

# Modelo Operacional de Siembra de Nubes

## **Introducción**

La siembra de nubes se ha llevado a cabo en algunas áreas montañosas de la Región de O'Higgins con el objetivo de aumentar la cantidad de nieve acumulada en el invierno. Una gran cantidad de la escorrentía anual en los arroyos y ríos de esta región se deriva de la fusión de la nieve, lo que explica el enfoque en la siembra de invierno. Estos suministros de agua se utilizan normalmente para la agricultura de regadío, las industrias o para los suministros de agua a la población. La siembra en la nube se realiza utilizando redes de generadores de yoduro de plata (Agl) operados manualmente o remotamente. Estos se encuentran ubicados al pie de las colinas, frente a las barreras montañosas, ya que el viento asciende por las montañas y transporta el material de la siembra hacia el interior de la nube. Los resultados de la siembra dependen de que las nubes sembradas tengan las características necesarias para incrementar su precipitación si se le adicionan núcleos glaciogénicos como el yoduro de plata. Aun cuando se escojan sitios donde frecuentemente hay nubes con características favorables para la siembra y se configuren los generadores en forma óptima, sigue siendo necesario determinar el momento adecuado para sembrar y por tanto, existe una dependencia de la capacidad del personal de escoger las nubes adecuadas. Es importante identificar las oportunidades de siembra o las situaciones donde no se debe sembrar para reducir los riesgos inadvertidos y minimizar el costo de las operaciones. Cada año, la precipitación en la región de O'Higgins ocurre en los meses invernales durante el paso de los frentes fríos sobre la región. Estos son el tipo de nubes que normalmente son sembradas en esta región.

## **Modelo operativo de siembra de nubes**

El modelo operativo de siembra de nubes es el conjunto de operaciones que permiten determinar el momento de activación de los generadores para realizar la siembra. Este establece como debe evaluarse el cumplimiento de los criterios meteorológicos determinados para la zona, utilizando las herramientas disponibles en tiempo real (Imágenes de satélites, datos de radio sondeo, salidas de modelos de pronóstico, etc.).

## 1.1 Criterios meteorológicos y su evaluación

Las condiciones necesarias para iniciar o continuar la siembra para la región de O'Higgins se obtuvieron a partir de los criterios que actualmente se utilizan en este proceso. Estos criterios se verificaron y adaptaron a las condiciones específicas de las nubes y la topografía del área de interés.

El meteorólogo del proyecto es responsable de pronosticar y verificar las condiciones de sembrado, y también de iniciar y terminar las operaciones. Es recomendable mantener archivados los registros que documentan las condiciones meteorológicas durante una operación para el posterior análisis de la siembra y sus resultados.

Las condiciones meteorológicas y las características que deben presentar las nubes para iniciar o continuar las operaciones de siembra de nubes en cualquier área de la región de O'Higgins son:

1. El área cubierta por la nubosidad (CC): El área cubierta debe exceder al menos el 50%.

La verificación se realiza mediante imágenes visibles o infrarrojas del satélite GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite). Si se observa desde el área de siembra, el cielo cubierto debe superar las 4 octas. En días previos a la ocurrencia del evento puede evaluarse este criterio a partir del pronóstico de la nubosidad brindado por el modelo regional WRF (Weather Research and Forecasting) o modelos globales como el GFS (Global Forecast System) y el ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts).

2. Temperatura del tope de las nubes ( $T_{tc}$ ): El sistema frontal deberá presentar nubes cuyos topos tengan temperaturas entre los  $-7.0$  y los  $-27.3^{\circ}$  C.

Aunque no es posible determinar la existencia de agua sobreenfriada en las nubes al momento de la siembra, es posible inferirla a partir de este criterio, ya que en la climatología de nubes realizada para la región, el

percentil 90 de las nubes que contenían suficiente agua sobreenfriada tenían toques con valores de temperatura en este rango. Es bueno señalar que aunque el yoduro de plata se activa a temperaturas tan altas como  $-4^{\circ}\text{C}$ , su activación es mucho más eficiente por debajo de los  $-8^{\circ}\text{C}$  por lo que podría reducirse el intervalo de toques a aquellos que se encuentren entre  $-8$  y  $-27^{\circ}\text{C}$ .

La verificación se realiza mediante imágenes de satélite infrarrojas (topes nubosos) de GOES (ver epígrafe 1.2). Además, es posible obtenerla a partir de las salidas del modelo de pronóstico cuando aún no se cuenta con observaciones directas de esta variable.

3. Altura de la base de las nubes ( $H_{bc}$ ): La altura máxima de la base de la nube debe ser de 2050 msnm (metros sobre el nivel del mar).

El criterio de altura de la base debe evaluarse para cada cuenca en dependencia de la altura de la topografía y la distancia al generador. La base de la nube debe estar por debajo de la cima de las montañas donde se colocan los generadores. Por otro lado, la distancia entre la base de la nube y el generador deberá permitir que la pluma alcance la nube y que la precipitación modificada caiga en el área de interés. Usualmente no se disponen de datos de altura de la nube en el lugar, por lo que el criterio que aquí damos se obtuvo estadísticamente a partir del sondeo de Santo Domingo cuando se cumplía con lo descrito anteriormente para los lugares con potencial dentro de la cuenca.

Cabe señalar que si se consideran sitios donde el generador está por debajo de 900 msnm y con poco potencial de siembra, el valor máximo de la altura de la base disminuye a 1780 msnm. Incluso esta condición se cumple para la mayoría de los sistemas frontales en Chile.

La verificación de estas condiciones se puede obtener a partir de la altura de la base de la nube estimada por el radiosondeo de Santo Domingo, de observaciones visuales y/o informes de condiciones de la nube por el meteorólogo del proyecto, otro personal del proyecto ubicados en

cualquiera de las áreas del proyecto, o enlaces de Internet a cámaras web con vistas de áreas objetivo.

4. Altura de la isoterma  $-5^{\circ}\text{C}$  ( $H_{-5\text{C}}$ ): La temperatura en el nivel de 700mb debe ser menor a  $-8^{\circ}\text{C}$ .

Para aumentar la probabilidad de formación de cristales de hielo a partir de los aerosoles de la siembra de AgI desde los generadores en tierra, la temperatura cerca del nivel superior de la montaña debería ser de  $-5^{\circ}\text{C}$  o más fría, según lo verificado por las estaciones meteorológicas o los sondeos de aire superiores. Las operaciones pueden iniciarse a una temperatura mayor de  $-4^{\circ}\text{C}$ , siempre que se pronostique que el umbral de  $-5^{\circ}\text{C}$  se alcanzará en las próximas 3 horas. En caso de no contar con mediciones insitu, puede utilizarse la temperatura a 700mb del sondeo que se lanza diariamente en Santo Domingo ( $33.7^{\circ}\text{S}$ ,  $71.6^{\circ}\text{W}$ ) a las 0 y 12 UTC.

5. Altura de la isoterma  $0^{\circ}\text{C}$  ( $H_{0\text{C}}$ ): La altura de la isoterma  $0^{\circ}\text{C}$  debe ser inferior a 2400 msnm.

Es recomendable que la isoterma  $0^{\circ}\text{C}$  se encuentre a alturas inferiores a la línea de nieve en el área de interés en el momento de la siembra, pues en caso contrario la precipitación llegará en forma líquida y contribuirá al derretimiento de la nieve acumulada en eventos anteriores. Por tanto, el criterio para la altura de la isoterma  $0^{\circ}\text{C}$  debe ajustarse según la altura de la nieve acumulada en tormentas previas.

La verificación se realiza utilizando observaciones visuales de la altura de la línea de nieve por el meteorólogo del proyecto, otro personal ubicado en cualquiera de las áreas del proyecto, o mediciones de estaciones de superficie.

6. Dirección del viento ( $WD_{700}$ ): La dirección del viento predominante a 700 mb, debe estar entre los  $270\text{-}360^{\circ}$  (debe tener una componente NO).

Esto se verificará con datos del radio sondeo de Santo Domingo. También puede ser utilizado el viento pronosticado a 700mb a partir de los modelos meteorológicos.

Este criterio es un indicador de que el viento conduce al transporte de material de siembra hacia las áreas objetivo y depende de la ubicación de los quemadores.

Si se cuenta con estaciones meteorológicas de montaña en los sitios de siembra, la dirección del viento favorable puede ser distinta a las establecidas por este criterio. En tales casos, las direcciones de viento favorables para el ascenso son aquellas con componente perpendicular a la ladera de la montaña donde se ubica el quemador de Agl.

7. Velocidad del viento en 800mb (WF<sub>800</sub>): Las velocidades del viento en o cerca de 800 mb no deben exceder los 30 m s<sup>-1</sup> (60kt) para asegurar que haya suficiente tiempo disponible para el crecimiento y la precipitación de cristales de hielo sembrados en el área objetivo.

Las estaciones meteorológicas en áreas superiores de la montaña y el sondeo de aire superior de Santo Domingo proporcionarán la verificación de la velocidad del viento. Este criterio debe verificarse una vez que se cumpla con el criterio WD<sub>700</sub>.

Las operaciones también pueden iniciarse en base a un pronóstico de 0-3 h de estas condiciones existentes en un área operativa ya que todos los criterios anteriores pueden ser evaluados a partir de la salida del modelo de pronóstico del tiempo.

Los criterios de suspensión de siembra siempre anularán los criterios de operaciones de siembra.

Generalmente, se espera que ocurran suspensiones de siembra debido a una o más de las siguientes condiciones:

- A) Pronóstico de una tormenta invernal cálida (nivel de congelación > 2500m), emitido por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), con la posibilidad de

lluvia considerable en las elevaciones más altas que podría conducir a inundaciones locales.

- B) Cuando el meteorólogo del proyecto determina que pueden existir posibles condiciones de inundación o precipitaciones intensas (más de 50mm en 24h pronosticado por los modelos) en o alrededor de cualquiera de las áreas del proyecto.
- C) Si la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública (ONEMI) ha emitido cualquiera de las siguientes alertas o advertencias en o alrededor de cualquiera de las áreas del proyecto :
  - a. Inundaciones o anegamientos
  - b. Sistema frontal con precipitaciones intensas.

#### 1.1.2 Identificación de las nubes en el satélite.

Existen numerosas publicaciones en Internet que muestran los productos del satélite meteorológico GOES en el área de América del Sur y el Pacífico Este. En este informe usaremos como referencia los productos de libre acceso, publicados por la Dirección Meteorológica de Chile en su página web: <http://www.meteochile.cl/>.

Uno de los canales más usado en el pronóstico operativo es el **Canal 11: IR, Fase de los topos nubosos**. Esta imagen nos permite estimar la temperatura de los topos de las nubes. Nuestro parámetro temperatura del tope indica que debe situarse en el rango entre  $-7.0$  y  $-27.3^{\circ}\text{C}$ . En este producto pueden verse claramente nubes bien blancas con temperaturas entre  $-10$  y  $-20^{\circ}\text{C}$ , así como nubes con distintos tonos de celestes cuyos topos están entre  $-20$  y  $-30^{\circ}\text{C}$ . Ambos conjuntos de nubes cumplen con el criterio de altura del tope para la siembra. Esta temperatura también puede verse en otra escala en el **Producto 9. SPC Visible y Tope de Nube Fría**. Aquí se resaltan los topos fríos donde nubes con colores celestes ya alcanzan los  $-30^{\circ}\text{C}$  de temperatura en el tope.

Nubes más altas ya contienen suficiente contenido de hielo para hacer eficiente el proceso de precipitación y no necesitan ser sembradas. Esto puede verificarse con el **Producto 7: RGB Hielo Nieve**, donde nubes entre blanco naranja y rosado claro están compuestas por agua o agua y poco contenido de hielo, mientras que nubes con altos contenidos de hielo se ven rosado fuerte.

## 1.2 Siembra operativa

Durante el período de la siembra, el meteorólogo del proyecto debe revisar diariamente la información meteorológica disponible para identificar los posibles días de operaciones. La información en tiempo real se adquiere continuamente a través de Internet, lo que permite tomar decisiones sobre si se debe sembrar, y donde y cuando hacerlo. La información adquirida en línea incluye observaciones meteorológicas de superficie, observaciones de radiosondas, cartas meteorológicas, imágenes de satélites meteorológicos, pronósticos de la zona realizados por el Servicio Meteorológico Nacional, así como otros numerosos productos. El meteorólogo a cargo de las operaciones utiliza esta información para tomar decisiones informadas sobre la siembra de nubes, así como documentar la información meteorológica y las actividades de siembra para futuras referencias. Los criterios de siembra de la sección 1.1 constituyen una guía para la identificación de las oportunidades de siembra.

Las Figuras 1.2.1 – 1.2.2 proporcionan ejemplos de los tipos de Información meteorológica disponible en línea que pueden ser utilizadas en la toma de decisiones para la siembra. En la figura 1.2.1 se observa el área cubierta por nubes con topes fríos. Las nubes más altas poseen topes tan fríos (en verde y amarillo) que en ellas debe haberse iniciado la formación de hielo y por tanto deben poseer suficientes núcleos de congelación. Sin embargo, las nubes en color celeste poseen topes más cálidos. El sondeo de la figura 1.2.2 para este día, confirma que la temperatura de los topes están en el rango entre -7 y -27.3°C, lo que indica la posible presencia de agua sobreenfriada. Además, el sondeo muestra una temperatura en 700 mb cercana a -5°C, con gran saturación de humedad en la parte baja y media (la temperatura está muy cerca de la

temperatura de rocío). La isoterma 0°C está a 1500m aproximadamente y por último, los vientos son del noroeste en los niveles medio y superior.

Se recomienda que la siembra se inicie en un momento cercano a la llegada de las nubes objetivo pues el yoduro de plata es fotosensible, osea, que sólo se mantiene activo si está dentro de la nube o en ausencia de radiación solar. Durante la noche, la siembra puede iniciarse unas horas antes si se desea lograr un efecto de acumulación de los núcleos en el aire ya que estos se mantienen activados por varias horas. Sin embargo, la presencia de los vientos prefrontales contribuirá a la dispersión del material glaciogénico fuera del área objetivo.

Debe existir una política permanente de operar dentro de las pautas adoptadas para garantizar la seguridad al público. En consecuencia, es importante tener en cuenta los criterios para la suspensión de las operaciones de siembra.

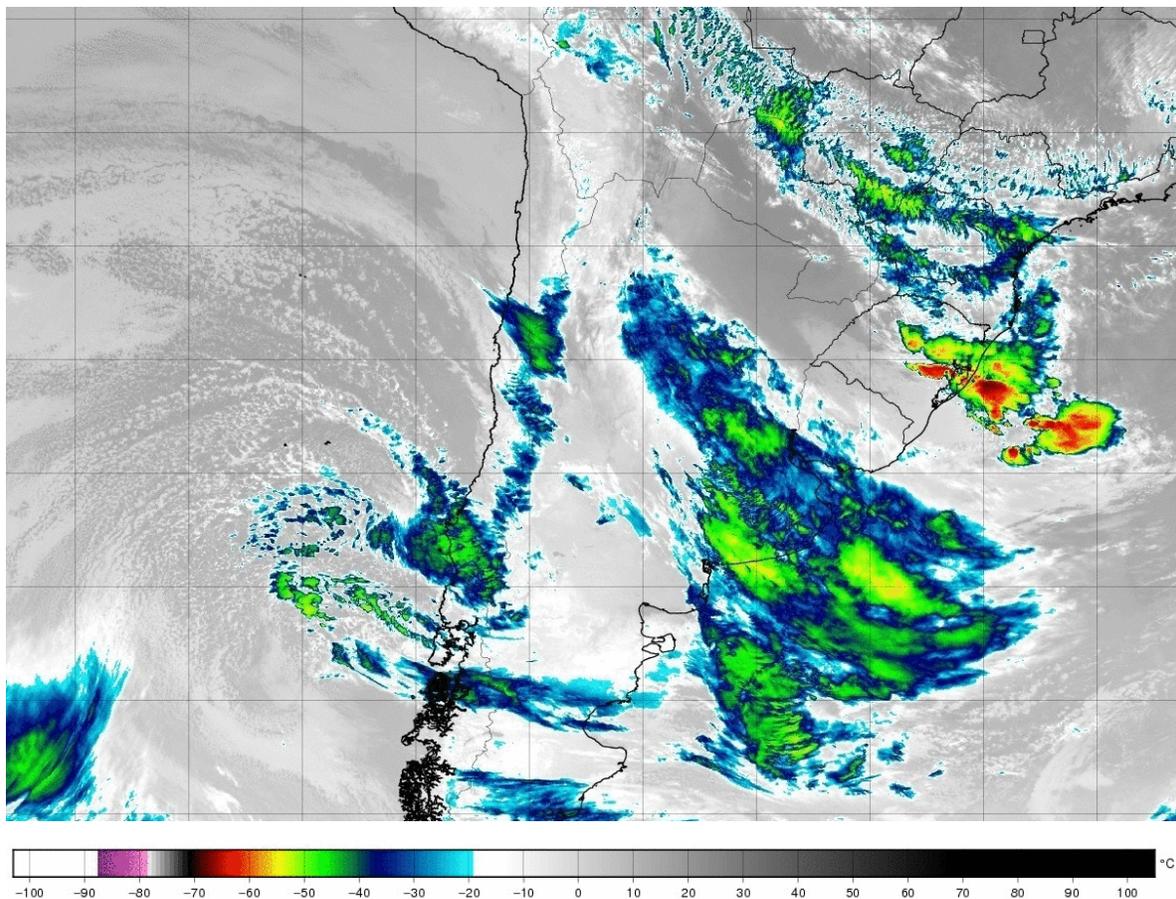


Figura 1.2.1: Imagen satelital Topes nubosos del 10 de junio de 2018.

**85586 SCSN Santo Domingo**

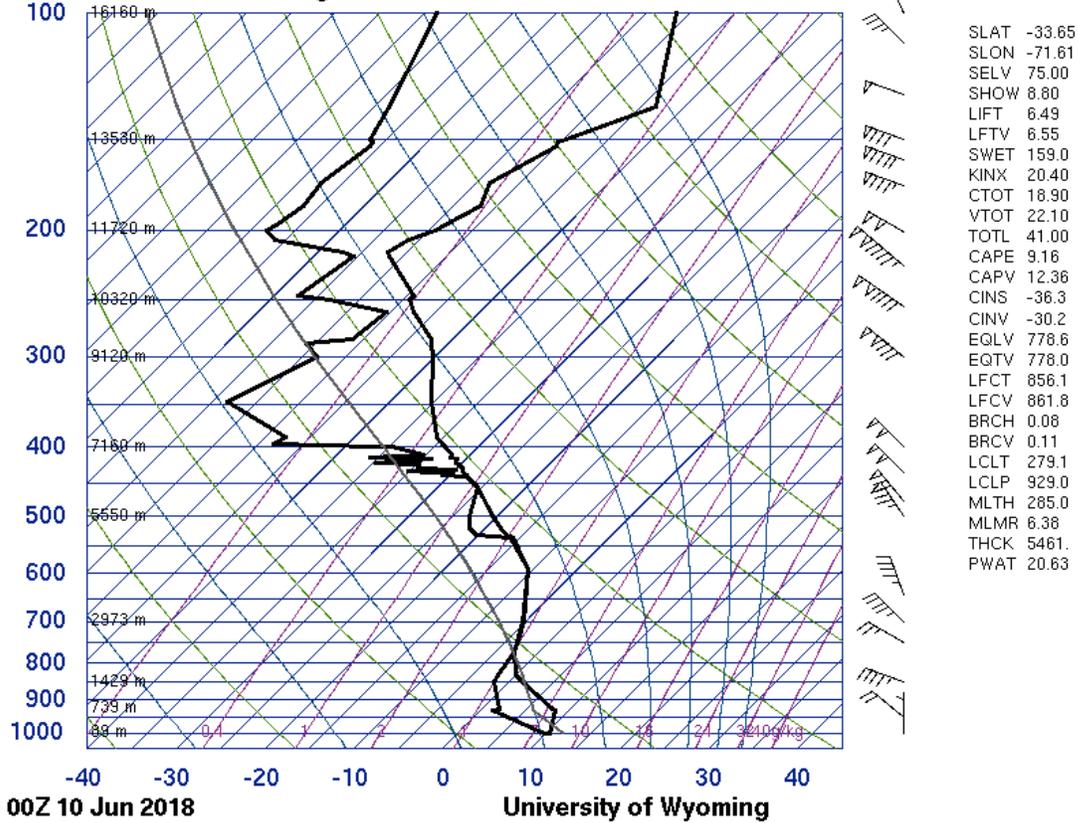


Figura 1.2.2: Sondeo de aire superior (observado por un globo meteorológico) sobre Santo Domingo el 10 de junio de 2018. (La línea negra derecha representa la temperatura y la línea negra izquierda es el punto de rocío. Las líneas azules son niveles de presión en milibares, Horizontal y temperatura en grados C, diagonal. Barbas de viento a la derecha Mostrar la velocidad del viento y la dirección en varios niveles.