

# Medición de la carga eléctrica transferida a un sustrato de hielo en acreción, debido a múltiples colisiones con cristales de hielo.

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

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

En este trabajo se reportan resultados de mediciones de la corriente eléctrica a través del sustrato de hielo (granizo simulado) debida a su colisión con un gran número de pequeños cristales de hielo. Las mediciones fueron hechas variando el contenido efectivo de agua líquida de la nube (EW) entre 0.5 y 1.5 g/m<sup>3</sup>; la temperatura ambiente (Ta) entre -10 y -25°C y la velocidad de impacto fue de 5 m/s. Los cristales de hielo usados en estos experimentos, crecieron a partir de la fase vapor a Ta, y sus tamaños estuvieron entre 20 μm y 100 μm. El sustrato de hielo estuvo en acreción de gotitas de agua sobreenfriada durante todo el transcurso de la medición. Se estudió la dependencia del cargado eléctrico del granizo con Ta y EW y se comparan estos resultados con los reportados por otros autores.

Pacs N° 13.5225, 14.9260

## 1 Introducción

La electrificación de las nubes de tormenta, ha sido y es objeto de numerosas investigaciones científicas. Los mecanismos por los cuales se produce la separación de las cargas eléctricas dentro de una nube aun no están identificados.

Se ha sugerido que las colisiones entre granizos y cristales de hielo presentes en las nubes son las responsables de la separación de carga eléctrica. Las colisiones se producen debido a que los granizos y los cristales de hielo tienen diferentes velocidades. Dicha diferencia está relacionada con el tamaño, masa y forma de las partículas que interactúan; esto es, efectos gravitatorios y de rozamiento con el aire. Estas colisiones dejan los granizos cargados eléctricamente con un determinado signo, mientras que los cristales se llevan la carga de signo opuesto; es decir, se produce lo que se llama separación de carga eléctrica. Así, la aparición de los centros de carga dentro de la nube estaría relacionada con la diferencia de velocidades de caída.

Los experimentos de laboratorio han mostrado que la magnitud y signo de la carga eléctrica depositada en el granizo cuando colisiona contra un cristal de hielo depende de: la temperatura ambiente (Ta), dimensión y forma de los cristales y del granizo, contenido de agua líquida de la nube (LWC), espectro de diámetros de las gotas de nube (Takahashi <sup>(1)</sup>; Keiht and Saunders <sup>(2)</sup>; Saunders *et al.* <sup>(3)</sup>). Sin embargo no todos los resultados reportados hasta el momento han sido consistentes entre sí.

Takahashi <sup>(1)</sup> reportó resultados de experimentos en los que midió la carga eléctrica transferida en colisiones múltiples de cristales de hielo y una acreción. Las mediciones de la corriente de cargado de un

granizo simulado se efectuaron mientras éste rotaba a una velocidad de 9 m/s dentro de una nube formada por cristales de hielo y gotitas de agua. El espectro de gotitas de agua usado tenía un diámetro modal de 10 μm y un diámetro máximo de 25 μm. Las mediciones se realizaron en temperaturas (Ta) dentro del rango -5 y -30°C y con LWC entre 0.01 y 20 g/m<sup>3</sup>. Se observó que a Ta mayores que -10°C el cargado era positivo independientemente del valor de LWC. Para temperaturas menores que -10°C el cargado era: positivo para valores de LWC entre 0.01 y 0.2 g/m<sup>3</sup>; negativo para LWC entre 0.2 y 4 g/m<sup>3</sup> y nuevamente positivo para valores entre 4 y 20 g/m<sup>3</sup>.

Por otra parte, Keith and Saunders <sup>(2)</sup> realizaron mediciones de transferencia de carga eléctrica en colisiones múltiples de cristales de hielo y una acreción. En estos experimentos el granizo simulado rotaba dentro de una nube formada por cristales y gotitas de agua. Los cristales de hielo usados en las mediciones tenían tamaños entre 30 y 200 μm y se encontraron agregados de cristales de hasta 800 μm. La velocidad de colisión se varió en el rango de 2 a 6 m/s y la temperatura ambiente (Ta) se varió entre -6 y -40°C. En este trabajo se usó un espectro de nube que tenía un diámetro modal de 12 μm y se extendía hasta tamaños de 33 μm. Los resultados que se reportan para EW = 0.5 g/m<sup>3</sup>, un rango de tamaños de cristales entre 30 y 800 μm y con Ta entre -6 y -15°C el cargado es positivo. Mientras que es negativo cuando Ta es menor que -18°C.

En un trabajo posterior Saunders *et al.* <sup>(3)</sup> reportan mediciones de carga transferida durante interacciones múltiples entre un granizo simulado fijo y una nube compuesta de gotitas de agua y cristales de hielo transportada por un flujo de aire. Todos los experi-

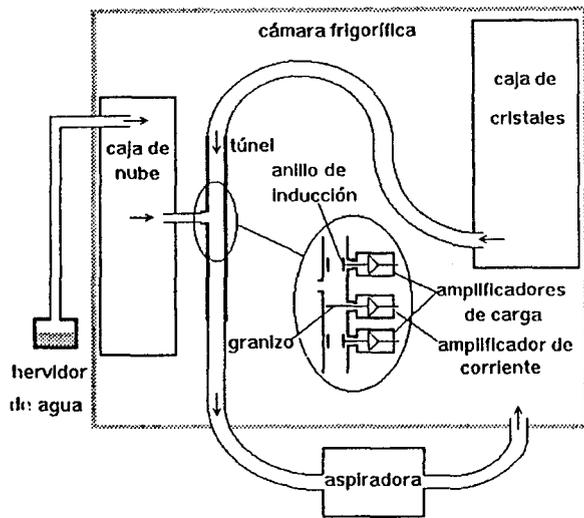


Figura 1: Esquema del equipo de medición.

mentos realizados se hicieron con una velocidad del flujo de aire de 3 m/s. En estos experimentos usaron EW de hasta 2 g/m<sup>3</sup> y variaron la temperatura entre los -9 y los -32°C. Mientras que el tamaño de los cristales usados estuvo entre los 100 y 120 μm. El espectro de nube empleado en estas mediciones tenía un diámetro modal de 12 μm y tamaños máximo de 33 μm.

En este trabajo se reporta que el cargado del gránizo es de signo positivo cuando: EW es mayor que 0.2 g/m<sup>3</sup> y Ta es mayor que -12°C; EW es mayor que 0.5 g/m<sup>3</sup> y Ta = -15°C; EW es mayor que 0.7 g/m<sup>3</sup> y Ta = -18°C; y cuando EW es 0.9 g/m<sup>3</sup> y Ta = -21°C. Mientras que es negativo para Ta mayor que -12°C y EW menor que 0.2g/m<sup>3</sup>. Para temperaturas menores que -21°C y EW entre 0.2 y 1 g/m<sup>3</sup> el cargado es negativo.

Las discrepancias que se observan entre los resultados de estos autores podrían deberse a los diferentes métodos de medición empleados, en los que no se controlan todas las variables involucradas en el fenómeno de transferencia.

En este trabajo se reportan resultados de mediciones de transferencia de carga en colisiones múltiples entre cristales de hielo y una acreción de hielo (gránizo simulado). Los experimentos se realizaron con un gránizo simulado fijo inmerso en un flujo de aire que transportaba los cristales de hielo y se desarrollaron de forma tal que el crecimiento de los cristales de hielo no afectaba el espectro de nube de acreción.

Los resultados se comparan con los reportados por otros autores. Se analizan las diferencias encontradas entre ellos.

## 2 Método experimental

Los experimentos consistieron en medir la corriente eléctrica que circulaba por una acreción de hielo, cuando colisionaba contra ella una nube de cristales de hielo. Las mediciones se realizaron dentro un túnel de viento, de 2 cm de diámetro interno, y de 60 cm de largo, instalado dentro de una cámara frigorífica que permite variar su temperatura.

El túnel se hallaba en posición vertical y estaba conectado en su extremo inferior por medio de un tubo de plástico corrugado a una aspiradora instalada fuera de la cámara. La aspiradora producía un flujo de aire vertical descendente dentro del túnel y devolvía ese aire al interior de la cámara. La velocidad del flujo de aire se podía controlar con la potencia entregada a la aspiradora. Ver Figura 1.

En el interior de la cámara se ubicó una caja metálica (0.6x0.9x1.8 m<sup>3</sup>), dentro de la misma se producían y crecían los cristales de hielo a ser utilizados en los experimentos. Los cristales de hielo se sembraron mediante una pequeña explosión de un globo de goma, que activaba los núcleos de congelación de hielo en el interior de caja. A partir de ese momento los cristales crecían por deposición de vapor a expensas de una nube de gotitas de agua. Esa nube de gotitas era introducida a la caja unos minutos antes de realizar el sembrado. Esta nube proveía el vapor necesario para que los cristales crezcan. Los cristales eran aspirados desde esta caja a través de un conducto que conecta la parte inferior de la caja con el extremo superior del túnel, en el momento de la medición. Ver Figura 1.

La nube de gotitas utilizada para producir la acreción se generó por condensación de vapor de agua dentro de otra caja metálica (0.3x0.3x1 m<sup>3</sup>). Esta caja también se ubicó dentro de la cámara frigorífica. El vapor de agua provenía de un recipiente en donde se hacía hervir agua. Este recipiente se ubicó afuera de la cámara frigorífica y se conectó a la caja de nube por medio de cañería metálica. La nube se aspiró a través de un caño metálico que se comunicaba al interior del túnel por entradas laterales del mismo. Tanto el agua utilizada para producir la nube de acreción como la utilizada en la nube para hacer crecer los cristales de hielo era tridestilada.

En el túnel se instaló un cilindro metálico de 4 mm de diámetro, que atravesaba toda la sección del túnel y sobre el cuál creció el sustrato de hielo (gránizo simulado). También, en el interior del túnel, coaxialmente al mismo, se ubicaban dos anillos metálicos, uno a 12 cm por arriba del gránizo simulado y otro a 8 cm por debajo. Ver Figura 1.

Tanto el gránizo como ambos anillos estaban conectados eléctricamente a la entrada de amplificadores electrónicos, fijados al túnel. El amplificador que estaba en contacto con el gránizo simulado, amplifica la corriente eléctrica que pasa a través de él, debido a los choques con los cristales de hielo. Los amplificadores que se hallan conectados a los anillos de inducción detectan el pasaje de partículas cargadas a través de e-

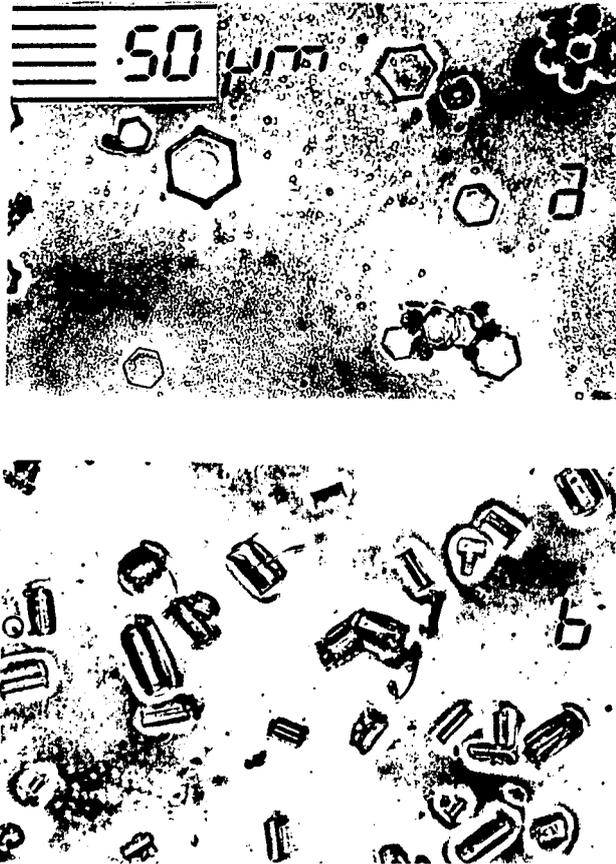


Figura 2: Fotografías de los cristales. (a) Medición realizada a  $-21.7^{\circ}\text{C}$ . (b) Medición realizada a  $-10.9^{\circ}\text{C}$ .

llos. La señal proveniente del amplificador del anillo superior nos permite saber si la nube de cristales que impactaba contra el granizo tenía carga eléctrica o si venía descargada. La señal del anillo inferior detectaba si la misma nube quedaba cargada luego de interactuar con el granizo.

La corriente a través del granizo se graficó con un registrador XT, mientras que la señal eléctrica proveniente de los anillos de inducción se grabó en cinta magnética y fue observada con un osciloscopio digital.

Se tomaron réplicas de los cristales que había dentro de la caja. Estas muestras se obtuvieron pasando un portaobjeto con una fina capa de formvar diluido en cloroformo (al 3% de masa) en el espacio donde se hallaban los cristales.

Se midió el espectro de gotas de nube con que se trabajó. Para esto se utilizó un cilindro de vidrio de las mismas dimensiones que el usado para crecer la acreción. Este cilindro se cubrió con una fina capa de formvar (al 3%) y se instaló en el túnel en la misma forma que el usado para crecer la acreción de hielo. La toma de muestra consistió en someterlo al cilindro al flujo de aire y nube durante 1 seg aproximadamente. Este proceso se realizó de la misma forma en la que se hicieron las mediciones de transferencia, pero sin la presencia de cristales de hielo.

El contenido de agua líquida efectivo (EW) de la

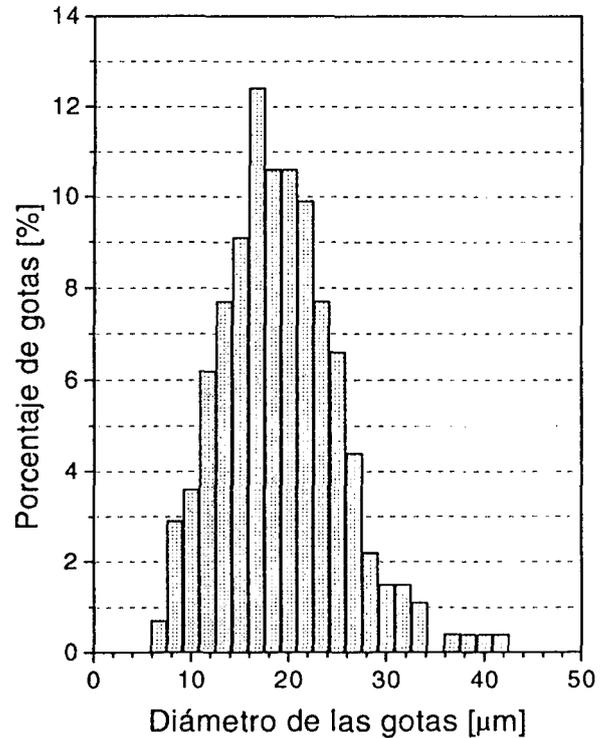


Figura 3: Espectro de gotas de la nube utilizada

nube (porción de agua que se deposita sobre el granizo, por unidad de volumen que ocupa en el aire) se pesó la masa de la acreción con una balanza de precisión.

Cada medición duró de 3 a 5 minutos. Durante ese tiempo ingresaban simultáneamente al túnel cristales de hielo y gotitas de agua provenientes de sus respectivas cajas. La temperatura ambiente durante los experimentos se midió con un termistor adosado al túnel y a la altura de la acreción. La  $T_a$  no varió más de  $1.5^{\circ}\text{C}$  durante el transcurso de una corrida. La velocidad del flujo de aire con la que se realizaron las mediciones fue de 5 m/s.

### 3 Resultados

En la Figura 2 se ven fotografías de las dos formas típicas de cristales con las que se realizaron las mediciones. Se puede observar, que el tamaño de los cristales estaba entre los 10 y los 60  $\mu\text{m}$ . También se ve que los hábitos de crecimiento en general fueron placas hexagonales y cilindros hexagonales.

En la Figura 3 se presenta el espectro de la nube que se usó en las mediciones de transferencia de carga. Como se puede ver el espectro tenía un valor medio de 20  $\mu\text{m}$  y el rango de valores de los diámetros estaba entre los 6 y 42  $\mu\text{m}$ . Este rango está asociado a la eficiencia de colección del cilindro de vidrio y a la velocidad a la que se realizó la medición. Hay que tener en cuenta que estos tamaños no son todos los presentes en la nube. Gotas de diámetros menores

a los 6  $\mu\text{m}$  no son vistas debido a su baja eficiencia de colisión. En todas las mediciones se obtuvo una acreción en régimen de crecimiento seco; esto es, no hubo presencia de zonas transparentes que evidenciaran crecimiento húmedos. Respecto de la estructura que tuvieron en general podemos decir que era porosa y de densidad entre 0.3 y 0.6  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

En las señales provenientes de los anillos de inducción se vió que: Cuando se produjo el ingreso de cristales de hielo y gotas de agua (nube) la señal del anillo superior no fue demasiado diferente de la señal antes del ingreso. Por otro lado, el anillo inferior evidenció un intenso pasaje de partículas cargadas (manifestado en la gran cantidad de pulsos seguidos y superpuestos observados en la señal procedente del mismo). Este hecho prueba que los cristales se hallaban descargados antes de pasar por la región de medición (donde estaba el granizo simulado) y que muchos de ellos tenían carga eléctrica después de hacerlo (esto es un indicativo de que interaccionaron con el granizo) y de que se produjo separación de carga eléctrica.

En la Figura 4 se muestra un gráfico producido por el registrador XT, corresponde a  $T_a = -12.5^\circ\text{C}$  y  $EW = 1 \text{ g}/\text{m}^3$ . Este gráfico refleja el comportamiento de la corriente a través del granizo, debido a la carga transferida por los cristales. En dicho gráfico se indican los momentos en que se iniciaba el flujo de viento dentro del túnel y los momentos en que se lo cortaba. Los cortes se efectuaron para verificar el cero de corriente y evitar falsas lecturas. El rango de variación observado en la corriente se debe al hecho de que el número de cristales que entra al túnel no es constante durante todo el transcurso de la corrida, ya que los cristales caen por efecto de la gravedad. Sin embargo como se puede ver en la Figura 4, el valor de corriente no cambió de manera brusca entre los 20 y 80 primeros segundos, lo que indica que la caja de cristales se comportó como un reservorio.

Los resultados de las mediciones de corriente eléctrica en el granizo se hallan resumidos en la tabla 1. En ella se presentan las temperaturas en las que se midió (máxima, mínima y media), los contenidos de agua líquida efectivos de la nube y las corrientes observadas en cada medición (máxima y mínima). Se puede ver que el signo de la corriente del cargado fue en todos los casos de signo positivo.

#### 4 Discusión

El signo de la corriente del cargado de la acreción reportados en este trabajo está, en general, en acuerdo con los que se reportan en Keilit and Saunders <sup>(2)</sup> y Saunders *et al.* <sup>(3)</sup> para temperaturas mayores que  $-21^\circ\text{C}$ . Esto se puede observar en la Figura 5. A los fines de comparar nuestros resultados con los de Takahashi <sup>(1)</sup>, consideramos una eficiencia de colección de gotitas de nube de 0.5 en el cálculo del LWC a partir de los EW medidos. Encontrándose poco acuerdo.

Recientemente se ha propuesto que el espectro de

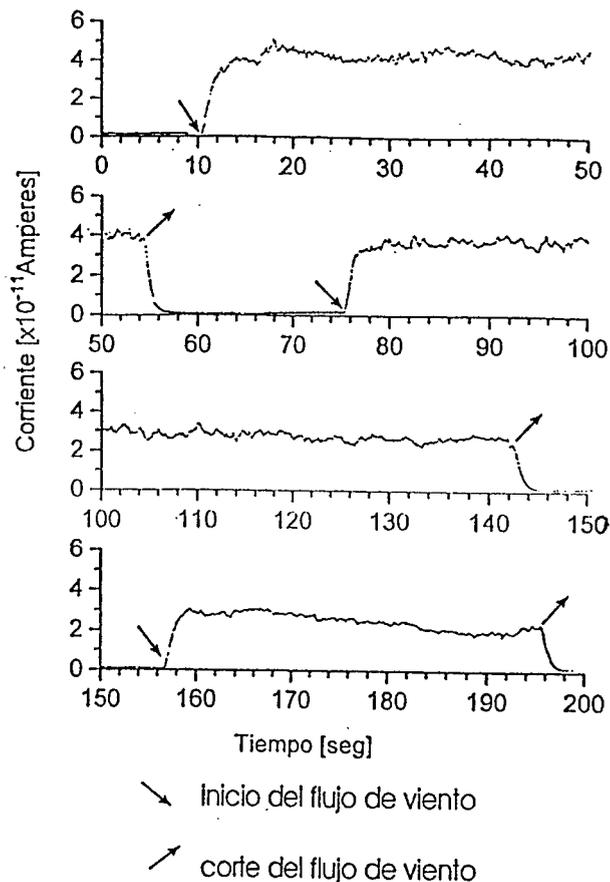


Figura 4: Gráfico de la corriente en el granizo

gotas de nube sería un factor importante en la separación de carga eléctrica cuando una acreción colisiona con esferas de hielo (Avila *et al.* <sup>(4)</sup> <sup>(5)</sup>). En principio, en los fenómenos de separación de carga eléctrica en colisiones granizo - cristales de hielo estarían involucrados los mismos mecanismos que en colisiones granizo-esfera de hielo. Con esto en mente, se podría pensar que algunas de las diferencias encontradas entre nuestros resultados y los de los autores citados sería a causa de los distintos espectros de nube utilizados y de su control durante las mediciones.

De este modo, se debería tener en cuenta que en Keilit and Saunders <sup>(2)</sup> el espectro de gotas nube cambió durante el transcurso de una misma corrida, como se puede ver en la Figura 3 de su trabajo. Algo similar podría haber ocurrido en Saunders *et al.* <sup>(3)</sup> y en Takahashi <sup>(1)</sup>. Este cambio se podría deber principalmente a la presencia de cristales en crecimiento (Brooks and Saunders <sup>(5)</sup>).

Por otra parte, el control del espectro de gotas de nube representa una de las ventajas de la forma en que se realizaron las mediciones reportadas en este trabajo. Durante nuestros experimentos el espectro gotas de nube fue estacionario durante toda la corrida y no fue afectado notablemente por la nube de cristales. Ambas nubes se mezclaban 5 ms antes de encontrarse con el granizo simulado.

Algo interesante respecto a la nube de cristales,

Medición	Temperatura [°C]	Cont. de agua liq. efec. [g/m <sup>3</sup> ]	Corriente [10 <sup>-11</sup> A]
1	-5.4 / -7.8 (-6.6)	0.84	0.7 / 0.1
2	-6.2 / -7.8 (-7.0)	0.77	1 / 0.4
3	-6.2 / -7.8 (-7.0)	0.36	2 / 0.6
4	-10.1 / -11.6 (-10.9)	0.92	2.4 / 0.4
5	-10.2 / -11.5 (-10.9)	1.76	6 / 2
6	-10.7 / -12.3 (-11.5)	1.93	4 / 3
7	-11.4 / -13.5 (-12.5)	1.03	3 / 1
8	-12.2 / -13.6 (-12.9)	1.42	5 / 2
9	-12.5 / -14.7 (-13.6)	0.73	1 / 0.1
10	-16.1 / -17.3 (-16.7)	0.69	0.8 / 0.2
11	-17.0 / -17.3 (-17.2)	0.65	1 / 0.9
12	-20.8 / -21.5 (-21.2)	1.59	3 / 1
13	-21.3 / -21.8 (-21.6)	1.47	1 / 0.2
14	-21.4 / -22.9 (-21.7)	0.41	0.4 / 0.2
15	-21.7 / -22.3 (-22.0)	0.69	0.8 / 0.2
16	-24.3 / -25.4 (-24.9)	0.29	0.4 / 0.2
17	-25.6 / -27.2 (-26.4)	0.29	0.5 / 0.1

Tabla 1: Resultados

es que venía descargada antes de interactuar con la acreción. La capacidad de verificar directamente este hecho es otra ventaja de este método de medición; esto es, permite chequear la carga eléctrica que transporta la nube de cristales antes e inmediatamente después de interactuar con la acreción.

## 5 Conclusiones

A partir de los resultados de este trabajo, se puede decir que la corriente eléctrica debida al cargado del granizo cuando colisionan contra el mismo cristales de hielo es de signo positivo en todo el rango de temperatura y contenido efectivo de agua líquida de la nube de acreción en que se midió.

Por lo sugerido en Avila *et al.* (4), acerca de que el espectro de gotas de nube desempeñaría un papel importante en los fenómenos de separación de carga, es de resaltar las ventajas del método de medición descrito en este trabajo. En este método el espectro de nube se mantiene en estado estacionario durante toda la medición y no es afectado por el crecimiento de los cristales de hielo. Además, este método permite chequear la carga eléctrica de la nube de cristales y gotas de agua, antes y después de interactuar con el granizo.

## 6 Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo del CONICET, del CONICOR y de la SeCyT UNC. 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).

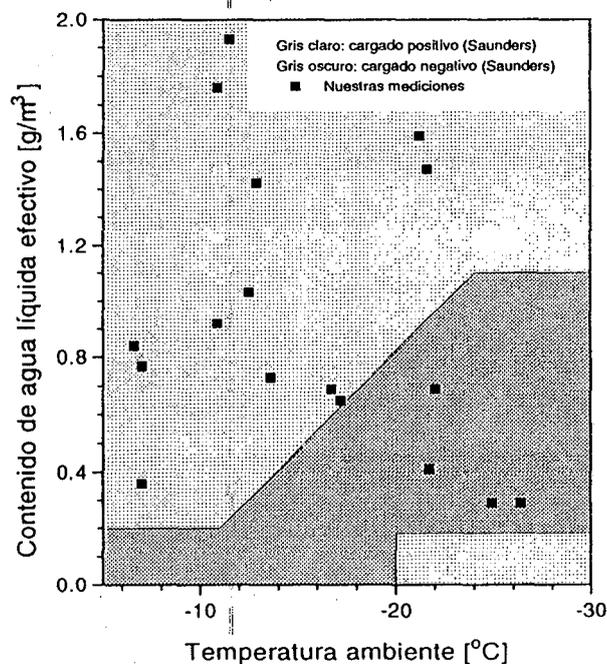


Figura 5: Comparación los resultados con los reportados Saunders *et al.* (3)

- [2] W. D. Keith y C. P. R. Saunders, Atmos. Res., **25** 445 (1990).
- [3] C. P. R. Saunders, W. D. Keith y R. P. Mitzewa, J. Geophys. Res., **96**; 11007 (1994).
- [4] E. E. Avila, R. G. Pereyra, G. G. Aguirre Varela y G. M. Caranti, enviado para ser publicado en J. Geophys. Res.
- [5] I. M. Brooks y C. P. R. Saunders, Atmos. Res. **39**; 263 (1995).