

PROPEDEUTICA

LA MODIFICACION DE LAS NUBES.

David Erickson

Jefe de Meteorología en el Proyecto de Estimulación de Precipitaciones desarrollado por el Ministerio de Agricultura en la Zona Norte de Chile.^(*)

RESUMEN

Se presenta una descripción de los mecanismos productores de precipitación que incluyen los procesos de "lluvia cálida" y de "lluvia fría". Se describe la tecnología existente para modificar estos procesos, analizando la microfísica de las nubes y las reacciones termodinámicas en su interior.

ABSTRACT

THE CLOUDS MODIFICATION

A description of the precipitation mechanisms in the atmosphere is presented, including the "warm rain" and the "cold rain" processes. The current technology for the modification of those processes is described. Changes in the cloud microphysics and thermodynamics are discussed.

INTRODUCCION.

La modificación del tiempo ha sido siempre para el hombre un motivo de preocupación. Muchas tribus primitivas danzaban para que lloviera o dejar de llover. En este artículo no se presentará una historia de la modificación del tiempo, sino solamente la tecnología actualmente existente para modificar las nubes. Para esto, es conveniente analizar por separado los dos mecanismos que producen la precipitación en la atmósfera y que originan las llamadas lluvia "cálida" y lluvia "fría".

(*) 1866 South Davis Blvd., Bountiful, Utah 84010, U.S.A.

1. Lluvia cálida.

La lluvia "cálida" se origina en una nube cuya temperatura es mayor que 0°C en toda su extensión.

Proceso de condensación.

La condensación, entendida como el cambio que se origina en el agua al pasar de la fase gaseosa a la fase líquida, se produce difícilmente en el seno de aire que sólo contiene moléculas de nitrógeno, oxígeno y otros gases y que no contiene iones. En los primeros años de este siglo, el científico C.T.R. Wilson mostró que en este aire "limpio", la humedad relativa tiene que alcanzar aproximadamente 800% para que se formen gotitas. En este caso, la condensación, llamada "homogénea", implica un acercamiento espontáneo de las moléculas de vapor entre sí, permitiendo la acción de las fuerzas de cohesión intermolecular. La probabilidad de que tales choques ocurran aumenta si crece el número de moléculas de vapor de agua en un volumen dado, es decir, si la humedad relativa es más alta.

Cuando un conjunto de moléculas empiezan a formar un embrión de gotita, la agitación térmica tiende a hacer que algunas de las moléculas se escapen. Solamente cuando el embrión ha alcanzado un tamaño crítico (radio mayor que 10^{-5} cm), las fuerzas de atracción llegan a ser suficientemente fuertes como para que el embrión crezca. En este caso existe un número mayor de moléculas acercándose y adhiriéndose a la superficie del embrión, que escapando de ella por evaporación. Se calcula que para formar un embrión de 10^{-5} cm de radio se necesitan cerca de cien millones de moléculas de agua.

Núcleos de condensación.

En la atmósfera nunca existe una humedad relativa mayor que 100% (aproximadamente). Esto se debe a que el aire nunca es "limpio", existiendo siempre una gran cantidad de pequeñas partículas en suspensión, que pueden servir como superficies o núcleos de condensación. Las moléculas de vapor de agua chocan y se juntan con esas partículas originando lo que se denomina "condensación heterogénea". Las partículas, levantadas por el viento desde la superficie, pueden corresponder a polvo, sal del océano, pólen, cenizas, o

cualquier sustancia sólida que por su tamaño y densidad pueda permanecer suspendida en el aire. Según su tamaño, estos núcleos se dividen en 3 categorías

<u>Nombre</u>	<u>Diámetro</u>	<u>Concentración típica</u>
Núcleos de Aitken	menor que 0.4 μm	1000 - 5000/cm ³
Núcleos Grandes	entre 0.4 a 1 μm	100 - 1000/cm ³
Núcleos Gigantes	entre 1 a 10 μm	1/cm ³

Es notorio que la concentración de las partículas más pequeñas es mayor. Eso se debe al hecho de que las partículas grandes tienen una velocidad de caída mayor, y por lo tanto, su tiempo de residencia en la atmósfera es menor. Es importante notar que la concentración de partículas depende de muchos factores entre los cuales destacan el tipo de superficie (océano, continente, ciudad, campo, etc.) y el viento. Las cifras dadas arriba son un promedio de todos los lugares y condiciones. Las partículas del tamaño mayor que 10 μm no se mantienen suspendidas en el aire en condiciones normales.

Crecimiento de las gotas - Difusión de vapor.

Una nube recién formada contiene billones de gotitas de agua, producidas por condensación alrededor de los núcleos que acabamos de describir. Estas gotitas crecen en el ambiente saturado de la nube (humedad relativa cercana a 100%) por el mecanismo de "difusión de vapor". Este mecanismo consiste en la migración y fijación directa de moléculas de vapor de agua en la superficie de las gotitas en crecimiento.

El tamaño de una gotita recién formada es alrededor de 0.01 mm (10^{-3} cm). Las corrientes ascendentes en una nube tienen normalmente una velocidad mayor que la velocidad terminal de caída de las gotitas, manteniéndolas suspendidas en la nube. En ausencia de corrientes ascendentes, las gotas escapan de la nube evaporándose posteriormente en el aire inferior más cálido y seco. En este caso la nube entra en un proceso de disipación. Por el contrario, si se mantienen las corrientes ascendentes, puede llegar a producirse precipitación

En el caso de una lluvia ligera, las gotas que llegan al suelo tienen un radio de alrededor de 1 mm (10^{-1} cm), necesitándose cerca de un millón de gotitas típicas de una nube en formación para formar una sola gota de lluvia. Para que una gotita creciera hasta el tamaño de una gota de lluvia mediante el

proceso de "difusión de vapor" se necesitaría alrededor de veinte horas, tiempo que excede con creces la duración media de una nube típica. Sin embargo, se ha visto que una nube puede formarse y precipitar en una hora, concluyéndose entonces, que debe existir otro mecanismo aparte de la "difusión de vapor" en la producción de la lluvia cálida.

Crecimiento de las gotas de lluvia - Colisiones y coalescencia.

Mediante el proceso de difusión de vapor, algunas de las gotitas alcanzan mayor tamaño que otras porque han tenido más tiempo o más humedad para crecer. Estas caen más rápidamente a causa de su mayor masa (y peso), alcanzando y chocando con las gotitas más pequeñas que se encuentran en su camino. Por otra parte, las gotitas grandes tienen más inercia, y no siguen la misma trayectoria que las gotitas pequeñas en las corrientes turbulentas dentro de la nube. Esto genera también choques y captura de gotitas de menor tamaño. La eficiencia de una gota grande para captar las gotitas con las cuales choca es alrededor de un 20%. En otras palabras, de diez colisiones, sólo dos (aproximadamente) resultan en coalescencia, ya que la tensión superficial de las gotas y la existencia de una delgada capa de moléculas de aire que separa las gotitas que chocan, hacen que éstas reboten en la mayoría de los casos. Sin embargo, en una nube suficientemente grande y que dure más de una hora, este mecanismo puede producir lluvia (gotas de 1 mm). Al aplicar un campo electrostático que induzca una separación en la carga eléctrica de cada gotita se puede mejorar la eficiencia de la coalescencia. Se producen así, fuerzas de atracción electrostática entre las gotas que chocan, dándole más tiempo para que se produzca la coalescencia.

El hombre no puede producir un campo electrostático lo suficientemente grande ni fuerte para mejorar la eficiencia de captación en la atmósfera. Sin embargo, el campo producido en las tormentas eléctricas llega a ser lo suficientemente grande como para que la eficiencia llegue al 90%, produciéndose gotas de gran tamaño.

Modificación de una nube "cálida".

Para estimular los mecanismos de crecimiento en una nube cálida, se utilizan sustancias higroscópicas, siendo la sal común (NaCl), y un fertilizante nitrogenado llamado urea, las más utilizadas.

Una sustancia higroscópica tiene afinidad con el agua y por lo tanto atrae moléculas de vapor de agua en la nube. La presión del vapor saturado es menor sobre un núcleo higroscópico que sobre otro no-higroscópico. Bajo condiciones de sobre-saturación un núcleo higroscópico aumenta más rápidamente de tamaño por difusión de vapor, que otro no higroscópico. Esto produce la iniciación del crecimiento por colisiones y coalescencia en un tiempo relativamente corto, cuando la nube es todavía muy joven, lo que permite que la nube pueda empezar a precipitar más rápido y por lo tanto, durante más tiempo dentro del período de vida de la nube. Al "estimular" una nube, se introducen artificialmente en ella núcleos o impurezas higroscópicas, mejorando la eficiencia de la nube en la producción de la precipitación. Esta estimulación se conoce comúnmente como "siembra de nubes".

Cambios termodinámicos en la nube en un proceso de lluvia cálida.

Cuando el agua cambia de fase, de vapor a líquido (condensación), se libera calor. Este calor se llama "calor latente de condensación" y varía desde 540 hasta 600 calorías/gramo, dependiendo de la temperatura ambiental. Una cantidad de calor análoga se consume en el cambio de la fase líquida a la de vapor (evaporación). Las moléculas de vapor de agua guardan esta energía en forma latente, aumentando en el estado gaseoso su libertad de movimiento. Cuando el vapor se vuelve a condensar, se libera esta energía a la atmósfera en forma de calor sensible, constituyendo un factor importante en la estimulación del desarrollo vertical en las nubes.

Ahora bien, cuando se siembra una nube "cálida" con núcleos higroscópicos, se libera una cantidad mayor de calor sensible debido a la mayor condensación. Cuando la atmósfera es muy estable, esta adición de calor no es suficiente para estimular un crecimiento vertical, quedando las nubes estratificadas. Sin embargo, cuando la atmósfera es condicionalmente estable, este calor adicional puede ser suficiente para estimular un mayor desarrollo vertical en las nubes, aumentando su tiempo de vida, su tamaño y la cantidad de agua en estado líquido. Sembrar en este caso, puede ser una forma de prolongar la vida de una nube, si las condiciones de inestabilidad existen.

2. Lluvia fría.

La lluvia "fría" se produce en una nube que tiene una temperatura menor que 0°C en sus capas superiores. En este caso, la presencia de cristales de hielo en la formación de la "lluvia fría" es de suma importancia.

Proceso de congelación.

El cambio de fase líquida a fase sólida se llama "congelación" o "solidificación" (el proceso opuesto de llama derretimiento o fusión).

Para poder entender el proceso de la lluvia fría es necesario establecer que 0°C no es necesariamente el punto de congelación del agua líquida, pero sí el punto de fusión del hielo. Es decir, el agua líquida se puede enfriar bajo 0°C sin que se congele, pero no se puede calentar el hielo sobre 0°C sin que se derrita. En un volumen de agua muy grande / estacionario, (como un lago o un charco) la congelación ocurre cerca de 0°C , pero las pequeñas gotitas suspendidas en una atmósfera "limpia" se puede enfriar hasta los -40°C sin que se congelen. En este estado se dice que el agua está "subfundida" o "sobreenfriada".

Para que el agua pura se transforme en hielo las moléculas deben ordenarse en una forma específica, siendo esta situación gobernada por el azar en ausencia de núcleos de congelación. La probabilidad de que este ordenamiento correcto llegue a producirse en alguna parte (sin destruirse por las oscilaciones moleculares) aumenta con el volumen de agua, (los lagos se congelan cerca de los 0°C). Por otra parte, cuando más baja es la temperatura, menor es la agitación molecular, aumentando las posibilidades de que se forme un "ordenamiento correcto" de las moléculas en forma de un cristal de hielo. Si un "embrión" de hielo alcanza un tamaño suficientemente grande como para que pueda mantener su familia de moléculas, puede empezar a crecer y actuar como núcleo de otros cristales. Cuando el agua pura se congela sin la ayuda de núcleos, se llama "congelación homogénea". Esta se produce cuando la temperatura es menor de -40°C .

Núcleos de congelación.

En el estado subfundido, existe un equilibrio inestable. El agua subfundida se congela inmediatamente, si existen núcleos o superficie de congelamiento. Ciertas partículas de pequeño tamaño pueden servir como "núcleos de congelación" (también se llaman "núcleos glaciogénicos"), siendo las más eficientes las que tienen una estructura cristalina parecida a la del hielo. Estos núcleos escasean por lo general en la atmósfera. Sin embargo, cuánto más baja es la temperatura del aire, mayor es el número de núcleos naturales "activados". Esto quiere decir que, el agua muy subfundida (digamos a -35°C) no necesita para congelarse, un núcleo de estructura exactamente igual a la del hielo pudiendo utilizar otro de estructura parecida. Cuando el agua pura se congela con la ayuda de algún núcleo (artificial o natural) se habla de "congelación heterogénea".

Crecimiento de cristallitos de hielo - Proceso Bergeron.

En una nube sobre-enfriada hay cristallitos de hielo y gotitas de agua creciendo en la misma nube. Los cristallitos de hielo crecen a expensas de las gotitas subfundidas circundantes, porque la presión del vapor de agua necesaria para producir la saturación es menor sobre el hielo que sobre el agua (Fig. 1). Este proceso se llama el "Proceso de Bergeron", y es llamado así en honor al meteorólogo sueco quién lo observó por primera vez. En este proceso, las gotitas se evaporan, existiendo un "flujo" de vapor hacia los cristallitos, sobre los cuales se depositan las moléculas. En esta forma, los cristallitos de hielo crecen mucho más rápido que las gotitas de agua. Realmente, el "Proceso de Bergeron" no es más que "difusión de vapor" desde las gotitas subfundidas hacia los cristallitos de hielo.

Crecimiento de partículas de hielo - Proceso de Aglomeración.

Cuando los cristallitos de hielo crecen lo suficiente, mediante el proceso de Bergeron, adquieren una velocidad de caída que es considerable, comenzando a chocar con otros cristales o con gotitas subfundidas en la nube. Este mecanismo se llama "aglomeración" y difiere de los procesos de colisiones y coalescencia porque se produce una congelación de las partículas (gotitas sobre-enfriadas alcanzadas por los cristales). El crecimiento por aglomeración es

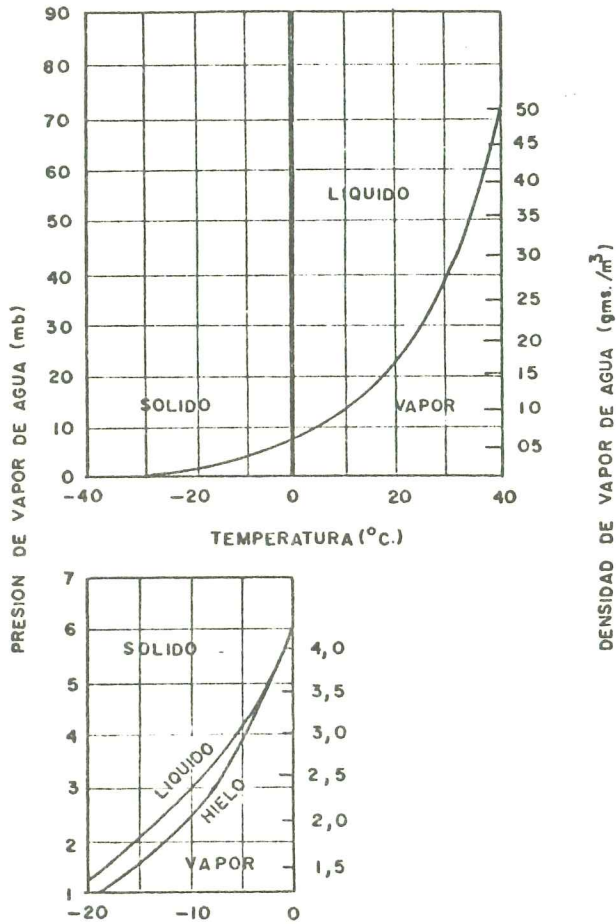


Fig. 1 Presión del vapor saturado y su densidad en función de la temperatura. Abajo: Presión y densidad del vapor saturado sobre superficies de agua líquida y hielo a temperaturas bajo 0°C.

más rápido que el crecimiento por difusión de vapor (Fig. 2) y por lo tanto las partículas pueden crecer en poco tiempo a un tamaño suficientemente grande como para caer de la nube y alcanzar el suelo. Si la temperatura entre la nube y el suelo es menor que 0°C, cae una precipitación en forma de nieve granulada, o granizo. En cambio, si los cristales cruzan en su caída la isoterma de 0°C, se derriten generando una precipitación en forma de lluvia.

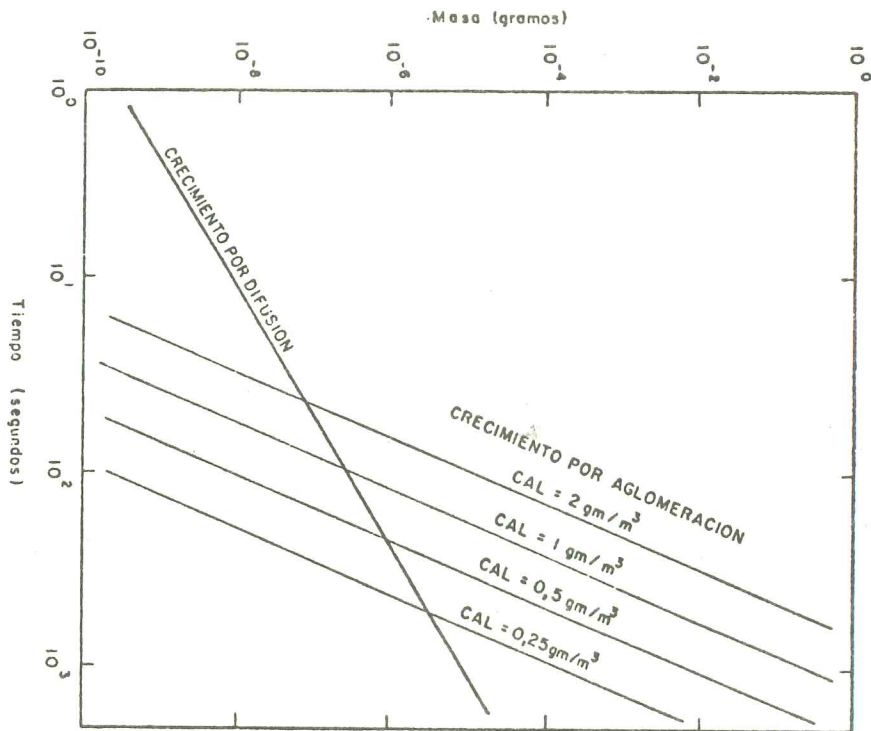


Fig. 2 Relación entre la masa (de cristales individuales de hielo) y el tiempo de crecimiento por "difusión de vapor" y "aglomeración". Para el crecimiento por difusión de vapor se supone que la saturación es constante y que la masa es proporcional al $t^{1/2}$, donde t es el tiempo. Para el crecimiento por aglomeración se supone una eficiencia constante, y que la masa es proporcional al t . Se muestran curvas para un contenido de agua líquida (CAL) de 2, 1, 0.5 y 0.25 gramos (de agua líquida) por metro cúbico de nube.^(*)

(*) Los datos de las Figs. 2, 3, 4 y 5 han sido tomados de:

FUKUTA, N., NEUBAUER, L.R., and ERICKSON, D.D.; 1979: "Estudios de Laboratorio acerca de humo de Núcleos Orgánicos de Hielo bajo condiciones de siembra simuladas: Crecimiento de cristales de hielo." Informe final para la Fundación Nacional de Ciencia de los Estados Unidos. NSF ENV77-15346.

Modificación de "nubes frías".

Se ha descubierto que ciertos núcleos artificiales, como el Yoduro de Plata (AgI), pueden ser muy eficaces para producir el congelamiento de las gotitas subfundidas. El Yoduro de Plata tiene un ordenamiento atómico muy parecido al hielo, pero no se derrite cuando la temperatura es superior a 0°C. Otra sustancia que se ha utilizado es el Metaldehído (MA) que es un nucleante orgánico. El metaldehído presenta muchas ventajas sobre otros nucleantes, pero su uso se encuentra aún en etapa de experimentación.

También se ha utilizado el hielo seco, (CO₂ sólido) pero éste tiene un efecto diferente. El hielo seco hace que la temperatura a su alrededor baje mucho, (hasta los -70°C) activando así un gran número de núcleos naturales cuyas estructuras no coinciden necesariamente con la del hielo.

Cuando se siembra una nube fría con núcleos glaciogénicos, se pueden formar cristales de hielo por tres mecanismos diferentes: a) nucleación por congelación de contacto; cuando un núcleo hace contacto físico con una gotita subfundida y la gotita se congela, b) nucleación por deposición, cuando las moléculas de vapor de agua se depositan directamente sobre el núcleo en forma de hielo, sin haber pasado por la fase de líquido, y c) nucleación por condensación y congelación: cuando las moléculas de vapor de agua se condensan primero sobre el núcleo, utilizándolo primero como núcleo de condensación, produciéndose luego el congelamiento.

La introducción de núcleos glaciogénicos en una nube permite la formación de cristalitos de hielo a temperaturas mayores, aprovechándose así la mayor cantidad de agua disponible para crecer rápidamente mediante los procesos de Bergeron y aglomeración (Ver Fig. 4). La siembra de una nube fría con núcleos glaciogénicos permite así mejorar la eficiencia de la nube en la producción de la precipitación.

Cuando el agua cambia de fase de líquida a sólida (congelación) se libera el "calor latente de fusión", que es de alrededor de 80 cal/gr, dependiendo de la temperatura ambiental. Al igual que en el proceso de la lluvia cálida este cambio de energía es muy importante como mecanismo de estímulo del desarrollo vertical en las nubes.

Requisitos para la siembra de nubes "frías" con núcleos glaciogénicos.

A continuación se presentan los que se consideran como los factores más importantes en la selección de una nube para su tratamiento.

a) Agua subfundida: Tiene que existir mucha agua subfundida en las capas superiores de la nube. Si no hay agua subfundida suficiente, los núcleos glaciogénicos no pueden actuar como núcleos de cristales de hielo.

b) Tiempo de vida de la nube: Las nubes deben tener una vida útil superior a una hora. Con menos tiempo, las partículas de precipitación no alcanzan a crecer lo suficiente como para caer. En el norte de Chile, hay muchas nubes orográficas y cúmulos sobre los Andes que en ciertas estaciones tienen una vida útil muy superior a una hora.

c) Espesor mínimo y altura de la nube: Si el espesor de la nube es pequeño, es difícil que las gotas se mantengan suspendidas en el ambiente nublado durante un tiempo suficiente como para que crezcan a un tamaño que permita su caída al suelo. Un espesor de 300 m es el mínimo aceptable. También hay que considerar la altura de la nube sobre el terreno. Si la distancia entre el terreno y la base de la nube es mayor que el espesor de la nube, es probable que la precipitación que cae de la nube se evapore antes de llegar al suelo. Este fenómeno se conoce como "Virga".

d) Dirección y velocidad del viento: Si el viento cambia bruscamen- te de dirección o velocidad, es probable que la nube se deshaga antes de formar precipitaciones. Además, la nube no debe presentar una inclinación muy marcada por el efecto de cizalle vertical del viento.

e) Temperatura: La Fig. 3 muestra que, existen dos puntos máximos en el crecimiento de cristales de hielo por difusión de vapor. El primero corresponde a la formación de cristales de hielo en forma de "agujas" a los -7°C y el segundo a la formación de cristales de hielo en forma de "placas" a los -15°C . A los -10°C encontramos la zona de transición entre formas de placas y de agujas, y por lo tanto, la forma del cristal es casi esférica. A esa temperatura se produce un máximo en la densidad aparente de los cristales de hielo (Fig. 4) y por tanto un máximo en la velocidad de caída de los cristales de hielo que se incrementa por menor resistencia aerodinámica asociada a la forma casi esférica (Fig. 5). Esta alta velocidad es ventajosa para la iniciación del crecimiento por aglomeración. Este proceso es mucho más rápido que el crecimiento por difusión de vapor y puede ser iniciado por los cristales de

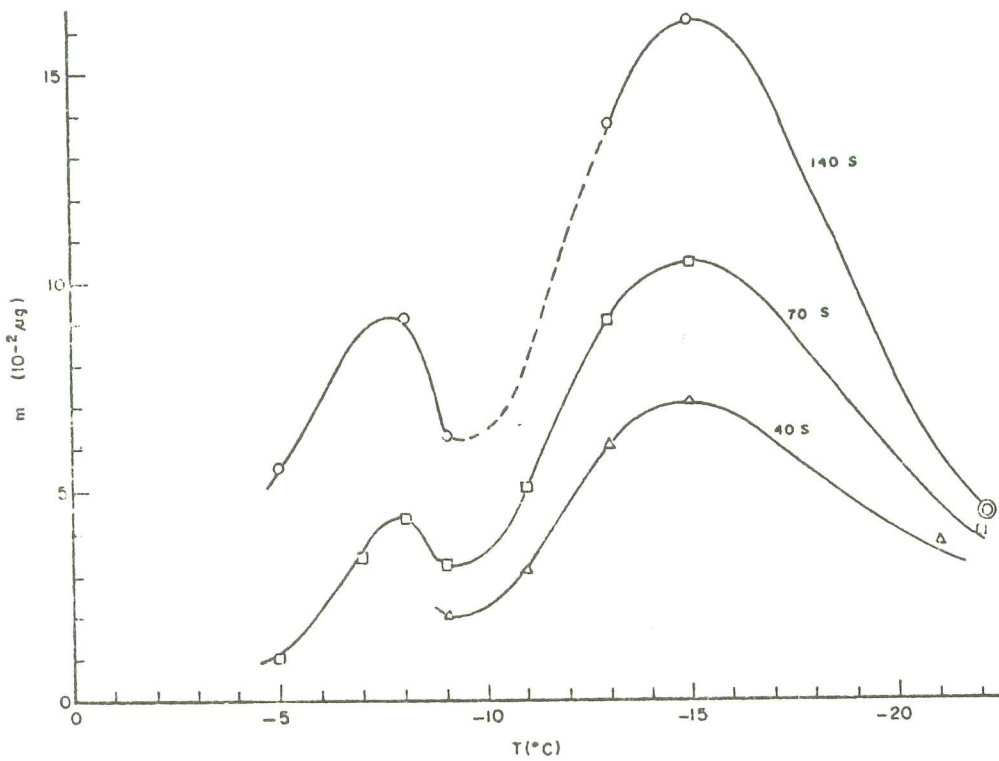


Fig. 3 Masa de cristales individuales de hielo en función de la temperatura T para diferentes períodos de crecimiento por difusión de vapor. La máxima a los -7°C corresponde a la formación de cristales de hielo en forma de "agujas", y la máxima a los -15°C corresponde a la formación de cristales de hielo en forma de "placas".

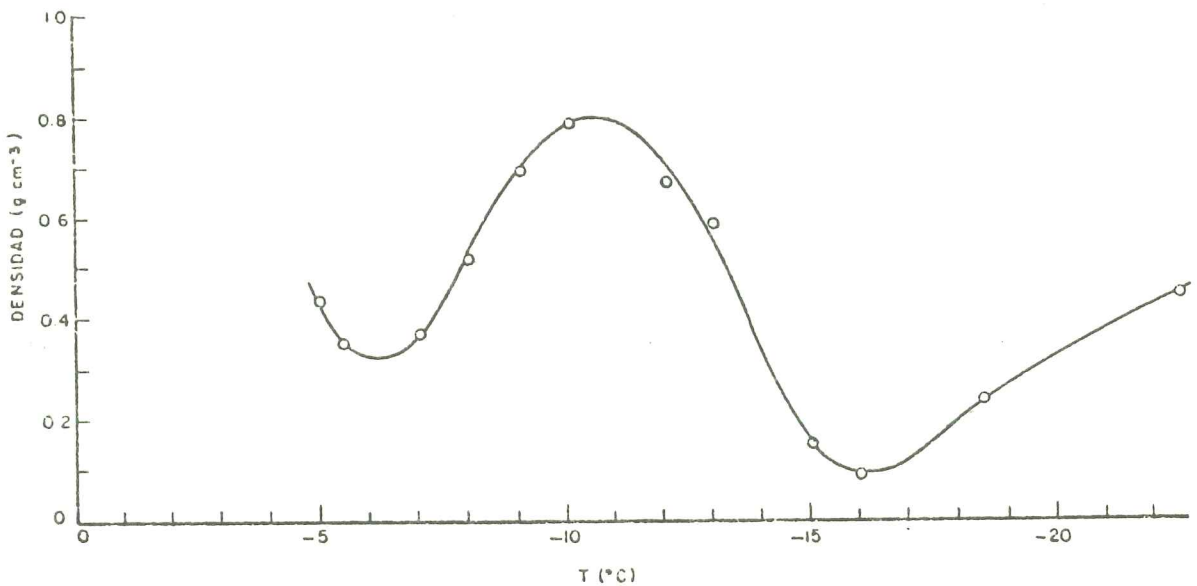


Fig. 4 Densidad aparente de cristales de hielo en función de la temperatura T . Se define la densidad aparente (según Fukuta) como la razón entre el peso de un cristal de hielo y el volumen de una placa hexagonal o columna que envuelve los bordes del cristal mismo.

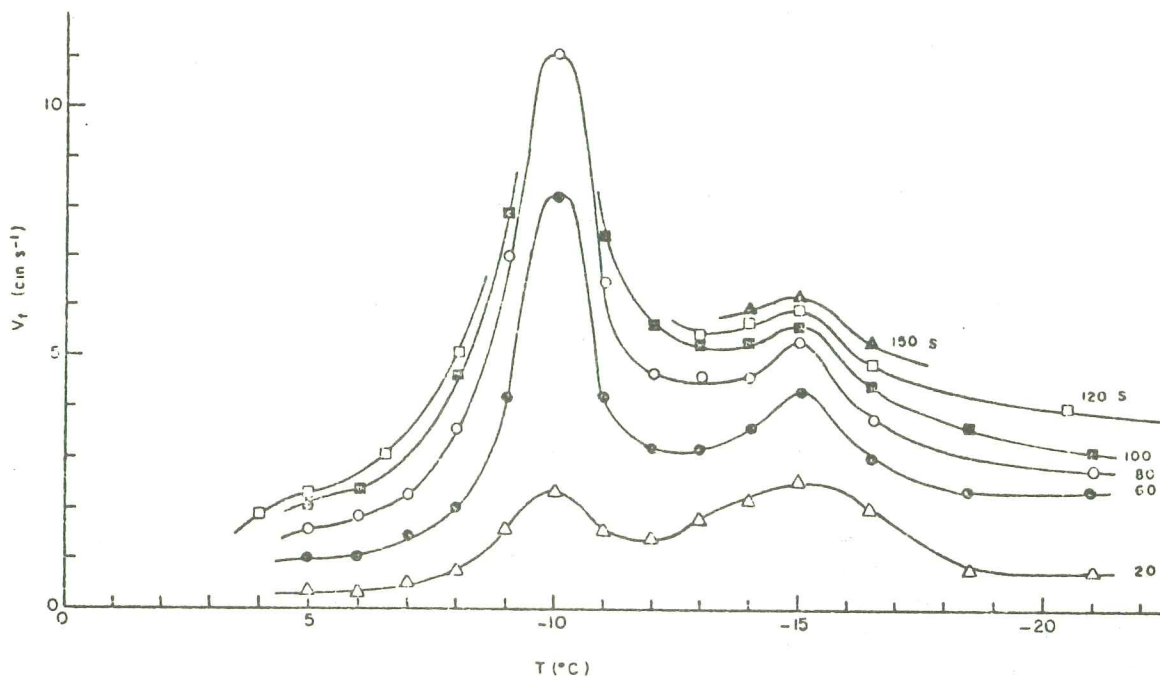


Fig. 5 Velocidad de caída V_f (de cristales individuales de hielo) graficada como función de la temperatura T , para diferentes períodos de crecimiento (en segundos).

hielo que caen con gran velocidad a temperaturas cercanas a -10°C ó por los cristales que crecen por difusión con eficiencia máxima a los -7°C y -15°C . Considerando estos máximos en el crecimiento y con el fin de no perder efecto de borde se estima un rango óptimo entre -5°C y -20°C para las condiciones térmicas de la capa superior de las nubes tratadas, siendo las mejores, cercanas a -10°C . Estas reglas son sólo aproximadas, requiriéndose de bastante experiencia para poder seleccionar nubes adecuadas para ser sembradas.

3. Resumen y Conclusiones.

Para que ocurra la condensación en la atmósfera, se necesitan "núcleos de condensación". En la atmósfera son abundantes las partículas pequeñas que pueden servir para tal efecto, y por eso la condensación se lleva a cabo con una humedad relativa cercana al 100%. Para estimular un crecimiento más rápido, se pueden introducir "núcleos higroscópicos" en la nube. Estos tienen afinidad con el agua y crecen más rápido por difusión del vapor que

los núcleos no-higroscópicos, iniciando el proceso de colisiones y coalescencia en un tiempo más corto, cuando la nube es todavía muy joven. Lo anterior permite aumentar el tiempo útil para que la nube precipite.

En el norte de Chile existen muchas nubes "cálidas". Entre otras, están los estrato-cúmulos que se forman a lo largo de la costa. Si bien, parece posible sembrar estas nubes con núcleos higroscópicos para mejorar su eficiencia en producir llovizna, no debe esperarse un desarrollo vertical de estas nubes por la permanente existencia de una inversión térmica que limita los movimientos verticales en la atmósfera. Esta inversión es el producto de la subsidencia del aire en el anticiclón subtropical y del efecto de las aguas frías de la corriente de Humboldt.

La segunda razón para no esperar un desarrollo vertical en las nubes estratiformes de la costa es el hecho de que se forman en el aire marítimo del Pacífico. Se supone que el aire marítimo ya tiene muchas partículas de sal, levantadas por el viento desde la superficie del océano, las cuales pueden servir como núcleos higroscópicos de condensación. Al añadir artificialmente más núcleos higroscópicos mediante una siembra, puede mejorarse un poco la eficiencia de la nube, pero no su desarrollo vertical.

Para que ocurra la congelación en la atmósfera, se necesitan "núcleos de congelación" (núcleos glaciogénicos), que por lo general son escasos. Por esto, es posible modificar una "nube fría" al sembrarla con núcleos de congelación que deben ser de alguna sustancia (como AgI o MA) que tenga un ordenamiento atómico (forma de cristal) parecido al ordenamiento atómico del hielo. Estos cristales crecen rápidamente a expensas de las gotitas subfundidas circundantes, en un proceso llamado "de Bergeron". Cuando tienen un tamaño suficientemente grande, caen, atrapando a otros cristales o gotitas subfundidas en un proceso llamado "aglomeración". El segundo proceso es mucho más rápido que el primero, y las partículas de hielo pueden crecer a un tamaño suficientemente grande como para escapar de la nube y alcanzar el suelo. Con el calor latente liberado, la nube puede ser estimulada en su crecimiento vertical, prolongando así su vida útil, e incrementando la cantidad de agua disponible para la precipitación. Sembrar una nube con "núcleos glaciogénicos" es una forma de mejorar su eficiencia en la producción de la precipitación.

En el norte de Chile y en ciertas épocas del año existen muchas nubes "frías" sobre la cordillera de los Andes. Estas nubes, (cúmulos, cumulonimbus o altoestratos) son aptas para su siembra con núcleos glaciogénicos siempre que contengan mucha agua subfundida. Aparentemente, existiría un déficit de núcleos glaciogénicos naturales en estas nubes, que puede ser solucionado al sembrarlas con núcleos glaciogénicos artificiales.

La modificación del tiempo a través de la siembra de nubes podría proporcionarnos una solución económica para el desarrollo de los recursos hídricos en las regiones de sequía. Este sistema sería aplicable en el Norte de Chile^(*), aprovechando la nubosidad de la alta cordillera. Las acciones para aumentar las precipitaciones deberían ir acompañadas de obras que permitan almacenar una eventual cantidad mayor de agua evitando que ésta se pierda en el mar.

(*) El Ministerio de Agricultura está desarrollando un Proyecto de Estimulación de Precipitaciones (PEP) en el cual se están aplicando los principios descritos para la modificación de la nubosidad "fría" en el norte de Chile.