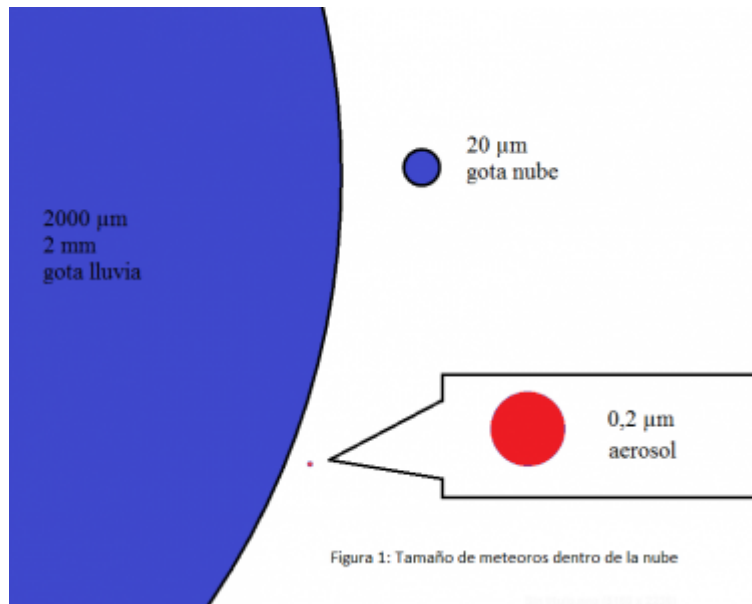




Sequia, Bombardeo de Nubes, Siembra de Nubes o Lluvia Artificial: Conceptos, Mitos y Realidades.

Política Internacional, 08/03/2012



Un Tema Más Viejo que el Hilo Negro!!

¿Déficit hídrico en el norte de Chile? el norte es seco con 80 mm. de lluvia anual promedio en la Serena, con o sin lluvia artificial continuará siendo seco!

En general, sobre zonas agrícolas no se requiere lluvia, lo que si se requiere es agua en los ríos y canales durante la temporada de riego, y para que esto ocurra, es necesario precipitaciones sólidas (nieve) en cordillera.

Durante las sequías de los últimos 20 años, 1995-1996, 1998-1999, 2007 y recientemente 2010-2011, me ha correspondido responder innumerables consultas sobre la utilización de la técnica denominada "sembrado de nubes", "bombardeo de nubes" o "lluvia artificial", para palear:

- 1) el déficit hídrico o sequía, generado por la falta de precipitaciones ocurridas durante la temporada invernal,
- 2) incrementar las precipitaciones en zonas que por climatología son secas, como La Serena (80 mm) o Copiapó (12mm) y
- 3) aumentar el volumen de embalses para riego como la Paloma o Hidroeléctricos como Rapel.

CONCEPTOS BASICOS DE FISICA DE NUBES:

La "siembra de nubes", está orientada a actuar sobre la microfísica de la nube, facilitando el proceso de formación de gotas en nubes cálidas o cristales de hielo en nubes frías, y tratar que estos meteoros alcancen tamaños mayores en menos tiempo, y con esto lograr velocidades de caída mayores que les permite precipitar (lluvia o nevada).

Para que una gota de agua pueda ser calificada como gota de lluvia, tiene que tener una velocidad de caída superior a 1 m/s lo que se logra con tamaños superiores a 1 milímetro. De lo contrario, la gota no precipita y se queda suspendida en la nube para formar niebla, neblina o camanchaca.

Para formar una nube, primero se requiere vapor de agua, que como todo gas está formado por moléculas y por lo tanto no

precipita o en palabras simples, no tiene velocidad de caída suficiente (no llueve).

El vapor de agua se concentra en las capas bajas de la atmósfera, principalmente sobre los océanos o grandes cuerpos de agua. Para lograr formar una nube, la que está constituida por pequeñas gotitas de agua (del orden 10 micrones), se requiere condensar el vapor de agua y formar agua líquida. Al igual como ocurre en el parabrisas del auto cuando se “empaña” por efecto del frío externo, para condensar el vapor de agua, la atmósfera recurre al enfriamiento del aire húmedo mediante un ascenso forzado que puede ser generado por un sistema frontal, un obstáculo físico como la cordillera o el calentamiento del suelo durante el verano (tormentas), esto es posible debido a que la temperatura del aire decrece con la altura a una razón media de 6,5°C por cada 1.000 metros.

La condensación se logra mediante un proceso denominado **nucleación heterogénea**, el cual se realiza en presencia de pequeñas partículas denominadas **núcleos de condensación** o **CCN** que tienen un tamaño de décimas de micrones (Figura 1), partículas que permiten concentrar alrededor de ellas moléculas de agua (higroscópica), dentro de estas partículas se encuentran los aerosoles naturales como la sal común o arcilla y los artificiales como es el yoduro de plata (I_{Ag}) o el hielo seco (CO₂) utilizados para el “sembrado de nubes”, mediante este proceso se logran formar gotas de agua con diámetros de 1 micrón, las que son aún muy pequeñas para precipitar.

El diámetro óptimo de la gotita de agua, resulta del equilibrio entre el efecto curvatura de las gotas (mayor evaporación que en una superficie plana) y las características químicas del CCN o soluto (menor evaporación que agua pura), efectos que se combinan en la **Ecuación de Köhler**.

Se requiere un segundo mecanismo para hacer crecer las gotas de agua en un orden de magnitud, este es la **difusión**. Básicamente en este mecanismo las moléculas de vapor de agua migran desde zonas con mayor concentración (sobre-saturadas) a zonas con menos moléculas (sub-saturadas). La difusión solo actúa alrededor de pequeñas partículas, donde el efecto de curvatura de las gotas es importante. Con este mecanismo las gotas pueden alcanzar un tamaño de 10 micrones, luego de alcanzar este tamaño el mecanismo de difusión deja de ser eficiente.

Mediante la **nucleación y difusión**, se pueden formar gotas del orden de 20 micrones, las que aún tienen velocidades pequeñas para precipitar y por tanto no generan lluvia, solo niebla o llovizna.

En nubes frías, con temperaturas de aproximadamente entre -5°C y -20°C, y donde se cuenta con agua en estado líquido, la presión de saturación del hielo es menor que la del agua líquida, por lo que el crecimiento de los cristales de hielo se realiza a expensas de la evaporación de las gotas de agua, en un proceso denominado **Wegener-Bergeron-Findeisen (WBF)**.

Para lograr formar gotas de lluvia con un tamaño del orden de los 2 milímetros que tengan velocidades de caída de aproximadamente 1 m/s, se requiere agrupar aproximadamente 1 millón de gotas en la nube, esto es posible mediante el mecanismo denominado **colisión y recolección**, donde gotas más grandes y que tienen velocidades mayores recolectan o “barren” las gotas más pequeñas creciendo a expensas de éstas (Figura 1).

Dentro de la nube la distribución estadística del radio de las gotas de agua, sigue aproximadamente la distribución de **Marshall-Palmer**.

Para que el mecanismo de **colisión y recolección** sea efectivo, se requieren nubes con espesores superiores a 1.000 metros, de lo contrario, no se logra formar gotas de un tamaño suficiente para precipitar. Es por esto, que no se produce lluvia en los **estratocúmulos costeros** de todo el norte chileno y solo se alcanza la categoría de niebla o camanchaca.

En lo expuesto anteriormente, aún hay preguntas en física de nubes sin respuestas, una de ellas es ¿cómo se logra formar una población de gotas heterogénea, sin la cual el mecanismo de recolección no es efectivo, a partir de una población homogénea?

TECNICAS UTILIZADAS EN EL BOMBARDEO DE NUBES:

La técnica más utilizada para el “sembrado de nubes” consiste en incorporar dentro de la nube algún **compuesto higroscópico** como yoduro de plata (Agl) o hielo seco (CO₂). Lo que permite actuar sobre la microfísica de nubes, “acelerando” el crecimiento de las pequeñas gotas de agua o cristales de hielo. Para que esto sea posible se requiere:

- 1) Vapor de agua, que no esta disponible en zonas secas, temporada seca (verano en Chile) o sequias (cada 4 o 5 años), definitivamente no se puede hacer llover en el desierto de Atacama!
- 2) Una nube (sistema frontal) de gran desarrollo vertical, la que muy probablemente de todas formas precipitaría. Es por esto que en Chile cuando se quieren mostrar éxitos de esta técnica se recurre a ejemplos de inicio de la temporada de lluvias (mayo o junio).
- 3) Se requiere algún compuesto higroscópico o núcleo de condensación que ayude en el crecimiento de las gotas de agua en la nube, usualmente:
 - a) Yoduro de Plata, el cual es caro y contaminante.
 - b) Hielo Seco (**CO₂**) más económico, pero es un gas **Efecto Invernadero** que todo el mundo esta tratando de reducir.

RESULTADOS:

En general, los resultados de la aplicación de la técnicas de “sembrado de nubes” son discutibles, mientras que las empresas dedicadas al “sembrado de nubes” habla de incrementos cercanos al 5% en la precipitación total e incluso llegan a mencionar 20%. Los pocos estudios existentes solo muestran valores de 0% a 3%, mientras los más escépticos, dentro de los cuales yo me encuentro, pensamos que incluso puede ocurrir una reducción en las precipitaciones totales, que de todas formas ocurrirían sin mediar sembrado alguno.

El gran problema está en poder demostrar que efectivamente, un sembrado de nubes genera un incremento en la lluvia de un sistema frontal, que de todas formas generaría precipitaciones, ya que la técnica de terreno contempla “sembrar” nubes existentes que están muy cerca de precipitar, las que son seleccionadas utilizando un radar meteorológico, la técnica no se puede aplicar con cielos despejados!.

En un contexto meteorológico, lo anterior resulta difícil de explicar, ya que las lluvias que afectan la zona central y norte de Chile, durante el invierno, son principalmente sistemas de mal tiempo que abarcan grandes extensiones territoriales y superan largamente los miles de kilómetros, pensar que la incorporación de algunas toneladas de sales pueda modificar uno de estos sistemas resulta muy difícil de creer y demostrar en contexto físico.

Para colocar lo anterior en números, permítame asumir el caso más favorable de una ganancia de un 5% en las precipitaciones, en el caso de las cuencas chilenas más beneficiadas con el “sembrado de nubes” se tendría que esperar durante un:

Año Normal.

Copiapó Llueve	12 mm +5% significaría un incremento	<1 mm al año.
Serena Llueve	80 mm, +5% significaría un incremento	4 mm al año.
San Felipe Llueve	235 mm, +5% significaría un incremento	12 mm al año.
Santiago Llueve	310 mm, +5% significaría un incremento	15 mm al año.
Curicó Llueve	780 mm, +5% significaría un incremento	25 mm al año.

Año Seco: (ejemplo durante la sequía de 1998)

Copiapó Llovió	4 mm, +5% significaría un incremento	<1 mm en el año.
Serena Llovió	20 mm, +5% significaría un incremento	1 mm en el año.
San Felipe Llovió	40 mm, +5% significaría un incremento	2 mm en el año.
Santiago Llovió	90 mm, +5% significaría un incremento	4 mm en el año.
Curicó Llovió	170 mm, +5% significaría un incremento	10 mm en el año.

De los ejemplos anteriores se desprende que:

- 1) Durante años normales, sólo se lograría un incremento en las precipitaciones de entre 1 y 25 mm, ninguno de estos casos se puede calificar de temporal o lluvia significativa, una lluvia débil en la zona central supera los 25mm en tan solo un día.
- 2) Ni siquiera durante años normales, el "bombardeo de nubes" permite asegurar una precipitación suficiente para modificar el déficit climatológico en las cuencas desde Curicó al Norte.
- 3) Durante años secos, los beneficios serían mínimos, tan solo unos milímetros anuales, el equivalente a una niebla o llovizna.
- 4) La aplicación de la técnica no cambiará la hidrología de la cuenca beneficiada, un año seco continuará siendo seco antes y después de aplicar la técnica.
- 5) No se puede aplicar la técnica en años lluviosos con una lluvia anual sobre 700mm en Santiago, y donde 35 mm de lluvia extra pueden hacer la diferencia entre una inundación o no.
- 6) La aplicación de la técnica durante los meses de primavera u otoño puede tener un fuerte impacto en la actividad agrícola como la fruticultura, ya que incluso precipitaciones de 1mm obligarían a la aplicación de productos como plaguicidas, incrementando los costos y disminuyendo la calidad de la producción.
- 7) Claramente hablar de "**lluvia artificial**" es una exageración, en el mejor de los casos correspondería a una "**llovizna artificial**".

Efectos Colaterales:

- 1) Indudablemente su alto costo, el bombardeo de nubes es una técnica que requiere instalaciones (radar), insumos (sales) y horas de vuelo costosas.
- 2) La oportunidad de las precipitaciones. Esta es una técnica que de ser efectiva no se puede aplicar cuando se requiere el agua que es durante la temporada de riego, simplemente porque no hay nubes de lluvia.
- 3) La Técnica no se puede aplicar en invierno de años secos, porque son escasas o no ocurren nubes adecuadas.
- 4) La técnica no se puede aplicar en el litoral del norte chico y grande de Chile, ya que dominan nubes de bajo espesor vertical como son los estratocúmulos costeros que son muy delgados para generar gotas de lluvia.
- 5) En la zona central y norte de Chile, la técnica solo se puede aplicar durante la aproximación de un sistema frontal o pre-frontal, generando la duda si la lluvia fue generada por la técnica o simplemente tenía que llover.
- 6) El Bombardeo de Nubes, tiene efectos ambientales negativos al requerir productos que son contaminantes para el medioambiente (sales o CO₂).
- 7) Eventual problema legal, de ser correcto lo que afirman las empresas dedicadas al bombardeo de nubes, que logran un 20% o más de sobre precipitación. Queda claro que de aplicarse la técnica de manera incorrecta, por ejemplo durante la llegada de un sistema frontal en Mayo o Junio, como ocurrió durante el invierno de 2002, con 200 mm de lluvia acumulada en Santiago. Un 20 % extra puede hacer la diferencia entre una crecida y una gran crecida en el Río Mapocho, generando daños a la infraestructura pública y privada, en este caso ¿quién será el responsable? ¿Se requerirán seguros por daños a terceros?

Otros Artículos: Chile Pronostico de la Sequia o Cronica de una Sequia Pronosticada

<http://www.reeditor.com/columna/2362/8/ciencia/tecnologia/deficit/o/sequiacuanta/agua/se/dispose/consumo/turismo/riego/minera>

a

Referencias:

Ahrens, C. D, Meteorology Today, 591 pag.

Cotton, W. y R. Anthes, Storm and Cloud Dynamics. 883 pag.

Holton, J., J. Curry y J. Pyle, Encyclopedia of Atmospheric Sciences, 2780 pag.

Houze, R. Cloud Dynamics, 573 pag.

Rogers, R. y M. Yau, Cloud Physics, 293 pag.

Warner, T., T., Desert Meteorology, 595 pag.

Young, K., Microphysical Processes in Clouds, 427 pag.

José Vergara, Ing. Ph.D.