bajos. Esto se puede observar con más detalle en las figuras 3.6 y 3.10; y se evidencia en la mediana y varianza  $\sigma$ , presentados en las figuras 3.16 y 3.17, donde la distribución se ensancha y se desplaza a la derecha para valores menores de  $Q_{in}$ .

El experimento de esta sección podría usarse para entender lo que ocurre en la zona aleada a una isoterma dentro de una nube en la atmósfera. Sin embargo, no se debe perder de vista el hecho de que la caja tiene paredes (bordes) que actúan como sumideros de gotas. Esto no se corresponde con una parcela dentro de una nube, la que cumpliría en mejor aproximación (con pequeñas dimensiones) con condiciones de frontera periódicas.

3 TRATAMIENTO Y DISCUSIÓN DE DATOS

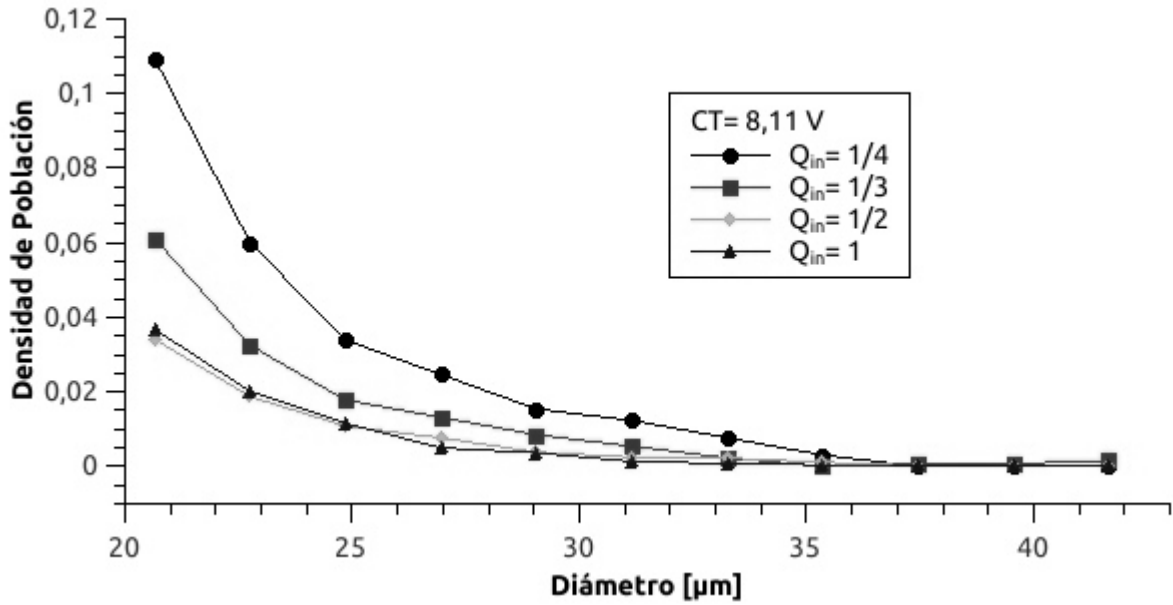


Figura 3.14- Distribución de población de gotas para  $CT = 8,11$  V y los distintos  $Q_{in}$ .

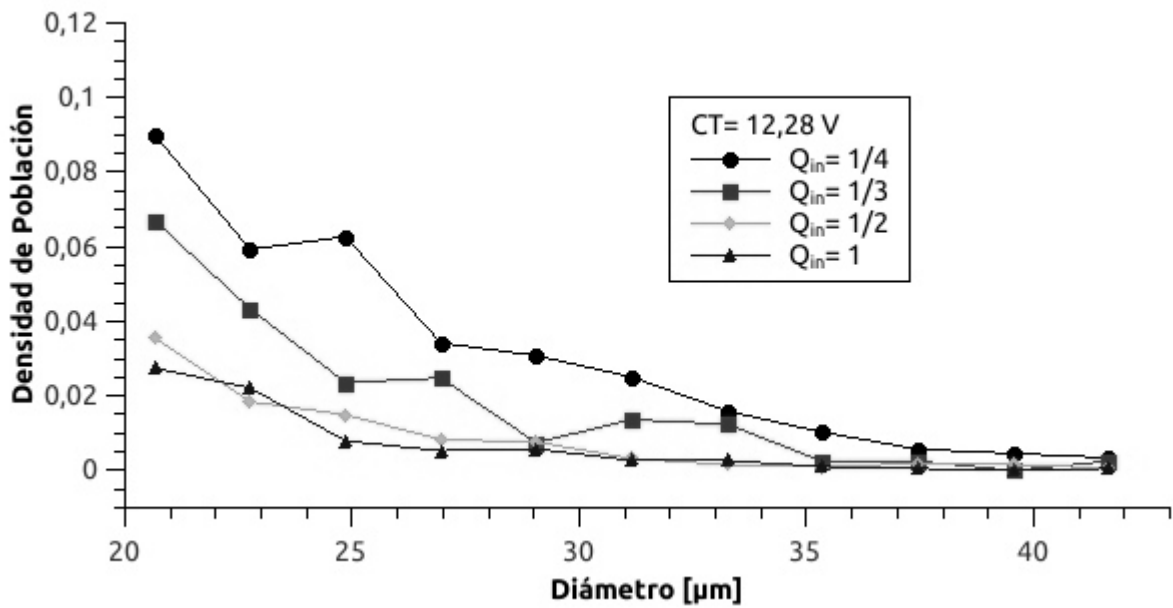


Figura 3.15- Distribución de población de gotas para  $CT = 12,28$  V y los distintos  $Q_{in}$ .

Resulta interesante comparar las distribuciones entre sí respecto de la posición del centro y ancho  $2\sigma$  de la distribución (fig. 3.16 Y 3.17), donde se evidencia un mayor efecto de la turbulencia a menores  $Q_{in}$ :

3.4.2 Distribución de población en el régimen turbulento

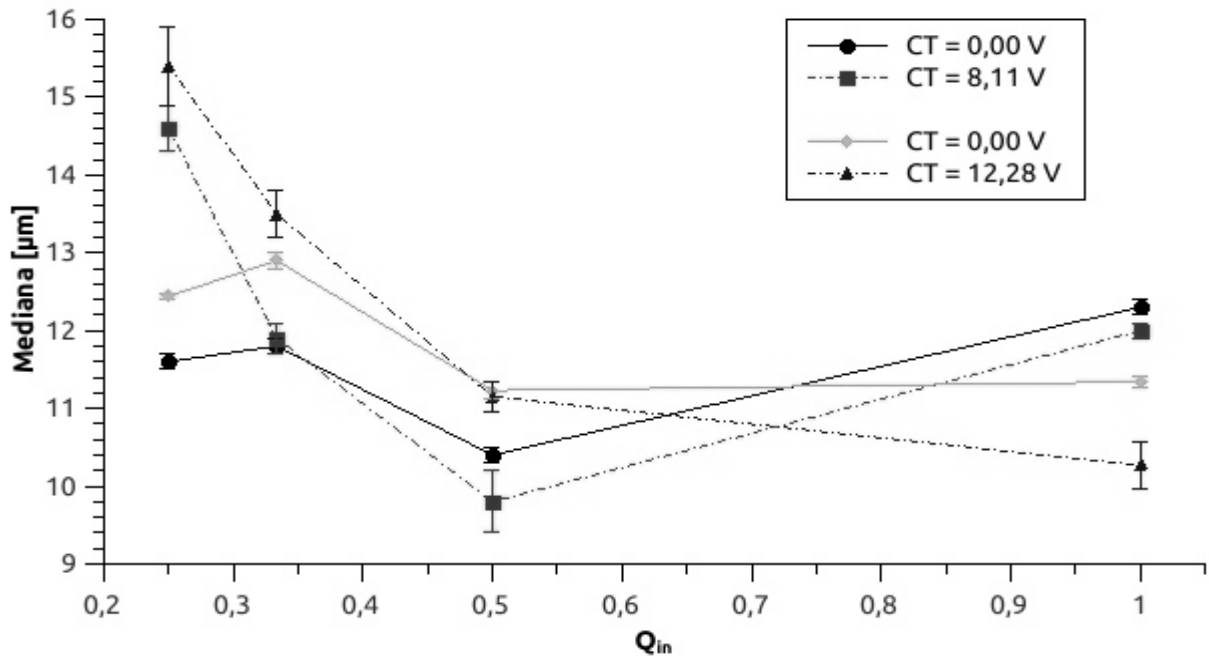


Figura 3.16- Posición de la mediana para sets de mediciones a un mismo  $Q_{in}$  con  $CT=(0,00\text{ V};8,11\text{ V})$  y  $CT=(0,00\text{ V};12,28\text{ V})$ .

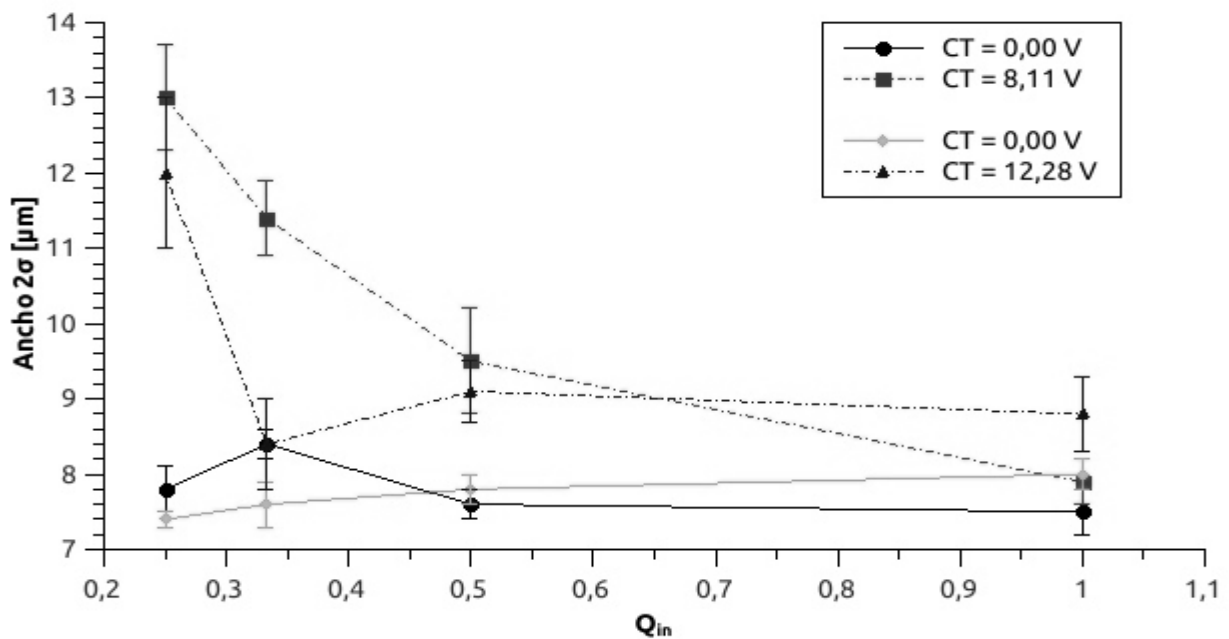
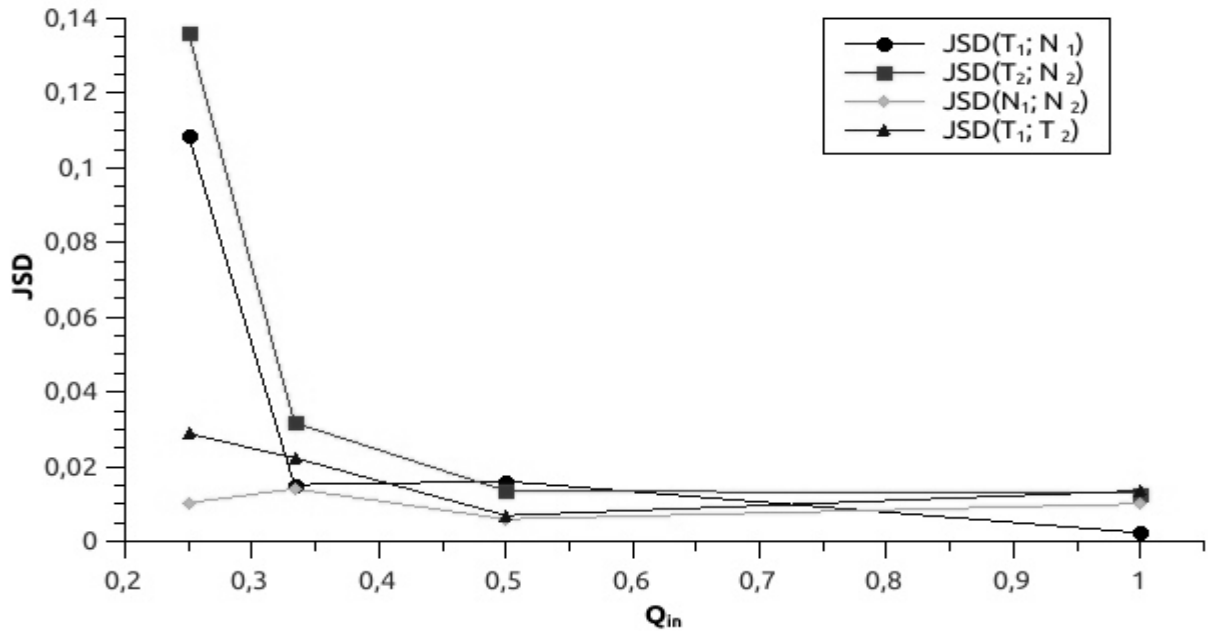


Figura 3.17- Ancho  $2\sigma$  para sets de mediciones a un mismo  $Q_{in}$  con  $CT=(0,00\text{ V};8,11\text{ V})$  y  $CT=(0,00\text{ V};12,28\text{ V})$ .

Adicionalmente como medida de diferencia entre los espectros se tiene la  $JSD$  mutua al mismo  $Q_{in}$  y distintas condiciones de  $CT$  en la figura 3.18. En la mencionada figura se ha usado la nomenclatura  $N_1$  para designar a todos los espectros correspondientes a  $CT=0,00\text{ V}$  mostrados en las figuras 3.6 a 3.9 y  $N_2$  para designar a todos los espectros correspondientes a  $CT=0,00\text{ V}$  mostrados en las figuras 3.10 a 3.13. Además se ha usado  $T_1$  y  $T_2$ , correspondientemente a los estados con  $CT \neq 0,00\text{ V}$ .

### 3 TRATAMIENTO Y DISCUSIÓN DE DATOS



**Figura 3.18-** *JSD* de las mediciones entre el régimen con  $CT = 8,11$  V ( $T_1$ ) junto con su respectivo  $CT = 0,00$  V ( $N_1$ ) y  $CT = 12,28$  V ( $T_2$ ) junto con sus respectivo  $CT = 0,00$  V ( $N_2$ ).

Comparando los histogramas de las nubes correspondientes a las mediciones con  $CT = 0,00$  V ( $N_1, N_2$ ), se puede considerar que estas nubes en reposo (i.e. con baja tasa de disipación) presentan espectros similares; esto es, bajo un mismo  $Q_{in}$  aunque tengan condiciones iniciales distintas e independientemente de variables externas tales como la temperatura ambiente, la humedad inicial en la caja, la presión atmosférica y otras. Con este criterio se define y se deja establecido, de ahora en mas, que las distribuciones asociadas a  $JSD \leq 0,014$  se consideran indistinguibles. Este valor de *JSD* es el más alto de los correspondientes a las nubes en reposo  $N_1$  y  $N_2$  en la figura 3.18. En esta figura también se puede observar que la variación más grande en los valores de *JSD* se produce entre las nubes perturbada y la no perturbada con  $Q_{in} = 1/4$ .

En la figura 3.19 se presentan las *JSD* calculadas con los espectros de  $N_1$ , para cuantificar la diferencia entre los histogramas asociados a los distintos caudales  $Q_{in}$  entre sí. Se muestran los conjuntos de comparaciones de un determinado  $Q_{in}$  (indicado en el gráfico) con cada uno de los  $Q_{in} = 1/4; 1/3; 1/2; 1$ . Por otra parte, en la figura 3.20 se presentan las *JSD* calculadas con los espectros de  $T_1$ , para cuantificar la diferencia entre los histogramas correspondientes a los  $Q_{in}$  entre sí.

### 3.4.2 Distribución de población en el régimen turbulento

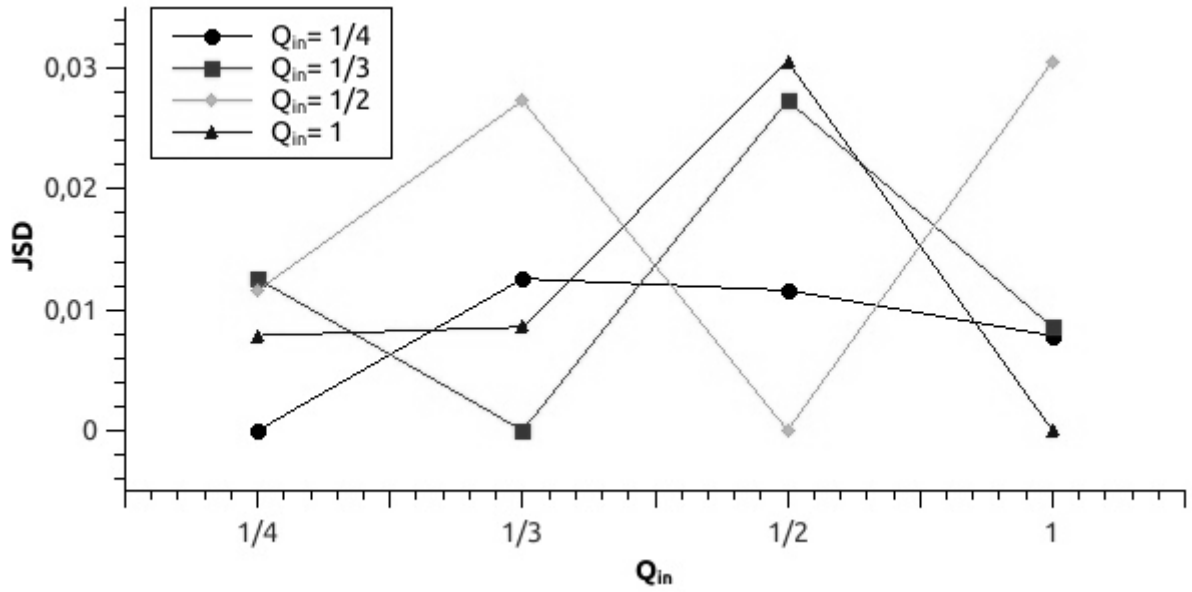


Figura 3.19- JSD para N<sub>1</sub> en los distintos Q<sub>in</sub>.

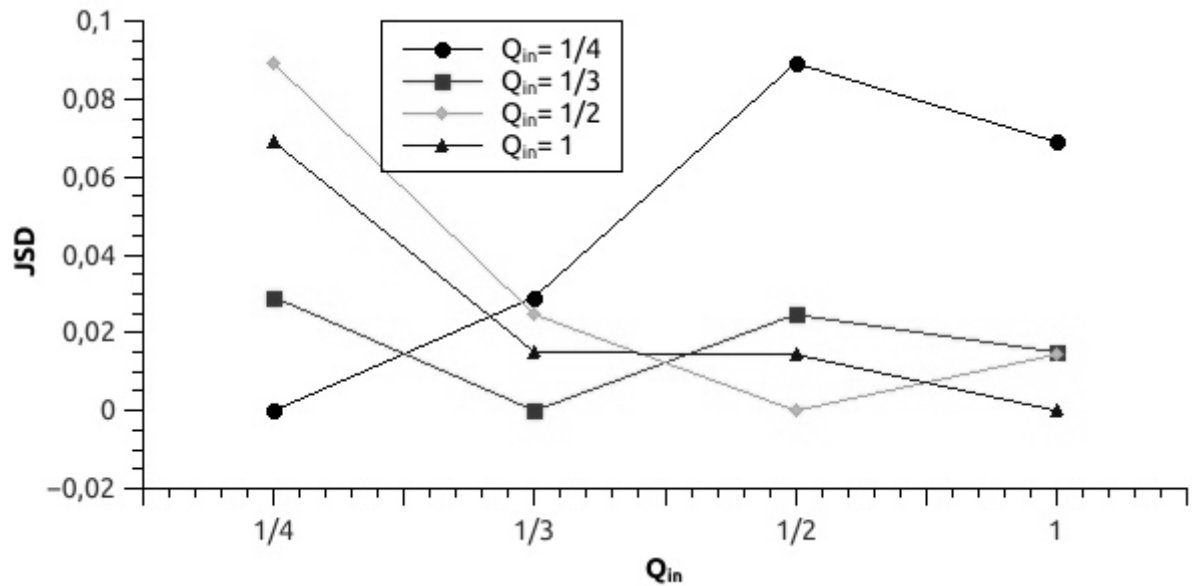


Figura 3.20- JSD para T<sub>1</sub> en los distintos Q<sub>in</sub>.

En la figura 3.21 se presentan las JSD calculadas con los espectros de N<sub>2</sub>, para los distintos caudales Q<sub>in</sub> entre sí. Mientras que en la figura 3.22 se presentan las JSD calculadas con los espectros de T<sub>2</sub>.

3 TRATAMIENTO Y DISCUSIÓN DE DATOS

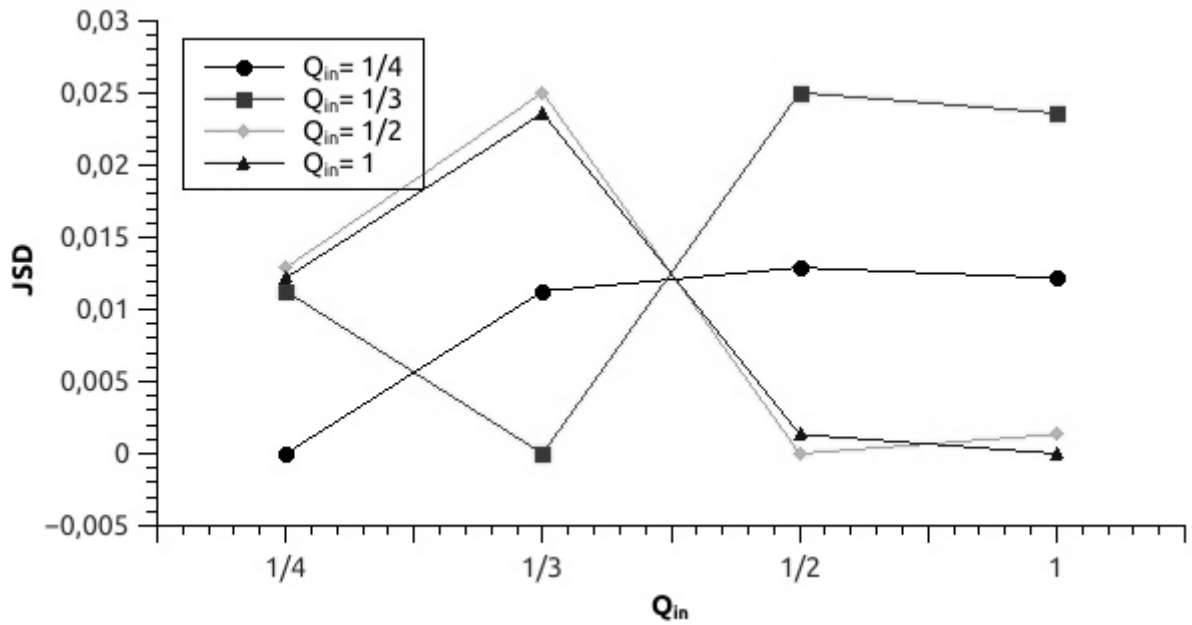


Figura 3.21- JSD para N<sub>2</sub> en los distintos Q<sub>in</sub>.

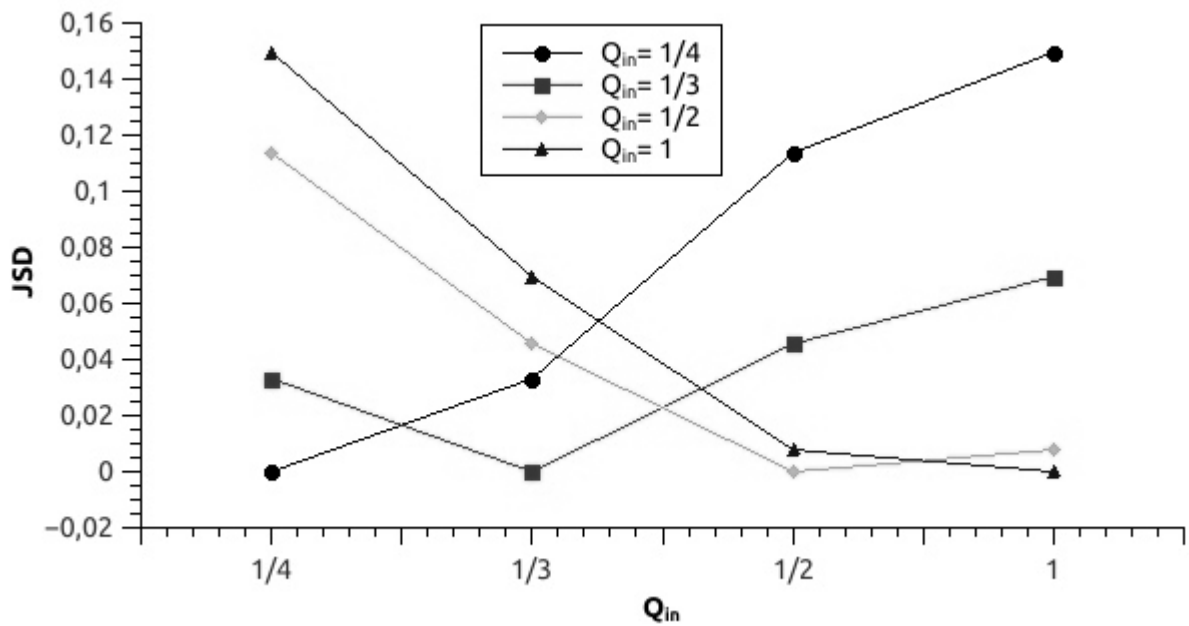


Figura 3.22- JSD para T<sub>2</sub> en los distintos Q<sub>in</sub>.

En las figuras 3.19 y 3.21 las JSD no muestran ninguna tendencia clara cuando se varia Q<sub>in</sub>.

De la figura 3.20 se puede concluir que los espectros correspondientes a los diferentes Q<sub>in</sub> son distinguibles, excepto para JSD correspondiente a Q<sub>in</sub>=1/2 y Q<sub>in</sub>=1. Mientras que en la figura 3.22 se puede ver que si se incrementa el Q<sub>in</sub>, a partir de uno determinado, las JSD's asociadas se incrementan. Esto se ve claramente cuando se observan las JSD obtenidas comparando Q<sub>in</sub>=1/4 con Q<sub>in</sub>=1/3; 1/2; 1.

Adicionalmente se pueden superponer las JSD para N<sub>2</sub> y T<sub>2</sub> en función del LWC:

### 3.4.2 Distribución de población en el régimen turbulento

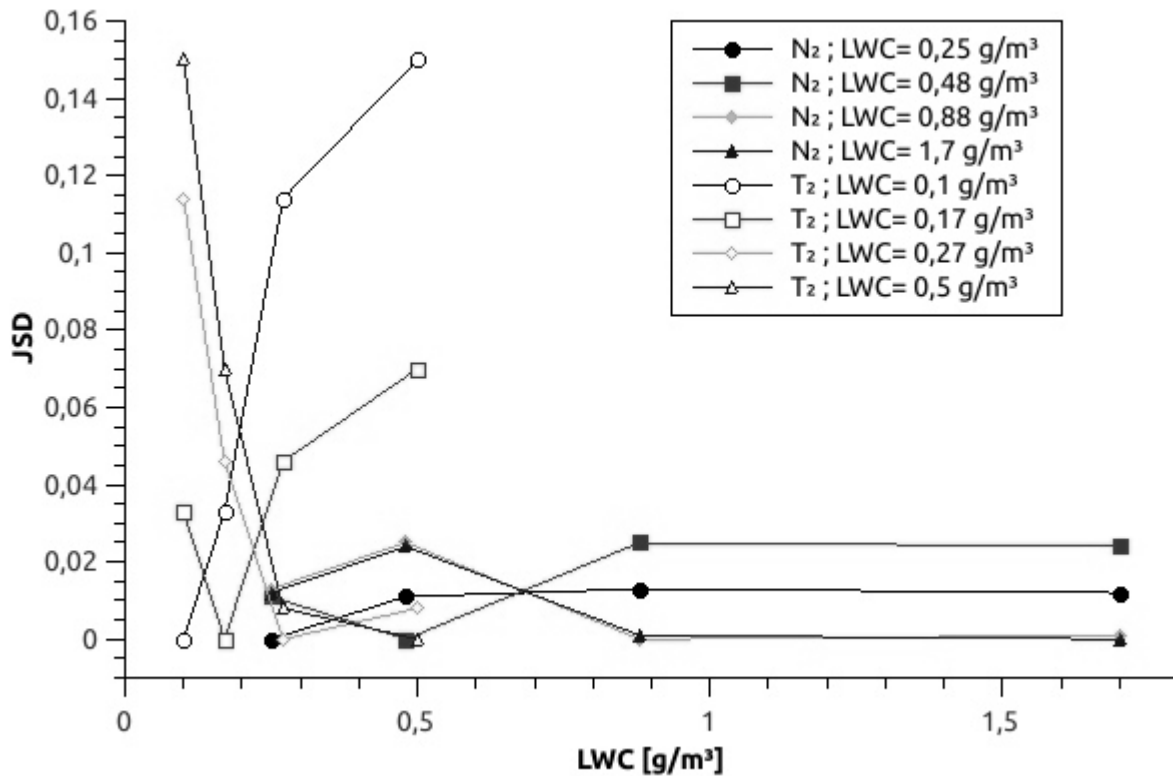


Figura 3.23- Superposición de las  $JSD$  para  $N_2$  y  $T_2$  en función del  $LWC$ .

En la figura 3.23, no se debe olvidar que corresponden a comparaciones con espectros diferentes. El objetivo de esta figura es poner en evidencia el comportamiento de la  $JSD$  cuando se incrementa el  $LWC$  en régimen no turbulento y en régimen turbulento. Se puede observar que la variación en la diferenciación de un espectro en régimen turbulento es más afectada por el cambio de  $LWC$  que en el régimen no turbulento. Es posible observar que se alcanza un plató en  $JSD$  para régimen no turbulento, que puede ser entendido mediante el modelo conceptual propuesto mas arriba. Esto es, la concentración de gotas alcanzado un dado valor, no afecta mas a los mecanismos de crecimiento de gotas.

En el régimen turbulento, por otra parte, no se observa un plató pero, aunque sólo se midió a  $LWC$  bajos, se puede observar que la tasa de variación de la  $JSD$  se reduce. Sería interesante ampliar el rango de  $LWC$  para ver si en este régimen también existe un plató. El cual podría ser entendido también mediante el modelo conceptual que se propuso antes.

A partir de los datos originales de las distribuciones de las figuras 3.6 a 3.13, se construyen los histogramas en el rango de diámetro  $20 \leq a \leq 41 \mu\text{m}$  con un tamaño de paso de  $3 \mu\text{m}$  solamente para los casos  $CT \neq 0,00 \text{ V}$ :

3 TRATAMIENTO Y DISCUSIÓN DE DATOS

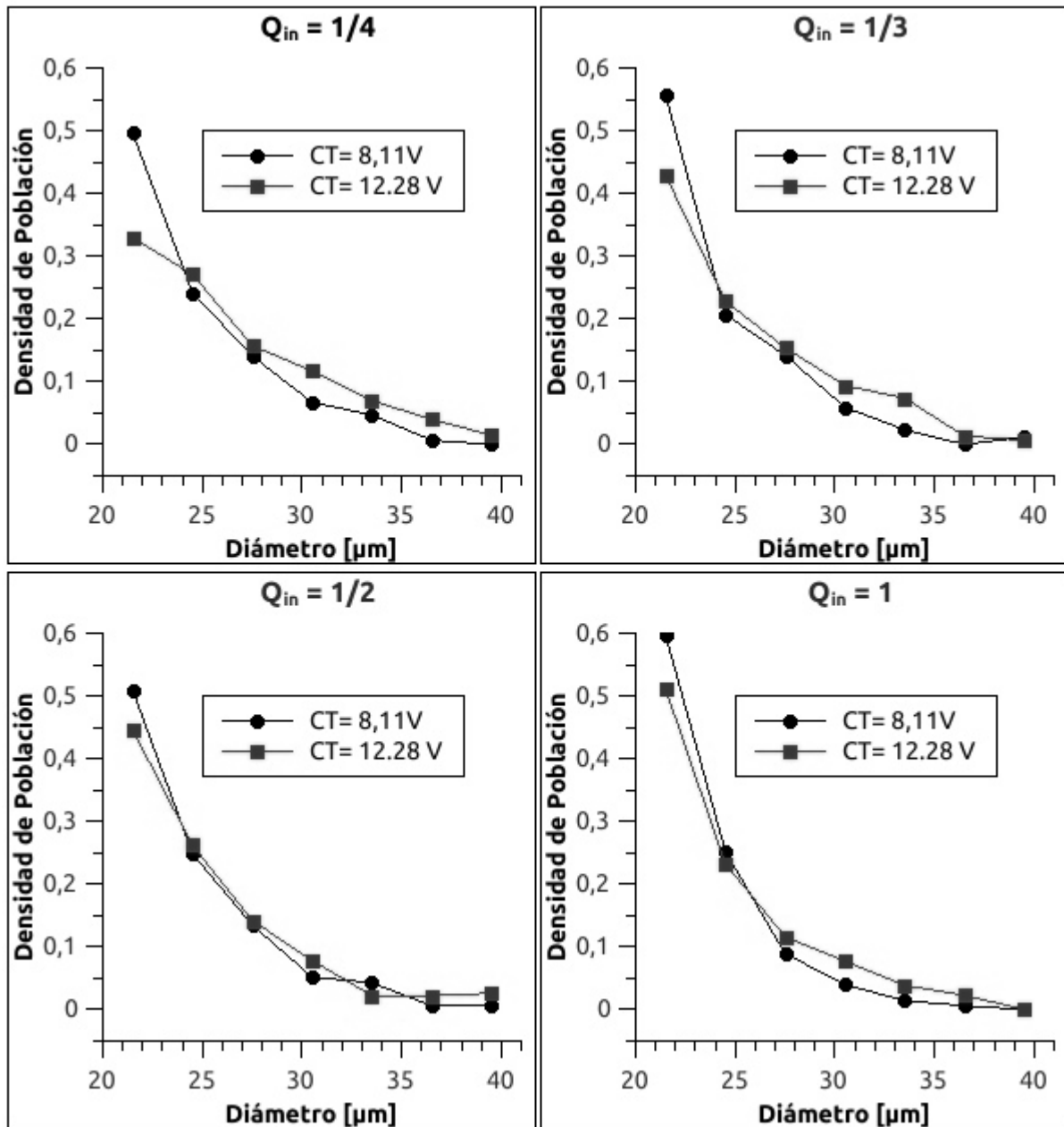


Figura 3.24- Distribución de diámetro de gotas para  $CT \neq 0$  V, en el rango  $20 \leq a \leq 41 \mu\text{m}$  con un tamaño de paso de  $3 \mu\text{m}$ .

y sus respectivas  $JSD$ :

	$Q_{in} = 1/4$	$Q_{in} = 1/3$	$Q_{in} = 1/2$	$Q_{in} = 1$
<b>JSD</b>	0.037	0.026	0.014	0.016

Tabla 3.4.1-  $JSD$  de los histogramas de comparación para  $CT \neq 0$  V, en el rango  $20 \leq a \leq 41 \mu\text{m}$  con un tamaño de paso de  $3 \mu\text{m}$ .

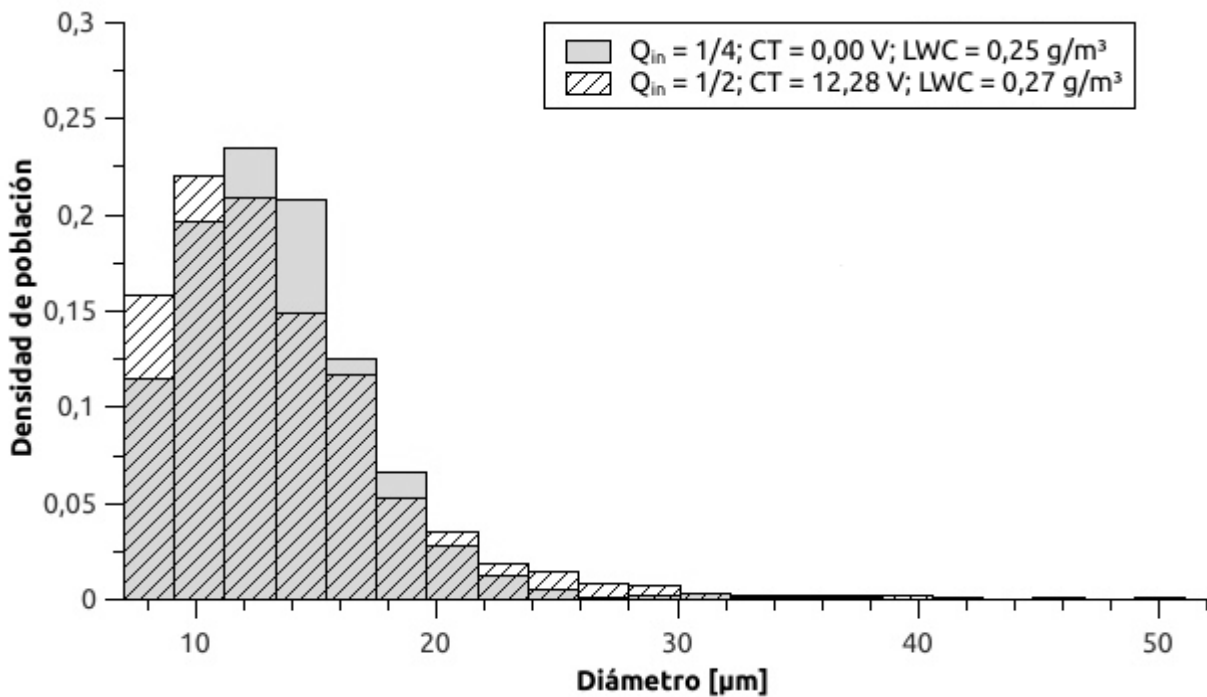
En la figura 3.24 no se observa una diferencia significativa de los espectros ante un incremento de un orden de magnitud en  $\epsilon$ . Hay una ligera tendencia de gotas mayores para la tasa de disipación



mayor, pero la incerteza asociada a estos puntos no permite discernir las curvas. Éstas (las curvas) tienen un comportamiento muy similar al mismo  $Q_{in}$ . De la tabla 3.4.1 se puede apreciar que la mayor diferencia se da para  $Q_{in}=1/4$ . Incluso a un orden de magnitud mayor en la  $\varepsilon$ , el comportamiento es el mismo, hace pensar que se está en presencia de un mismo mecanismo. El leve, pero repetitivo incremento de población de gotas de mayor tamaño ( $r \geq 23 \mu\text{m}$ ) al incrementar  $\varepsilon$ , lleva a la cuestión de cuánto debe de aumentar  $\varepsilon$  para lograr gotas lo suficientemente grandes como para producir lluvia. Lo último dicho se debe a que es de esperar que a mayor turbulencia, las velocidades relativas aumenten para gotas de tamaños cada vez mas grandes, beneficiando así la colección respecto de cuando no hay turbulencia.

### 3.5- Comparación del Espectro bajo un similar Contenido de Agua Líquida

A partir del gráfico de la figura 3.1 se comparan los espectros turbulentos para  $LWC$  similares para los valores  $CT = (0,00 \text{ V}; 12,28 \text{ V})$ :



**Figura 3.25-** Comparación de espectros a distinto grado de turbulencia con  $LWC = (0,25 \pm 0,06) \text{ g/m}^3$  y  $LWC = (0,27 \pm 0,02) \text{ g/m}^3$ , en azul y con franjas respectivamente.

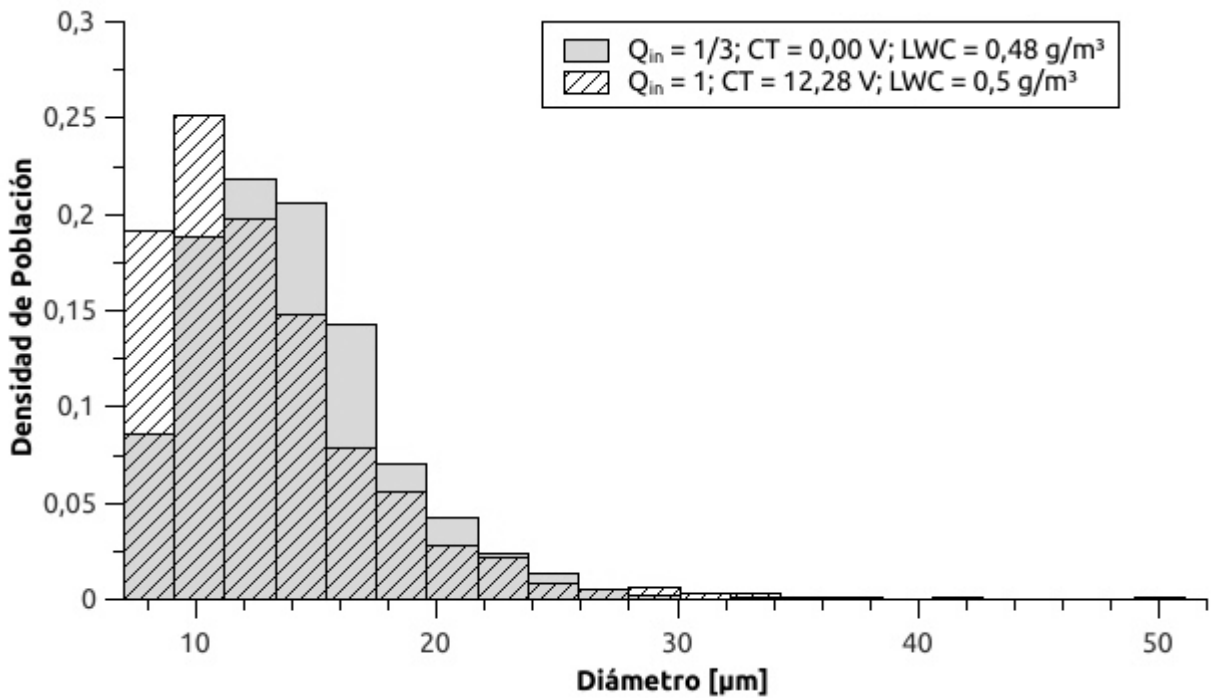


Figura 3.26- Comparación de espectros a distinto grado de turbulencia con  $LWC = (0,48 \pm 0,08)$  g/m<sup>3</sup> y  $LWC = (0,5 \pm 0,1)$  g/m<sup>3</sup>, en azul y con franjas respectivamente.

p

	$LWC$ [g/m <sup>3</sup> ]	Mediana [μm]	Ancho $2\sigma$ [μm]	$JSD$
<b>CT = 0,00 V</b>	$0,25 \pm 0,06$	12,6	$12,44 \pm 0,04$	0,017
<b>CT = 12,28V</b>	$0,27 \pm 0,02$	12,0	$11,2 \pm 0,2$	
<b>CT = 0,00 V</b>	$0,48 \pm 0,08$	12,2	$12,9 \pm 0,1$	0,034
<b>CT = 12,28V</b>	$0,5 \pm 0,1$	11,0	$10,3 \pm 0,3$	

Tabla 3.5.1- Comparación de espectros para  $LWC$  similares ante distintos voltajes de turbulencia.

La densidad de población muestra un desplazamiento negativo de la mediana y los espectros son distinguibles entre sí (fig. 3.25 y 3.26); también se observa un incremento de gotas de diámetro  $a \geq 20$  μm. ¿Porqué sucede esto? (que haya más proporción de gotas grandes con menores  $Q_{in}$ ). Una posible explicación puede ser que debido a las fluctuaciones de la masa de aire, es como si los pequeños remolinos determinasen la frontera entre distintas parcelas de aire que pueden contener gotas desplazándose con el flujo. En otras palabras, se puede suponer una red compuesta por celdas de tamaño  $\sim \lambda_0 \sim (v^3/\epsilon)^{1/4}$  con su respectivo sentido instantáneo individual de flujo, algunas de estas con gotas que se desplazan acorde a su inercia y a la velocidad del aire en la celda. Los distintos flujos entre estas pequeñas parcelas puede hacer posible la colisión de gotas que no se encontrarían entre sí en aire calmo (sin fluctuaciones), aumentando la eficiencia de colisión respecto del aire en ausencia de fluctuaciones bruscas. Esta diferencia en particular entre aire calmo y turbulento, debería notarse más a bajos contenidos de agua líquida ya que hay menos celdas (con gotas) que puedan acortar sus distancias. Los mecanismos de arrastre de gotas que actúan entre choque y choque, aceleran a las mismas hasta velocidades mayores cuando el camino libre medio entre colisiones de gotas es mayor (menores concentraciones de gotas). Con esto, la coalescencia luego del choque sería más probable para concentraciones menores (camino libre medio más largo)

### 3.5 *Comparación del Espectro bajo un similar Contenido de Agua Líquida*

ya que la coalescencia depende de la velocidad relativa entre las gotas (que podrían corresponder así a diferentes parcelitas del tamaño  $\lambda_0^3$ ). Si bien, a mayores concentraciones se incrementaría el número de choques, no sería el caso de la eficiencia de coalescencia ya que las velocidades de colisión serían menores.



## CONCLUSIÓN

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  $LWC$  utilizados, que el espectro de tamaños este correlacionado con el  $LWC$  en nubes con baja tasa de disipación.

En los resultados de las mediciones en los que se incrementó la tasa de disipación (entre  $4\text{ cm}^2/\text{s}^3$  y  $40\text{ cm}^2/\text{s}^3$ ) se evidenció un efecto de la turbulencia sobre el espectro de tamaños a través de un incremento en la cantidad de gotas mayores a  $20\ \mu\text{m}$ . Sin embargo no fue posible establecer diferencias entre las mediciones con  $CT=8,11\ \text{V}$  y  $CT=12,28\ \text{V}$ , correspondientes a  $\varepsilon=4\text{ cm}^2/\text{s}^3$  y  $\varepsilon=40\text{ cm}^2/\text{s}^3$ .

De los mismo se puede concluir que la turbulencia afecta al espectro de diámetros de gotas de nube.

El análisis digitalizado de las microfotografías correspondientes a las placas con las que se tomó muestra del espectro de tamaño de gotas de nube ha probado ser una herramienta sumamente útil.

La divergencia de Jensen Shannon fue utilizada para cuantificar la diferencia o similitud de los espectros de tamaños de gotas medidos, y ha resultado ser una herramienta útil para esto.

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.

Propuestas para el futuro:

Sería interesante ampliar el rango de medición del contenido de agua líquida y de la tasa de disipación, con la expectativa de encontrar una explicación satisfactoria de este fenómeno.

Además estudiar la influencia de la forma en que se genera la nube en los experimentos. En particular el efecto de nubes con carga eléctrica.

Realizar un control sobre la temperatura y la humedad relativa del ambiente, en particular en el interior de la caja.



## REFERENCIAS

- American Meteorology Society. (2015). Glossary of Meteorology. [Disponible en línea en [http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main\\_Page](http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page)]
- Bender FAM, Rodhe H, Charlson RJ, Ekman AML, Loeb N. (2006). 22 views of the global albedo: comparison between 20 GCMs and two satellites. *Tellus A* 58:320-30
- Falkovich G, Fouxon A, Stepanov MG. (2002). Acceleration of rain initiation by cloud turbulence. *Nature* 419:151–54
- Ferreira T, Rasband W. (2012). ImageJ User Guide IJ 1.46r . [Disponible en línea en <http://rsbweb.nih.gov/ij/docs/guide/146.html>].
- Fleagle RG, Businger JA. (1980). An Introduction to Atmospheric Physics, Second Edition. International Geophysics Series, vol 25. ISBN: 9780122603556
- Fukushima C, Westerweel J. (2007). False color image of the far field of a submerged turbulent jet. Technical University of Delft, The Netherlands [Disponible en línea en [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:False\\_color\\_image\\_of\\_the\\_far\\_field\\_of\\_a\\_submerged\\_turbulent\\_jet.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:False_color_image_of_the_far_field_of_a_submerged_turbulent_jet.jpg)]
- Grabowski WW, Wang LP. (2013). Growth of Cloud Droplets in a Turbulent Environment. *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol 45. DOI: 10.1146/annurev-fluid-011212-140750
- Hsieh WC, Jonsson H, Wang L-P, Buzorius G, Flagan RC, Seinfeld JH, Nenes A. (2009). On the representation of droplet coalescence and autoconversion: Evaluation using ambient cloud droplet size distributions. *J. Geophys. Res.*, 114, D07201
- JetStream - National Oceanic and Atmospheric Administration. (2015). How Clouds Form. <http://www.srh.noaa.gov/jetstream/clouds/formation.htm>
- Kostinsky AB, Shaw RA. (2005). Fluctuations and Luck in Droplet Growth by Coalescence. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86, 235–244.
- Landau LD, Lifshitz EM. (1987). *Fluid Mechanics*. Vol. 6 (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-08-033933-7
- Lanotte AS, Seminara A, Toschi F. (2009). Cloud droplet growth by condensation in homogeneous isotropic turbulence. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 66(2009), No. 6, p. 1685-1697
- Lau KM, Wu HT. (2003). Warm rain processes over tropical oceans and climate implications. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 2290, doi:10.1029/2003GL018567, 24
- Lin J. (1991). Divergence measures based on the Shannon entropy. *IEEE Transactions on Information Theory*, 37, 145–151.
- McDonald JE. (1958). The physics of cloud modification. *Adv. in Geophys.* 5, 233-303
- Parro.com.ar. (2015). Diccionario de Arquitectura y Construcción. Disponible en línea en <http://www.parro.com.ar/index.php>
- Pinsky M, Khain AP, Krugliak H. (2008). 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
- Pinsky MB, Khain AP. (2002). Effects of in-cloud nucleation and turbulence on droplet spectrum formation in cumulus clouds. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 128:501–33
- Pinsky MB, Khain AP. (2004). Collisions of small drops in a turbulent flow. Part II: Effects of flow accelerations. *J. Atmos. Sci.* 61:1926–39
- Pinsky MB, Khain AP, Grits B, Shapiro M. (2006). Collisions of small drops in a turbulent flow. Part III: Relative droplet fluxes and swept volumes. *J. Atmos. Sci.* 63:2123–39
- Pinsky MB, Khain AP, Shapiro M. (1999). Collisions of small drops in a turbulent flow. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 125:553–81
- Pinsky MB, Khain AP, Shapiro M. (2007). Collisions of cloud droplets in a turbulent flow. Part IV: droplet hydrodynamic interaction. *J. Atmos. Sci.* 64:2462–82
- Pruppacher HR, Klett JD. (1997). *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Dordrecht: Kluwer Acad. 954 pp
- Rogers RR, Yau MK. (1989). *A short course in cloud physics*. Butterworth-Heinemann. ISBN: 0-7506-3215-1

## REFERENCIAS

- Stevens B, y Coautores. (2003). Dynamics and chemistry of marine stratocumulus—DYCOMS-II. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84, 579–593
- Straka JM. (2011). *Cloud and Precipitation Microphysics: Principles and Parameterizations*. ISBN 9780521297592
- Vaillancourt PA, Yau MK, Bartello P, Grabowski WW. (2002). Microscopic approach to cloud droplet growth by condensation. Part II: Turbulence, clustering, and condensational growth. *J. Atmos. Sci.* 59:3421–35
- Wallace JM, Hobbs PV. (2006). *Atmospheric Science (Second Edition)*. ISBN: 012732951x
- Wang L-P, Ayala O, Rosa B, Grabowski WW. (2008). Turbulent collision efficiency of heavy particles relevant to cloud droplets. *New J. Phys.* 10:075013
- Wang L-P, Franklin CN, Ayala O, Grabowski WW. (2006). Probability distributions of angle of approach and relative velocity for colliding droplets in a turbulent flow. *J. Atmos. Sci.* 63:881–900
- Wang L-P, Grabowski WW. (2009). The role of air turbulence in warm rain initiation. *Atmos. Sci. Lett.* 10:1–8
- Wang L-P, Xue Y, Grabowski WW. (2007). A bin integral method for solving the kinetic collection equation. *J. Comput. Phys.* 225:51–73
- Xue Y, Wang L-P, Grabowski WW. (2008). Growth of cloud droplets by turbulent collision-coalescence. *J. Atmos. Sci.* 65: 357–74



## ANEXO A- TABLAS

En esta sección se dispone de las mediciones para la medición de  $LWC$ , estimación de  $\varepsilon$  y distribución de diámetros de gotas correspondientes a estas condiciones.

### A.1- Evolución Temporal del Espectro

Diámetro [ $\mu\text{m}$ ]	t = 0' 40''	t = 1' 27''	t = 2' 38''	t = 4' 39''	t = 6' 09''
8,05	0.18	0.11	0.26	0.22	0.22
10,15	0.24	0.25	0.25	0.26	0.24
12,25	0.17	0.21	0.17	0.22	0.20
14,35	0.18	0.13	0.12	0.12	0.14
16,45	0.12	0.13	0.08	0.09	0.08
18,55	0.04	0.06	0.05	0.04	0.05
20,65	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03
22,75	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
24,85	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
26,95	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01
29,05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
31,15	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
33,25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
35,35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37,45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
39,55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
41,65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
43,75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
45,85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
47,95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50,05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Desviación estándar</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>
<b>Población total</b>	<b>113</b>	<b>284</b>	<b>2346</b>	<b>828</b>	<b>4130</b>

Tabla A.1.1- Densidad de distribución diámetro de gotas para  $Q_m = 1$  a distintos tiempos de toma de muestra sin perturbación.

Aplicando un ajuste gaussiano a la tabla A.1 se tiene:

ANEXO A- TABLAS

	$t = 0' 40''$	$t = 1' 27''$	$t = 2' 38''$	$t = 4' 39''$	$t = 6' 09''$
$x_c$	10.6	11.6	6.2	9.9	9.5
$err_{x_c}$	0.5	0.4	0.9	0.2	0.3
$w$	10.4	8.1	13	8.5	9.9
$err_w$	0.9	0.9	1	0.5	0.4
$\chi^2_{red}$	1.7E-04	4.1E-04	4.8E-05	7.4E-05	3.5E-05
$R^2$	0.975	0.939	0.994	0.991	0.995

**Tabla A.1.2-** Ajuste gaussiano de los histogramas para  $t=(40''; 1' 27''; 2' 38''; 4' 39''; 6' 09'')$  y  $Q_{in} = 1$ ; donde  $x_c$  es el centro y su error es  $err_{x_c}$ ,  $w$  es el ancho y  $err_w$  su error,  $\chi^2_{red}$  es chi reducido y  $R^2$  es el coeficiente de determinación.

Tomando  $JSD$  como medida de distancia se tiene:

	$t = 0' 40''$	$t = 1' 27''$	$t = 2' 38''$	$t = 4' 39''$	$t = 6' 09''$
$t = 0' 40''$	0.000	0.035	0.020	0.018	0.017
$t = 1' 27''$	0.035	0.000	0.045	0.036	0.034
$t = 2' 38''$	0.020	0.045	0.000	0.008	0.005
$t = 4' 39''$	0.018	0.036	0.008	0.000	0.008
$t = 6' 09''$	0.017	0.034	0.005	0.008	0.000

**Tabla A.1.3-** Divergencia de Jensen Shannon entre los histogramas para  $t=(0' 40''; 1' 27''; 2' 38''; 4' 39''; 6' 09'')$  y  $Q_{in}=1$ .

## A.2- Distribución de Diámetros

Del muestreo automático de las placas se tiene:

ANEXO A- TABLAS

<b>Diámetro [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	$Q_{in} = 1/4$	$Q_{in} = 1/4$	$Q_{in} = 1/3$	$Q_{in} = 1/3$	$Q_{in} = 1/2$	$Q_{in} = 1/2$	$Q_{in} = 1$	$Q_{in} = 1$
<b>8,05</b>	0,15	0,08	0,14	0,13	0,21	0,20	0,11	0,12
<b>10,15</b>	0,23	0,12	0,21	0,18	0,27	0,25	0,21	0,21
<b>12,25</b>	0,24	0,12	0,22	0,17	0,23	0,19	0,24	0,23
<b>14,35</b>	0,18	0,16	0,17	0,17	0,15	0,13	0,19	0,17
<b>16,45</b>	0,09	0,13	0,12	0,11	0,08	0,09	0,12	0,11
<b>18,55</b>	0,06	0,12	0,07	0,09	0,04	0,06	0,07	0,07
<b>20,65</b>	0,03	0,11	0,03	0,06	0,02	0,03	0,04	0,04
<b>22,75</b>	0,01	0,06	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
<b>24,85</b>	0,01	0,03	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01
<b>26,95</b>	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
<b>29,05</b>	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>31,15</b>	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>33,25</b>	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>35,35</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>37,45</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>39,55</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>41,65</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>43,75</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>45,85</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>47,95</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>50,05</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Desviación estándar</b>	0,08	0,06	0,08	0,07	0,09	0,08	0,08	0,08
<b>Población total</b>	1026	649	2608	1292	9468	4428	10786	12655
<b>Mediana [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	12,1	15,5	12,6	13,5	11,3	11,7	12,8	12,7

Tabla A.2.1- Distribución normalizada de diámetros en  $\mu\text{m}$  (rango  $7 \mu\text{m} \leq \text{diámetro} \leq 52 \mu\text{m}$  y tamaño de paso de  $2,1 \mu\text{m}$ ) para  $CT = (0,00 \text{ V -gris-}; 8,11 \text{ V -blanco-})$  y  $Q_{in} = (1/4; 1/3; 1/2; 1)$ .

ANEXO A- TABLAS

Diámetro [μm]	$Q_{in} = 1/4$	$Q_{in} = 1/4$	$Q_{in} = 1/3$	$Q_{in} = 1/3$	$Q_{in} = 1/2$	$Q_{in} = 1/2$	$Q_{in} = 1$	$Q_{in} = 1$
8,05	0,11	0,04	0,09	0,05	0,16	0,16	0,16	0,19
10,15	0,20	0,11	0,19	0,16	0,25	0,22	0,23	0,25
12,25	0,23	0,14	0,22	0,19	0,23	0,21	0,24	0,20
14,35	0,21	0,13	0,21	0,17	0,17	0,15	0,17	0,15
16,45	0,12	0,14	0,14	0,14	0,10	0,12	0,10	0,08
18,55	0,07	0,10	0,07	0,08	0,05	0,05	0,06	0,06
20,65	0,03	0,09	0,04	0,07	0,02	0,04	0,02	0,03
22,75	0,01	0,06	0,02	0,04	0,01	0,02	0,01	0,02
24,85	0,00	0,06	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01
26,95	0,00	0,03	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01
29,05	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01
31,15	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
33,25	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
35,35	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
37,45	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
39,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
41,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
43,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
45,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
47,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Desviación estándar</b>	0,08	0,05	0,08	0,06	0,09	0,08	0,08	0,08
<b>Población total</b>	871	814	896	806	4163	3142	4283	1895
<b>Mediana [μm]</b>	12,8	16,6	13,3	14,4	11,9	12,4	12,1	11,7

Tabla A.2.2- Distribución normalizada de diámetros en μm (rango  $7 \mu\text{m} \leq \text{diámetro} \leq 52 \mu\text{m}$  y tamaño de paso de  $2,1 \mu\text{m}$ ) para  $CT = (0,00 \text{ V -gris-}; 12,28 \text{ V -blanco-})$  y  $Q_{in} = (1/4; 1/3; 1/2; 1)$ .

Aplicando un ajuste gaussiano a las tablas A.2.1 y A.2.2 se tiene:

	$Q_{in} = 1/4$	$Q_{in} = 1/4$	$Q_{in} = 1/3$	$Q_{in} = 1/3$	$Q_{in} = 1/2$	$Q_{in} = 1/2$	$Q_{in} = 1$	$Q_{in} = 1$
$x_c$	11,6	14,6	11,8	11,9	10,4	9,8	12,3	12,0
$err_{x_c}$	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,4	0,1	0,1
$w$	7,8	13,0	8,4	11,4	7,6	9,5	7,5	7,9
$err_w$	0,3	0,7	0,2	0,5	0,2	0,7	0,3	0,3
$\chi^2_{red}$	4.6E-05	6.2E-05	1.9E-05	3.7E-05	3.0E-05	1.1E-04	6.0E-05	5.9E-05
$R^2$	0.994	0.983	0.997	0.993	0.997	0.986	0.992	0.991

Tabla A.2.3- Ajuste gaussiano de los histogramas para  $CT = (0,00 \text{ V -gris-}; 8,11 \text{ V -blanco-})$  y  $Q_{in} = (1/4; 1/3; 1/2; 1)$ ; donde  $x_c$  es el centro y su error es  $err_{x_c}$ ,  $w$  es el ancho y  $err_w$  su error,  $\chi^2_{red}$  es chi reducido y  $R^2$  es el coeficiente de determinación.

ANEXO A- TABLAS

	$Q_{in} = 1/4$	$Q_{in} = 1/4$	$Q_{in} = 1/3$	$Q_{in} = 1/3$	$Q_{in} = 1/2$	$Q_{in} = 1/2$	$Q_{in} = 1$	$Q_{in} = 1$
$x_c$	12.44	15.40	12.90	13.50	11.23	11.15	11.34	10.27
$err_{x_c}$	0,04	0,5	0,1	0,3	0.1	0.2	0.07	0.3
$w$	7.4	12	7.6	8.4	7.8	9.1	8.0	8.8
$err_w$	0,1	1	0,3	0,6	0,2	0,4	0,2	0,5
$\chi^2_{red}$	9.0E-06	1.7E-04	5.8E-05	2.0E-04	3.2E-05	5.8E-05	1.9E-05	8.4E-05
$R^2$	0.999	0.941	0.991	0.959	0.996	0.991	0.998	0.989

**Tabla A.2.4-** Ajuste gaussiano de los histogramas para  $CT=(0,00\text{ V -gris-}; 12,28\text{ V -blanco-})$  y  $Q_{in}=(1/4; 1/3; 1/2; 1)$ ; donde  $x_c$  es el centro y su error es  $err_{x_c}$ ,  $w$  es el ancho y  $err_w$  su error,  $\chi^2_{red}$  es chi reducido y  $R^2$  es el coeficiente de determinación.

Entre las tablas A.2.3 y A.2.4 se tiene la siguiente *JSD*:

	$JSD(T_1;N_1)$	$JSD(T_2;N_2)$	$JSD(N_1;N_2)$	$JSD(T_1;T_2)$
$Q_{in} = 1/4$	0.109	0.136	0.010	0.029
$Q_{in} = 1/3$	0.015	0.032	0.014	0.022
$Q_{in} = 1/2$	0.016	0.014	0.006	0.007
$Q_{in} = 1$	0.002	0.013	0.010	0.014

**Tabla A.2.5-** *JSD* de las mediciones entre el régimen con  $CT = 8,11\text{ V}$  ( $T_1$ ) junto con su respectivo  $CT = 0,00\text{ V}$  ( $N_1$ ) y  $CT = 12,28\text{ V}$  ( $T_2$ ) junto con sus respectivo  $CT = 0,00\text{ V}$  ( $N_2$ ).

Cuando se comparan  $CT = 8,11\text{ V}$  ( $T_1$ ) junto con su respectivo  $CT = 0,00\text{ V}$  ( $N_1$ ) entre los distintos  $Q_{in}$  se tiene:

$Q_{in}$	1/4	1/3	1/2	1
1/4	0.000	0.013	0.012	0.008
1/3	0.013	0.000	0.027	0.009
1/2	0.012	0.027	0.000	0.031
1	0.008	0.009	0.031	0.000

**Tabla A.2.6-** *JSD* para  $N_1$  en los distintos  $Q_{in}$ .

$Q_{in}$	1/4	1/3	1/2	1
1/4	0.000	0.029	0.089	0.069
1/3	0.029	0.000	0.025	0.015
1/2	0.089	0.025	0.000	0.014
1	0.069	0.015	0.014	0.000

**Tabla A.2.7-** *JSD* para  $T_1$  en los distintos  $Q_{in}$ .

De la comparación para  $CT = 12,28\text{ V}$  ( $T_2$ ) junto con sus respectivo  $CT = 0,00\text{ V}$  ( $N_2$ ) en los

ANEXO A- TABLAS

distintos  $Q_{in}$  se tiene:

$Q_{in}$	1/4	1/3	1/2	1
1/4	0.000	0.011	0.013	0.012
1/3	0.011	0.000	0.025	0.024
1/2	0.013	0.025	0.000	0.001
1	0.012	0.024	0.001	0.000

Tabla A.2.8- JSD para  $N_2$  en los distintos  $Q_{in}$ .

$Q_{in}$	1/4	1/3	1/2	1
1/4	0.000	0.033	0.114	0.150
1/3	0.033	0.000	0.046	0.070
1/2	0.114	0.046	0.000	0.008
1	0.150	0.070	0.008	0.000

Tabla A.2.9- JSD para  $T_2$  en los distintos  $Q_{in}$ .

De los histogramas en las figuras 3.6 a 3.13, se construyen los histogramas en el rango de diámetro  $20 \leq a \leq 41 \mu\text{m}$  con un tamaño de paso de  $3 \mu\text{m}$  solamente para los casos  $CT \neq 0,00 \text{ V}$ :

Paso [ $\mu\text{m}$ ]	$Q_{in} = 1/4$	$Q_{in} = 1/4$	$Q_{in} = 1/3$	$Q_{in} = 1/3$	$Q_{in} = 1/2$	$Q_{in} = 1/2$	$Q_{in} = 1$	$Q_{in} = 1$
21,5	0.50	0.33	0.56	0.43	0.51	0.45	0.60	0.51
24,5	0.24	0.27	0.21	0.23	0.25	0.26	0.25	0.23
27,5	0.14	0.16	0.14	0.15	0.13	0.14	0.09	0.12
30,5	0.07	0.12	0.06	0.09	0.05	0.08	0.04	0.08
33,5	0.05	0.07	0.02	0.07	0.04	0.02	0.01	0.04
36,5	0.01	0.04	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02
39,5	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.00	0.00
<b>Desviación estándar</b>	4	5	4	4	4	4	3	4
<b>Población total</b>	149	273	169	149	326	267	918	129
<b>Mediana [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	23,0	24,9	22,5	23,4	22,6	23,6	22,3	23,0

Tabla A.2.10- Histogramas de comparación para  $CT \neq 0 \text{ V}$ , en el rango  $20 \leq a \leq 41 \mu\text{m}$  con un tamaño de paso de  $3 \mu\text{m}$ . En gris para  $CT=8,11 \text{ V}$  y en blanco para  $CT=8,11 \text{ V}$ .

### A.3- Determinación del Contenido de Agua Líquida

Del promedio de mediciones sucesivas de velocidad y pesajes se puede despejar el  $LWC$  y su

ANEXO A- TABLAS

respectivo error para distintas condiciones de caudal de entrada:

	CT [V]	v [m/s]	m [g]	LWC [g/m <sup>3</sup> ]	s <sub>LWC</sub> [g/m <sup>3</sup> ]	er <sub>LWC</sub>
Q = 1/4	0,00	1.3	0.100	0,25	0,06	0,25
	8,11	1,4	0,079	0,19	0,03	0,16
	12,28	1.3	0.038	0,10	0,01	0,14
Q = 1/3	0,00	1.2	0.173	0,48	0,08	0,16
	8,11	1,0	0,137	0,47	0,07	0,15
	12,28	1.2	0.062	0,17	0,03	0,18
Q = 1/2	0,00	1.3	0.344	0,88	0,05	0,06
	8,11	1,2	0,242	0,68	0,05	0,07
	12,28	1.4	0.118	0,27	0,02	0,08
Q = 1	0,00	1.1	0.556	1,7	0,3	0,17
	8,11	1.3	0,454	1,20	0,08	0,07
	12,28	1.4	0.228	0,5	0,1	0,26

Tabla A.3.1- Cálculo del  $LWC_A$  con su respectiva desviación estándar  $s_{LWC}$  y desviación estándar relativa  $er_{LWC}$  para distintos caudales de entrada a partir de la velocidad media  $u$  y el incremento de masa  $m$ .

#### A.4- Estimación de la Tasa de Disipación

Del promedio temporal en distintos intervalos es que se obtienen las tablas en esta sección. Dada la variabilidad de las mediciones y que se toman el módulo de la velocidad, estas tablas son solamente estimaciones del orden de la magnitud y se omite el cálculo del error.

Para  $CT = 12,28$  V se realizan dos sets de mediciones:

Perturbación	$v_{rms}^2$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$\epsilon$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	$\lambda_0$ [μm]
sólo cooler extracción	6E-04	6E-06	5E+04
sólo nebulizador	1E-02	7E-02	5E+03
nebulizador y turbulencia	1E-01	4E+01	9E+02
sólo cooler extracción	5E-03	3E-03	1E+04
sólo turbulencia	7E-02	1E+01	1E+03
nebulizador y turbulencia	1E-01	3E+01	1E+03
sólo cooler extracción	2E-02	4E-01	3E+03

Tabla A.4.1- Primer set de mediciones de velocidad cuadrática media y tasa de disipación para  $CT = 12,28$  V y  $Q_{in} = 1$  ante distintas perturbaciones del sistema, con  $v = 14,55 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s.

ANEXO A- TABLAS

Perturbación	$v_{rms}^2$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$\epsilon$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	$\lambda_0$ [μm]
sólo cooler extracción	5E-03	5E-03	9E+03
sólo turbulencia	8E-02	2E+01	1E+03
nebulizador y turbulencia	9E-02	3E+01	1E+03
sólo nebulizador	2E-02	3E-01	3E+03
sólo cooler extracción	3E-03	7E-04	1E+04
sólo nebulizador	2E-02	1E-01	4E+03
nebulizador y turbulencia	9E-02	2E+01	1E+03
sólo cooler extracción	8E-03	2E-02	6E+03

Tabla A.4.2- Segundo set de mediciones de velocidad cuadrática media y tasa de disipación para  $CT = 12,28$  V y  $Q_{in} = 1$  ante distintas perturbaciones del sistema, con  $v = 14,55 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s.

Para  $CT = 8,11$  V se tiene:

Perturbación	$v_{rms}^2$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$\epsilon$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	$\lambda_0$ [μm]
nada	7E-04	9E-06	4E+04
sólo cooler extracción	1E-03	4E-05	3E+04
sólo turbulencia	4E-02	2E+00	2E+03
nebulizador y turbulencia	5E-02	4E+00	2E+03
sólo nebulizador	2E-02	1E-01	4E+03
sólo cooler extracción	3E-03	7E-04	2E+04
sólo nebulizador	3E-03	8E-04	1E+04
nebulizador y turbulencia	4E-02	2E+00	2E+03
sólo turbulencia	3E-02	8E-01	3E+03
sólo cooler extracción	1E-02	4E-02	5E+03

Tabla A.4.3- Velocidad cuadrática media y tasa de disipación para  $CT = 8,11$  V y  $Q_{in} = 1$  ante distintas perturbaciones del sistema, con  $v = 14,55 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s.