

ESTRUCTURA DE GRANIZOS Y SU VINCULACION CON LAS CONDICIONES AMBIENTALES

L. LEVI, E.M. de ACHAVAL, L. LUBART
Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas;
Servicio Meteorológico Nacional.

Se consideran resultados anteriores que permiten vincular el tamaño y la orientación de los cristales que forman una piedra de granizo con las temperaturas del aire T_a y de la superficie de la acreción T_s , existentes durante el proceso.

Estos resultados se aplican al análisis de una piedra de granizo natural, formada por un centro y dos zonas I y II.

Los valores obtenidos para las temperaturas en las dos zonas se utilizan para estimar la velocidad ascensional del aire en la nube U , el contenido de agua líquida en la misma w , la proyección vertical de la trayectoria del granizo ΔZ , y el tiempo de crecimiento correspondiente t .

El ejemplo muestra que, el análisis de piedras de granizo recogidas en tierra, permite determinar las condiciones de crecimiento y sus relaciones con algunos parámetros de la nube.

Previous results are considered where the size and the orientation of crystals which form a hailstone are correlated with the temperature of the air T_a and of the accretion surface T_s .

These results are applied to the analysis of a natural hailstone, formed by a centre and two zones I and II.

The values obtained for the temperatures prevailing in both zones are used to estimate the updraught velocity of the cloud U , the corresponding water content w , the vertical component of the hailstone trajectory ΔZ and the growth time t .

The example shows that the analysis of the hailstones collected on the ground makes it possible to determine the prevailing growth conditions in the cloud and their relations with some of the cloud parameters.

Uno de los problemas actuales en Física de Nubes, reside en la comprensión del proceso de formación de piedras de granizo.

Consideremos una partícula de hielo en un ambiente a temperatura $T_a < 0^\circ\text{C}$; su temperatura de superficie T_s será igual a la del ambiente T_a . Si la partícula comienza a crecer por acreción de gotas sobreenfriadas, T_s aumenta, debido al calor de fusión hasta alcanzar un valor estacionario. Este último es función de la masa de agua que la partícula captura por unidad de tiempo, y de los valores que tienen los distintos parámetros que determinen el balance calórico, como por ejemplo: T_a , velocidad del aire, número de Reynolds, etc.

Mientras $T_s < 0^\circ\text{C}$ el crecimiento se denomina seco, es decir que las gotas congelan antes de la llegada de nuevas gotas. Cuando T_s alcanza 0°C , el granizo está constituido por una mezcla de hielo-agua y el crecimiento se llama húmedo.

Estas distintas condiciones determinan distintas características estructurales de las piedras de granizo, tales como orientación y tamaño de cristales, distribución de burbujas, forma y aspecto externo (rugosidad, lóbulos, protuberancias), fracción de agua líquida en el crecimiento húmedo, etc.

1) Orientación y tamaño de cristales en granizos artificiales

En trabajos recientes, Levi-Achával-Lubart (1974), estudiaron la orientación y tamaño de cristales, en granizos artificiales obtenidos en túnel de viento, en el rango de temperaturas comprendido entre $-18^\circ\text{C} > T_a > -27^\circ\text{C}$ y $-5^\circ\text{C} > T_s > -15^\circ\text{C}$. La orientación de los cristales se determina midiendo el ángulo $\bar{\varphi}$ formado por el eje \vec{c} de cada cristal con la dirección de crecimiento y se caracteriza cada muestra por el valor medio de este ángulo $\bar{\varphi}$. El área media de los cristales se expresa por $\bar{\sigma}$ en mm^2 . Los resultados obtenidos para $\bar{\varphi}$ y $\bar{\sigma}$ pueden verse en las figuras 1 y 2 donde se representa $\bar{\varphi}$ y $\log \bar{\sigma}$ en función de T_a , con T_s como parámetro ($T_s \cong -5, -10, -15^\circ\text{C}$). Se observa que para T_s aproximadamente constante, $\bar{\varphi}$ aumenta y $\log \bar{\sigma}$ disminuye al disminuir T_a . Este efecto se hace menos marcado para $T_a > -18^\circ\text{C}$, donde pequeñas variaciones de T_s y de otros parámetros, tales como el tamaño de las gotas, pueden influir sensiblemente sobre el fenómeno. A este efecto se debe probablemente el aparente cambio de pendiente en la primera parte de las curvas para $T_s \cong -10^\circ\text{C}$.

Estos resultados se interpretan suponiendo que, en la primera etapa de congelación de cada gota, el hielo crece extendiéndose sobre el sustrato y forma una capa de características similares a las de las dendritas. De esta manera, $\bar{\varphi}$ puede relacionarse con la orientación de las dendritas y sus variaciones con la temperatura, fenómeno observado por diversos autores en agua sobreenfriada (Pruppacher, (1967), Macklin and Ryan (1965)).

La relación aproximadamente exponencial que se observa entre $\bar{\sigma}$ y T , (Fig. 2) puede estar determinada por la relación inversa que habría entre el tamaño de los cristales y la probabilidad de nucleación $P(T)$ de hielo sobre un sustrato. Siguiendo a Fletcher (1974), puede escribirse:

$$P(T) = a e^{bT} \quad (1)$$

donde en nuestro caso T es una temperatura intermedia entre T_a y T_s , expresada

en grados centígrados y **a** y **b** son constantes que dependen de las características del sustrato.

2) Estudio de un granizo natural

Los resultados descriptos anteriormente se han aplicado al estudio de un granizo natural, recogido en Davos (Suiza), que presentaba características de formación a temperaturas bajas y crecimiento seco. La Figura 3 muestra un corte de este granizo, en el cual se observa la estructura policristalina de la acreción.

Se distinguen: Una zona central de 2,5 mm de radio, una zona I de 2,5 a 5 mm de radio y finalmente una zona II de 5 a 8 mm de radio.

Se omite el estudio de la zona central de la cual no se conoce claramente el mecanismo de formación. Las mediciones de $\bar{\varphi}$ y $\bar{\sigma}$ en las zonas I y II del granizo y la aplicación de los datos de las Fig. 1 y 2 dan los siguientes resultados:

Zona I	$\bar{\varphi}$	=	34°	$\bar{\sigma}$	=	4,5 · 10 ⁻¹ mm ²
	T _a	=	-20°C	T _s	=	-15°C
ó bien	T _a	=	-22°C	T _s	=	-10°C
Zona II	$\bar{\varphi}$	=	40°	$\bar{\sigma}$	=	6,8 · 10 ⁻² mm ²
	T _a	=	-25°C	T _s	=	-15°C

Vemos que para la zona I existen dos pares de valores posibles para T_a y T_s. Para elegir entre estos valores se consideran algunos aspectos de las condiciones de crecimiento dentro de la nube.

En la Fig. 4 se observa el esquema de un Cúmulonimbus donde se indica la posible trayectoria de un granizo. De acuerdo con modelos previos, cada piedra necesita, para alcanzar un radio del orden del cm, efectuar un ascenso dentro de la nube de alrededor de un km, lo que corresponde, generalmente, a una variación de temperatura de 6°C.

Esto sugiere que el primer par de valores de temperaturas de la Zona I es el más aceptable.

Habiendo establecido T_a y T_s para cada zona, se calculan en función de estos valores los siguientes parámetros de la nube: velocidad ascensional del aire, contenido de agua líquida, ascenso ΔZ del granizo en la nube y tiempo necesario para el crecimiento de cada zona.

Sean U la velocidad ascensional del aire dentro de la nube, que se admite constante en este caso, y V la velocidad terminal de caída del granizo que depende del radio de la acreción de acuerdo con la expresión:

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

donde: R radio del granizo
 C_D coeficiente de arrastre
 ρ_i densidad del hielo

ρ_a densidad del aire
g aceleración de la gravedad.

Pueden darse las siguientes posibilidades:

$U > V$ el granizo asciende
 $U = V$ el granizo alcanza su altura máxima
 $U < V$ el granizo desciende

Para el granizo analizado puede admitirse que la condición $U = V$ se alcanzó aproximadamente en la mitad de la zona II y que el granizo completó su crecimiento en la primera parte del descenso.

Suponiendo para la densidad del aire ρ_a un valor correspondiente a una presión $p = 400$ mb y una temperatura $T_a \cong -20^\circ\text{C}$, pueden atribuirse a los parámetros en (2) los siguientes valores:

$\rho_a = 5,6 \cdot 10^{-4}$ g/cm³
 $\rho_i = 0,9$ g/cm³
R = 6,5 mm
 $C_D = 0,5$

Aplicando (2) se obtiene:

$$U \cong 23 \text{ m/seg.}$$

El contenido de agua líquida en la nube (w) depende de T_a y T_s de acuerdo a la siguiente expresión, que se obtiene teniendo en cuenta el balance calórico en la formación del granizo:

$$w = \frac{20,6 \text{ Re}^{1/2} \{ L_v D \Delta \rho_v + K (T_s - T_a) \}}{RVE \{ L_f + c_w (T_a - T_o) + c_i (T_o - T_s) \}} \quad (3)$$

donde::

R_e = Número de Reynolds
 L_v = calor latente de vaporización
 L_f = calor latente de fusión
 c_w = calor específico del agua
 c_i = calor específico del hielo
D = coeficiente de difusión del vapor de agua en aire
K = conductividad térmica del aire
 T_o = temperatura de fusión del hielo
E = coeficiente de recolección
 $\Delta\rho_v$ = variación de densidad de vapor de agua entre la superficie del granizo y el ambiente

Atribuyendo a R y V sus valores medios en las zonas I y II del granizo analizado se obtiene:

$$w_I = 0,66 \text{ g/m}^3$$

$$w_{II} = 0,73 \text{ g/m}^3$$

Finalmente, el tiempo necesario para la formación de cada zona y la variación de altura del granizo en la nube se calculan a partir de las expresiones:

$$\frac{dR}{dT} = \frac{E w V}{4 \rho_i} \quad (4)$$

$$dZ = (U - V) dt = (U - V) \frac{dt}{dR} dR \quad (5)$$

Integrando se obtiene:

$$t_I = 13 \text{ min.} \quad t_{II} = 14 \text{ min.} \quad \Delta Z = 800 \text{ m}$$

Puede observarse que se han obtenido, para los diferentes parámetros de la nube, valores posibles para una tormenta de mediana energía y contenido de agua líquida relativamente bajo.

Es interesante notar asimismo, que la orientación media de los cristales, alcanza en este caso valores superiores a 30° , hecho no observado hasta ahora en granizos naturales.

En conclusión, el presente ejemplo muestra que, el análisis de piedras de granizo recogidas en tierra, representa un medio adecuado para conocer algunos aspectos de la nube que le dió origen.

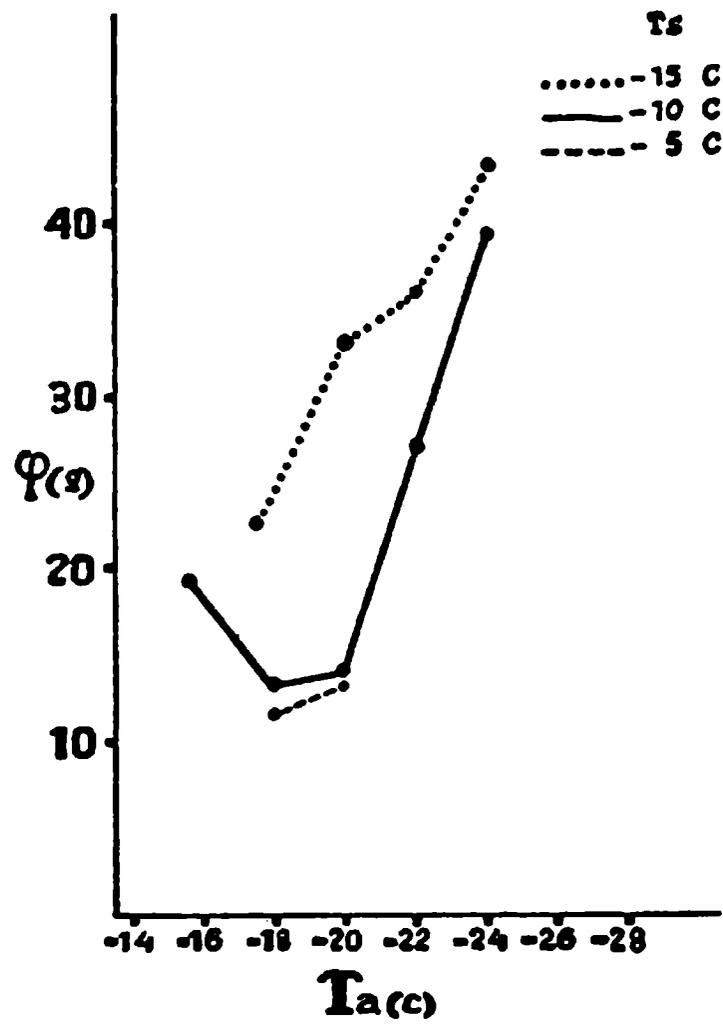


Figura 1: Angulo $\bar{\varphi}$ en función de T_a con T_s como parámetro.

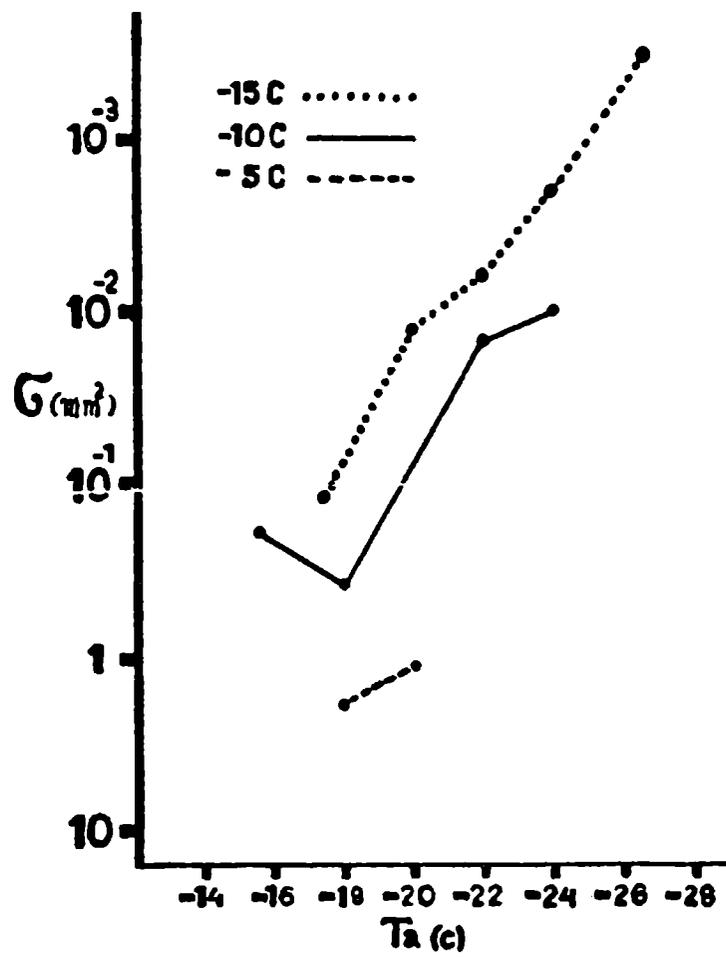


Figura 2: Area media \bar{G} en función de T_a con T_s como parámetro.

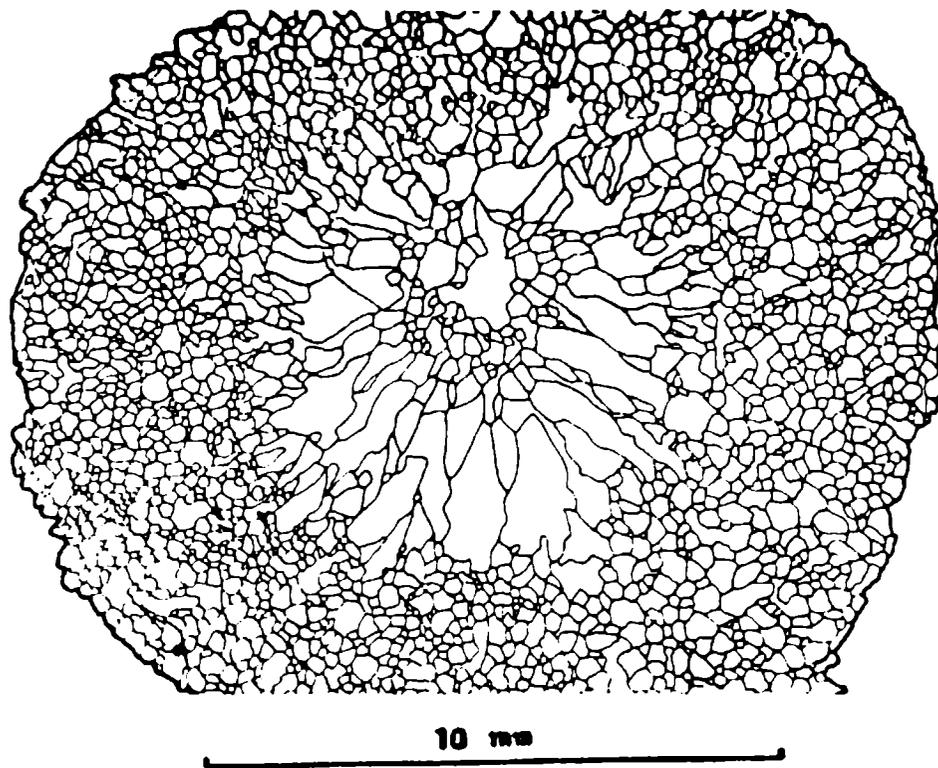
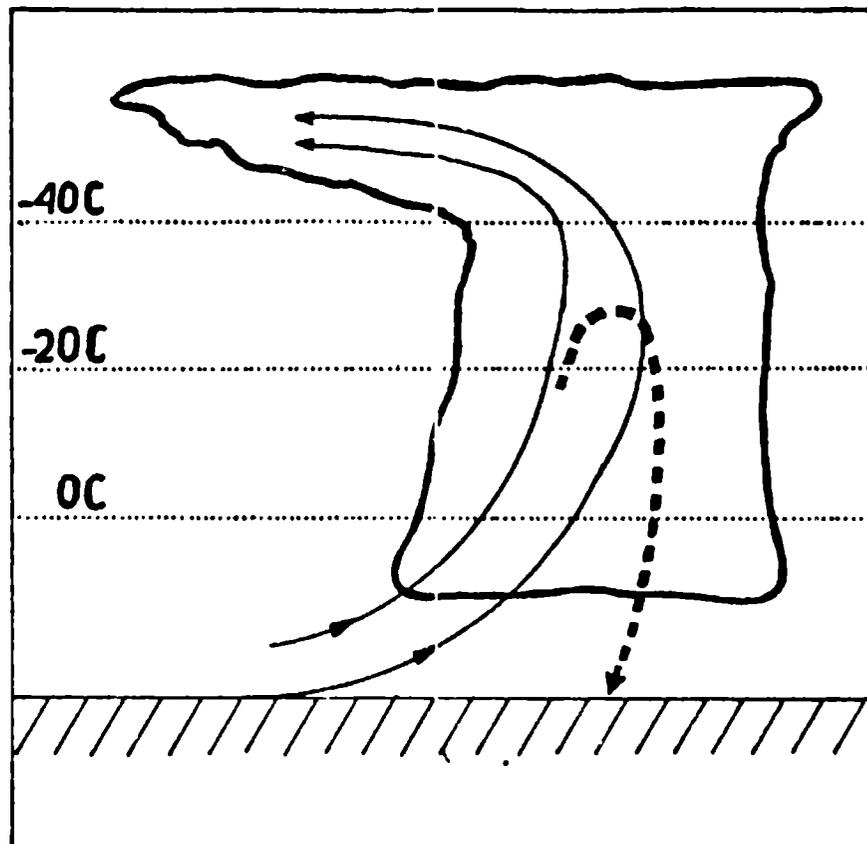


Figura 3: Sección de un granizo natural.



Corriente ascendente →
Trayectoria - - - - - ↘

Figura 4: Esquema de un Cumulus Nimbus.

BIBLIOGRAFIA

- FLETCHER, N.H., 1974: Temperature dependence of the active site Concentration of ice nucleants; J. Atmos. Sci., v. 28 p. 1718-1720.*
- LEVI, L., Achával, E.M. de Lubart, L., 1974: Structure of ice grown from droplet accretion and solidification process; J. Crystal Growth, v. 22, p. 303-310.*
- MACKLIN, W.C., RYAN, B.F., 1965: The structure of ice grown in bulk super-cooled water; Jour. Atm. Sci., v. 22, p. 452-459.*
- PRUPPACHER, H.R., 1967: Browth modes of ice crystals in supercooled water and aqueous solutions; J. Glaciology, v. 6, p. 651-662.*