

# Transferencia de carga eléctrica en colisiones individuales entre esferas de hielo y un sustrato de hielo en acreción.

G.G. Aguirre Varela, R.G. Pereyra, E.E. Avila y J.M. Caranti

Facultad de Matemática, Astronomía y Física - Universidad Nacional de Córdoba  
Ciudad Universitaria - (5010) - Córdoba - Argentina  
e-mail: [aguirre@roble.fis.uncor.edu](mailto:aguirre@roble.fis.uncor.edu), [pereyra@roble.fis.uncor.edu](mailto:pereyra@roble.fis.uncor.edu)

En este trabajo se reportan resultados de mediciones de la carga eléctrica separada en colisiones individuales entre esferas de hielo, de  $100\mu\text{m}$  de diámetro, y un sustrato de hielo creciendo por acreción de gotitas de agua (granizo simulado).

El contenido efectivo de agua líquida de la nube (EW) presente durante las mediciones se varió entre  $0.8$  y  $2\text{ g/m}^3$ ; la temperatura ambiente ( $T_a$ ) se varió entre  $-10$  y  $-25^\circ\text{C}$  y la velocidad de impacto fue de  $5\text{ m/s}$ . Se analiza la dependencia del cargado eléctrico del granizo en acreción, con  $T_a$  y EW. Se discute su relación con algunos mecanismos físicos de separación de carga propuestos hasta el presente.

Pacs N<sup>o</sup> 13.5225, 14.9260

## 1 Introducción

El fenómeno de electrificación de las nubes de tormenta ha motivado el estudio de muchos procesos que se desarrollan dentro de las nubes. Por esto, se realizan mediciones dentro de nubes, como así también en experimentos de laboratorio en los cuales se recrean las condiciones presentes en nubes reales.

A pesar de los variados tipos de medición realizados, los mecanismos por los cuales se separa la carga eléctrica no están completamente identificados. Algunos autores han sugerido, a partir de experimentos de laboratorio, que la separación de la carga eléctrica se produce durante las colisiones hielo-hielo que ocurren en las nubes.

Takahashi<sup>(1)</sup> realizó experimentos en los que midió la carga eléctrica que se depositaba sobre una acreción (granizo simulado), cuando interaccionaba con una nube compuesta de gotitas de agua y cristales de hielo. La nube gotitas de agua que usó tenía un diámetro modal de  $10\mu\text{m}$  y un diámetro máximo de  $25\mu\text{m}$ . Los cristales de hielo tuvieron dimensiones inferiores a  $100\mu\text{m}$ . Así, mientras la acreción rotaba a  $9\text{m/s}$  dentro de la nube, se cargaba al colisionar con los cristales de hielo. Las temperaturas ( $T_a$ ) en las que realizó las mediciones estuvieron entre  $-5$  y  $-30^\circ\text{C}$  y los contenidos de agua líquida de la nube (LWC) que usó estaban entre  $0.01$  y  $20\text{g/m}^3$ .

A partir de estas mediciones observó que a  $T_a$  mayores que  $-10^\circ\text{C}$  el cargado era positivo independientemente del valor de LWC. Mientras que, para temperaturas menores que  $-10^\circ\text{C}$  el cargado era: positivo para valores de LWC entre  $0.01$  y  $0.2\text{g/m}^3$ ; negativo para LWC entre  $0.2$  y  $4\text{g/m}^3$  y nuevamente positivo para valores entre  $4$  y  $20\text{g/m}^3$ .

También, Keith y Saunders<sup>(2)</sup> reportan resultados de mediciones de transferencia de carga eléctrica en colisiones múltiples de cristales de hielo y una acreción. En estos experimentos se varió la velocidad a la que rotaba el granizo simulado, dentro de la nube de cristales y gotitas de agua, en el rango de  $2$  a  $6\text{m/s}$ . Estos autores usaron cristales de hielo de tamaños entre  $30$  y  $200\mu\text{m}$ . Aunque, también, reportan haber detectado agregados de cristales de hasta  $800\mu\text{m}$ . La temperatura ambiente ( $T_a$ ) en las que realizaron las mediciones estuvo entre  $-6$  y  $-40^\circ\text{C}$ . El espectro de gotitas de agua presentes en la nube tenía un diámetro modal de  $12\mu\text{m}$  y se extendía hasta tamaños de  $33\mu\text{m}$ .

Estos autores encontraron que con un contenido de agua líquida eficaz (EW) igual a  $0.5\text{g/m}^3$  y con  $T_a$  entre  $-6$  y  $-15^\circ\text{C}$  el cargado es positivo. Mientras que es negativo cuando  $T_a$  es menor que  $-18^\circ\text{C}$ .

Por otro lado, Saunders y colaboradores<sup>(3)</sup> realizaron mediciones de carga eléctrica transferida durante la interacción de un granizo simulado fijo y una nube compuesta de gotitas de agua y cristales de hielo transportada por un flujo de aire a  $3\text{m/s}$ . En estos experimentos se usaron EW de hasta  $2\text{g/m}^3$  y se varió la temperatura entre los  $-9$  y los  $-32^\circ\text{C}$ . El tamaño de los cristales de hielo que se usaron en estos trabajos estuvo entre los  $100$  y  $120\mu\text{m}$ . Mientras que, el espectro de gotitas de agua empleado en estas mediciones tenía un diámetro modal de  $12\mu\text{m}$  y tamaños máximo de  $33\mu\text{m}$ . Estos autores reportan que el cargado del granizo simulado es de signo positivo cuando:

- $T_a$  es mayor que  $-12^\circ\text{C}$  y EW es mayor que  $0.2\text{g/m}^3$ ;
- $T_a = -15^\circ\text{C}$  y EW es mayor que  $0.5\text{g/m}^3$ ;
- $T_a = -18^\circ\text{C}$  y EW es mayor que  $0.7\text{g/m}^3$ ;
- y cuando  $T_a = -21^\circ\text{C}$  y EW es  $0.9\text{g/m}^3$ .

Mientras que el cargado es negativo para:

-Ta mayor que  $-12^{\circ}\text{C}$  y EW menor que  $0.2\text{g}/\text{m}^3$ ;

-Ta menores que  $-21^{\circ}\text{C}$  y EW entre  $0.2$  y  $1\text{g}/\text{m}^3$ .

Por otra parte Avila and Caranti <sup>(4)</sup> reportan resultados de experimentos de transferencia de carga eléctrica en colisiones individuales entre esferas de hielo y una acreción fija. Estos autores realizaron mediciones a Ta en el rango de  $-10$  a  $-24^{\circ}\text{C}$ . En los experimentos usaron esferas de  $100\mu\text{m}$  de diámetro, las que impactaban a una velocidad de  $5\text{m}/\text{s}$ . Los EW en estos experimentos estuvieron en el rango de  $0.1$  a  $0.5\text{g}/\text{m}^3$ . A partir de estos experimentos encontraron que:

-con  $\text{EW}=0.2\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{Ta}=-10$ ,  $-15$  y  $-18^{\circ}\text{C}$  el cargado es positivo;

-con  $\text{EW}=0.2\text{g}/\text{m}^3$  y  $\text{Ta}=-24^{\circ}\text{C}$ , el cargado es negativo;

-con  $\text{EW}=0.3\text{g}/\text{m}^3$  y  $\text{Ta}=-12^{\circ}\text{C}$ , el cargado es positivo;

-con  $\text{EW}=0.5\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{Ta}=-15$  y  $-18^{\circ}\text{C}$ , el cargado es positivo.

Como puede observarse, no todos los resultados que se han reportados son consistentes entre si. Estas discrepancias pueden deberse a que las mediciones fueron realizadas de diferentes maneras y de que en los experimentos no se habrían controlado todas las variables involucradas en el fenómeno de transferencia.

En este trabajo se reportan mediciones de separación de carga eléctrica durante colisiones individuales entre esferas de hielo y una acreción (granizo simulado). Estos experimentos se realizaron a diferentes Ta y para varios EW. Además, se realizaron asegurando la condición de estacionario del espectro de nube que generaba la acreción y del EW. Los resultados se comparan con los reportados por otros autores. Se realiza un breve análisis de algunos mecanismos propuestos.

## 2 Equipo experimental

El equipo experimental utilizado consistió en un túnel de viento de flujo vertical invertido, en el cual hay instalados dos anillos de inducción. Mediante los anillos se pueden detectar partículas cargadas y además se les puede medir la carga eléctrica que transportan. Cada uno de los anillos de inducción esta conectado a electrómetros de  $2\text{fC}$  de sensibilidad. Para realizar los experimentos se instaló el túnel de viento dentro de una cámara frigorífica de temperatura controlable.

En este túnel se estudió la transferencia de carga en colisiones de esferas de hielo y una acreción (granizo simulado). Para esto se instaló en él un cilindro metálico, de  $4\text{mm}$  de diámetro y  $20\text{mm}$  de longitud, sobre el cual creció la acreción a partir de una nube de gotitas de agua. La acreción formada estaba ubicada  $12\text{cm}$  por debajo de uno de los anillos de inducción y  $8\text{cm}$  por arriba, de esta manera se podía medir la carga eléctrica de las esferas antes y después de la colisión.

Para realizar las mediciones de carga depositada en la acreción luego de cada colisión, se conectó el cilindro

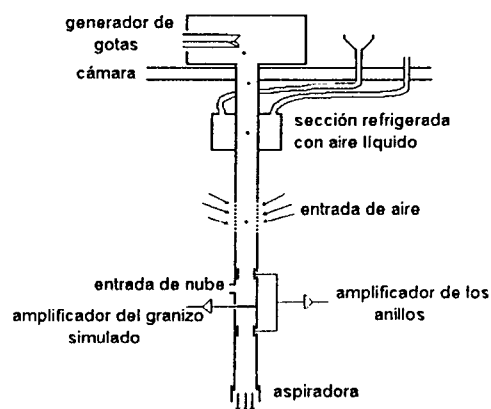


Figura 1: Esquema del túnel de viento

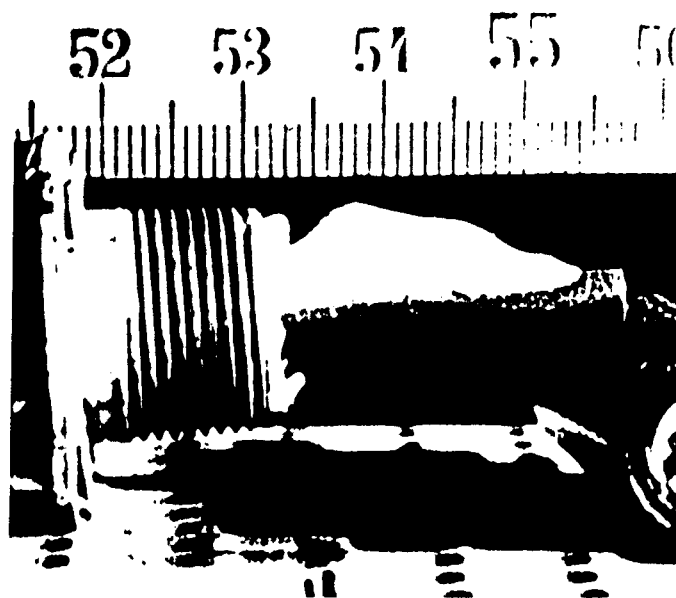


Figura 2: Acreción típica

metálico a un electrómetro de una sensibilidad de  $2\text{fC}$ . En la Figura 1 se muestra un esquema del túnel de viento, en la Figura 2 se muestra una acreción típica.

La nube de gotitas de agua se obtuvo haciendo ingresar vapor de agua producido por ebullición a una caja metálica ( $0.3\text{X}0.3\text{X}1\text{m}^3$ ). Esta caja estaba instalada dentro de la cámara frigorífica y el recipiente de ebullición estaba ubicado afuera de la cámara. La nube era conducida desde la caja al interior del túnel mediante cañería metálica para facilitar su termalización.

Las esferas de hielo que se usaron en las mediciones se obtuvieron congelando gotitas de agua producidas por un generador Abbot y Cannon <sup>(5)</sup>. Con este generador es posible elegir el tamaño y la carga eléctrica de las gotas. El congelamiento de estas gotas se iniciaba dentro del túnel al pasar por una región refrigerada con aire líquido. El congelamiento completo y termal-

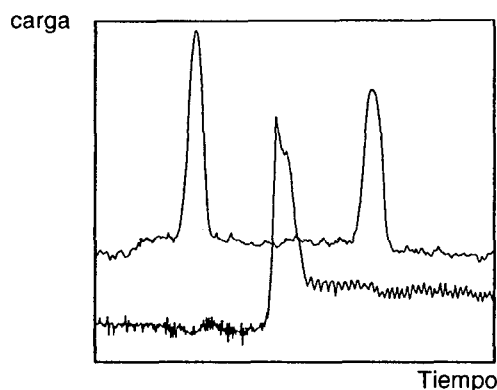


Figura 3: Pulso típico de medición

ización de las esferas de hielo se producía a velocidad terminal de caída. Luego de termalizar entraban en la región de aceleración (ver Figura 1) y eran arrastradas por el flujo de aire hasta alcanzar la velocidad predeterminada a la que colisionarían con la acreción (entre 4.5 y 5.5 m/s). En las mediciones se trabajó con esferas de hielo de diámetro entre 90 y 110  $\mu\text{m}$  y con cargas entre +30 y -30 fC. El tamaño de las esferas de hielo se determinó mediante su velocidad terminal de caída (Mason <sup>(6)</sup>). La medición de la velocidad terminal como así también la velocidad de impacto, se midieron mediante el arreglo de los anillos de inducción.

La salida de los tres electrómetros se grabó en cinta magnética y fue analizada luego en un osciloscopio digital, usando un conversor frecuencia-voltage.

La Figura 3 muestra un pulso típico observado en el osciloscopio. La señal superior corresponde a la proveniente de los anillos y la inferior a la proveniente del granizo. El eje de las abscisas es el eje temporal y el de las ordenadas es de la carga. Este evento corresponde a una esfera de hielo con carga positiva (primer pulso de la señal superior), que colisiona con el blanco y le transfiere carga positiva (señal inferior), pasando luego por el anillo inferior con menor cantidad de carga eléctrica (segundo pulso de la señal superior).

### 3 Resultados

La Figura 4 muestra el espectro de diámetros de gotas de nube que se usó en los experimentos.

Para las condiciones de velocidad y temperatura en las que se realizaron los experimentos, este espectro de nube produjo acreciones con aspecto poroso, en régimen de crecimiento seco y con superficie macroscopicamente convexa. La densidad de las acreciones obtenidas estuvo entre 0.3 y 0.6  $\text{g/cm}^3$ .

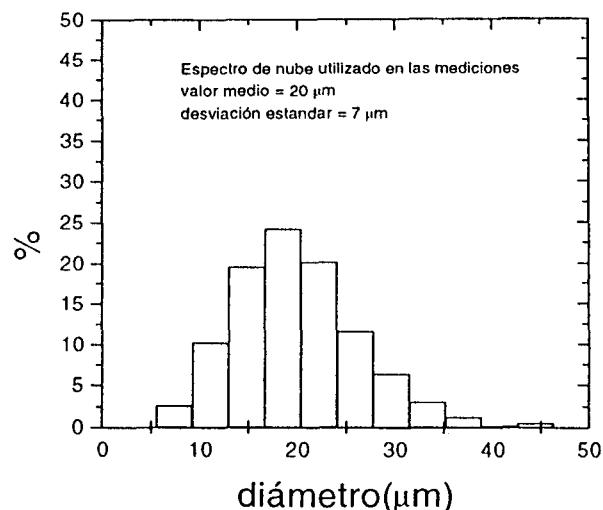


Figura 4: Espectro de gotas de nube usado en las mediciones

En la Figura 5 se muestran los histogramas de algunas de las mediciones. Como se puede observar, a medida que la temperatura disminuye, aumenta la cantidad de eventos en los que separa carga negativa. Esto se puede ver en el desplazamiento de los valores medios de los histogramas hacia valores negativos. Se puede notar también que el ancho de todos es comparable y que los módulos de las cargas máximas separadas son similares.

En la tabla 1 se detallan las condiciones de  $T_a$ , EW y RAR (tasa de acreción) con las que se midió. También se muestran los valores medios de carga eléctrica separada ( $Q_b$ ).

Durante los experimentos se observaron impactos en los que se produjo el pasaje de dos o más partículas por el anillo inferior. Estos eventos fueron indetificados como colisiones en las que se había producido fractura de estructuras crecidas en la superficie de la acreción.

### 4 Discusión

Como se puede ver, nuestros resultados están en buen acuerdo con los reportados por Avila y Caranti <sup>(1)</sup>. También son consistentes con los reportados por Saunders y colaboradores <sup>(3)</sup>, si bien no corresponden exactamente a las regiones de cargado propuestas por estos autores. Sin embargo, nuestros resultados no muestran una tendencia clara que relacione el RAR con el signo del cargado del granizo. Por otra parte, no están en buen acuerdo con los reportados por Takahashi <sup>(1)</sup>.

El hecho que se observa en la Figura 5, esto es que a una dada  $T_a$  y con un dado EW, haya eventos en los que se transfiere carga negativa y eventos en los que se transfiere carga positiva, pone de manifiesto que las propiedades de pequeños lugares de la superficie de la

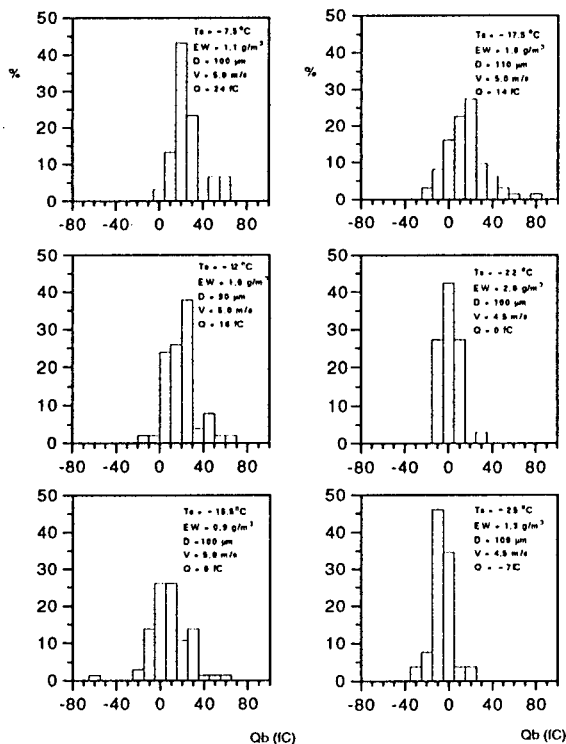


Figura 5: Histogramas de algunas mediciones

acreción, involucradas en la separación de carga, cambian fuertemente de un punto a otro y probablemente también lo hagan con el tiempo.

Propiedades tales como la porosidad de la acreción y la forma de su superficie (rugosidad) podrían estar jugando un papel importante durante el proceso de separación de carga. Esto es, tanto la porosidad como la forma de la acreción están relacionadas con la ventilación de la acreción y por lo tanto con sus temperaturas superficiales. Estas temperaturas estarían vinculadas con el signo de la carga que queda en el granizo luego de una colisión (Avila y colaboradores (7)).

Por otro lado, las propiedades morfológicas del blanco están relacionadas con la nube de gotitas de agua a través de la densidad de nube (EW) y del espectro de tamaño de las gotitas. Esto indicaría una conexión entre los procesos de separación de carga y la nube de gotitas que produce la acreción. Luego, acreciones obtenidas en diferentes experimentos podrían tener diferentes propiedades morfológicas.

Estas consideraciones respecto de la importancia de la temperatura superficial, la ventilación de la acreción y el espectro de nube utilizado, indicarían que si la disipación del calor entregado a la acreción es diferente, los resultados de mediciones de separación de carga podrían ser diferentes. Esto explicaría porque experimentos en condiciones supuestamente similares dan diferentes resultados de separación de carga.

Por otra parte, también podrían relacionarse las

EW (g/m <sup>3</sup> )	Ta (°C)	Qb (fC)	RAR (g/s m <sup>3</sup> )
1.1	-7.5	24	5.4
1.0	-12.0	16	5.0
0.6	-13.0	21	3.1
0.9	-15.0	8	4.4
0.5	-15.0	12	2.5
0.6	-15.5	18	3.1
0.3	-15.5	14	1.7
0.5	-15.5	20	2.4
0.4	-15.5	21	2.2
1.0	-17.5	14	4.9
0.8	-18.0	9	4.1
2.0	-22.0	0	8.9
1.0	-24.0	-3	4.6
1.3	-25.0	-7	5.7

Figura 6: Mediciones realizadas

características morfológicas de la acreción con la tasa de crecimiento superficial (RAR) y éste a su vez con el signo del cargado (Saunders y colaboradores (3)). De esta forma estaría relacionada nuevamente la capacidad de evacuar calor y las características del cargado de la acreción.

El hecho de que nuestros resultados no evidencien una clara correlación entre el RAR y el cargado, se entendería si se acepta que las propiedades morfológicas de la acreción afectan al cargado de la misma. Esto es, a un mismo RAR se asegura una cantidad de calor igual en un dado tiempo, pero la acreción producida no necesariamente tendrá las mismas características, por ejemplo podrían cambiar las propiedades térmicas.

## 5 Conclusiones

En este trabajo se encontró que existe una  $T_a$  asociada a un dado EW, para la cuál el cargado del granizo cambia de signo. En nuestras mediciones se observó para  $EW = 1\text{ g/m}^3$  que esta temperatura estaba alrededor de los  $-22^\circ\text{C}$ .

En general nuestros resultados están en buen acuerdo con los reportados por otros autores en mediciones de transferencia de carga en colisiones individuales. Pero están en menor acuerdo con los resultados reportados en mediciones de transferencia en colisiones múltiples.

Por otro lado, sería conveniente realizar experimentos en los cuales se pueda determinar la influencia real de las características morfológicas de la

acreción en su cargado, tanto a nivel microscópico como macroscópico.

## 6 Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo del CONICET, del CONICOR y de la SeCyTUNC. Queremos agradecer la colaboración prestada durante las mediciones como así también la labor fotográfica de José Barcelona.

## Referencias

- [1] T. Takahashi, *J. Atmos. Sci.* **35**; 1536 (1978).
- [2] W.D. Keith y C.P.R. Saunders, *Atm. Res.* **25**; 445-464 (1990).
- [3] C. P. R. Saunders, W. D. Keith y R. P. Mitzewa, *J. Geophys. Res.* **96**; 11007 (1994).
- [4] E. E. Avila y G. M. Caranti, *J. Geophys. Res.* **99**; 10611 (1994).
- [5] Abbott, C.E., and T.W. Cannon, *Rev. Sci. Instrum.*, **43**; 1313-1317, (1972).
- [6] Mason, B.J., Clarendon Press, Oxford, Second Edition. (1972).
- [7] E. E. Avila, G.G. Aguirre Varela y G. M. Caranti, *J. Atmos. Sci.* **52**; 4515-4522 (1995).