

CRECIMIENTO DE EMBRIONES DE GRANIZO DE TIPO "GRAUPEL"

Luisa Lubart y Laura Levi*

Servicio Meteorológico Nacional

* Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

Buenos Aires, República Argentina

RESUMEN

El análisis de un lote de 45 granizos precipitados en San Rafael muestra una predominancia de embriones de tipo "Graupel", cuyo proceso de crecimiento pudo haber ocurrido en tres etapas: 1°) formación de "riming": hielo con estructura abierta de baja densidad, 2°) embebido: penetración de agua en el hielo poroso al atravesar el embrión una zona de la nube de alto contenido de agua líquida y 3°) congelación total: transformación de esa estructura esponjosa en hielo compacto. Se aplica un modelo para determinar la velocidad de crecimiento de dichos embriones y se relaciona la estructura de los mismos con la de las primeras capas de los granizos.

ABSTRACT

The analysis of 45 hailstones collected in San Rafael shows a graupel like embryo predominance the growth mechanism of which could have occurred in three steps: 1°) riming process: low density graupel development, 2°) soaking: water penetration into the pores of the rime, as the embryo traverses a high water content zone and finally 3°) total icing of the spongy structure allowing the trapped water to freeze. In order to calculate the graupel growth rate a numerical model is applied. The obtained embryo structure is also related to the growth mode of the subsequent hailstone accretion.

1. INTRODUCCION

Uno de los mecanismos fundamentales de la formación de la precipitación es el crecimiento de partículas de hielo por acreción y subsiguiente congelación de gotas de agua sobreenfriada. Cuando la partícula en crecimiento es pequeña y el depósito acrecido es de baja densidad, el proceso se indica con el nombre de "riming". Los embriones de granizos consisten frecuentemente en partículas crecidas por el proceso de "riming" y en ese caso se les da el nombre de "graupel". En general estas entidades se distinguen netamente del crecimiento posterior del granizo por su diferente estructura.

Las diferentes características que presentan ambos procesos de crecimiento, del embrión y del granizo, hacen suponer que ellos tienen lugar en distintas zonas de las nubes. Teniendo en cuenta esta hipótesis, en los modelos numéricos de crecimiento del granizo se introducen en la nube los embriones ya formados para simular el crecimiento posterior (Charlton y List, 1972). Faltan en consecuencia en la bibliografía cálculos numéricos del crecimiento de embriones. Estos cálculos son actualmente posibles teniendo en cuenta determinaciones realizadas por Pflaum y Pruppacher (1979) de los parámetros que intervienen en el proceso de "riming".

En el presente trabajo se aplica un modelo numérico para el cálculo de crecimiento de embriones de tipo "graupel", teniendo en cuenta las características que presentan la mayoría de los embriones de un lote de granizos precipitados en San Rafael (Mendoza) el 4 de marzo de 1980.

2. DESARROLLO DEL MODELO DE CRECIMIENTO

Para los cálculos de crecimiento del "graupel" se supone que éste mantiene su forma esférica. En cada intervalo de crecimiento prefijado se calculan iterativamente los siguientes parámetros:

velocidad terminal de caída, masa acrecida, temperatura de superficie y densidad del "graupel".

Se especifican las siguientes condiciones iniciales:

Radio del "graupel": $R_0 = 300 \mu\text{m}$

Densidad del "graupel": $\rho_{g_0} = 0.9 \text{ g/cm}^3$

Presión del aire: $P = 400 \text{ mb}$

Radio de volumen medio de las gotitas de nube: $r = 10 \mu\text{m}$

Temperatura del aire: $T_a = -10, -15, -20 \text{ y } -25^\circ\text{C}$

Contenido de agua líquida: $w = 2, 4, 6 \text{ y } 8 \text{ g/m}^3$

2.1. Velocidad terminal de caída

Se calcula mediante la expresión

$$V = \left(\frac{8 g \rho_g R}{3 \rho_a C_D} \right)^{1/2} \quad (1)$$

donde ρ_g y ρ_a : densidad del "graupel" y del aire, respectivamente

R : Radio del "graupel"

C_D : coeficiente de arrastre

Para cada valor del radio R se calcula el coeficiente de arrastre C_D mediante un método de aproximaciones sucesivas. Para ello se parte de un valor inicial propuesto y se tienen en cuenta las expresiones que vinculan la velocidad de caída con C_D (Ec. (1)) y con el número de Reynolds, $Re = 2RV\rho_a/\mu_a$ (μ_a = viscosidad dinámica del aire) y además la relación funcional empírica que existe entre Re y C_D para partículas esféricas con $40 < Re < 1000$ (Le Clair y Hameliec, 1970).

2.2. Masa acrecida

Se calcula teniendo en cuenta la expresión

$$\Delta M / \Delta t = E \pi R^2 V w = K w \quad (2)$$

donde el producto $K = E \pi R^2 V$ se denomina "Kernel" de recolección y se calcula aplicando la expresión teórica obtenida por Beard y --

Grover (1974) para gotas de agua que colectan gotitas de $r = 10 \mu\text{m}$

$$K_{10} = 9,13 (\text{MV})^{0,738} \quad (3)$$

donde MV es la cantidad de movimiento del colector.

2.3. Temperatura de superficie del "graupel"

Se calcula mediante la ecuación que se obtiene del balance calórico que se establece cuando una partícula crece por acreción de gotitas (Mason, 1971)

$$T_s = \frac{Kw/R\pi(L_f + C_w(T_a - T_0) + C_i T_0) + 2DL_s N_{Sh}(\rho_{va} - \rho_{vs}) + 2kT_a N_{Nu}}{2kN_{Nu} + (Kw/R\pi) C_i} \quad (4)$$

donde L_f y L_s son respectivamente los calores latentes de fusión y sublimación, C_w y C_i los calores específicos del agua y del hielo, T_a y T_0 las temperaturas del aire y de fusión del hielo, ρ_{va} y ρ_{vs} las densidades de vapor de agua en el aire y en la superficie, N_{Sh} y N_{Nu} los números de Sherwood y Nusselt, D el coeficiente de difusión del agua en el aire y finalmente k es la conductividad térmica del aire.

Para calcular T_s se aplica un método iterativo debido a que ρ_{vs} es a su vez una función de T_s .

2.4. Densidad y radio del "graupel"

Para obtener estos parámetros se calcula en primer término la densidad del "rime" mediante la expresión empírica obtenida por Pflaum y Pruppacher (1979)

$$\rho_{\text{rime}} = 0,261 (-r V_{\text{imp}} / T_s)^{0,38} \quad (5)$$

Con este valor se determina la densidad media que alcanza el "graupel". A su vez, con los valores de ΔM y de ρ_g se calcula el nuevo radio -

que alcanza el embrión en ese intervalo de crecimiento. Los cálculos se interrumpen cuando T_s alcanza valores próximos a 0°C (crecimiento húmedo). Si se continuaran los cálculos debería modificarse el modelo para tener en cuenta que la partícula crece como mezcla de hielo y agua ($T_s = 0^\circ\text{C}$).

3. RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo de crecimiento para el cálculo del radio (R), la densidad (ρ), la velocidad terminal (V) y la temperatura de superficie (T_s) del "graupel", se representaron gráficamente en función del tiempo para distintas temperaturas del aire ($T_a = -10, -15, -20$ y -25°C) y contenidos de agua líquida ($w = 2, 4, 6$ y 8 g/m^3). Se observa por ej. en la Fig. 1 ($T_a = -10^\circ\text{C}$) que el tiempo necesario para que T_s sea próxima a 0°C es de 21 min cuando $w = 2\text{ g/m}^3$ y R alcanza un valor de 5,5 mm. Cuando $w = 6\text{ g/m}^3$ el tiempo se reduce a 3,3 min y el radio que alcanza el "graupel" en este caso es de 1,8 mm.

En la Fig. 2.a. ($T_a = -20^\circ\text{C}$; $w = 2\text{ g/m}^3$) se puede observar que, en este caso, el tiempo necesario para que T_s sea próximo a 0°C aumenta considerablemente (36 min) respecto al caso de la Fig. 1.a. y el radio que alcanza el "graupel" es de 11,5 mm, es decir considerablemente mayor.

En particular, aplicamos el modelo a un embrión de un granizo característico que pertenece al lote recogido el 4 de marzo de 1980.

La Fig. 3 muestra la sección de este granizo fotografiado (a) con luz transmitida y (b) entre polaroids cruzados. El "graupel", de aproximadamente 2 mm de radio, se distingue por su opacidad de las capas posteriores. En la Fig. 3 (b) se observa que los cristales iniciados en el embrión continúan en la capa subsiguiente. Este hecho y el tamaño grande de los cristales indican que tanto el ----

"graupel" como la capa subsiguiente crecieron a una temperatura relativamente alta, es decir $T_a \approx -10^\circ\text{C}$. Con este valor de T_a y recurriendo a las curvas de la Fig. 1 se deduce que para que el "graupel" alcance una temperatura próxima a 0°C cuando su radio es de 2 mm es necesario considerar un contenido de agua líquida de aproximadamente 6 g/m^3 (Fig. 1.b). Por otra parte, la continuación de los cristales del "graupel" a la capa posterior indicaría que el crecimiento se produjo en forma casi continua de manera que al terminarse la formación del "graupel" éste se empapa rápidamente debido al agua en exceso la cuál llenaría la estructura abierta de baja densidad. Siguiendo el crecimiento posterior del granizo notamos que la capa subsiguiente, formada por cristales grandes, puede haber crecido en régimen de crecimiento húmedo. Esto parece evidente por las características de las burbujas y la forma ondulada de los lóbulos.

Es interesante hacer notar que si recurrimos al modelo numérico de nube granicera, aplicado a los datos del sondeo de 18 Z del día de la tormenta, se encuentra que el contenido de agua líquida alcanza un valor de 6 g/m^3 precisamente para una temperatura del aire de -10°C . Este resultado indica que los valores obtenidos mediante la aplicación del modelo de crecimiento del "graupel" están de acuerdo con las condiciones ambientales presentes en la nube que produjo los granizos analizados.

La Fig. 4 muestra una sección de un granizo del mismo lote. En este caso el "graupel" está formado por cristales pequeños y se observa una separación neta entre el embrión y el crecimiento posterior. Como consecuencia de ello consideramos que en este caso el "graupel" terminó de crecer en condiciones de crecimiento seco ($T_s < 0^\circ\text{C}$) y se formó en una zona de la nube diferente para ser transportado luego por la corriente ascensional a la zona de la nube donde se produjo el crecimiento posterior.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que los "graupels" pueden crecer formados por hielo poroso, de baja densidad, aún para temperaturas del aire y contenido de agua relativamente elevados: - - - -
 $-15 < T_a < -10^\circ\text{C}$ y $2 < w < 6 \text{ g/m}^3$. Estas condiciones ambientales son comparables a las que en el caso de granizos de $R > 10 \text{ mm}$ dan lugar, habitualmente, a hielo de densidad $\rho = 0.9 \text{ g/cm}^3$ y eventualmente a crecimiento húmedo.

La diferencia encontrada entre estos dos modos de crecimiento, el embrión y el granizo, se debe principalmente a la diferente velocidad relativa de ambos con respecto a las gotitas de nube. Este hecho determina también una menor recolección de gotas en el caso del "graupel" en un medio de igual contenido de agua líquida.

Consideramos que la aplicación del modelo de crecimiento del "graupel" permitirá acotar las condiciones ambientales presentes en la zona de la nube donde se forma el embrión del granizo, es decir su etapa inicial de formación.

Agradecimientos: Las autoras expresan su agradecimiento a la Lic. - María Victoria Carrilho por su valiosa colaboración en el desarrollo del programa para el cálculo de crecimiento.

BIBLIOGRAFIA

- Beard, K.V. y Grover, S.N., 1974: Numerical Collision Efficiencies for Small Raindrops Colliding with Micron Sized Particles; J. Atmos. Sci., 31, 534-550.
- Charlton, R.B. y List, R. 1972: Hail Size Distributions and Accumulation Zones; J. Atmos. Sci., 29, 1182-1193.
- Le Clair, B.P., Hameliec, A.E. y Pruppacher, H.R., 1970: A Numerical Study on the Drag on a Sphere at Low and Intermediate, Reynolds Numbers; J. Atmos. Sci. 27, 308-315.

Mason, B.J., 1971: The Physics of Clouds, Clarendon Press-Oxford p. 351-352.

Pflaum, J.C. y Pruppacher, H.R., 1979: A Wind Tunnel Investigation of the Growth of Graupel Initiated from Frozen Drops; J. Atmos.Sci. 36, 680-689.

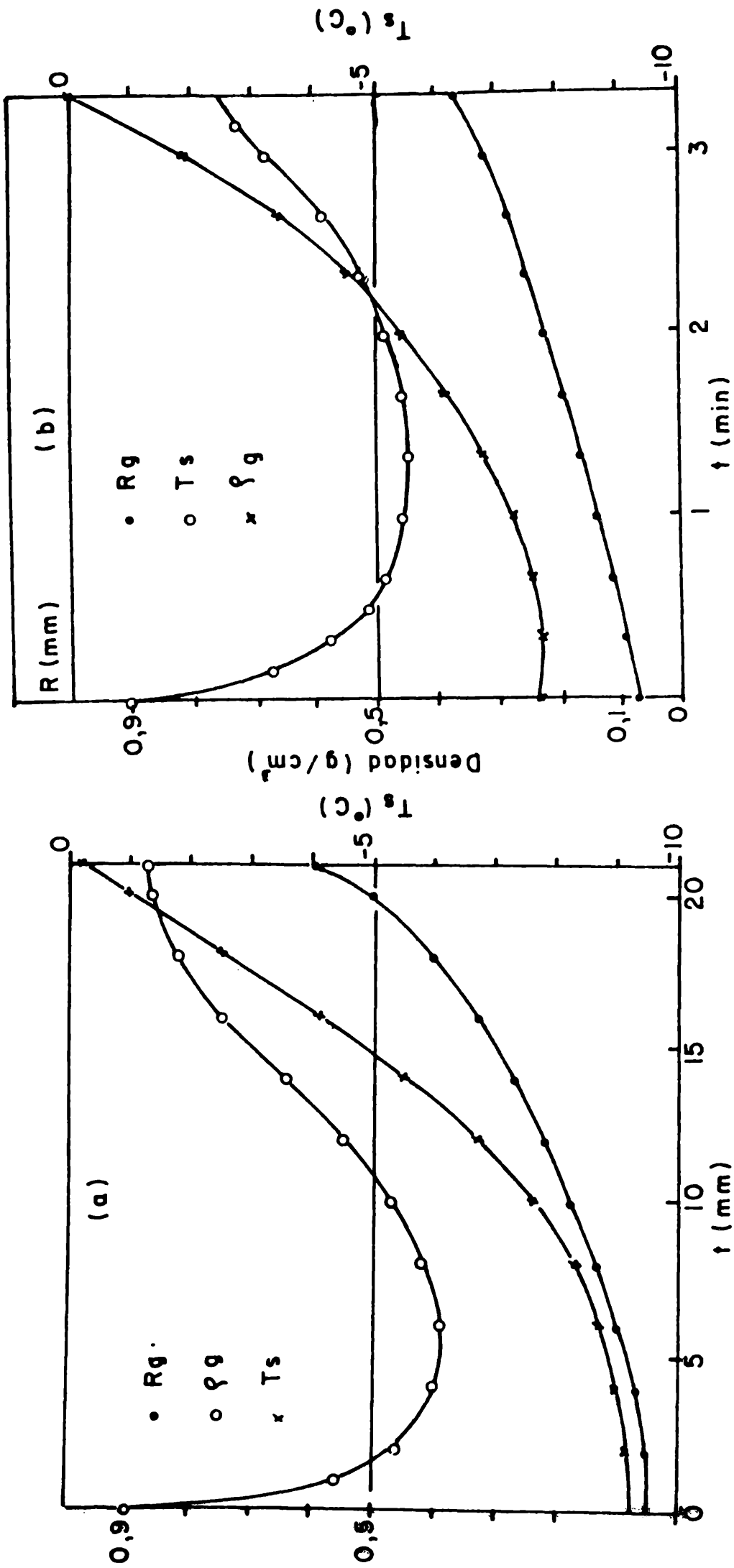


Fig.1: Variación del radio, densidad y temperatura de superficie del graupel en función del tiempo para $T_a = -10^\circ\text{C}$
 (a) Contenido de agua líquida $w = 2$ g/m³
 (b) Contenido de agua líquida $w = 6$ g/m³

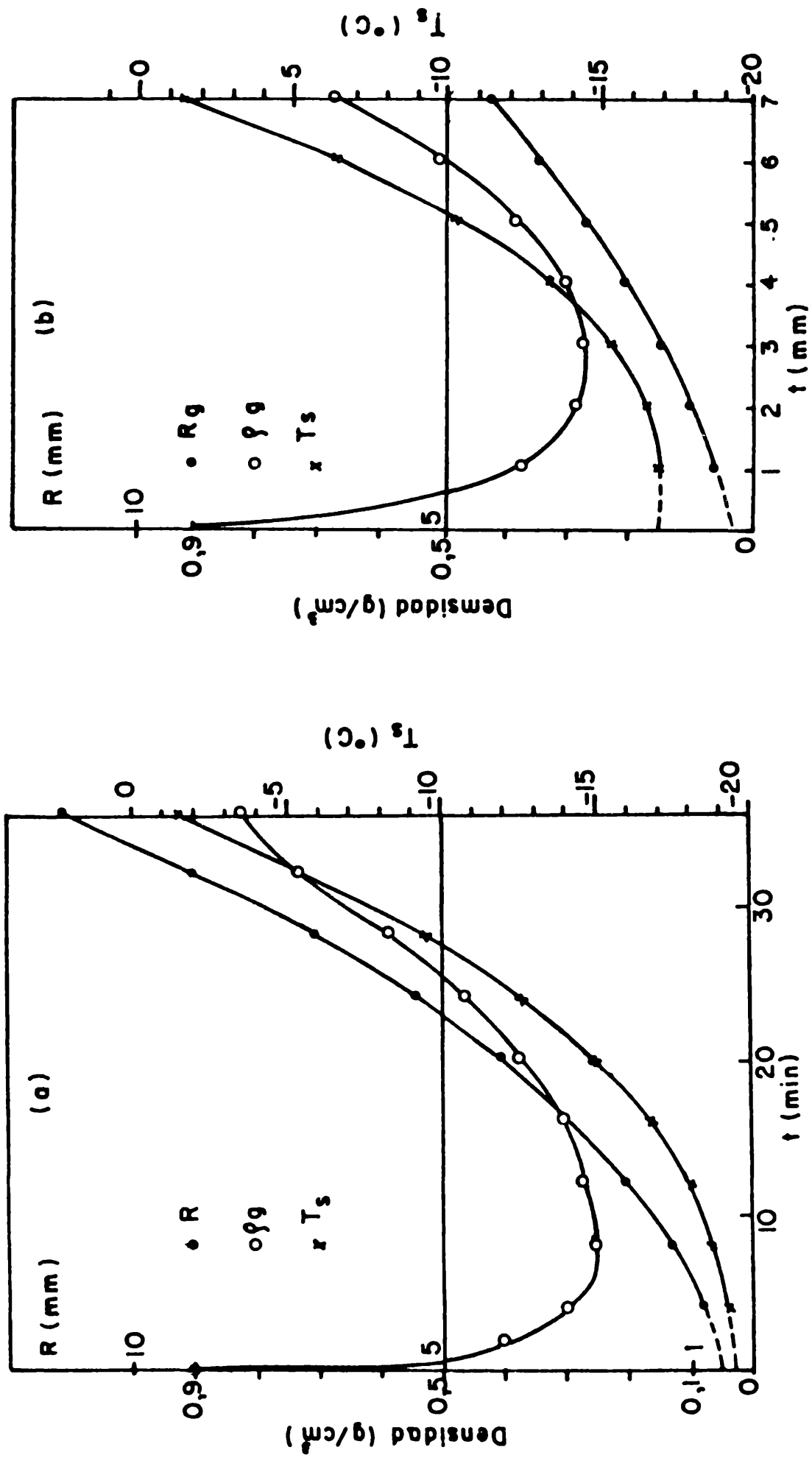


Fig. 2: Variación del radio, densidad y temperatura de superficie del "graupel" en función del tiempo para $T_a = -20^\circ\text{C}$.

(a) Contenido de agua líquida $w = 2 \text{ g/m}^3$
 (b) Contenido de agua líquida $w = 6 \text{ g/m}^3$

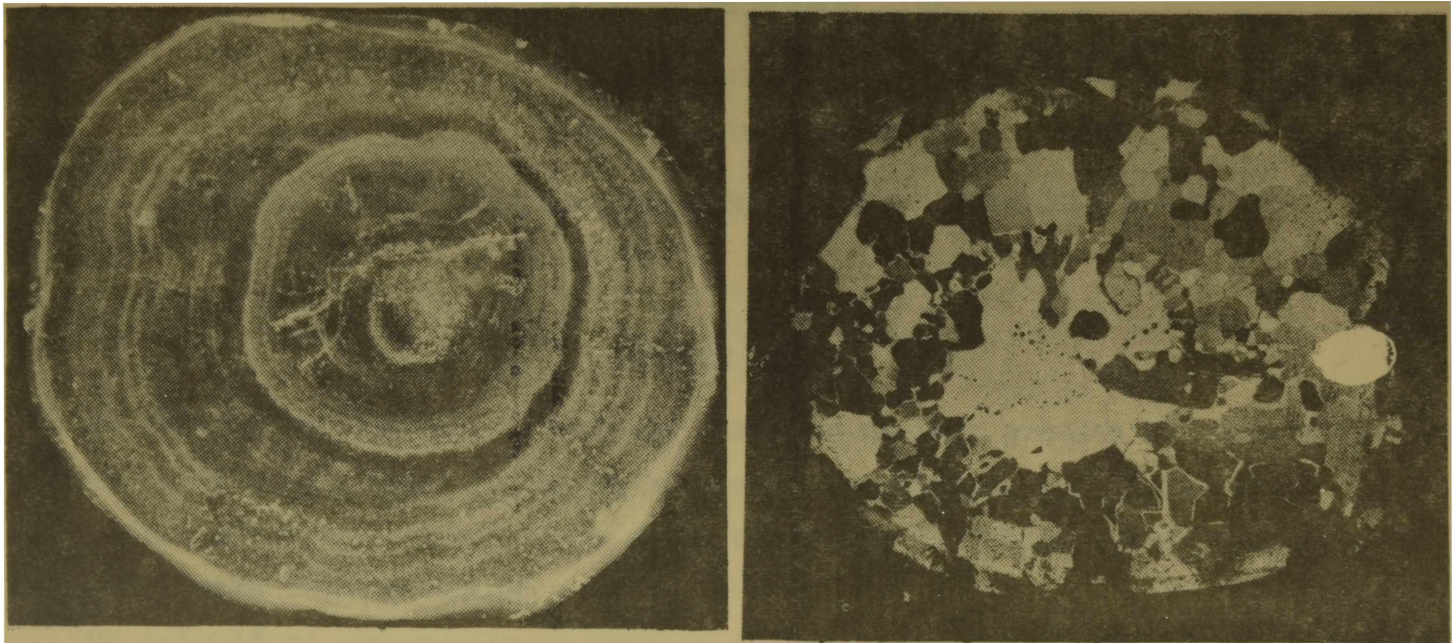


Fig.3: Sección de granizo (K23) característico de la tormenta.
(a) Fotografía con luz transmitida.
(b) Fotografía entre polaroids cruzados.

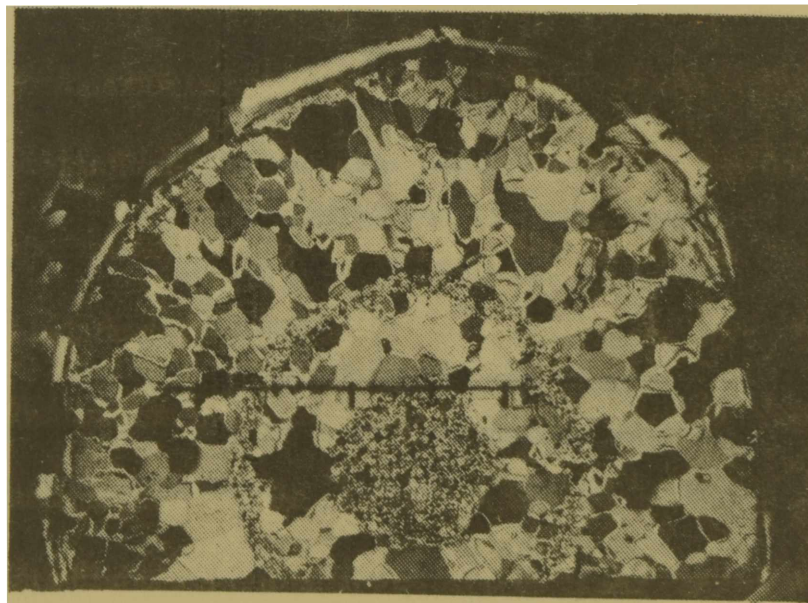


Fig.4: Sección de granizo K12.
Fotografía entre polaroids cruzados

