



**FACULTAD DE CIENCIAS**  
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGÍA  
CARRERA DE METEOROLOGÍA

# Verificación del efecto del programa siembra terrestre de nubes en la cuenca del río Cachapoal utilizando datos fluviométricos

Tesis para optar al título profesional de Meteorólogo

Loreto Andrea Ubilla Castillo

Profesora Guía: Ph.D. Diana Pozo Labrada

Valparaíso, Chile  
2017

## **Dedicatoria**

A mi abuela Carmen, mi mamá Marina y a mi hermana Carmen Gloria.

## **Agradecimiento**

Agradezco de manera especial a la profesora guía, Dra. Diana Pozo por aceptarme como alumna tesista, por su paciencia y comprensión. Sus comentarios y sugerencias a través de este tiempo fueron fundamentales para que esta etapa llegase finalmente a su conclusión.

A la directora de la carrera de Meteorología de la Universidad de Valparaíso, Dra. Ana María Córdova por las oportunidades brindadas, por su tiempo compartido, dedicación en la corrección y por sus consejos que enriquecieron el desarrollo de esta tesis.

Al físico cubano, Sr. Guillermo Puente por el apoyo profesional y personal que fueron esenciales para llevar a cabo los objetivos de este trabajo. Por sus ejemplos de perseverancia y constancia que recordare por siempre.

Quiero agradecer al Sr. Miguel Martínez por la confianza, apoyo entregado a través de todos estos años y por otorgarme el acceso a la información requerida para este estudio. Al Sr. Robert Hilliard de la Junta de Vigilancia del río Cachapoal Primera Sección por su amable y cariñosa disposición, además, por su ayuda en la obtención de los datos meteorológicos de cordillera.

Finalmente, al Sr. Cesar Sandoval, por su colaboración en el planteamiento de este trabajo.

## Índice

Resumen .....	7
1. Introducción .....	9
1.2 Hipótesis .....	12
1.3 Objetivos.....	12
2. Marco teórico.....	13
2.1 Microfísica de nubes.....	13
2.2 Siembra de nubes .....	18
2.3 Régimen de precipitación e hidrología .....	25
3. Metodología.....	28
3.1 Delimitación geográfica .....	28
3.2 Delimitación temporal .....	30
3.3 Fuentes de datos .....	30
3.4 Metodología .....	32
4. Resultados .....	39
4.1 Determinación de los días que existían condiciones meteorológicas para la siembra terrestre.....	39
4.2 Determinación del número de días que hubo siembra terrestre de nubes con y sin condiciones meteorológicas.....	47
4.3 Análisis pluviométrico .....	58
4.4 Análisis fluviométrico .....	72
5. Discusión y conclusiones .....	82
6. Referencias .....	89
7. Anexo 1: Índices estadísticos.....	94

## Índice de figuras

Figura 3. 1 Red primaria de generadores terrestres de yoduro de plata, estaciones pluviométricas y pluviométricas utilizados en el presente estudio.....	29
Figura 3. 2 Fotografías de dos equipos generadores terrestres de yoduro de plata. A la derecha estación Chapa Verde y a la izquierda la estación Bocatoma Pangal, ambas ubicadas en la cuenca río Cachapoal, Chile.....	30
Figura 3. 3 Interpolación lineal. Línea roja representa recta que pasan por los puntos $(x_1, y_1)$ y $(x_2, y_2)$ .....	33
Figura 3. 4 Recta de regresión estimada para un modelo lineal simple. ....	38
Figura 4. 1 Correlaciones entre la altura de la base de las nubes observada frente a la estimada utilizando datos de superficie del radiosonda Santo Domingo a las 00Z entre los años 2009 a 2012. ....	40
Figura 4. 2 Correlaciones entre la altura de la base de las nubes observada frente a la estimada utilizando datos de superficie del radiosonda Santo Domingo a las 12Z entre los años 2009 a 2012. ....	40
Figura 4. 3 Frecuencia de la altura de la isoterma 0 °C (msnm) registrada en la estación de radiosonda de Santo Domingo desde el mes de abril a septiembre entre los años 2009 a 2012 a las 00Z (izquierda) y 12Z (derecha). ....	42
Figura 4. 4 Frecuencia de la altura de la isoterma 0 °C menor o igual y mayor a los 2500 (msnm) desde el mes de abril a septiembre entre los años 2009 a 2012 a las 00Z (izquierda) y 12Z (derecha). ....	43
Figura 4. 5 Altura de la base de la nube (ABN) (msns) estimada respecto a la estación de Maitenes (1055 msnm) para los períodos nocturnos (a) y diurnos (b) donde la altura de la isoterma 0 °C fue menor o igual a los 2500 (msnm). ....	44
Figura 4. 6 Variación de la dirección del viento medio a la altura de la base de la nube en los casos donde la altura de la isoterma 0 °C y altura de la base de la nube fueron menor o igual a 2500 (msnm). ....	45
Figura 4. 7 Imagen satelital infrarroja del satélite del GOES-13 del día 28 de junio de 2009 a las 00Z (20:00 Hora local).....	46
Figura 4. 8 Número de días con condiciones meteorológicas (DCC) versus día con equipos de siembra terrestre activado (DA) entre los años 2009 a 2012 para a) período nocturno y b) período diurno. ....	48
Figura 4. 9 Box-plot de las alturas de las isotermas 0 °C, -5 °C y su residuo durante los días de siembra con condiciones. ....	50
Figura 4. 10 Distribución espacial de la dirección del viento medio a la altura de la base de las nube estimada durante (a) activación diurna del 6 de junio 2010 entre las 12Z-00Z (b) activación nocturna del 5 de agosto 2011 entre las 00Z-12Z.....	52
Figura 4. 11 Número de días que no cumplieron con las cuatros condiciones meteorológicas previstas y hubo equipos de siembra terrestre activado (DA) por periodo nocturno y diurno entre los años 2009 a 2012.....	53
Figura 4. 12 Box-plot de las alturas de las isotermas 0 °C, -5 °C y su residuo durante los días de siembra. ....	55
Figura 4. 13 Distribución espacial de la dirección del viento medio a la altura de la base de las nube estimada durante (a) activación nocturna del 6 de mayo 2010 entre las 00 Z-12 Z (b) activación nocturna del 16 de junio 2010 entre las 00Z-12Z.....	57
Figura 4. 14 Precipitación anual y variación respecto al promedio climatológico para el período 1979 a 2016 en la estación de Rancagua en los gráficos a) y b) respectivamente. ....	59
Figura 4. 15 Precipitación anual para el período 2009 a 2012 en la estación de Rancagua y en las cuatro estaciones meteorológicas de superficie utilizadas en este estudio..	60

Figura 4. 16 Frecuencias de días con precipitación líquida a partir de las series diarias entre 2009 a 2012. ....	62
Figura 4. 17 Precipitación líquida en los meses invernales (barra gris claro) y anuales (barra gris oscuro) en el período 2009 a 2012. La línea continua y puntos indican el porcentaje que represento la precipitación de invierno sobre el total anual para cada estación.....	63
Figura 4. 18 Precipitación líquida en meses invernales (barra) y promedio diario (triángulos) en el período 2009 a 2012 para cada estación meteorológica. ....	64
Figura 4. 19 Precipitación acumulada en el día siembra (+1 día) y la variación porcentual de la precipitación acumulada en 24 horas respecto al promedio diario en cada período invernal.....	67
Figura 4. 20 Precipitación acumulada en el día siembra (+1 día) y la variación porcentual de la precipitación acumulada en 24 horas respecto al promedio diario en cada período invernal.....	69
Figura 4. 21 Precipitación acumulada en el día con condiciones meteorológicas y sin equipos de siembra terrestre activados y la variación porcentual de la precipitación acumulada en 24 horas respecto al promedio diario en cada período invernal. ....	71
Figura 4. 22 Caudal medio mensual durante el período de enero 1989 a febrero 2013. .	73
Figura 4. 23 Anomalía fluviométrica en temporada de deshielo respecto al promedio histórico de 1989 a 2013. ....	75
Figura 4. 24 Correlación entre estaciones fluviométricas destino y control: río Cachapoal En Pte. Termas versus río Maipo en La Obra y Las Hualtatas .....	76
Figura 4. 25 Correlación entre estaciones fluviométricas destino y control: río Pangal en Pangal Termas versus río Maipo en La Obra y Las Hualtatas .....	76
Figura 4. 26 Distribución de los datos de las estaciones fluviométricas destino y control (columna izquierda) y distribución datos normalizados (columna derecha) .....	77
Figura 5. 1 Precipitación estival acumulada en las temporadas deshielo (octubre a febrero) para la estación control Embalse El Yeso y estación destino río Pangal en Pangal entre los años 2009 a 2013.....	85
Figura 5. 2 Variación fluviométrica promedio por temporada de deshielo (octubre a febrero) entre los años 2009 a 2013.....	86

## Índice de tablas

Tabla 3. 1 Nombre y altura de la red primaria de generadores terrestres de yoduro de plata. ....	30
Tabla 3.2 Períodos de ejecución de las campañas operativas del programa siembra terrestre de nubes entre los años 2009 a 2012. ....	31
Tabla 3. 3 Nombre y localización de las estaciones meteorológicas. ....	31
Tabla 3. 4 Número de datos de radiosonda disponible durante el período de estudio. ....	31
Tabla 3. 5 Nombre y localización de las estaciones fluviométricas. ....	32
Tabla 4. 1 Parámetros estadísticos de la estimación de altura de la base de la nube a partir de la temperatura del aire a nivel de superficie y la temperatura del punto de rocío medida y estimada entre los años 2009 a 2012.....	41
Tabla 4. 2 Parámetros estadísticos de la estimación de altura de la base de la nube a partir de la temperatura del aire a nivel de superficie y la humedad relativa entre los años 2009 a 2012. ....	41
Tabla 4. 3 Número de casos que cumplieron la condición 1 (C <sub>1</sub> ) una altura de la isoterma 0°C menor o igual a 2500 (msnm), condición 2 (C <sub>2</sub> ) una altura de la base de las nube menor o igual a 2500 (msnm), condición 3 (C <sub>3</sub> ) dirección del viento medio con una	

componente del oeste, condición 4 (C <sub>4</sub> ) nubosidad en la cuenca destino y el número de casos que cumplieron con todos los filtros (C <sub>1</sub> a C <sub>4</sub> ). .....	47
Tabla 4. 4 Días de siembra que se ajustaron a las cuatro condicionantes de activación por período (P) nocturno (N) y diurno (D). En la tabla a) activaciones nocturna.....	48
Tabla 4. 5 Distancia (msns) entre la altura de la base de la nube estimada promedio y la altura del equipo de siembra terrestre. En la tabla superior se presenta a) activaciones nocturnas, e inferior b) activaciones diurnas.....	51
Tabla 4. 6 Características de los eventos de activación por período nocturno (N) y diurno (D) que cumplieron (C) y no cumplieron (NC) con la condición 1 (C <sub>1</sub> ) una altura de la isoterma 0°C menor o igual a 2500 (msnm), condición 2 (C <sub>2</sub> ) una altura de la base de la nube menor o igual a 2500 (msnm), condición 3 (C <sub>3</sub> ) dirección del viento medio con una componente del oeste y condición 4 (C <sub>4</sub> ) nubosidad en la cuenca destino...	54
Tabla 4. 7 Distancia (msns) entre ABN estimada promedio y al altura del equipo de siembra terrestres. En la tabla superior a) activaciones nocturnas e inferior b) activaciones diurnas. ....	56
Tabla 4. 8 Correlación de precipitaciones mensual entre las estaciones meteorológicas de superficie utilizadas en este estudio entre el año 2009 a 2012. ....	61
Tabla 4. 9 Características de la precipitación a 48 y 24 (h) en los días con condiciones meteorológicas y equipos de siembra terrestre activados. ....	66
Tabla 4. 10 Características de la precipitación a 48 y 24 (h) en los días sin condiciones meteorológicas y equipos de siembra terrestre activados. ....	68
Tabla 4. 11 Características de la precipitación en los días con condiciones meteorológicas y sin equipos de siembra terrestre activados. ....	70
Tabla 4. 12 Caudal medio por temporada de deshielo (octubre a febrero) bajo los dos escenarios, con (y sin) aplicación del programa de siembra terrestre de nubes entre 1989 a 2013.....	74
Tabla 4. 13 Coeficiente de correlación normalizada para las estaciones destino y control. ....	76
Tabla 4. 14 Variación fluviométrica por temporada de deshielo de la estación destino río Cachapoal en Pte. Termas en relación a la estación control río Maipo en La Obra. ...	78
Tabla 4. 15 Variación fluviométrica por temporada de deshielo de la estación destino río Pangal en Pangal en relación a la estación control río Maipo en La Obra. ....	79
Tabla 4. 16 Resultados de la variación fluviométrica mensual y por temporada del río Cachapoal en Pte. Termas versus río Maipo en Las Hualtatas.....	80
Tabla 4. 17 Resultados de la variación fluviométrica mensual y por temporada del río Pangal en Pangal versus río Maipo en Las Hualtatas. ....	82
Tabla 5. 1 Número de (i) Días con condiciones meteorológicas y equipos de siembra terrestre activados y (ii) Días sin condiciones meteorológicas y equipos de siembra terrestre activados. ....	83
Tabla 5. 2 Porcentajes de variación obtenidos utilizando la metodología de evaluación de estudios previos.....	84

## Resumen

Un programa de siembra terrestre de nubes se ha llevado a cabo en la cuenca del río Cachapoal, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, durante doce temporadas invernales entre los años 2000 a 2003 y 2008 a 2017. Basado en el modelo de la siembra glaciogénica estática desde el año 2008 el diseño del programa tuvo como objetivo aumentar la precipitación sólida, y por ende, la capa nival invernal que contribuirá posteriormente al caudal de deshielo de la cuenca. La introducción del producto glaciogénico en las nubes se realiza desde una red de generadores terrestres de yoduro de plata (AgI) que utilizan las corrientes ascendentes de la atmósfera propiciadas por la orografía para hacer llegar el producto glaciogénico a la altura donde este se active como núcleos de hielo. El AgI deberá ser dispersado al oeste de la barrera montañosa en presencia de nubosidad que contenga agua líquida sobreenfriada. La técnica de evaluación estadística que se ha aplicado para proporcionar estimaciones de los efectos del programa ha sido la de regresión histórica utilizando datos fluviométricos medios mensuales de la cuenca del río Cachapoal (destino) en la estación Puente Termas versus la cuenca del río Maipo (control) en la estación La Obra. El presente trabajo, se focalizó en verificar si esta técnica permite determinar el efecto de la siembra terrestre de nubes del programa desarrollado en la cuenca del río Cachapoal entre los años 2009 a 2012 utilizando datos fluviométricos históricos. En el análisis primario se utilizó la anomalía diaria de precipitación por período invernal para los eventos con (sin) condiciones meteorológicas y (sin) equipo activado. El objetivo de realizar esta clasificación, basado en cuatro parámetros propios de inicio de la operación de la red, fue evitar realizar una estimación del efecto global de la siembra a partir de la precipitación total invernal. Como resultado se obtuvo en general incrementos (disminuciones) de la variable en cada una de las clasificaciones sin presentar una tendencia marcada. En los días con condiciones y (sin) generador activado no aumento la precipitación líquida respecto a la media luego que se sembró. En ambos, hubo mayor número de casos con una variación negativa de la variable. En los días sin condiciones meteorológicas y equipos de siembra terrestre activados hubo un aumento en la precipitación líquida respecto a la media. Como análisis secundario se replicó el método de verificación estadístico de regresión histórica con una modificación en el tratamiento de la fluviometría para validar los porcentajes de variación obtenidos en estudios previos. Se incluyeron en el análisis dos ríos de cabeceras ubicados sobre los 1500 (msnm)<sup>1</sup> en las cuencas destino y control que presentan un menor uso

---

<sup>1</sup> Metros sobre el nivel del mar (msnm)

consuntivo del recurso hídrico. En general, el caudal de deshielo se vio incrementado (disminuido) en los meses estivales pero el origen de esta condición fue indeterminado debido a que hubo eventos de precipitación de diversas intensidades en la cuenca del río Cachapoal y del río Maipo durante el mismo período de tiempo. La variación obtenida pudo ser producto del deshielo, la precipitación estival tanto como de las condiciones de explotación, uso, manejo y ubicación de los cuatro ríos analizados. De acuerdo al análisis realizado no fue posible verificar el efecto del programa siembra terrestre de nubes desarrollado en la cuenca del río Cachapoal entre los años 2009 a 2012 utilizando datos fluviométricos históricos.

## 1. Introducción

Desde tiempos remotos, el ser humano ha intentado con manipular el tiempo y el clima a su favor, a través de prácticas infructuosas. En la década del cuarenta, este deseo empieza a adquirir solidez con los descubrimientos de Schaefer (1946) y Vonnegut (1947) al hallar que gotas de agua sobreenfriada podían ser convertidas a cristales de hielo con la aplicación de agentes glaciogénicos como el hielo seco o con núcleos artificiales de congelación como el yoduro de plata (Xue et al., 2013). A setenta años de este hecho, importantes instituciones como The American Meteorological Society (AMS), Weather Modification Association (WMA) y la World Meteorological Organization (WMO), entre otros, han realizado diversas investigaciones al respecto. Esta última, el año 2015, declaró que existen pruebas considerables de que la microestructura de las nubes puede ser modificada mediante la siembra con materiales glaciogénicos o higroscópicos en condiciones apropiadas (WMO, 2015). Las concentraciones naturales de los núcleos de hielo son típicamente bajas en la atmósfera, lo cual permite la existencia de agua sobreenfriada, y por consiguiente la introducción de núcleos adicionales convierte las pequeñas gotas en partículas más grandes de hielo mejorando la eficiencia de precipitación (líquida o sólida).

La siembra glaciogénica de nubes orográficas se ha utilizado para incrementar principalmente la capa nival de cordillera lo cual implica, a su vez, aumentar la esorrentía en una cuenca determinada. Si la siembra se realiza desde una red de generadores terrestres de yoduro de plata (AgI), la esperanza de éxito dependerá de la presencia de fuertes corrientes ascendentes (propiciadas por la orografía) capaces de llevar las partículas de AgI a las zonas sobreenfriadas de las nubes antes que este se desactive por fotólisis<sup>2</sup>. Sobre la base de este concepto, las condiciones de sembrabilidad requieren nubes con agua líquida sobreenfriada a temperaturas suficientemente frías para que los núcleos de AgI se activen, y vientos que permitan la dispersión del material glaciogénico en las nubes hacia el área destino.

Programas invernales sobre montañas que emplean una técnica de siembra glaciogénica se han aplicado en diversas oportunidades, tales como, Snowy Precipitation Enhancement Research Project (SPERP) desarrollado al sureste de Australia (2005-2013), Wyoming Weather Modification Pilot Program (WWMPP) el cual abarca tres cadenas montañosas

---

<sup>2</sup> Descomposición de una sustancia por acción de la luz u otra radiación electromagnética (Glosario RAE, 2017).

Wind River, Sierra Madre y Medicine Bow en el estado de Wyoming (2008-2014), Central Colorado Mountains River Basins Program (CCMRB) en la cuenca alta del río Colorado (2000-2016), entre otros. En estas zonas, el crecimiento económico, el desarrollo social y el aumento de la población han provocado una demanda creciente en los recursos hídricos, los cuales han mostrado un serio nivel de deterioro en su calidad y una disminución en su oferta natural, por lo cual, la posibilidad de aumentar la precipitación ha surgido como una alternativa viable de ejecutar (Pokharel et al., 2014).

En Chile, en la cuenca del río Cachapoal ubicada en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, se han desarrollado dos programas de siembra terrestre de nubes ejecutados entre los años 2000 a 2003 y 2008 a 2017. Además, en la Región de Valparaíso, a partir del mes de marzo 2012 al primer semestre del 2013, se desarrolló un programa de similares características en las cuencas de los ríos Petorca, La Ligua, Aconcagua, estero de Casablanca y Provincia de San Antonio (Méndez et al., 2014).

Estudios internacionales han evaluado los programas de siembra de nubes, pero en Chile no se ha presentado una evaluación científica de los programas que se han aplicado, por lo tanto, se carece de información concreta acerca del impacto y efecto logrado. Al respecto, la AMS (2011) hizo hincapié en la necesidad de realizar un enfoque integral en este tipo de programas, incluyendo evaluaciones estadísticas para establecer la presencia de un cambio significativo dado por el resultado de una actividad de siembra, y físicas para confirmar que el cambio observado estadísticamente es debido a la siembra (Breed et al., 2014). En la misma línea, el National Research Council (2003) instó a la realización de mediciones atmosféricas y a la utilización de la modelación numérica para simular los procesos físicos relacionados con la siembra (Jing et al., 2015). Respecto a los resultados, la WMA y la American Society of Civil Engineers (ASCE) indican que este tipo de programas pueden alcanzar entre un 5% a 15% de incremento promedio en la variable afectada por la siembra de nubes (Defelice et al., 2014).

El método de verificación estadístico tradicionalmente utilizado en los programas de siembra de nubes operativos es el de correlación y regresión histórica. La correlación se utiliza como medida del grado de asociación entre dos variables. Una de ellas debe estar ubicada en un área control (sin siembra) de características climatológicamente semejante a la designada como área destino (con siembra). Para determinar la relación entre las dos (o más) variables se utiliza el método de regresión (lineal o múltiple) de modo que se

pueda obtener información sobre una de ellas mediante el conocimiento de los valores de la otra u otras (Devore, 2008). El aspecto clave es verificar como varió la relación histórica entre la variable control y destino cuando se aplicó un programa de siembra de nubes en una de ellas. Silverman (2007), respecto a la evaluación de un programa de siembra de largo plazo desarrollado en Sierra Nevada estado de California, indicó que el método de regresión histórica proporcionaría estimaciones precisas de los efectos de varios años de siembra (Griffith et al., 2011). Por otro lado, recientes investigaciones indican que para evaluar con mayor precisión la siembra glaciogénica, la variación debe ser observada en los eventos con condiciones de siembra. Generalmente se suele estimar el efecto global de la siembra glaciogénica a partir, por ejemplo, de la precipitación total invernal. Este enfoque hace la suposición de que toda la precipitación invernal surge de eventos que cumplen con las condiciones de siembra, lo cual es una condición poco probable (Ritzman et al., 2015).

El propósito de este trabajo será verificar si es posible determinar el efecto del programa siembra terrestre de nubes durante cuatro campañas operativas invernales desarrolladas en la cuenca del río Cachapoal entre los años 2009 a 2012 mediante un estudio cuantitativo utilizando datos fluviométricos históricos. Se replicará el método de verificación estadístico de regresión histórica con una modificación en el tratamiento de la fluviometría estableciendo un enfoque en los períodos de deshielo. Períodos que se establecen como respuesta a la aplicación del programa durante los meses invernales. Además, se analizará la respuesta de la precipitación local utilizando la anomalía diaria por período invernal en los días con (sin) condiciones meteorológicas y (sin) equipos de siembra terrestre activados.

## **1.2 Hipótesis**

Es posible verificar el efecto del programa siembra terrestre de nubes desarrollado en la cuenca del río Cachapoal entre los años 2009 a 2012 utilizando datos fluviométricos históricos.

## **1.3 Objetivos**

### 1.3.1. Objetivo general

Utilizar datos fluviométricos históricos entre los años 1989 a 2012 para verificar el efecto del programa siembra terrestre de nubes en la cuenca del río Cachapoal (destino) respecto a la cuenca del río Maipo (control) durante las campañas operativas entre los años 2009 a 2012.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- (i) Determinar los días en que existían condiciones meteorológicas para la siembra terrestre de nubes durante las campañas operativas entre los años 2009 a 2012.
- (ii) Determinar los días que hubo siembra terrestre de nubes con y sin condiciones meteorológicas.
- (iii) Determinar la respuesta de la siembra terrestre de nubes sobre la pluviometría local en los días con (sin) condiciones meteorológicas y equipos de siembra terrestre activados entre los años 2009 a 2012.
- (iv) Verificar el efecto de la siembra terrestre de nubes sobre la fluviometría durante el período de deshielo en la cuenca del río Cachapoal respecto a la cuenca del río Maipo.

## 2. Marco teórico

### 2.1 Microfísica de nubes

Una nube es un conjunto de pequeñas gotas en un número aproximado de unas 100 por centímetro cúbico, cuyos radios son del orden de los  $10 \mu\text{m}^3$  (Sendiña et al., 2006). Para que se formen, es preciso que se produzca ascenso o brusco enfriamiento de aire húmedo y contar con núcleos de condensación o de congelación dependiendo de la temperatura. Su presencia, facilita la formación y crecimiento inicial de gotas por difusión de vapor (condensación en nubes cálidas y congelación en nubes frías) y posteriormente, mediante los procesos de coalescencia y colisión (colección) o acreción (a bajas temperaturas) se genera la precipitación (Wallace et al., 2006).

#### 2.1.1 Formación de las gotas de agua y cristales de hielo

##### (i) Nucleación de las gotas de agua y núcleos atmosféricos de condensación

Cuando las partículas de vapor de agua cambian de estado y se transforman en gotas de agua, pasan por un proceso denominado nucleación. Existen dos posibles casos para que se produzcan: el primero, suponiendo que estamos presente a una atmósfera homogénea sin impurezas, la aparición de la nueva fase tendrá lugar mediante fluctuaciones al azar (Houze, 2014). Lo que implica, un acercamiento espontáneo de las moléculas de vapor entre sí permitiendo la acción de las fuerzas de cohesión. En el segundo caso, se reúnen las partículas de vapor de agua sobre un aerosol atmosférico, de tamaño microscópico, que tienen una gran afinidad con el agua y actúa como núcleo de condensación (Wallace et al., 2006).

Para que la gota formada pueda sobrevivir sin evaporarse es necesario que supere cierto radio crítico. El tamaño crítico viene determinado por el equilibrio entre dos tendencias opuestas: la de crecimiento y la de desaparición, las cuales a su vez, dependen del entorno en el cual se formó la gota: espacio libre o en contacto con otro cuerpo (Wallace et al., 2006). En el caso de la nucleación homogénea del agua pura, el ritmo de crecimiento depende de la presión parcial del vapor de agua en el entorno y el proceso de desaparición depende de la temperatura de la gota y de su tensión superficial (Sendiña et

---

<sup>3</sup>  $\mu\text{m}$ : Micrón es una unidad de longitud equivalente a una milésima de milímetro (Glosario AMS, 2012).

al., 2006). Para que las gotas de agua pura puedan ser estables se requiere sobresaturaciones muy elevadas. Por ejemplo, una gota de agua pura de radio  $0,01 \mu\text{m}$  requiere una humedad del 112% (es decir, una sobresaturación de 12%) para estar en equilibrio con su entorno. Mientras que una gota de radio  $1 \mu\text{m}$  requiere de una humedad relativa de sólo 100,12% (es decir, una sobresaturación de 0,12%) (Wallace et al., 2006).

En la atmosfera, nunca existe una humedad relativa mayor del 100%. Esto se debe a que el aire no es limpio, existiendo siempre una gran cantidad de pequeñas partículas en suspensión (Houze, 2014). En la nucleación heterogénea, las gotas se forman sobre aerosoles llamados núcleos de condensación o núcleos higroscópicos. Los cuales según su tamaño se clasifican en Núcleos de Aitken (diámetro menor que  $0,2 \mu\text{m}$ ), Núcleos Grandes (diámetro entre  $0,2$  to  $2 \mu\text{m}$ ) y Núcleos Gigantes (mayor a  $2,0 \mu\text{m}$ ) (Wallace et al., 2006). La concentración de dichas partículas depende, a su vez, de muchos factores entre los cuales se destacan el tipo de superficie (océano, continente, ciudad, campo, entre otros) y el viento.

#### (ii) Nucleación de la fase hielo y núcleos glaciogénicos

Una vez que una nube se extiende hasta alturas por encima del nivel de los  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , existe la probabilidad que se formen cristales de hielo. En nubes mixtas, a pesar de que la temperatura puede estar por debajo de  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , es posible que co-existan gotas de agua sobreenfriada y partículas de hielo (Wallace et al., 2006). Dos transiciones de fase pueden conducir a la formación de hielo: el congelamiento de una gotita líquida o el paso directo de vapor, por sublimación, a la fase sólida (Rogers, 1977). Ambos procesos de nucleación pueden ser, del mismo modo que para el vapor de agua, homogéneos o heterogéneos.

Experimentos sobre la nucleación homogénea, asociados a la congelación de gotas de agua muy puras, indican que esta se logra alcanzar a aproximadamente  $-41 \text{ }^\circ\text{C}$  para gotas de  $1 \mu\text{m}$  de diámetro y a  $-35 \text{ }^\circ\text{C}$  para gotas de  $100 \mu\text{m}$  (Wallace et al., 2006). Es decir, las gotas más grandes se congelan a temperaturas mayores que las pequeñas. En la atmosfera, es probable que el congelamiento homogéneo sea un proceso que efectivamente ocurra particularmente en las nubes altas donde subsistan gotas líquidas a temperaturas menores a los  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  (Houze, 2014).

En la nucleación heterogénea, los cristales de hielo empiezan a aparecer en una nube cuando la temperatura desciende por debajo de unos  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , generalmente, frente a la presencia de superficies extrañas o de partículas suspendidas (Rogers, 1977). Los núcleos glaciógenos en general, son menos abundantes que los núcleos de condensación. Existiendo 1 núcleo glaciógeno por cada litro de aire mientras existen  $10^5$  núcleos de condensación por litro. En este caso, no cualquier partícula puede actuar como núcleo glaciógeno en el proceso de nucleación heterogénea. La condición necesaria para que un aerosol sea útil para establecer la nucleación es que su red cristalina tenga un alto grado de similitud con la estructura molecular de cristalización de las gotas de agua a esa temperatura (Rogers, 1977). Estas partículas, que logran flotar en la atmósfera y tienen la función de facilitar la solidificación del agua, pueden ser de origen orgánico o inorgánico. Por el momento, los materiales inorgánicos como el yoduro de plata y yoduro de plomo han demostrado semejanzas en su estructura con el hielo presentando umbrales altos de nucleación de  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente (Rogers, 1977). Cabe destacar, que el yoduro de plomo tiene características muy similares al AgI pero no es utilizado por la contaminación producida al liberarlo a la atmósfera.

### 2.1.2 Mecanismos de crecimiento

En una nube ocurre que simultáneamente crecen muchas gotas a la vez compitiendo por la cantidad de vapor de agua disponible, su velocidad de crecimiento depende de la concentración, tamaño y naturaleza del núcleo, de la velocidad de enfriamiento y de la magnitud de los movimientos turbulentos (Rogers, 1977).

#### (i) Difusión de vapor y coalescencia

La difusión de vapor de agua hacia la superficie de los núcleos de condensación y la consecuente condensación, es uno de los mecanismos por medio del cual puede llegar a crecer una gota de agua.

Una nube recién formada contiene billones de gotas de agua. Las corrientes ascendentes en la nube tienen normalmente una velocidad mayor que la velocidad terminal de caída de las gotas, manteniéndolas suspendidas (Erickson, 1982). La tasa de crecimiento de estas gotas por condensación es inversamente proporcional a su radio, lo que implica que las gotas grandes (radio grande) crezcan más lentamente que otras más pequeñas. En

consecuencia, a lo largo del tiempo los tamaños de las gotas son cada vez más uniforme. En condiciones realistas, el crecimiento por difusión produce gotas de radios en torno a los 10 ( $\mu\text{m}$ ) (Wallace et al., 2006). Por ende, para crecer hasta formar una gota de lluvia de 1 (mm) de radio requiere un aumento de volumen de un millón de veces más. Necesitando un tiempo de aproximadamente 20 horas para alcanzar un tamaño suficiente para caer por su propio peso, tiempo que además, excede la duración media de una nube típica (Erickson, 1982). Por lo tanto, el crecimiento por condensación es demasiado lento para producir gotas de lluvia con radios de milímetros.

En ocasiones, mediante el proceso de difusión de vapor, algunas de las gotas 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, alcanzado y chocando con las gotas más pequeñas que se encuentran en su camino (Erickson, 1982). La colisión entre dos gotas no garantiza la coalescencia, debido a que pueden rebotar entre sí o permanecer unidos sólo temporalmente (Houze, 2014). Estas gotas deben juntarse y fundirse para mantener la adhesión. Por ejemplo, de diez colisiones aproximadamente dos resultan en coalescencia, ya que, la tensión superficial de las gotas y la existencia de moléculas de aire que separa las gotas que chocan, hacen que estas reboten en la mayoría de los casos (Erickson, 1982). Este mecanismo de crecimiento, en el cual las gotas grandes (colectoras) crecen por captura de otras más pequeñas, se cree efectivo a partir de los radios que alcanzan los 40 ( $\mu\text{m}$ ) (Pruppacher et al., 2010).

(ii) Crecimiento por difusión de los cristales de hielo y acreción

En las nubes frías, el hielo crece a expensas de la fase líquida. Esto puede ocurrir mediante la colisión y el subsiguiente congelamiento de las gotas líquidas con las partículas de hielo más grandes (proceso de acreción) o por la difusión del vapor de agua hacia el hielo, debido a la menor presión de vapor del hielo respecto al agua (Asar, 2013).

A su vez, la acreción puede ser clasificada en dos categorías más amplias: crecimiento seco o húmedo. Acreción por crecimiento húmedo resulta en hidrometeoros parcialmente congelados, que pueden contener restos de agua y una temperatura de aproximadamente de 0 °C. En estas condiciones, las gotas que colisionan sufren un importante esparcimiento sobre la superficie de la partícula y un posible filtrado hacia el interior, resultando en una estructura densa y transparente. El régimen de crecimiento seco está

asociado con condiciones de menores contenidos de agua líquida y temperaturas de superficie por debajo de 0 °C (Asar, 2013).

Una vez que se genera el embrión de hielo, se inicia su crecimiento por difusión conservando siempre su estructura cristalina hexagonal. Así, el cristal de hielo cae a través de la nube aumentando su tamaño por acreción (escarcha y granizo) o por conglomeración (copos de nieve) (Rogers, 1977).

### 2.1.3 Origen de las precipitaciones

Si tomamos como criterio de clasificación los mecanismos de ascenso, que determinan la condensación por enfriamiento adiabático y la posterior precipitación, los principales tipos serían:

#### (i) Precipitación convectiva

Estas precipitaciones se producen como resultado de un desigual calentamiento de la superficie terrestre, a partir de aquí el aire adyacente se inestabiliza y asciende en forma de columnas aisladas que dan lugar a la formación de nubes tipo cúmulos (Cuadrat et al., 2006). En este caso, los movimientos verticales del aire son mayores que la velocidad de caída de los cristales de hielo contenidos en las nubes, lo cual favorece una mayor condensación, mayor formación de gotas de lluvia y, por tanto, precipitaciones más intensas (Houze, 2014). Como resultado de esta condición la precipitación es limitada y abrupta, donde a menudo puede alcanzar el suelo dentro de media hora desde su formación. Este tiempo es mucho más corto que 1 a 3 horas disponibles para crecimiento de las partículas de precipitación en las nubosidad estratiforme (Houze, 2014). Dado que el tiempo es tan corto, las partículas de precipitación suelen originarse y crecer no muy por encima de la base de las nubes.

#### (ii) Precipitación ciclónica

Resulta del levantamiento del aire que converge en un área de baja presión. Cuando dos masas de aire de distintas temperaturas (y densidad) se encuentran, en lugar de mezclarse, generan entre ambas una zona de transición llamada frente. La masa de aire frío penetra por debajo de la cálida y la levanta del suelo, al ascender se enfría

adiabáticamente formando extensas bandas de nubes y precipitación. La naturaleza de estas dependerá del contenido de humedad del aire y de las características del área frontal, generalmente son precipitaciones continuas sobre superficies extensas en la dirección de avance del frente (Cuadrat et al., 2006). Este tipo de precipitaciones, propia de latitudes medias y altas, se caracteriza además por presentar una gran área de acción o influencia llegando a extenderse a cientos de kilómetros.

### (iii) Precipitación orográfica

Las precipitaciones orográficas son originadas o incrementadas por mecanismos de ascensos forzados por la topografía sobre el flujo horizontal de aire húmedo que impacta sobre la misma. En Chile, las perturbaciones ciclónicas al penetrar en el territorio se encuentran con los sistemas montañoso de Los Andes y de la Cordillera de la Costa, los cuales logran reforzar e intensificar la actividad del sistema frontal y las precipitaciones a barlovento y reducirlas a sotavento del relieve (Viale, 2010).

## **2.2 Siembra de nubes**

### 2.2.1 Técnica glaciogénica e higroscópica

La técnica de siembra de nubes se puede dividir en glaciogénica; utilizando el método estático o dinámico, con el propósito primario de inducir cambios microfísicos en las nubes para aumentar la eficiencia de la precipitación o inducir cambios dinámicos que aumenten las dimensiones de las nubes o su duración; o higroscópica, el cual está asociado con siembra de nubes calientes o mixtas, con el objetivo de incrementar la precipitación promoviendo el proceso de coalescencia usando núcleos de sal higroscópicos generados por bengalas pirotécnicas, una dosificación en forma de spray de solución salina, entre otros (Rosengaus et al., 2002).

La técnica se sustenta en dos postulados, el primero enuncia que la deficiencia natural de núcleos de hielo limita la eficiencia de la precipitación en algunas nubes sobreenfriadas. Tales nubes son candidatas potenciales para la siembra con agentes glaciogénicos. El intento de aumentar las precipitaciones mejorando la eficiencia de su formación es conocido como siembra estática (Pérez et al., 2011). El segundo postulado se centra en la observación de las corrientes ascendentes de las nubes convectivas, en las cuales frecuentemente se encuentran grandes cantidades de agua sobreenfriada. Si esta agua se

congelara rápidamente y a temperaturas elevadas de lo que pudiera ocurrir de modo natural, el calor latente de congelación y de deposición sería liberado, conduciendo a un incremento en la flotabilidad de las nubes y a un mayor crecimiento de la misma. Esta nube de mayor espesor vertical podría entonces procesar más vapor de agua y propiciar así un aumento de la precipitación. Este postulado se conoce como hipótesis de siembra dinámica o siembra para efectos dinámicos (Pérez et al., 2011). En este modo de siembra, se busca introducir una gran cantidad de núcleos de hielo de 100 a 1000 núcleos/litro de manera que se produzca una glaciación casi total en la zona sembrada (Mayor et al., 2014).

### 2.2.1 Primeros experimentos de siembra de nubes

La posibilidad de influir artificialmente en la precipitación introduciendo determinados reactivos en las nubes fue constatada por primera vez con el descubrimiento de las propiedades del hielo seco y el yoduro de plata en los laboratorios de investigación de la General Electric en la década de 1940 (Chu et al., 2014). Probados, primero en cámaras de laboratorio, estos materiales mostraron su capacidad de convertir toda o parte de las gotas de agua sobreenfriada en cristales de hielo. Dichas gotas permanecían en fase líquida aunque la temperatura de su entorno fuese menor a 0 °C (Pérez et al., 2011). Después de este descubrimiento los programas de siembra de nubes se multiplicaron, y para el año 1951 se llevaban a cabo en unos 30 países (Chu et al., 2014).

Hasta el momento no se ha logrado rastrear de modo fehaciente los efectos de la siembra desde su inicio hasta el producto final, precipitación (líquida o sólida) sobre el suelo. Las dificultades en la evaluación se atribuyen, por un lado, a la alta variabilidad natural de la precipitación lo cual hace difícil la detección de los efectos de la siembra, las escalas espaciales y temporales de los efectos de la siembra de nubes puede ser diferente a los de las operaciones de siembra, el costo de desarrollar programas experimentales aleatorios y exploratorios para evaluar los efectos de la siembra de nubes es muy alto, entre otros (Xue et al., 2013). En vista de la dificultad para demostrar el efecto de este tipo de programas han surgido diversos métodos de verificación.

### 2.2.3 Métodos de verificación del efecto de la siembra de nubes

Existen tres categorías básicas de verificación: estadística, física y modelación numérica.

#### (i) Verificación estadística

El diseño que estableció Dennis (1980) describe el método estadístico de regresión histórica comúnmente utilizado en programas de siembra de nubes (Xue et al., 2013). Este se basa en la comparación de una variable afectada por la siembra (precipitación, nieve o caudal) de áreas destino versus una o varias áreas control mediante un análisis de regresión lineal o múltiple (Griffith et al., 2014). La ecuación de regresión se utiliza para estimar como habría sido el comportamiento de la variable del área destino (con siembra) en base a lo que se observó en el área de control (sin siembra).

En la cuenca del río Gunnison, estado de Colorado, se aplicó esta metodología para evaluar siete temporadas de siembra terrestre de nubes entre los años 2003 a 2010. El objetivo de este programa fue aumentar la capa nival lo cual contribuía al caudal de primavera y verano de la cuenca. En base a registros del equivalente de agua en la nieve y pluviometría entre los años 1990 a 2001, además, de datos fluviométricos entre los años 1971 a 2000 se obtuvo un aumento promedio estacional durante el período de siembra de entre un 16% a 20% (Griffith et al., 2011). Por otro lado, en el centro y el sur del estado de Utah utilizaron el método de regresión histórica para proporcionar una estimación cuantitativa del efecto de un programa siembra terrestre en áreas extras (adyacente al área destino) durante 25 temporadas (diciembre a marzo) entre los años 1974 a 2002. La relación entre la precipitación observada y estimada se realizó utilizando datos de 17 estaciones pluviométricas ubicadas en un área extra de efecto, entre 40 a 240 km de distancia del área destino principal del programa. Los resultados indicaron un incremento promedio del 8% hasta los 200 km de distancia, a partir de este límite no se habría presentado una variación significativa en la variable analizada (Defelice et al., 2014).

La técnica antes mencionada no es tan rigurosa o científicamente aceptada como la que utiliza un método de selección aleatoria. El objetivo de evaluar los resultados de un experimento de siembra de nubes es establecer si la variable aleatoria de prueba fue diferente de lo que habría sido sin el tratamiento. En este tipo de experimento se debe

ser capaz de medir la variable aleatoria de prueba con una precisión suficiente para separar los efectos de la variabilidad natural. El Wyoming Weather Modification Pilot Program fue diseñado como un experimento aleatorio y cruzado que requirió para el análisis dos montañas climatológicamente similares como las de Sierra Madre y Medicine Bow en el sureste del estado de Wyoming (Xue et al., 2013). El diseño cruzado estipulaba que las condiciones atmosféricas de siembra debían persistir (determinado por medio de pronóstico) durante un mínimo de 4 horas consecutivas en ambas montañas de forma simultánea. Utilizando una red de generadores terrestres ubicados contra el viento de la montaña a sembrar (seleccionada al azar) las partículas de AgI se introducían en la atmósfera. De esta forma se realizaba la dispersión y transporte de los núcleos de AgI al área destino, mientras que la otra montaña permanecía sin sembrar. El análisis de ocho temporadas del 15 de noviembre al 15 de abril de los años 2000 a 2008 determinaron que aproximadamente el 26% del tiempo las nubes con condiciones de siembra estaban presentes, aproximadamente entre el 12% a 14% del tiempo las nubes con condiciones de siembra estaban presentes y la precipitación se produjo sobre el área destino, lo que indica, que aproximadamente entre el 27% a 30% de la precipitación de invierno resultó de nubes sembradas (Ritzman et al., 2015). En Israel, dos experimentos (Israel-1 y Israel-2) de siembra de nubes aleatorias fueron realizados durante los años 1961 a 1975. En ellos se utilizó la siembra aérea para liberar (en sucesivos trazos) el AgI a la altura de la base de las nubes y siembra terrestre para complementar el proceso. En general, el resultado del experimento fue un incremento del 13% a 15% en la precipitación. Posteriormente, el programa de siembra mixto continuó desde 1975 a 1990 en una modalidad operativa (no aleatorio) obteniendo de la relación histórica de un área control versus destino un incremento del 6% (Silverman, 2001).

#### (ii) Verificación física

La evaluación física se utiliza para confirmar que los resultados estadísticos están siendo atribuidos a la siembra. Estas varían desde mediciones directas e indirectas dentro y fuera del área destino de la siembra. Las mediciones directas hacen referencia a la utilización de datos meteorológicos de superficie, mediciones aéreas usando aviones de investigación, observaciones de radiómetros de microondas, detectores de hielo, muestreo y análisis químico de la superficie para comprobar la llegada del material de siembra al área destino, entre otros. El Snowy Precipitation Enhancement Research Project llevado a cabo en los inviernos 2005 a 2009 en Snowy Mountains al sureste de

Australia es uno de esos experimentos. En él se encontró un positivo, pero no estadísticamente significativo, impacto en la precipitación mediante la siembra terrestre de nubes con AgI (Xue et al., 2013). El análisis primario de este trabajo mostró un efecto en la focalización del material de siembra, encontrándose un máximo nivel de plata en las muestras de nieve recogidas en las unidades experimentales sembradas que las no sembradas (Manton et al., 2011).

Referente a las estimaciones indirectas se han utilizado, por ejemplo, datos de radar. Los radares meteorológicos han sido una herramienta utilizada en la decisión de siembra, siendo su información recopilada para evaluar las operaciones diariamente como por temporada con la ventaja de presentar una cobertura de mejor resolución espacial y temporal. Este sistema de detección introduce otra variable a saber, la relación entre el parámetro medido por el radar y el dato en superficie. En el programa AgI Seeding Cloud Impact Investigation (ASCII) llevado a cabo sobre la Sierra Madre en el sur del estado de Wyoming se elaboró un estudio utilizando datos de un radar de polarización dual de banda X centrado en seis eventos durante el programa desarrollado el año 2012. Para examinar el impacto de la siembra glaciogénica terrestre en el crecimiento de la nieve en nubes orográficas invierno (mayormente estratiformes) realizaron comparaciones entre las mediciones de un período con siembra y sin siembra en tres áreas de estudio (un área de control y dos destino). Los cambios y diferencias de reflectividad sugirieron un aumento relativo en la concentración de las dendritas y las placas y un crecimiento de la nieve por difusión del vapor en lugar de acreción durante la siembra (Jing et al., 2015).

(ii) Verificación utilizando modelación numérica.

Se han utilizado modelos numéricos para verificar la evolución agua sobreenfriada, observar y diagnosticar las características de una nube en evolución, predecir el transporte y la difusión del AgI sembrado desde tierra, entre otros. La modelación contribuye, además, a seleccionar los lugares de siembra óptimos, predecir que instalaciones de siembra debería usarse en cada evento, y entregar un análisis detallado de los efectos del programa.

Durante la temporada invernal de los años 2010 a 2011 fueron simulados por el modelo de pronóstico numérico Weather Research and Forecast (WRF) cuatro eventos de siembra de nubes desarrollado sobre el sur de Idaho. Dentro de sus conclusiones indicaron que la

siembra aérea sería generalmente más eficiente que la siembra terrestre en términos de focalización del material glaciogénico en las áreas correctas de las nubes. Por otro lado, indicaron que el efecto de la siembra estaba inversamente relacionado con la eficiencia de precipitación natural (Xue et al., 2013). En Wyoming, utilizando el mismo modelo, mostraron que la extensión vertical del material glaciogénico liberado desde la siembra terrestre permaneció siguiendo las laderas de las montañas unos 500 metros sobre el nivel del suelo, además, determinaron que la emisión del producto glaciogénico durante una tormenta solo contribuye a su desperdicio (Mayor et al., 2014).

#### 2.2.4 Programa de siembra terrestre de nubes en la cuenca del río Cachapoal: antecedentes de diseño y resultados

En la cuenca del río Cachapoal, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, se han realizado dos programas de siembra de nubes utilizando el método terrestre entre los años 2000 a 2003 y 2008 a 2017. Basado en el modelo de siembra glaciogénica estática, el diseño del programa de siembra de nubes tuvo como fin aumentar la capa nival en la cuenca del río Cachapoal. El modelo sugiere que el AgI deberá ser dispersado al oeste de una barrera montañosa en presencia de nubosidad que contenga agua líquida sobreenfriada. La red generadores terrestres de AgI utilizan las corrientes ascendentes de la atmósfera propiciadas por la orografía para hacer llegar el material de siembra a la altura donde este se active como núcleos de hielo (Mayor et al., 2014).

En el primer programa, se privilegió la caída de precipitación líquida, a diferencia del segundo que privilegió la caída de precipitación sólida. Inicialmente, el programa opero con una red primaria de 8 equipos generadores terrestres de AgI entre los años 2000 a 2012. A partir de este último, se generó una ampliación de 11 equipos en la cuenca del río Cachapoal y de 14 equipos en el territorio precordillerano y cordillerano de las cuencas de los ríos Tinguiririca, Peuco y Claro de Rengo y esteros Zamorano, Chimbarongo y Codegua, ubicados en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

La metodología de verificación del primer programa fue analizar el comportamiento fluviométrico histórico entre los años 1970 a 2003 de la cuenca del río Cachapoal en la estación Puente Termas (área destino) versus la cuenca del río Tinguiririca en la estación Bajo Los Briones (área control). El análisis consistió en proyectar una línea de tendencia para la razón del caudal medio anual entre el área destino y control entre los años 1970 a

1999 (sin siembra) y estimar el comportamiento fluviométrico entre los 2000 a 2003 (con siembra). Comparando el valor anual de la razón real con el valor estimado (obtenida al proyectar la línea de tendencia histórica) se obtuvo el porcentaje de variación fluviométrica promedio de 15,6% del área destino en relación al área control durante la aplicación del programa.

A partir del año 2008 las evaluaciones se realizaron mediante un análisis estadístico de regresión histórica utilizando datos fluviométricos de la cuenca del río Cachapoal en la estación Puente Termas versus la cuenca del río Maipo en la estación La Obra. Debido a que el segundo programa tuvo como objetivo privilegiar la caída de precipitación sólida consideraron el período de deshielo (octubre a febrero) para evaluar los efectos de la siembra terrestre realizada durante los meses invernales. Con datos medios mensuales consecutivos, a partir del año 1989, determinaban la ecuación de regresión para estimar como se hubiese comportado la fluviometría del área destino en relación a lo observado en el área control durante los meses de octubre a febrero. Entre las temporadas 2008 a 2012 en promedio se obtuvo un 21% de incremento en la fluviometría del río Cachapoal en la estación de Puente Termas en relación al río Maipo en la estación La Obra.

En este estudio, se replicará el método de verificación estadístico de regresión histórica con una modificación en el tratamiento de la fluviometría para validar los porcentajes de variación obtenidos considerando el segundo programa de siembra terrestre de nubes y su red primaria. La modificación se enfocará en aislar de la serie cronológica histórica, y de sus diversas fluctuaciones, la componente estacional del período de interés asociado al deshielo (octubre a febrero). Se incluirán en el análisis, además, dos ríos de cabeceras ubicados sobre los 1500 (msnm)<sup>4</sup> en las cuencas destino y control que presentan un menor uso consuntivo del recurso hídrico. Esto se debe a que la estación de medición control La Obra, frecuentemente utilizada en evaluaciones previas, se ubica a menor cota (799 msnm) y sus flujos se ven alterados por uso. Lo que deriva a pensar que no es válido evaluar un proceso de siembra con caudales manipulados, ya que, esta intervención no puede ser totalmente eliminada en el proceso de análisis. Sin embargo, ya que históricamente se ha utilizado en este trabajo se conservó para mantener un referente.

---

<sup>4</sup> Metros sobre el nivel del mar (msnm).

### **2.3 Régimen de precipitación e hidrología**

Entre los 30° a 40° de latitud sur las precipitaciones tienen una marcada característica estacional, siendo los meses de abril a septiembre los más lluviosos acumulando entre 60% y 70% de la precipitación anual (Quintana, 2004). Esta condición es causada mayormente por la migración estacional del Anticiclón del Pacífico Sur Oriental que favorece el ingreso de sistemas frontales desde el Océano Pacífico, y en menor medida, un 5% corresponde a precipitaciones asociadas a bajas segregadas (Godoy et al., 2011). La isoterma de 0 °C es una buena estimación de la línea por sobre la cual no se produce fusión de nieve, mientras que por debajo la nieve existente se derrite provocando la escorrentía. Es importante señalar que esta línea determina también el tipo de precipitación que ocurrirá en un área. Por arriba, se registrarán precipitaciones sólidas (nieve) mientras que por debajo el agua precipitará en forma líquida (lluvia). En el hemisferio sur, las laderas sur y oriente se exponen a menor temperatura y menor radiación solar por lo que la línea de nieve tiende a ubicarse a una menor cota, en contraposición, las laderas norte y poniente se exponen a mayor temperatura y radiación solar, con una tendencia de la línea a localizarse a mayor altitud (Cepeda, 2008). De acuerdo a Garreaud (1993), en el tramo del río Aconcagua (Región de Valparaíso) y río Tinguiririca (Región del Libertador General Bernardo O'Higgins), la línea de nieve correspondería a una cota promedio de 2500 (msnm). Este rango se obtuvo mediante análisis de la relación entre la línea de nieve y el área aportante observada durante eventos de crecidas pluviales ocurridas entre las mencionadas cuencas nivo-pluviales (Cepeda, 2008).

La nieve precipitada afecta de forma clara la hidrología regional, ya que es "capturada" y almacenada de forma temporal por las montañas para finalmente ser liberadas (parcialmente) en forma de agua (Correa, 2013). El volumen anual de agua que escurre por el cauce de un río es el resultado del ciclo anual. En las cuencas frías en cuya superficie total o parcial se acumula el agua en fase sólida, las fluctuaciones del caudal puede clasificarse desde el punto de vista climático según responda sólo a la precipitación, a una combinación entre la precipitación y la temperatura, o sólo a la temperatura (Lascano et al., 2007).

En la cordillera de Los Andes, el escurrimiento de un río depende básicamente de la precipitación nival de invierno sobre las altas cumbres y del posterior derretimiento de la nieve en las estaciones de primavera y verano. Los sistemas frontales que se aproximan

desde el suroeste durante la estación invernal son el principal aporte de agua sólida al manto nival. A partir de los 32° y hasta los 36° de latitud sur los ríos de cordillera tienen un régimen típico de deshielo en que el caudal aumenta significativamente a partir de octubre, alcanzando un caudal medio mensual máximo del orden de 2 a 2,5 veces al caudal medio anual en los meses de noviembre y diciembre. Después, comienza a decrecer hasta abril o mayo, para mantenerse más o menos constante en el resto del año con un caudal medio mensual del orden de 0,5 veces al caudal medio anual, valor alterado en mayor o menor grado por las crecidas invernales (Court, 2014).

### 2.3.1. Caracterización hidrológica: Cuencas del río Maipo y del río Cachapoal

La cuenca del río Maipo, conformada por las cuencas del río Maipo y Mapocho, cubre una extensión de 15157 km<sup>2</sup> lo cual equivale el 95% de toda la superficie de la Región Metropolitana (Tesser, 2013). Sus afluentes en la parte alta son los ríos Yeso, Volcán y Colorado y los esteros Clarillo, Manzano, El Canelo, San José y Coyanco. Por el norte tiene como principales afluentes al río Mapocho y al estero Puangue, y por el sur al río Angostura (García, 2007). Su régimen hidrológico es nivo-pluvial, en la parte alta y media, presentando aumentos de caudales en primavera provenientes de los deshielos y en la parte baja sus caudales crecen en invierno inducidos directamente por las mayores precipitaciones (García, 2007).

Al sur de la Región Metropolitana, se encuentra la cuenca del río Rapel la cual abarca cerca de un 89% de la totalidad de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins (Guzmán, 2013). El río Rapel, a su vez, nace en la unión del río Cachapoal y el río Tinguiririca. La cuenca del río Cachapoal presenta una extensión de 7155 km<sup>2</sup> y una longitud total de aproximadamente 164 km entre su origen en las cumbres glaciales de Pico del Barroso (5160 msnm) y Nevado de Los Piuquenes (4440 msnm), y la confluencia con el río Tinguiririca donde comienza el río Rapel (Figueroa, 2008). Entre sus tributarios, se encuentran los ríos Las Leñas, Cortaderal, Cipreses, Claro de Cauquenes, Claro de Rengo, Zamorano, por el sur, y Pangal, Coya, por el norte. El Tinguiririca, río de distribución más al sur, se origina de la unión de los ríos Damas y Azufre. Posee una hoya hidrográfica de 4730 km<sup>2</sup> con una longitud de 167 km (MOP, 2004).

El régimen hidrológico de la cuenca alta del río Cachapoal es nival con sus mayores caudales en diciembre y enero. En la cuenca media, muestra un régimen nivo-pluvial, con

mayores caudales entre junio a julio y diciembre a enero producto de lluvias invernales y deshielos cordilleranos, respectivamente. Por último, en la cuenca baja muestra un régimen pluvio-nival, ya que, se observa una mayor influencia pluvial que nival (MOP, 2004).

### 2.3.2 Utilización del recurso hídrico: Cuencas del río Maipo y del río Cachapoal

La agricultura, minería, industria y la generación hidroeléctrica utilizan el agua como uno de sus principales factores productivos. La demanda de agua se divide principalmente en uso consuntivo y no consuntivo. El primero, por lo general, vienen del sector agropecuario, viviendas e industrias y se refieren a consumir el agua sin la obligación de ser restituidas a su fuente de origen. Mientras que las demandas no consuntivas son del sector de producción de energía y el turismo y está asociada a los derechos de uso del agua con sujeción a su reposición en el mismo volumen de agua extraída sin alterar su calidad ni física ni química (Tesser, 2013).

Gracias a los embalses y canales, junto a los acuíferos, parte del agua presente en una Región se le puede catalogar de disponible. La disponibilidad del agua depende de la variabilidad estacional e interanual del ciclo hidrológico, pero además, es sensible a factores no climáticos, como por ejemplo, cambios en el uso de suelo, actividades productivas y extracción de caudales.

En la cuenca del río Maipo, en cuanto a los flujos utilizados, la agricultura de riego es el principal usuario consuntivo con un consumo de 82 (m<sup>3</sup>/s) destinados al riego de aproximadamente 158.000 (he) (Tesser, 2013). El segundo usuario más importante, en términos de volumen, corresponde a las empresas de agua potable con una demanda de 18,5 (m<sup>3</sup>/s). En la cuenca, las principales fuentes de captación de agua potable se ubican en la laguna Negra (600 Hm<sup>3</sup>), la laguna Lo Encañado (50 Hm<sup>3</sup>), en el estero El Manzano, el estero El Canelo, el río Maipo y el embalse El Yeso (250 Hm<sup>3</sup>). Respecto a este último, su volumen promedio embalsado es regulado periódicamente por la empresa Aguas Andinas, según las necesidades del sistema de agua potable de la Región Metropolitana (Benado, 2013). Para finalizar, el sector hidroeléctrico, como uso no consuntivo, es el principal usuario de agua de esta cuenca con 129 (m<sup>3</sup>/s).

Por su parte, el uso del recurso hídrico del sistema Rapel-Cachapoal-Tinguiririca se basa en la actividad agrícola. Está se concentra mayoritariamente en la parte media y baja de la cuenca del río Cachapoal, donde además, se desarrolla una importante actividad minera del cobre (El Teniente), usos para agua potable y generación hidroeléctrica (Figueroa, 2008). Considerando los flujos utilizados la producción agrícola, gracias a la calidad de los suelos, presenta una demanda de 97,96 (m<sup>3</sup>/s) para una superficie de terrenos agrícolas de 423,78 (Ha) (Figueroa, 2008). Por otro lado, las empresas a las cuales se les ha otorgado derechos de agua con fines mineros, realizan extracciones de agua sobre los cursos superficiales de aproximadamente 9,39 (m<sup>3</sup>/s). En el caso del agua potable, la mayor parte del recurso hídrico proviene de pozos subterráneos con extracciones de 2,01 (m<sup>3</sup>/s). Respecto a la generación hidroeléctrica, presenta una demanda de uso de 653,75 (m<sup>3</sup>/s) para las 8 centrales, siete de pasada y una del embalse Rapel (Guzmán, 2013). El embalse Rapel tiene un volumen máximo de 433 Mill.m<sup>3</sup> y opera principalmente para compensar las demandas de energía que no pueden ser satisfechas por el resto de las grandes centrales.

### **3. Metodología**

#### **3.1 Delimitación geográfica**

La zona de estudio se centrará en la cuenca del río Cachapoal ubicada en el sector cordillerano septentrional de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Esta se localiza en Chile, entre los paralelos 34°00' y 34°40' de latitud sur, al norte de la cuenca del río Tinguiririca y al sur de la cuenca del río Maipo en la Región Metropolitana.

El área destino del programa siembra terrestre de nubes es la cuenca alta y media del río Cachapoal. La red primaria de generadores terrestres de yoduro de plata (Fig. 3.1) está instalada en las laderas a barlovento de la cuenca a una distancia entre sí de 10 a 15 km y a altitudes entre los 680 a 2268 (msnm) (tabla 3.1 y Fig. 3.2).

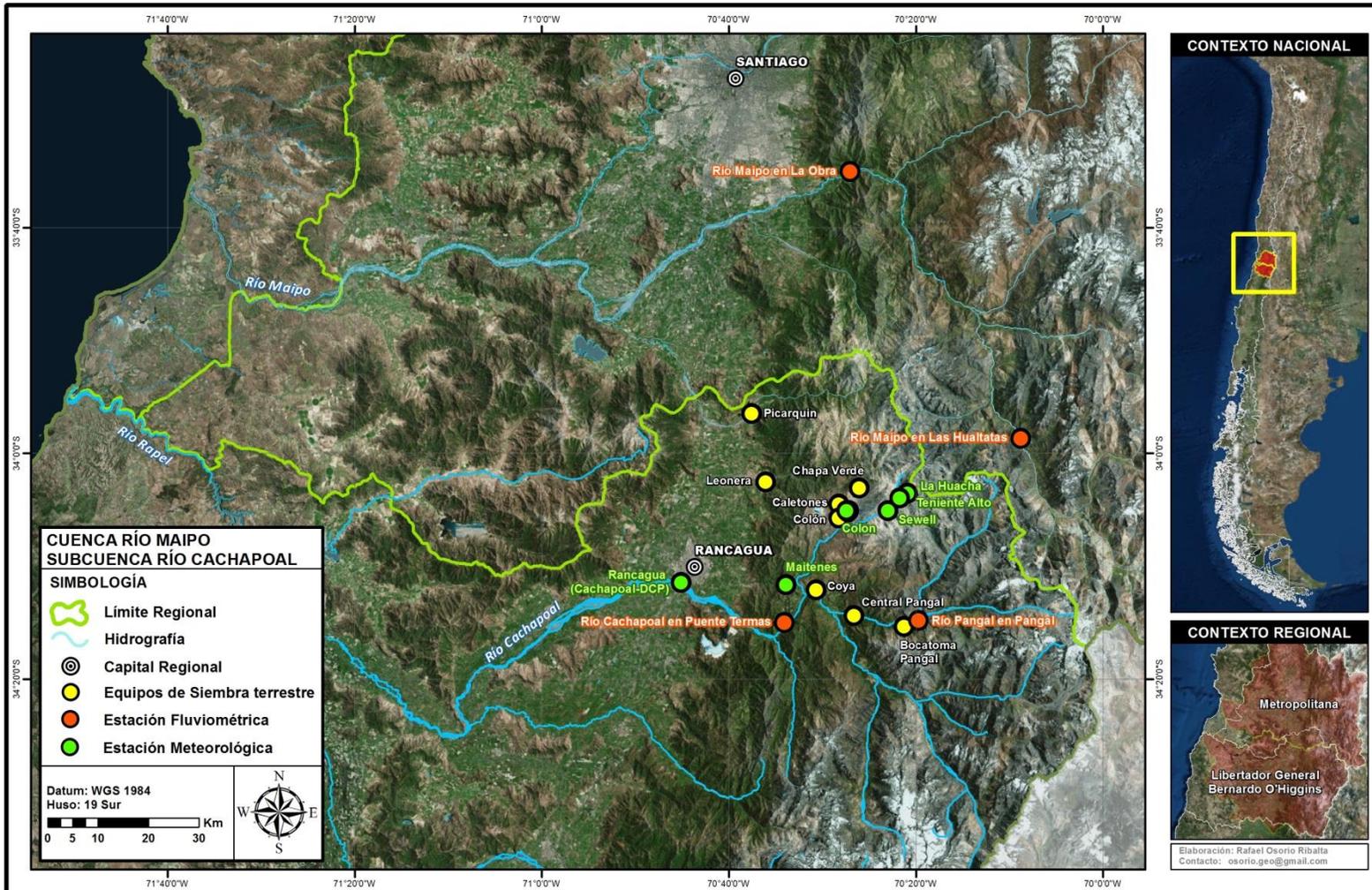


Figura 3. 1 Red primaria de generadores terrestres de yoduro de plata, estaciones fluviométricas y pluviométricas utilizados en el presente estudio.

Tabla 3. 1 Nombre y altura de la red primaria de generadores terrestres de yoduro de plata.

Nombre	Altura (msnm)
Chapa Verde	2268
Caletones	2036
Colón	1565
Bocatoma Pangal	1433
Central Pangal	962
Coya	872
Leonera	689
Picarquín	680



Figura 3. 2 Fotografías de dos equipos generadores terrestres de yoduro de plata. A la derecha estación Chapa Verde y a la izquierda la estación Bocatoma Pangal, ambas ubicadas en la cuenca río Cachapoal, Chile.

### 3.2 Delimitación temporal

El período de estudio abarca cuatro campañas operativas invernales del programa siembra terrestre de nubes desde el mes de abril a septiembre entre los años 2009 a 2012.

### 3.3 Fuentes de datos

#### 3.3.1. Datos meteorológicos de superficie y perfil vertical

Se utilizarán datos de humedad relativa (%), precipitación (mm) y temperatura (°C) con resolución temporal de 30 minutos desde el mes de abril a septiembre entre los años 2009 a 2012, períodos de desarrollo de las campañas de operativas invernales (tabla 3.2). Las coordenadas geográficas de cada estación meteorológica y su altitud se presentan en la tabla 3.3.

Tabla 3.2 Períodos de ejecución de las campañas operativas del programa siembra terrestre de nubes entre los años 2009 a 2012.

Año	Inicio	Fin	Nº días
2009	1-mayo	30- septiembre	153
2010	15-abril	15- septiembre	154
2011	15-abril	15- septiembre	154
2012	15-abril	30- septiembre	169

Tabla 3. 3 Nombre y localización de las estaciones meteorológicas.

Estación Meteorológica	Latitud (Sur)	Longitud (Oeste)	Altitud (msnm)
Teniente Alto	34°3'	70°21'	3052
La Huacha	34°3''	70°20'	3026
Sewel	34°5'	70°22'	2159
Colón	34°5''	70°27'	1943
Maitenes	34°11''	70°33'	1055

Del radiosondeo de la estación de Santo Domingo<sup>5</sup> (latitud 33°39' Sur y longitud 71°36' Oeste) se utilizarán datos de temperatura (°C), humedad relativa (%) y altura geopotencial (m) a las 00Z (20:00 H.L<sup>6</sup>) y 12Z (08:00 H.L) durante los períodos señalados en la tabla 3.2. La cantidad de días con sondeos disponibles para el análisis se presentan en la tabla 3.4.

Tabla 3. 4 Número de datos de radiosonda disponible durante el período de estudio.

Hora	Inicio	Fin	Nº días	Nº sondeos
00 Z	01-may-09	30-sep-12	630	560
12 Z	01-may-09	30-sep-12	630	578

### 3.3.2. Dirección del viento medio

La dirección del viento medio será extraída de los datos del reanálisis del National Center for Environment Prediction (NCEP) y National Center Atmospheric Research (NCAR)<sup>7</sup> en el punto más cercano a la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins para la fecha, hora (Z) y nivel de presión (mb) según corresponda.

<sup>5</sup> <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

<sup>6</sup> H.L: Hora Local

<sup>7</sup> <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/hour/>

### 3.3.2. Imágenes satelitales

Se utilizarán imágenes del satélite<sup>8</sup> GOES-12 del canal visible, infrarrojo y vapor de agua del archivo de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) obtenidos a través de la Universidad de Dundee para la fecha y hora (Z) según corresponda.

### 3.3.3. Datos fluviométricos

Se utilizarán datos medios mensuales de caudal (m<sup>3</sup>/s) de las estaciones Las Hualtatas y La Obra ubicadas en la cuenca del río Maipo y, Puente Termas de Cauquenes<sup>9</sup> y Pangal en la cuenca del río Cachapoal. Las coordenadas geográficas de cada estación fluviométrica y su altitud se detallan en la tabla 3.5.

Tabla 3. 5 Nombre y localización de las estaciones fluviométricas.

Cuenca	Nombre	Latitud (Sur)	Longitud (Oeste)	Altitud (msnm)
Río Maipo	Las Hualtatas	33°58'	70°08'	1820
Río Cachapoal	Pangal	34°14'	70°19'	1500
Río Maipo	La Obra	33°35'	70°30'	799
Río Cachapoal	Pte. Termas	34°15'	70°34'	700

### 3.3.4. Programa de siembra terrestre de nubes: activación de la red de equipos

Se recopilarán registros diarios y horarios de la activación la red de equipos de siembra terrestre (tabla 3.1) durante los períodos indicados en la tabla 3.2.

## 3.4 Metodología

### 3.4.1 Método para la determinación de los días que existían condiciones meteorológicas para la siembra terrestre

Para determinar el número de días en que existían condiciones meteorológicas para la siembra terrestre de nubes, se utilizarán cuatro parámetros propios de inicio de la operación de la red. En base a ello, los parámetros utilizados se dividirán en (i) altura de

<sup>8</sup> <http://www.sat.dundee.ac.uk/auth.html>

<sup>9</sup> Mencionada desde este momento como estación fluviométrica de Pte. Termas.

isoterma 0 °C (ii) altura base de las nubes, (iii) dirección del viento medio y (iv) nubosidad.

La selección se construirá inicialmente con dos filtros (i) altura de isoterma 0 °C y (ii) altura base de las nubes, utilizando datos de radiosonda de Santo Domingo y de las estaciones meteorológicas adyacentes a la ubicación de la red de equipos de siembra terrestre (tabla 3.3). A partir de los datos horarios de cada estación meteorológica se dividirá en dos períodos el análisis: diurno desde las 8:00 a 19:59 y nocturno desde las 20:00 a 7:59. Por otro lado, los datos de radiosonda de las 00Z (20:00 H.L) y 12Z (08:00 H.L) representarán la tendencia de la altura isoterma 0 °C en el período nocturno y diurno, respectivamente.

(i) Determinación de la altura de la isoterma 0 °C

La altura de la isoterma 0 °C (AIC) se obtendrá por medio de la interpolación de datos del perfil vertical del radiosonda de Santo Domingo. El cálculo se realizará considerando el perfil medio entre dos niveles troposféricos e interpolando la altura en que la magnitud de la temperatura fuese cero. La interpolación conveniente será lineal debido a que se conocerán los puntos extremos del intervalo. Al trazar una recta que pasa por los puntos  $(x_1, y_1)$  y  $(x_2, y_2)$  por semejanza de triángulos se logrará obtener el valor deseado (Fig. 3.3).

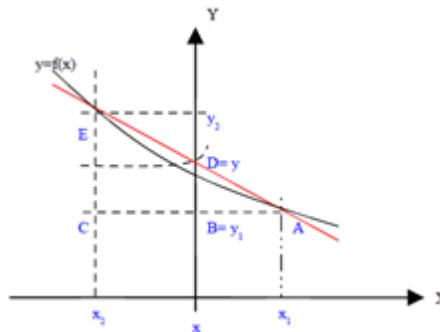


Figura 3. 3 Interpolación lineal. Línea roja representa recta que pasan por los puntos  $(x_1, y_1)$  y  $(x_2, y_2)$ .

Observando la semejanza de los triángulos  $\Delta BAD$  y  $\Delta CAE$ , se obtendrá por una parte:

$$\frac{\overline{CA}}{\overline{BA}} = \frac{\overline{CE}}{\overline{BD}}$$

Por lo que despejando, nos quedará:

$$\overline{BD} = \frac{\overline{BA}}{\overline{CA}} \overline{CE}$$

Sustituyendo los puntos,

$$(y - y_1) = \frac{x_1 - x}{x_1 - x_2} (y_2 - y_1)$$

Finalmente, se obtendrá el valor de altura (y) en metros sobre el nivel del mar para la temperatura del aire en °C (x) siguiendo la relación:

$$(1) y = \frac{x_1 - x}{x_1 - x_2} (y_2 - y_1) + y_1$$

La AIC se obtendrá con la ecuación (1) durante los períodos mencionados en la tabla 3.2. El registro de las 00Z representará al período nocturno y el de las 12Z al diurno. Se considerará los 2500 (msnm) como la altura de división entre la precipitación líquida y sólida tal como lo estipulaba la norma inicial de operación del programa siembra terrestre de nubes aplicado en la cuenca del río Cachapoal. Es decir, se seleccionarán los días que presenten una AIC menor o igual a este valor como filtro inicial de selección de los casos. Además, para este último, se calculará por medio de la ecuación 1 la altura de la isoterma -5 °C considerada como el umbral de nucleación del yoduro de plata.

(ii) Determinación de la altura base de las nubes

En la cuenca del río Cachapoal se cuenta con estaciones de superficie pero no de radiosondeo por eso se estimará la altura base de las nubes (ABN) centrados en Lawrence (2005) utilizando las ecuaciones (2) a (4).

$$(2) z_{LCL} = 125 * (t - t_d); \text{ con } t_d \text{ observada}$$

$$(2.1) z_{LCL} = 125 * (t - t_d); \text{ con } t_d \text{ estimada}$$

$$(3) z_{LCL} = \left(20 + \frac{t}{5}\right) (100 - HR)$$

$$(4) z_{LCL} = 25 * (100 - HR)$$

Donde z será la ABN en metros sobre nivel de la estación meteorológica (msns), t la temperatura (°C), HR la humedad relativa (%) y td la temperatura del punto de rocío (°C). Esta última se calculará utilizando:

$$(5) \quad t_d = \frac{B_1 \left[ \ln\left(\frac{HR}{100}\right) + \frac{A_1 t}{B_1 + t} \right]}{A_1 - \ln\left(\frac{HR}{100}\right) - \frac{A_1 t}{B_1 + t}}$$

Donde los valores para los coeficientes serán para A<sub>1</sub> de 18 °C y B<sub>1</sub> de 243 °C.

Utilizando datos de superficie de temperatura (t), punto de rocío (td) y humedad relativa (HR) del radiosonda Santo Domingo se estimará la ABN y se verificará con los valores observados del sondeo con el objetivo de confirmar la exactitud de las ecuaciones (2) a (4). Se tomarán como método de comparación el coeficiente de correlación lineal (R), Sesgo, Error Cuadrático Medio y Diferencia Relativa (DR) (Anexo 1). Finalmente, se seleccionará la ecuación que presente mayor capacidad predictiva para ser utilizada en el resto del trabajo. Con los datos horarios de la estación meteorológica se obtendrá el promedio o umbral de la ABN en cada período diurno (8:00 a 19:59 H.L) y nocturno (20:00 a 7:59 H.L), el cual según se mantuviese por debajo 2500 (msnm) determinará la efectiva presencia de nubosidad en la cuenca del río Cachapoal y permitirá estimar la distancia que el material de siembra debiera recorrer desde cada punto de emisión a la base de las nubes durante los períodos indicados en la tabla 3.2.

(iii) Dirección del viento medio e imágenes satelitales

Se determinará la dirección del viento medio en el nivel de presión (mb) correspondiente a la ABN (estimada) para la fecha y hora (Z) según cada caso. Será significativo observar si la dirección del viento medio mantiene una componente del oeste (suroeste o noroeste) para verificar la correcta dispersión del material glaciogénico en las nubes hacia el área destino del programa. En caso contrario, si presenta una componente del este se transportaría el compuesto emitido por la red de generadores terrestres de yoduro de plata hacia el valle de la cuenca del río Cachapoal. Además, se observarán las imágenes satelitales cada 3 horas en los períodos nocturnos y diurnos, según corresponda, con el fin de verificar la presencia de nubosidad en el área destino del programa siembra terrestre de nubes.

### 3.4.2 Determinación de los días que hubo siembra terrestre de nubes con y sin condiciones meteorológicas

Una vez generada la agrupación de datos con los mencionados filtros de clasificación (puntos i a iii) se procederá a contrastar con los registros diarios de activación de la red. Utilizando los informes de operación de la empresa ejecutante del programa se identificará el dato horario de inicio de este proceso. Esta información logrará dividir en dos períodos el análisis: si la activación de la red se realizó entre las 8:00 a 19:59 se considerará activación diurna y nocturna si se realizó entre las 20:00 a 7:59. Los días de activación de la red que no se ajusten a los filtros de selección previstos se les realizarán el cálculo de los parámetros (i) altura de isoterma 0 °C (ii) altura base de las nubes (ABN), (iii) dirección del viento medio y (iv) nubosidad.

### 3.4.3 Determinación de la respuesta de la siembra terrestre de nubes sobre la pluviometría local

Utilizando el promedio diario de precipitación en cada período invernal y estación meteorológica entre los años 2009 a 2012 se determinará la respuesta local de la siembra terrestre de nubes en el área destino del programa. De esta forma, las series de precipitación resultantes serán estacionales (abril a septiembre). Se definirá la intensidad de la precipitación media por día como el cociente entre la cantidad de precipitación acumulada en el período invernal (abril a septiembre) y el número de días con registro de precipitación en dicho período y estación meteorológica. Posteriormente, se describirá la anomalía como el peso de cada día de precipitación respecto a su media. Para así finalmente, expresar la variabilidad de la precipitación diaria ( $V_p$ ) en porcentaje.

$$(6) A_p = (P_i - \bar{P})$$

$$(7) V_p = \left( \frac{P_i - \bar{P}}{\bar{P}} \right) * 100$$

Dónde:

$A_p$  = Anomalía de precipitación

$P_i$  = Precipitación en intervalos de 24 horas

$\bar{P}$  = Precipitación media por período invernal y estación meteorológica

$V_p$  = Variación de precipitación (%)

Para el análisis se considerarán sólo los registros de precipitación diaria mayor o igual a 1 (mm), excluyendo al intervalo perteneciente entre 0,1 a 0,9 (mm/24 h) los cuales incluirían fenómenos de llovizna y niebla, además, los días sin registro de precipitación. Posteriormente, se determinará la precipitación acumulada en el día, y sus posteriores 24 horas (+1 día)<sup>10</sup>, para los casos seleccionados del punto 3.4.1 y 3.4.2. Para finalizar, se obtendrá la variación porcentual de la precipitación acumulada respecto al promedio diario en cada período invernal y estación meteorológica. La variación de precipitación mayor o igual al 10%<sup>11</sup> respecto al promedio diario se establecerá como umbral inicial a partir del cual sería considerada una respuesta positiva a la aplicación del programa en la cuenca de estudio.

#### 3.4.4 Verificación del efecto de la siembra terrestre de nubes basada en la fluviometría

Utilizando caudales medios mensuales entre los años 1989 a 2013 se verificará el efecto de la siembra terrestre de nubes. Se seleccionará una región hidrológica ubicada inmediatamente al norte de la cuenca destino con el objeto de dilucidar si hubo variación fluviométrica respecto a un área de control, de similares características, ubicada lejos del efecto del programa. Para la designación de las estaciones fluviométricas control y destino se buscarán semejanzas climatológicas, geográficas y de altitud para obtener una mayor correlación histórica entre las variables. De esta forma, se compararán las fluviometrías de las estaciones ubicadas en el río Cachapoal en Puente Termas y Pangal en Pangal como las áreas destino, versus las áreas control con datos del río Maipo en La Obra y Las Hualtatas.

Para verificar el efecto de la siembra en la capa nival acumulada durante el período invernal, lo que se traduciría en caudal de deshielo, se utilizará el rango de meses entre octubre a febrero. Siguiendo la metodología de verificación estadística, los datos históricos de caudal medio mensual (tabla 3.5) se seleccionarán considerando los años que no fueron sometidos a actividades de siembra. Estas series se utilizarán para desarrollar la ecuación de regresión la cual se aplicará al período sembrado para estimar como habría sido el comportamiento del caudal medio mensual del área fijada como

---

<sup>10</sup> (+1 día): Hace referencia a las 24 horas posteriores al evento de siembra.

<sup>11</sup> Porcentaje promedio entre el 5% a 15% de incremento que este tipo de programas puede alcanzar en la variable afectada por la siembra de nubes (Defelice et al., 2014).

destino (con siembra) en base a lo que se observó en el área de control (sin siembra) durante el período de deshielo (octubre a febrero) (Griffith et al., 2011).

La recta de regresión (Fig. 3.4) estimada para el modelo lineal simple será:

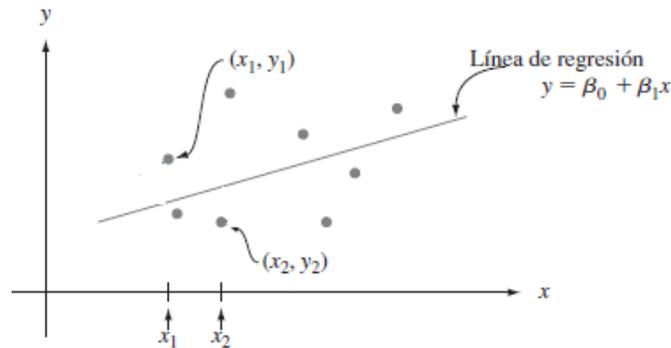


Figura 3. 4 Recta de regresión estimada para un modelo lineal simple.

$$(8) Y = \beta_0 + \beta_1 x_1$$

Donde,  $Y$  corresponderá al estimador (pronóstico) para la media de la observación  $Y_1$  (área destino), la cual corresponderá al valor  $x_1$  de la variable del área control. Los estimadores de mínimos cuadrados  $\beta_0$  (intersección) y  $\beta_1$  (pendiente) se obtendrán de la base de datos histórica. Los períodos históricos de deshielo (15 temporadas de octubre a febrero) no afectados por el desarrollo del programa, serán considerados desde octubre de 1989 a febrero del 2000 y de octubre 2004 a febrero 2008. Tal como se ha realizado en evaluaciones previas realizadas al programa usando el método de verificación estadístico, se excluirán los meses de octubre 2000 a febrero 2004, por haber estado bajo los efectos del programa de siembra nubes cuando tuvo como objetivo incrementar la precipitación líquida en la cuenca del río Cachapoal.

El residuo  $(Y_i - Y)$ , entre la  $Y_i$  observada y la  $Y$  estimada, permitirá comparar la variación fluviométrica en porcentaje por medio de la siguiente expresión:

$$(9) V_F = \left( \frac{Y_i - Y}{Y} \right) * 100$$

De la ecuación (9) se obtendrá un pronóstico por meses de los cuales se calculará la variación media mensual de los caudales y un promedio por temporada (5 meses).

## **4. Resultados**

### **4.1 Determinación de los días que existían condiciones meteorológicas para la siembra terrestre**

#### 4.1.1 Verificación de la estimación de la altura de la base de las nubes

La correlación entre la altura de la base de las nubes (ABN) estimada de las ecuaciones (2) a (4) y la ABN observada del radiosonda de Santo Domingo se muestra en la Fig. 4.1 y 4.2. Considerando, inicialmente, la temperatura del aire a nivel de superficie ( $t_a$ ) y la temperatura del punto de rocío ( $t_d$ ) medida se obtuvo una subestimación de ABN con un sesgo para las 00Z (20:00 H.L) y 12Z (8:00 H.L) de 3 (msnm) y una diferencia relativa (DR) de 1,16% a las 00Z y de 1,20% a las 12Z en la ecuación 2. Al relacionar la  $t_a$  con una  $t_d$  estimada a partir de la humedad relativa (HR) en la ecuación 2.1 se obtuvo valores de RMSE de 7,02 (msnm) a las 00Z y de 6,32 (msnm) a las 12Z (tabla 4.1). Posteriormente, al relacionar la  $t_a$  y la HR se obtuvo un sesgo de 17,11 (msnm) a las 12Z y de 62,48 (msnm) a las 00Z en las ecuaciones 3 y 4, respectivamente (tabla 4.2). En todos los casos, se presentó un menor error en la estimación de la ABN de las 00Z versus las 12Z. El descenso mayor de la temperatura, y por consiguiente una mayor HR en los períodos nocturnos (debido principalmente a un mayor enfriamiento radiativo) resultó en una ABN más baja. Cabe destacar que se asume que todos los sondeos describieron una trayectoria vertical, sin embargo, al relacionar  $t_a$  con la HR (ecuación 3 y 4) no se logró estimar con exactitud la ABN sobre los 1000 (msnm) para las 00Z y sobre los 600 (msnm) para las 12Z debido al desplazamiento lateral que se pudo presentar por la acción del viento desde mencionadas alturas. En concordancia con las sugerencias presentadas en Lawrence (2005) se recomienda la utilización principalmente de la  $t_a$  y la  $t_d$  (medida o estimada a partir de la HR) para calcular la ABN en ausencia de datos de radiosondeo en la Región de estudio.

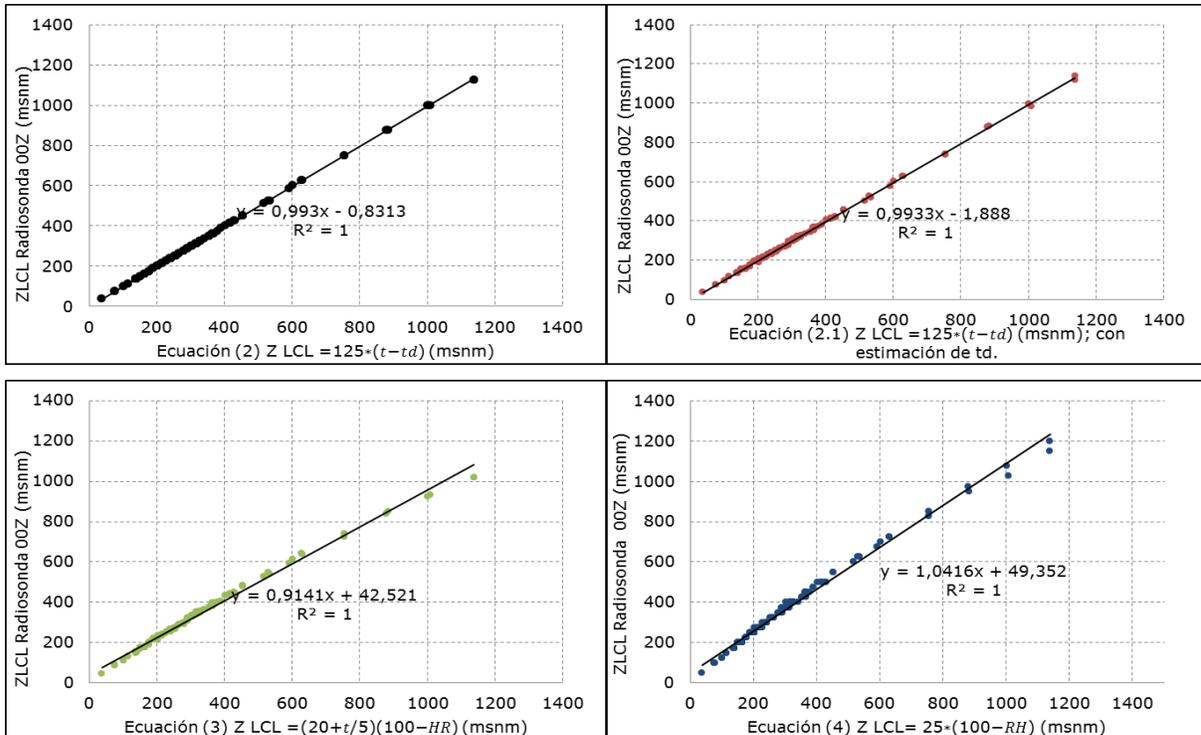


Figura 4. 1 Correlaciones entre la altura de la base de las nubes observada frente a la estimada utilizando datos de superficie del radiosonda Santo Domingo a las 00Z entre los años 2009 a 2012.

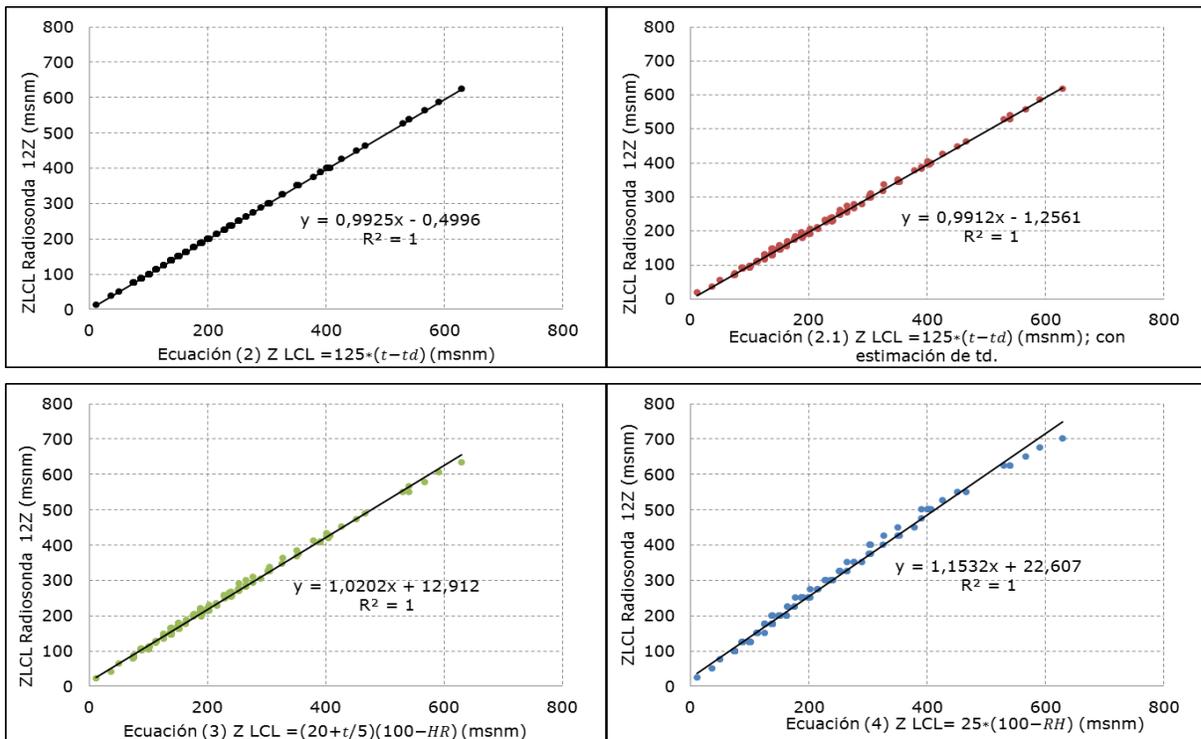


Figura 4. 2 Correlaciones entre la altura de la base de las nubes observada frente a la estimada utilizando datos de superficie del radiosonda Santo Domingo a las 12Z entre los años 2009 a 2012.

Tabla 4. 1 Parámetros estadísticos de la estimación de altura de la base de la nube a partir de la temperatura del aire a nivel de superficie y la temperatura del punto de rocío medida y estimada entre los años 2009 a 2012.

Hora (Z)	Datos	Ecuación 2		Ecuación 2.1	
00	124	R	1,00	R	1,00
		BIAS	-3,04	BIAS	-3,99
		RMSE	3,67	RMSE	7,02
		RD (%)	1,16	RD (%)	2,23
Hora (Z)	Datos	Ecuación 2		Ecuación 2.1	
12	130	R	1,00	R	0,99
		BIAS	-2,06	BIAS	-3,09
		RMSE	2,49	RMSE	6,32
		RD (%)	1,20	RD (%)	3,04

Tabla 4. 2 Parámetros estadísticos de la estimación de altura de la base de la nube a partir de la temperatura del aire a nivel de superficie y la humedad relativa entre los años 2009 a 2012.

Hora (Z)	Datos	Ecuación 3		Ecuación 4	
00	124	R	0,99	R	0,99
		BIAS	15,42	BIAS	62,48
		RMSE	28,36	RMSE	65,81
		RD (%)	8,99	RD (%)	20,86
Hora (Z)	Datos	Ecuación 3		Ecuación 4	
12	130	R	0,99	R	0,99
		BIAS	17,11	BIAS	54,48
		RMSE	18,74	RMSE	58,94
		RD (%)	9,01	RD (%)	28,33

El lanzamiento de radiosonda más cercano al sector cordillerano de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins se realiza en la costa de la Región de Valparaíso a más de 86 kilómetros al noroeste, por lo tanto, su información no sería totalmente representativa para la cuenca de estudio. Para el cálculo de la ABN se utilizaron los datos de la estación meteorológica de Maitenes (1055 msnm) porque se encuentra a una altura promedio de la red de ocho equipos de siembra terrestre y por presentar las condicionantes de temperatura (t) positiva entre  $0^{\circ} < t < 30^{\circ} \text{C}$  y  $\text{HR} > 50\%$  que sugiere el autor para aplicar las ecuaciones (Lawrence, 2005). Además, se utilizó la relación entre la ta con una estimación de td a partir de la HR debido a que las estaciones meteorológicas (tabla 3.3) utilizadas en este trabajo no presentan un registro de td.

#### 4.1.2 Determinación de los días que existían condiciones meteorológicas para la siembra terrestre

El nivel de congelamiento en la atmósfera es la altitud a la cual la temperatura del aire es de 0 °C y representa la altura de la isoterma 0 °C (AIC). En la Fig. 4.3 se presenta la AIC para el período nocturno (N) correspondiente a las 00Z (20:00 H.L) y diurno (D) a las 12Z (08:00 H.L) desde el mes de abril a septiembre entre los años 2009 a 2012. En términos generales, la AIC alcanzó en promedio un valor de 3145 y 3139 (msnm) en los períodos (N) y (D) respectivamente. Se observó un descenso de la AIC a medida que nos acercábamos a los meses invernales alcanzando un valor mínimo durante el mes de julio 2009 de 1252 (msnm) (N) y de 1060 (msnm) en julio 2011 (D) principalmente durante el paso de una masa de aire fría. Mientras que el ascenso de la AIC, de acuerdo con la propia fluctuación estacional, se observó durante el mes de mayo 2010 con un valor de 4931 (msnm) (N). Durante un evento de precipitación, AIC delimita aproximadamente las zonas que recibirán lluvia (terreno con elevaciones bajo AIC) o nieve (terreno con elevaciones sobre AIC). En Chile central se ha estudiado que cada tormenta tiene su propio valor de AIC, en algunos eventos muy fríos la AIC puede estar por debajo de los 1500 (msnm) y en algunos casos cálidos estar por encima de los 3500 (msnm) (Garreaud 2013). Por lo cual, las AIC obtenidas están dentro del rango esperado para la latitud de la Región de estudio.

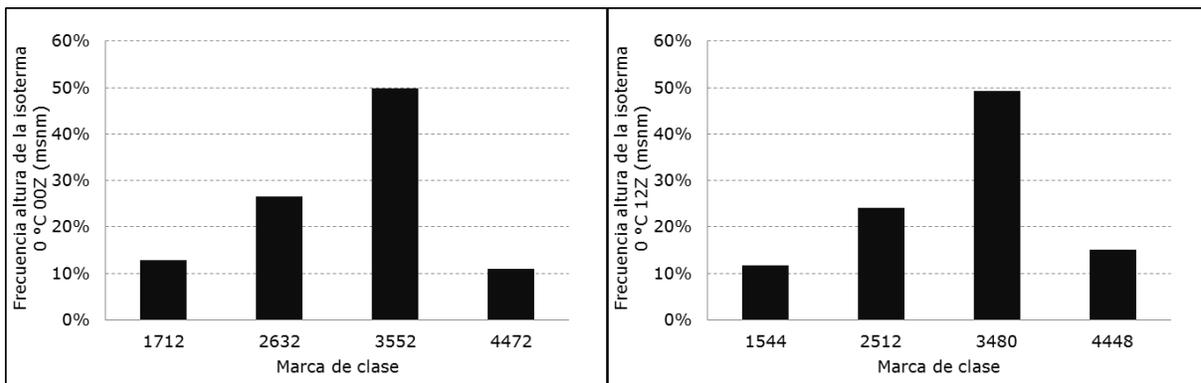


Figura 4. 3 Frecuencia de la altura de la isoterma 0 °C (msnm) registrada en la estación de radiosonda de Santo Domingo desde el mes de abril a septiembre entre los años 2009 a 2012 a las 00Z (izquierda) y 12Z (derecha).

Del total de 560 (N) y 578 (D) casos analizados entre los años 2009 a 2012 se seleccionaron los que presentaron una AIC menor o igual a 2500 (msnm) como filtro inicial de selección. Cabe recordar que está altura de la isoterma denota la norma inicial de operación de la red de equipos de siembra terrestre de nubes en la cuenca del río

Cachapoal debido a que el diseño del programa tuvo como objetivo aumentar la precipitación sólida. De ellos el 22% y 23%, correspondiente a 124 (N) y 132 (D) respectivamente, presentó una AIC menor o igual a 2500 (msnm) en torno principalmente a los meses de julio a agosto del invierno en el hemisferio sur (Fig. 4.4). En los períodos invernales de los años 2010 y 2011, en presencia del fenómeno climático La Niña (fase fría de El Niño Oscilación del Sur), hubo una mayor frecuencia en AIC menor o igual a 2500 (msnm). Por otro lado, la AIC tendió a ser más alta durante el invierno del año 2009 con El Niño (fase cálida de El Niño Oscilación del Sur) y en el año 2012 bajo un período Neutro (tabla 4.3). Se ha documentado ampliamente la tendencia a precipitaciones superiores a lo normal en el centro de Chile entre los 30° y 35° de latitud sur durante el período invernal entre los meses junio a agosto durante los episodios de El Niño, condición que es acorde con los registros de agua caída en la cuenca de estudio entre en los años 2009 y 2012. En cambio, en los meses de julio y agosto de los años 2010 y 2011 durante la fase La Niña a pesar que hubo menor registro de precipitación hubo mayor número de eventos que generaron un descenso de la AIC debido a que fue un período invernal frío.

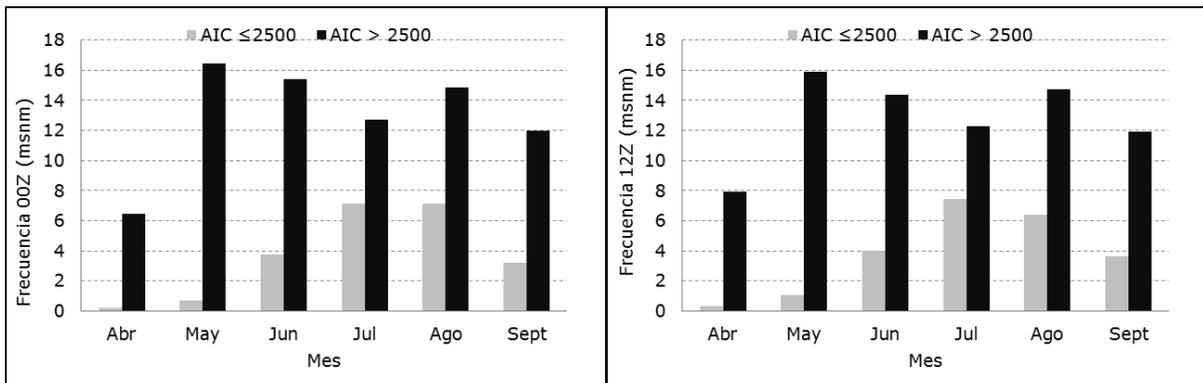


Figura 4. 4 Frecuencia de la altura de la isoterma 0 °C menor o igual y mayor a los 2500 (msnm) desde el mes de abril a septiembre entre los años 2009 a 2012 a las 00Z (izquierda) y 12Z (derecha).

Una vez determinada la AIC para los casos donde fue menor o igual a 2500 (msnm) se calculó el umbral de la altura de la base de las nubes (ABN) en cada período nocturno (20:00 a 7:59 H.L) y diurno (8:00 a 19:59 H.L). La Fig. 4.5 presenta los períodos N y D donde la AIC y ABN fueron menor o igual a 2500 (msnm). Con respecto al segundo filtro de selección, se identificaron 122 (N) y 125 (D) casos con una ABN menor o igual a 2500 metros. En base a lo observado, las alturas se mantuvieron en promedio en 1201 (msnm) (N) y 1518 (msnm) (D). En los períodos nocturnos se observó una disminución en altura

variando entre los 664 a 3361 (msnm). Mayoritariamente, en este período resulto presentar una ABN promedio más baja cuando la diferencia entre la  $t_a$  y  $t_d$  fue pequeña.

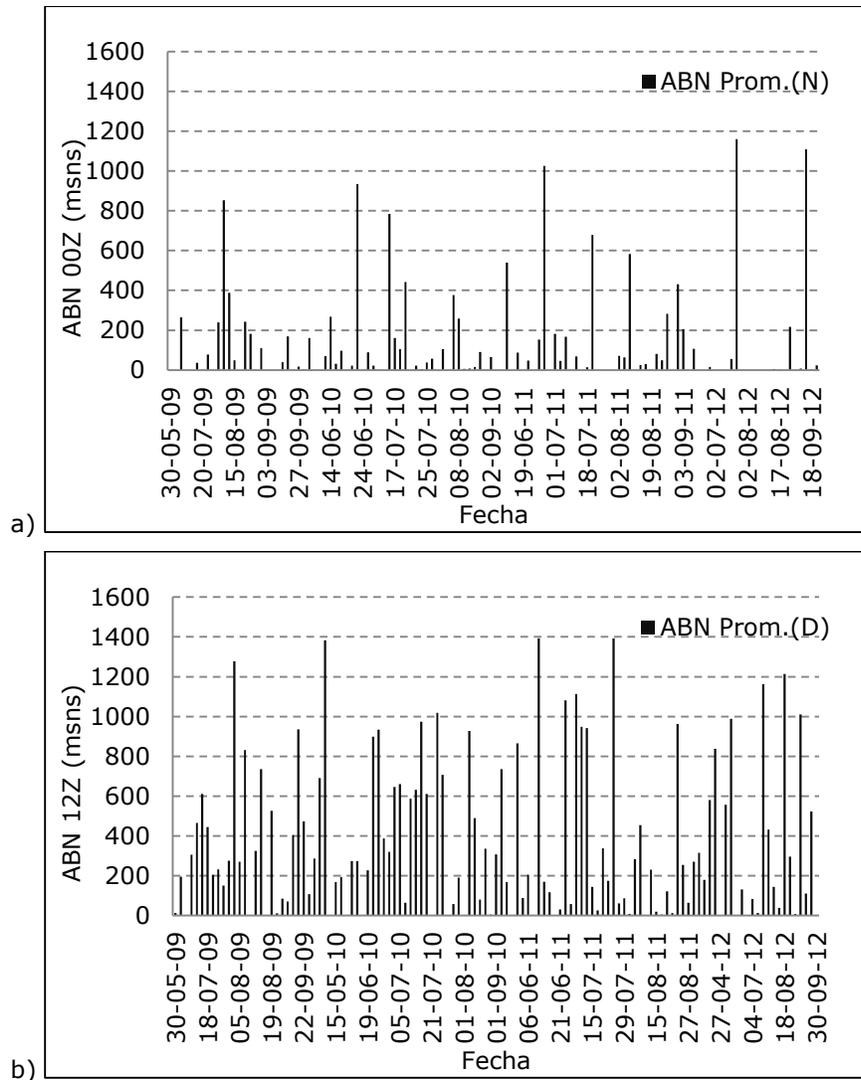


Figura 4. 5 Altura de la base de la nube (ABN) (msns) estimada respecto a la estación de Maitenes (1055 msnm) para los períodos nocturnos (a) y diurnos (b) donde la altura de la isoterma 0 °C fue menor o igual a los 2500 (msnm).

Una vez seleccionados los casos donde la AIC y ABN fueron menores o iguales a 2500 (msnm) se determinó la dirección del viento medio. La dirección del viento medio a la ABN promedio convertida de altura a niveles de presión (mb) para los períodos nocturnos y diurnos es presentada en la Fig. 4.6. Al variar la altura donde se produjo la condensación de las nubes en los 122 (N) y 125 (D) casos, se obtuvo diversos niveles de presión los cuales oscilaron entre los 925 (mb) a 600 (mb). Del tercer filtro de selección, se obtuvo una frecuencia predominante del 41% (00Z) a 38% (12Z) de viento del

suroeste y 24% (00Z) a 31% (06Z) del noroeste. Así mismo, se puede decir que los vientos con componente este presentaron una frecuencia minoritaria de 23% (00Z) a 22% (18Z) del sureste y 9% (00Z) a 4% (12Z) del noreste.

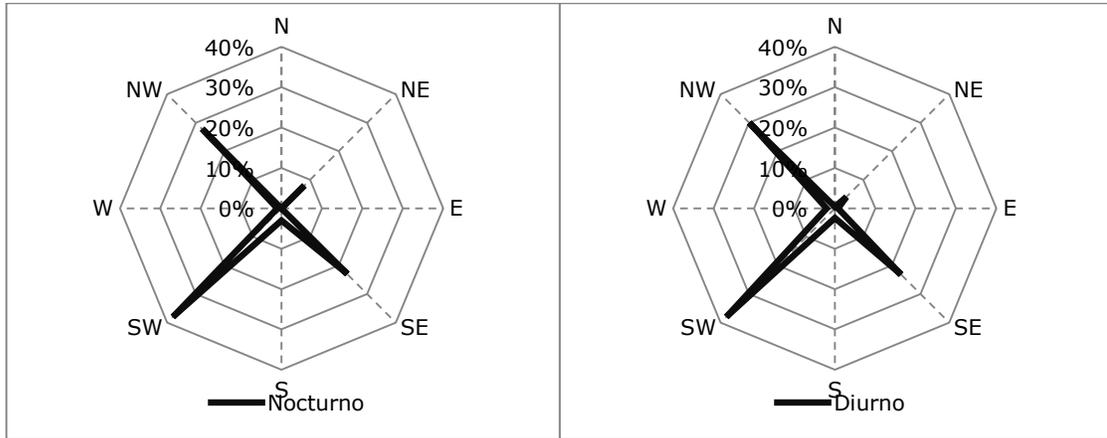


Figura 4. 6 Variación de la dirección del viento medio a la altura de la base de la nube en los casos donde la altura de la isoterma 0 °C y altura de la base de la nube fueron menor o igual a 2500 (msnm).

Al verificar la presencia de nubosidad en el área destino del programa siembra terrestre de nubes con las imágenes (visible, infrarrojo y vapor de agua) del satélite del GOES-13, para el conjunto total de casos seleccionados, se obtuvo que el incremento en el espesor nuboso se relacionó al paso de sistemas frontales (condición pre frontal y frontal) y por bajas segregadas. A partir de las condiciones pre frontales, se observó la aproximación de abundante nubosidad del tipo media y alta (altoestratos y altocúmulos), y al paso del mismo, nimboestratos, estratocúmulos, cúmulos sobre la cuenca de estudio. Las bajas segregadas debido a su grado de inestabilidad atmosférica generaron abundante nubosidad particularmente en su parte delantera, sector de abundante desarrollo de nubes altas y medias con formación de bandas convectivas. En la imagen satelital infrarrojo de la Fig. 4.7 se observó, por ejemplo, sistema frontal del día 28 de junio de 2009 que cubrió de nubosidad la zona de estudio.

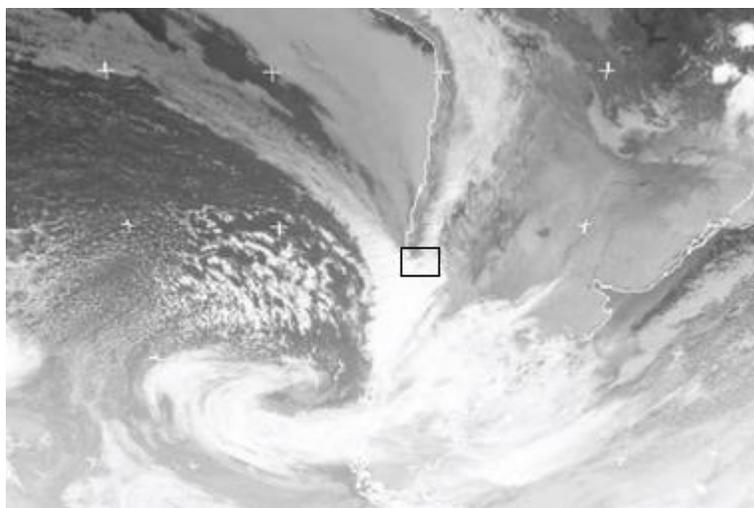


Figura 4. 7 Imagen satelital infrarroja del satélite del GOES-13 del día 28 de junio de 2009 a las 00Z (20:00 Hora local).

En la tabla 4.3 se presenta el resumen de los casos por grupo de clasificación. Siendo la condición 1 ( $C_1$ ) una AIC menor o igual a 2500 (msnm), condición 2 ( $C_2$ ) una ABN menor o igual a 2500 (msnm), condición 3 ( $C_3$ ) dirección del viento medio con una componente del oeste y condición 4 ( $C_4$ ) nubosidad en la cuenca destino. El mayor número de casos se produjo en la  $C_1$  y el menor número tiene lugar en la  $C_4$ . Se resume que el año 2011 fue el que presentó mayor cantidad de casos con 12 (N) y 9 (D) y el año 2012 la menor cantidad con solo 4. La selección de casos se empezó a acotar al analizar la dirección del viento y la nubosidad. En el primero hubo en 78 (N) y 82 (D) casos donde se observó una componente del oeste que contribuiría con el efecto del viento en la dispersión del material glaciogénico hacia el área destino del programa. En tanto, las condiciones de nubosidad no estuvieron siempre presentes sobre la cuenca durante los períodos nocturnos o diurnos seleccionados. En general, al analizar los 560 (N) y 578 (D) casos en los cuales estuvo operativo el programa siembra terrestre de nubes hubo un 22% (N) y 23% (D) que presentó una AIC menor o igual a los 2.500 (msnm). A partir de este dato, el resto de los casos fue descartado por no presentar en conjunto las cuatro condiciones y restricciones designadas en variables como: nubosidad 39% (N) y 36% (D); dirección viento medio 13% (N) y 8% (D); nubosidad y dirección viento medio 23% (N) y 24% (D); ABN y nubosidad 3% (D); ABN y dirección viento medio 1% (D); ABN, nubosidad y dirección viento medio 2% (N y D). Para finalizar, se obtuvo un 5% (30) y 6% (34) de casos donde existían condiciones para la siembra terrestre entre los años 2009 a 2012 basado en el cumplimiento de nuestros cuatro parámetros de activación de la red de equipos del programa.

Tabla 4. 3 Número de casos que cumplieron la condición 1 (C<sub>1</sub>) una altura de la isoterma 0°C menor o igual a 2500 (msnm), condición 2 (C<sub>2</sub>) una altura de la base de las nube menor o igual a 2500 (msnm), condición 3 (C<sub>3</sub>) dirección del viento medio con una componente del oeste, condición 4 (C<sub>4</sub>) nubosidad en la cuenca destino y el número de casos que cumplieron con todos los filtros (C<sub>1</sub> a C<sub>4</sub>).

Período Nocturno	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>3</sub> y C <sub>4</sub>
2009	27	27	17	9	8
2010	37	36	24	10	6
2011	37	36	23	16	12
2012	23	23	14	6	4
Total	124	122	78	41	30
Período Diurno	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>3</sub> y C <sub>4</sub>
2009	30	29	18	13	11
2010	41	36	24	11	10
2011	38	37	25	16	9
2012	23	23	15	5	4
Total	132	125	82	45	34

## 4.2 Determinación del número de días que hubo siembra terrestre de nubes con y sin condiciones meteorológicas

### 4.2.1 Días con condiciones meteorológicas y equipos de siembra terrestre activado

Entre el año 2009 a 2012 hubo 30 (N) y 34 (D) casos donde existían condiciones meteorológicas para la siembra terrestre bajo los cuatro parámetros de clasificación presentados en el punto 4.1.2, de ellos, en 5 (N) y 12 (D) hubo activación de la red de equipos (Fig. 4.8). Los eventos de siembra se presentaron alternadamente durante los meses invernales destacando una mayor ocurrencia en julio y agosto alcanzado en conjunto 14 casos, condición contraria ocurrió durante junio con 3 casos. Los meses que no presentan casos, coincidieron con la estación de otoño e inicios de la primavera donde se caracterizó por la estabilidad de las condiciones anticiclónicas que no favoreció el ingreso de sistemas frontales desde el Océano Pacífico. La tabla 4.4 indica las características de los casos que se ajustaron a las condicionantes de activación por período (N) y (D). De esta se puede destacar que durante los días de activación de la red la AIC varió entre los 1573 a 2427 (msnm) con un promedio de 2041 (msnm), concentrando el 50% de los casos entre los 1807 (msnm) y 2200 (msnm). Es interesante indicar que la altura de la isoterma no solo se presentó al mencionado nivel de referencia al inicio del evento de siembra, sino que se mantuvo en las 12 horas siguientes, con una

tendencia descendente en 3 de 5 eventos nocturnos a diurnos y en 9 de 12 eventos diurnos a nocturnos. Contrariamente, fue ascendente en 4 casos alcanzando los 2811 (msnm).

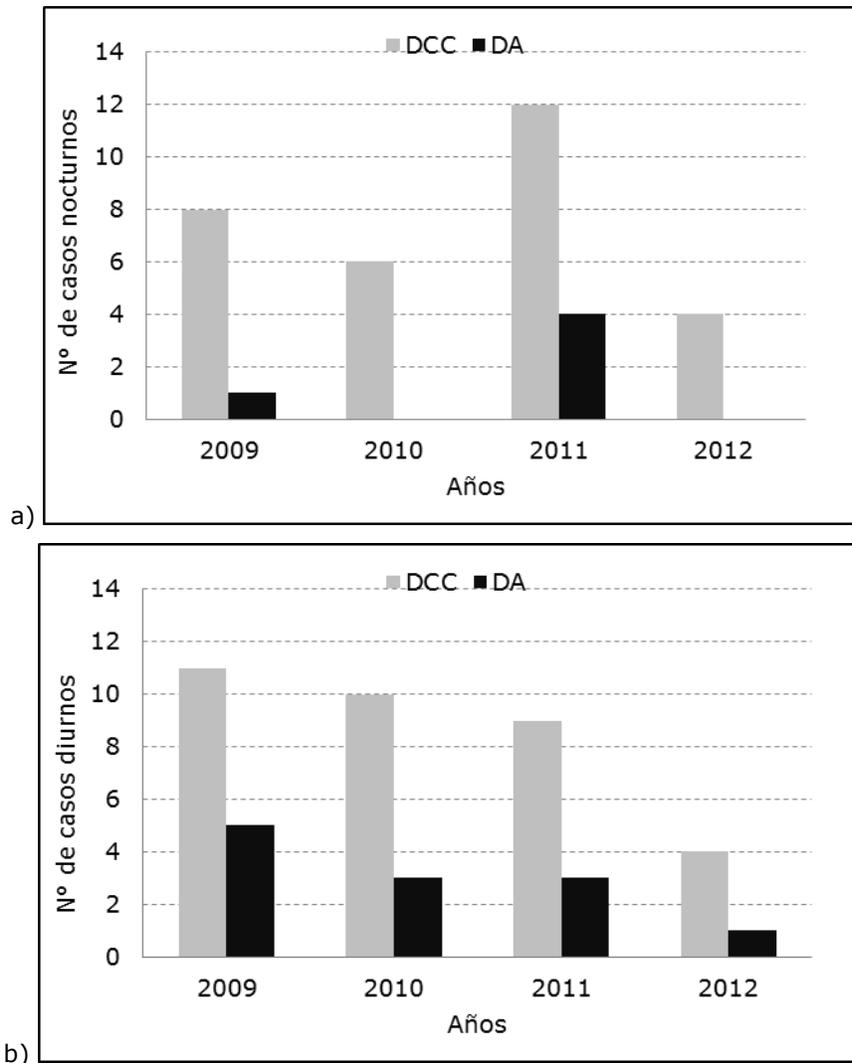


Figura 4. 8 Número de días con condiciones meteorológicas (DCC) versus día con equipos de siembra terrestre activado (DA) entre los años 2009 a 2012 para a) período nocturno y b) período diurno.

Tabla 4. 4 Días de siembra que se ajustaron a las cuatro condicionantes de activación por período (P) nocturno (N) y diurno (D). En la tabla a) activaciones nocturna

a)

Fecha	P	AIC	AIC (+12 hr.)	ABN Prom.	Dirección viento medio nocturno (00Z a 12Z)	
14-06-10	N	1807	1685	1323	NW	NW
02-08-11	N	1943	1351	1126	SW	SE
05-08-11	N	2229	2485	1638	SW	NW
16-08-11	N	1886	1525	1055	NW	NW
27-08-11	N	2136	2341	1104	NW	NW

Tabla 4.4 (Continuación) Días de siembra que se ajustaron a las cuatro condicionantes de activación por período (P) nocturno (N) y diurno (D). En la tabla b) activaciones diurnas.

b)

Fecha	P	AIC	AIC (+12 hr.)	ABN Prom.	Dirección viento medio diurno (12Z a 00Z)	
28-06-09	D	2144	1811	1057	NW	NW
30-06-09	D	2200	(s/i)	1361	NW	SW
04-07-09	D	2200	2811	1521	NW	NW
21-07-09	D	1658	1558	1206	NW	NW
18-08-09	D	2256	2003	1055	NW	NW
06-07-10	D	2051	1535	1120	NW	SW
23-07-10	D	1979	1559	1762	NW	NW
30-07-10	D	1573	1335	1113	SW	SW
14-07-11	D	2427	1705	1997	NW	NW
17-08-11	D	2000	1775	1177	NW	NW
28-08-11	D	2225	1562	1326	NW	NW
16-08-12	D	1977	2046	1199	NW	NW

Otro nivel importante de observar fue la altura de la isoterma  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (AI-5), ya que, a temperaturas inferiores a esta se produce la activación del producto glaciogénico como el AgI que se emite desde la red de equipos de siembra terrestre de nubes. Su comportamiento, durante los eventos que cumplieron los cuatro parámetros de clasificación, mostró una variación entre los 2307 (msnm) a 3290 (msnm) con un valor medio de 2862 (msnm). Al analizar los umbrales de AIC y AI-5 en el evento de siembra las mínimas diferencias residuales se dieron el 28 de agosto 2011 en una activación diurna con una diferencia de 517 (msnm) y el 21 de julio 2009 en una activación diurna de la red con una diferencia de 649 (msnm) (Fig. 4.9). Aunque la condición meteorológica inicial, una AIC menor o igual a 2500 (msnm), se cumplió en los eventos seleccionados es importante que haya presentado una cercanía con la AI-5. En el análisis, de los 17 casos (5 N y 12 D), hubo en 3 donde se produjeron las máximas diferencias entre la AIC y la AI-5 de 1235 (msnm) el 14 de junio 2010 en una activación nocturna, seguida por las activaciones diurnas del 16 agosto 2012 con 1163 (msnm) y 17 de agosto 2011 con 1002 (msnm). Dado que la distancia en estos casos entre la AIC y AI-5 fue mayor a 1 km es muy probable que la siembra no hubiese sido efectiva. Desde el punto de vista de la temperatura, significa que la siembra es probablemente eficaz en los eventos que hayan sido lo suficientemente fríos para ser sembrados, es decir, donde la altura de la AIC fue cercana a la AI-5.

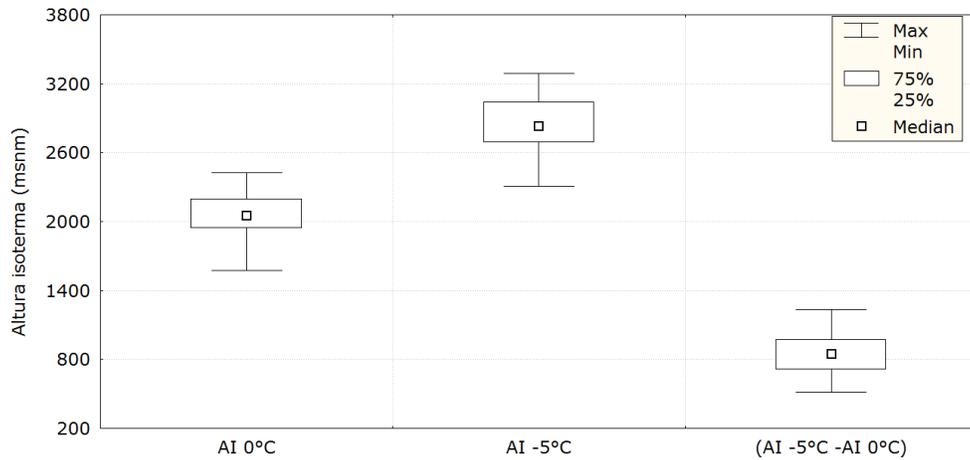


Figura 4. 9 Box-plot de las alturas de las isoterma 0 °C, -5 °C y su residuo durante los días de siembra con condiciones.

Si la siembra se realiza desde una red de generadores terrestres es importante conocer si el material de siembra llega a la base de las nubes y por medio de las corrientes ascendentes alcance la AI-5. Si la distancia entre el equipo de siembra y la AI-5 es muy grande es probable que la siembra no tenga eficacia. Con la ABN promedio estimada, en conjunto con la altura del equipo de siembra, se verificó la distancia que pudo recorrer el material glaciogénico respecto a la superficie en cada evento. La tabla 4.5 muestra la distancia del equipo de siembra hasta la ABN en los 5 (N) y 12 (D) casos clasificados. Las diferencias negativas indican que el equipo de siembra estuvo dentro de la ABN estimada y las positivas indican la distancia que pudo existir entre ambos. Se observó que en los equipos ubicados a mayor cota, a partir de los 1433 (msnm), como Bocatoma Pangal, Colón, Caletones y Chapa Verde el umbral de desplazamiento fue reducido, es decir, es probable que la dispersión del material glaciogénico se haya realizado cercano o en el interior de la nubosidad presente. Considerando el amplio rango de distancias obtenidas, se cree que al alejarnos del foco emisor (equipo de siembra) las concentraciones del material dispersado disminuyeron abruptamente. De hecho, el umbral más alto se presentó desde los equipos ubicados a una altura menor a los 1000 (msnm) como Picarquín, La Leonera, Coya y Central Pangal donde hubo una distancia de hasta los 1317 (msnm) entre el equipo de siembra y la ABN estimada.

Tabla 4. 5 Distancia (msns) entre la altura de la base de la nube estimada promedio y la altura del equipo de siembra terrestre. En la tabla superior se presenta a) activaciones nocturnas, e inferior b) activaciones diurnas.

a)

Fecha	Picarquín (680 msnm)	Leonera (689 msnm)	Coya (872 msnm)	C. Pangal (962 msnm)	B. Pangal (1433 msnm)	Colón (1565 msnm)	Caletones (2036 msnm)	C. Verde (2268 msnm)
14-06-10	643	634	451	361	-110	-242	-713	-945
02-08-11	446	437	254	164	-307	-439	-910	-1142
05-08-11	958	949	766	676	205	73	-398	-630
16-08-11	375	366	183	93	-378	-510	-981	-1213
27-08-11	424	415	232	142	-329	-461	-932	-1164

b)

Fecha	Picarquín (680 msnm)	Leonera (689 msnm)	Coya (872 msnm)	C. Pangal (962 msnm)	B. Pangal (1433 msnm)	Colón (1565 msnm)	Caletones (2036 msnm)	C. Verde (2268 msnm)
28-06-09	377	368	185	95	-376	-508	-979	-1211
30-06-09	681	672	489	399	-72	-204	-675	-907
04-07-09	841	832	649	559	88	-44	-515	-747
21-07-09	526	517	334	244	-227	-359	-830	-1062
18-08-09	375	366	183	93	-378	-510	-981	-1213
06-07-10	440	431	248	158	-313	-445	-916	-1148
23-07-10	1082	1073	890	800	329	197	-274	-506
30-07-10	433	424	241	151	-320	-452	-923	-1155
14-07-11	1317	1308	1125	1035	564	432	-39	-271
17-08-11	497	488	305	215	-256	-388	-859	-1091
28-08-11	646	637	454	364	-107	-239	-710	-942
16-08-12	519	510	327	237	-234	-366	-837	-1069

Continuando con el análisis, se obtuvo la dirección del viento medio a la ABN estimada como reflejó del movimiento de las partículas de yoduro de plata a partir de sus puntos de liberación a la zona destino del programa. El viento en los eventos de siembra tuvo una componente del oeste, con una dirección entre sur y norte. La dirección del viento fue del suroeste el 40% (N) y de 25% (D) y del noroeste en el 60% (N) y 75% (D) de los casos. Este resultado sugiere que la componente oeste del viento fue importante para maximizar los probables impactos de la siembra. Se ejemplifica, en la Fig. 4.10, la activación diurna del 6 de julio 2010 entre las 12Z a 00Z en donde hubo una variación de la dirección del noroeste al suroeste, mientras que durante la activación nocturna del 5 de agosto 2011 entre las 00Z a 12Z se mantuvo en dirección del noroeste.

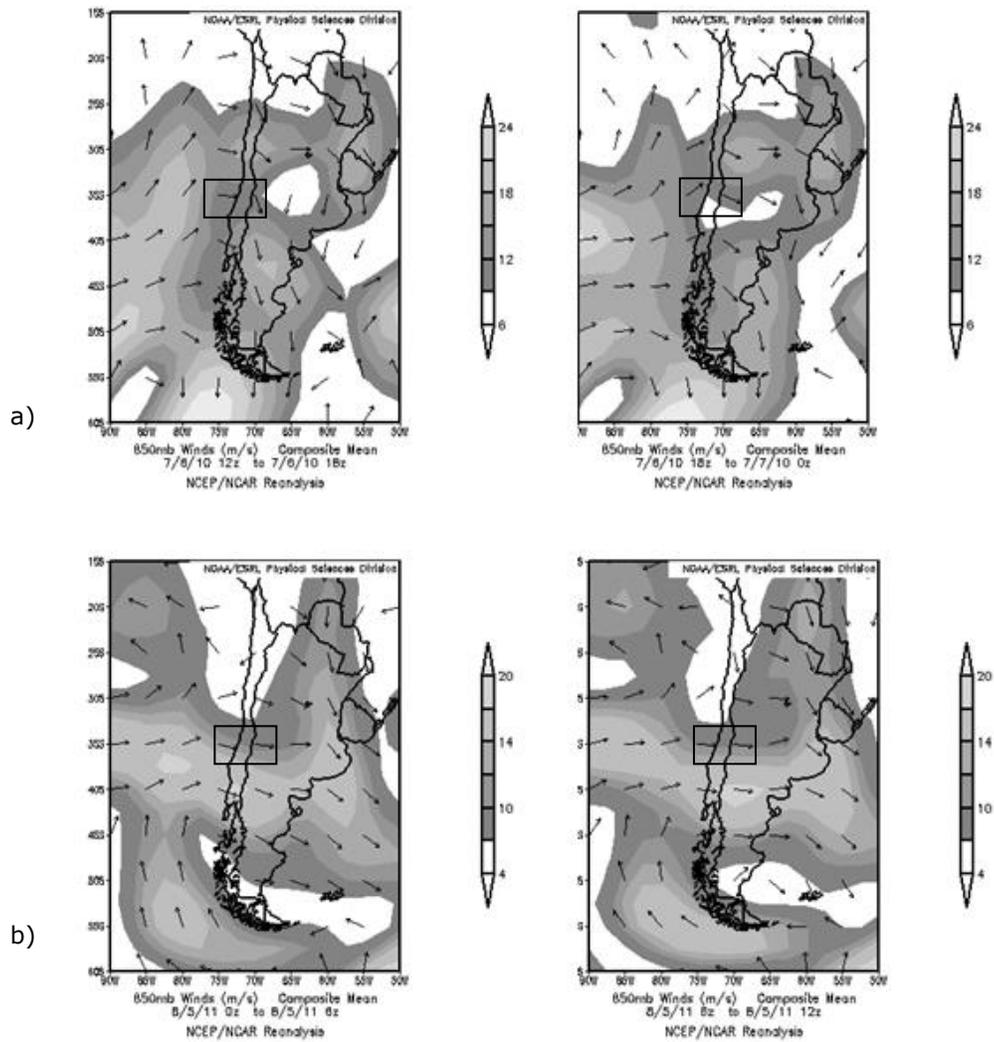


Figura 4. 10 Distribución espacial de la dirección del viento medio a la altura de la base de las nube estimada durante (a) activación diurna del 6 de junio 2010 entre las 12Z-00Z (b) activación nocturna del 5 de agosto 2011 entre las 00Z-12Z.

En resumen, se obtuvo que de los 48 eventos de activación de la red que se realizaron entre los años 2009 a 2012 el 35% (17) de los casos (5 N y 12 D) fueron bajo los cuatro parámetros de clasificación: AIC menor o igual a 2500 (msnm), ABN menor o igual a 2500 (msnm), dirección del viento medio con una componente del oeste y nubosidad en la cuenca destino. Sin embargo, si consideramos el número de veces que se podría haber activado corresponde a solo el 17% (N) y 35% (D) de los casos.

#### 4.2.2 Días sin condiciones meteorológicas y equipos de siembra terrestre activado

La Fig. 4.11 muestra los 48 de eventos de siembra realizados en el período 2009 a 2012. De ellos, 10 (N) y 21 (D) de los casos no se ajustaron a los cuatro parámetros de

clasificación previstos y hubo activación. En general, el mes de junio presentó mayor frecuencia en la activación de la red bajo mencionadas características con 13 eventos, seguido de 6 en agosto, 4 en mayo, 3 en julio y septiembre, en cambio, en abril hubo solo 2 casos. Respecto a la cantidad de eventos por año, se destacan los años 2010 y 2012 con 10 y 8 casos cada uno, 7 el año 2009 y un mínimo de 6 el año 2011.

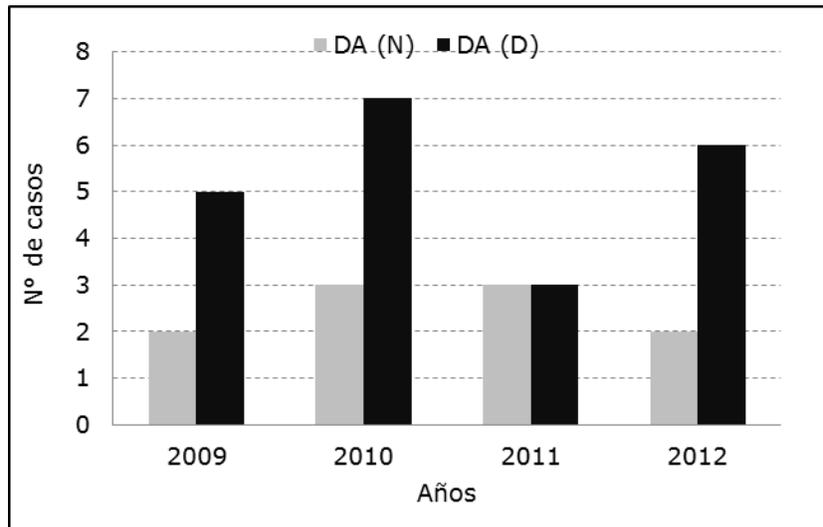


Figura 4. 11 Número de días que no cumplieron con las cuatros condiciones meteorológicas previstas y hubo equipos de siembra terrestre activado (DA) por periodo nocturno y diurno entre los años 2009 a 2012.

La tabla 4.6 indica las características de los eventos de activación por período (N) y (D). Las condiciones sinópticas que gatillaron la activación de la red se asoció al ingreso de sistemas frontales de diversas intensidades desde el Océano Pacífico. Hubo casos donde inicialmente una o varias de las condicionantes estuvieron presentes pero al no estar en conjunto fueron descartadas en el punto 4.2.1. Mayoritariamente, este número se relacionó a una AIC mayor a los 2500 (msnm), seguido por la falta de condiciones de nubosidad, y para finalizar por la presencia de una componente este que no contribuía con el efecto del viento en la dispersión del material glaciogénico.

Tabla 4. 6 Características de los eventos de activación por período nocturno (N) y diurno (D) que cumplieron (C) y no cumplieron (NC) con la condición 1 (C<sub>1</sub>) una altura de la isoterma 0°C menor o igual a 2500 (msnm), condición 2 (C<sub>2</sub>) una altura de la base de la nube menor o igual a 2500 (msnm), condición 3 (C<sub>3</sub>) dirección del viento medio con una componente del oeste y condición 4 (C<sub>4</sub>) nubosidad en la cuenca destino.

Fecha	P	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
05-08-2009	N	NC	C	C	NC
13-08-2009	N	NC	C	C	C
12-05-2009	D	NC	C	C	C
14-06-2009	D	NC	C	C	C
19-06-2009	D	NC	C	C	C
14-08-2009	D	NC	C	C	C
21-08-2009	D	NC	C	C	C
06-05-2010	N	NC	C	NC	NC
16-06-2010	N	NC	C	NC	NC
21-07-2010	N	C	C	C	NC
22-05-2010	D	NC	C	C	NC
28-05-2010	D	NC	C	C	NC
11-06-2010	D	NC	C	C	NC
17-06-2010	D	NC	C	C	C
23-06-2010	D	NC	C	C	C
02-09-2010	D	C	C	NC	NC
12-09-2010	D	C	C	C	NC
22-04-2011	N	NC	C	C	NC
25-07-2011	N	NC	C	C	C
30-07-2011	N	C	C	NC	C
05-06-2011	D	NC	C	C	C
20-06-2011	D	C	C	NC	C
29-06-2011	D	NC	C	C	C
30-06-2012	N	NC	C	C	NC
22-09-2012	N	NC	C	C	NC
26-04-2012	D	NC	C	NC	C
16-06-2012	D	NC	C	C	NC
20-06-2012	D	NC	C	C	C
28-06-2012	D	NC	C	C	C
01-08-2012	D	NC	C	C	NC
15-08-2012	D	NC	C	C	C

En los días de siembra la AIC fluctuó entre 2575 a 4111 (msnm). En el análisis, más de la mitad de los días donde se inició el evento de siembra con una AIC alta tendió a descender en las 12 horas siguientes. Particularmente esta condición ocurrió en las activaciones de la red que se iniciaron en un período diurno y se mantuvieron hacia un período nocturno para un 86% de los casos. Condición contraria, se observó en las activaciones de la red que se iniciaron en un período nocturno y se mantuvieron hacia un período diurno donde se reflejó un aumento de la AIC en un 40% de los casos. La AI -5 en los días de siembra mostró una variación entre los 3132 a 4780 (msnm) con un valor medio de 3701 (msnm) concentrándose el 50% de los casos entre los 3478 y 3922 (msnm). Al analizar los umbrales entre la AIC y AI-5, las mínimas diferencias residuales

se dieron el 21 de agosto 2009 en una activación diurna de la red donde hubo una distancia de 313 (msnm) respecto a una AIC ubicada a 3179 (msnm) y la máxima diferencia entre las isoterma fue de 1451 (msnm) el 30 junio 2012 en una activación nocturna respecto a una AIC ubicada a 2623 (msnm) (Fig. 4.12). La información de radiosonda de Santo Domingo indico que la isoterma 0 °C y -5 °C alcanzaron una altura superior a 2500 (msnm) en los 10 (N) y 21 (D) casos donde hubo activación de la red de equipos. En términos de temperatura, la efectividad de la red estuvo limitada porque el yoduro de plata emitido tuvo que alcanzar, por ejemplo, una altura máxima de hasta los 4780 (msnm) para que las concentraciones del producto glaciogénico se activen. En estos casos, las nubes no fueron lo suficientemente frías para que se produzca la siembra estática.

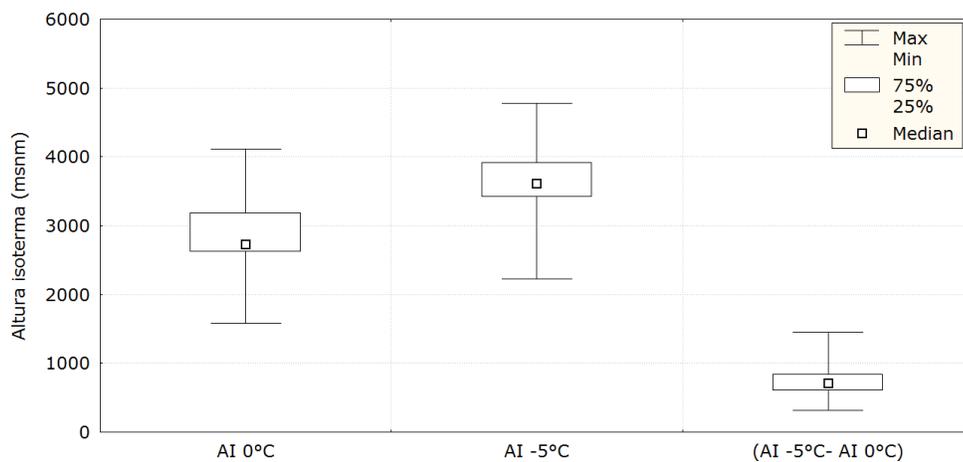


Figura 4. 12 Box-plot de las alturas de las isoterma 0 °C, -5 °C y su residuo durante los días de siembra.

En relación a la variación de la ABN estimada (tabla 4.7), se observó en los eventos nocturnos y diurnos en 9 de 10 y 16 de 21 casos, respectivamente, predominó la cercanía de la nubosidad a la altura de los equipos de siembra ubicados desde Bocatoma Pangal (1433 msnm). En caso contrario, para los equipos de siembra ubicados bajo Central Pangal (962 msnm) presentaron una distancia a la ABN de hasta los 1735 (msnm), principalmente el día 5 de junio 2011. En un sentido estrictamente técnico, basado principalmente en la preocupación de la emisión del material glaciogénico desde una menor altura, este podría quedar atrapado por las condiciones atmosféricas de bajo nivel (por ejemplo, inversiones). Por lo cual, la siembra bajo estas circunstancias podría ocasionar que las partículas de yoduro de plata no alcancen el nivel de la AI-5 en la atmósfera.

Tabla 4. 7 Distancia (msns) entre ABN estimada promedio y al altura del equipo de siembra terrestres. En la tabla superior a) activaciones nocturnas e inferior b) activaciones diurnas.

a)

Fecha	Picarquín (680 msnm)	Leonera (689 msnm)	Coya (872 msnm)	C. Pangal (962 msnm)	B. Pangal (1433 msnm)	Colón (1565 msnm)	Caletones (2036 msnm)	C. Verde (2268 msnm)
05-08-09	376	367	184	94	-377	-509	-980	-1212
13-08-09	543	534	351	261	-210	-342	-813	-1045
06-05-10	375	366	183	93	-378	-510	-981	-1213
16-06-10	463	454	271	181	-290	-422	-893	-1125
21-07-10	375	366	183	93	-378	-510	-981	-1213
22-04-11	674	665	482	392	-79	-211	-682	-914
25-07-11	375	366	183	93	-378	-510	-981	-1213
30-07-11	375	366	183	93	-378	-510	-981	-1213
30-06-12	741	732	549	459	-12	-144	-615	-847
22-09-12	1448	1439	1256	1166	695	563	92	-140

b)

Fecha	Picarquín (680 msnm)	Leonera (689 msnm)	Coya (872 msnm)	C. Pangal (962 msnm)	B. Pangal (1433 msnm)	Colón (1565 msnm)	Caletones (2036 msnm)	C. Verde (2268 msnm)
12-05-09	1112	1103	920	830	359	227	-244	-476
14-06-09	431	422	239	149	-322	-454	-925	-1157
19-06-09	522	513	330	240	-231	-363	-834	-1066
14-08-09	1163	1154	971	881	410	278	-193	-425
21-08-09	490	481	298	208	-263	-395	-866	-1098
22-05-10	525	516	333	243	-228	-360	-831	-1063
28-05-10	989	980	797	707	236	104	-367	-599
11-06-10	596	587	404	314	-157	-289	-760	-992
17-06-10	702	693	510	420	-51	-183	-654	-886
23-06-10	600	591	408	318	-153	-285	-756	-988
02-09-10	36	27	-156	-246	-717	-849	-1320	-1552
12-09-10	375	366	183	93	-378	-510	-981	-1213
05-06-11	1735	1726	1543	1453	982	850	379	147
20-06-11	377	368	185	95	-376	-508	-979	-1211
29-06-11	375	366	183	93	-378	-510	-981	-1213
26-04-12	449	440	257	167	-304	-436	-907	-1139
16-06-12	1185	1176	993	903	432	300	-171	-403
20-06-12	90	81	-102	-192	-663	-795	-1266	-1498
28-06-12	726	717	534	444	-27	-159	-630	-862
01-08-12	103	94	-89	-179	-650	-782	-1253	-1485
15-08-12	382	373	190	100	-371	-503	-974	-1206

Al analizar la variación de la dirección del viento cada 6 horas para los 10 (N) y 21 (D) casos, los datos del reanálisis mostraron que durante los episodios de siembra nocturna y diurna el viento del noroeste presento una mayor frecuencia, con un total de 53% y 43% casos, respectivamente. Representando el transporte del compuesto emitido por la red de generadores terrestres de yoduro de plata hacia la dirección de la cuenca del río Cachapoal. Por otro lado, se obtuvo 29% (00-06Z) y 41% (12-18Z) casos con una

componente del viento del suroeste, 15% (00-06Z) y 3% (12-18Z) casos desde el noreste y 2% (00-06Z) y 11% (12-18Z) casos desde el sureste. Se ejemplifica, en la Fig. 4.13, la activación nocturna del 6 de mayo 2010 entre las 00-12Z en donde hubo una variación de la dirección del suroeste al sureste, mientras que durante la activación nocturna del 16 de junio 2010 entre las 00-12Z se mantuvo en dirección noroeste a noreste.

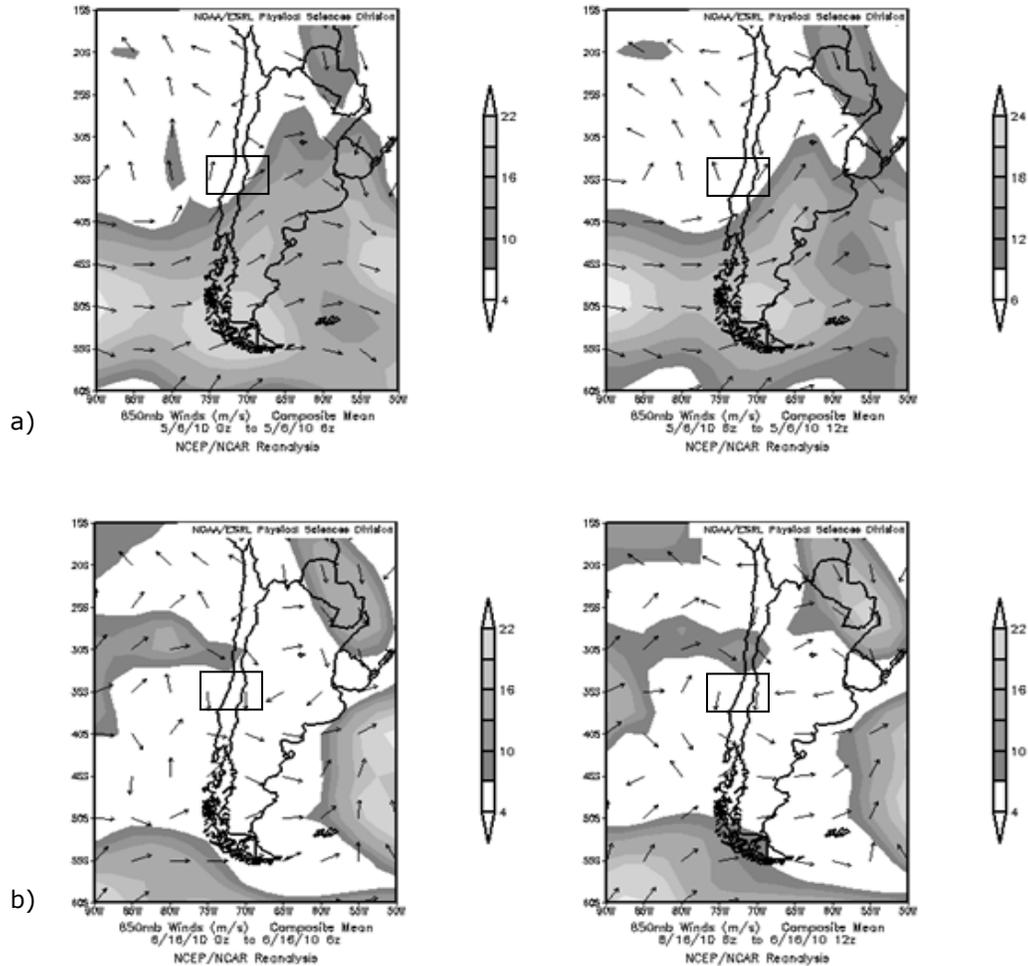


Figura 4. 13 Distribución espacial de la dirección del viento medio a la altura de la base de las nube estimada durante (a) activación nocturna del 6 de mayo 2010 entre las 00 Z-12 Z (b) activación nocturna del 16 de junio 2010 entre las 00Z-12Z

En resumen, de los 48 de eventos de siembra realizados entre los años 2009 a 2012 se obtuvo que el 65% (31) de los casos hubo siembra sin condiciones meteorológicas, es decir, no se ajustaron a los cuatro parámetros de clasificación previstos. Este porcentaje se obtuvo al encontrar que en el 45% de los casos la AIC estuvo mayor a 2500 metros o la activación de la red se realizó bajo con una componente del vector viento en dirección

este 3%, sin o con escasa nubosa 6%. Hubo oportunidades donde hubo una combinación de conflictos como en la dirección viento medio y nubes 3%; AIC, dirección viento medio y nubes 6%; AIC y dirección viento medio 6%; AIC y nubosidad 29%.

### **4.3 Análisis pluviométrico**

#### 4.3.1 Comportamiento pluviométrico histórico

En la Fig. 4.14, correspondiente a la estación Rancagua ubicada en el valle central interior de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, podemos observar que la tendencia pluviométrica ha sido marcadamente negativa encontrándonos con una serie de años que presentaron un acumulado de precipitación anual por debajo o menor al promedio climatológico (1979 a 2016) de 421 (mm). La precipitación máxima se presentó en el año 1982 donde alcanzó un valor de 869 (mm), el siguiente año más lluvioso fue 1997 con 802 (mm), coincidiendo ambos con años con presencia del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENSO) en su fase cálida El Niño. Los años más seco fueron en 1998 con 104 (mm), al que le siguen el año 1988 con 195 (mm) ambos estuvieron frente a ENOS en su fase fría La Niña. Cuando los eventos de El Niño (La Niña) ocurrieron se presentaron condiciones más lluviosas (secas) en la Región. Se puede observar, además, que en las décadas previas al año 2006 se evidenció una acentuada variabilidad de la precipitación, destacando mencionado año como un punto de inflexión, puesto que desde entonces no se supera la media anual de precipitación. En la Fig. 4.14 (b) se observa entre el año 2006 a 2013 una anomalía negativa de hasta 50% en la precipitación respecto al promedio climatológico. Es relevante destacar, desde el año 2000 estamos cruzando por un período seco asociado mayormente a la oscilación decadal del Pacífico, que ha traído una alta frecuencia de episodios de aguas oceánicas frías y la consecuente menor pluviometría. Adicionalmente a esta causa, otro fenómeno llamado Oscilación Antártica (AO), ha influido mayormente en una débil actividad frontal no alcanzando a traer las precipitaciones hacia la Región central.

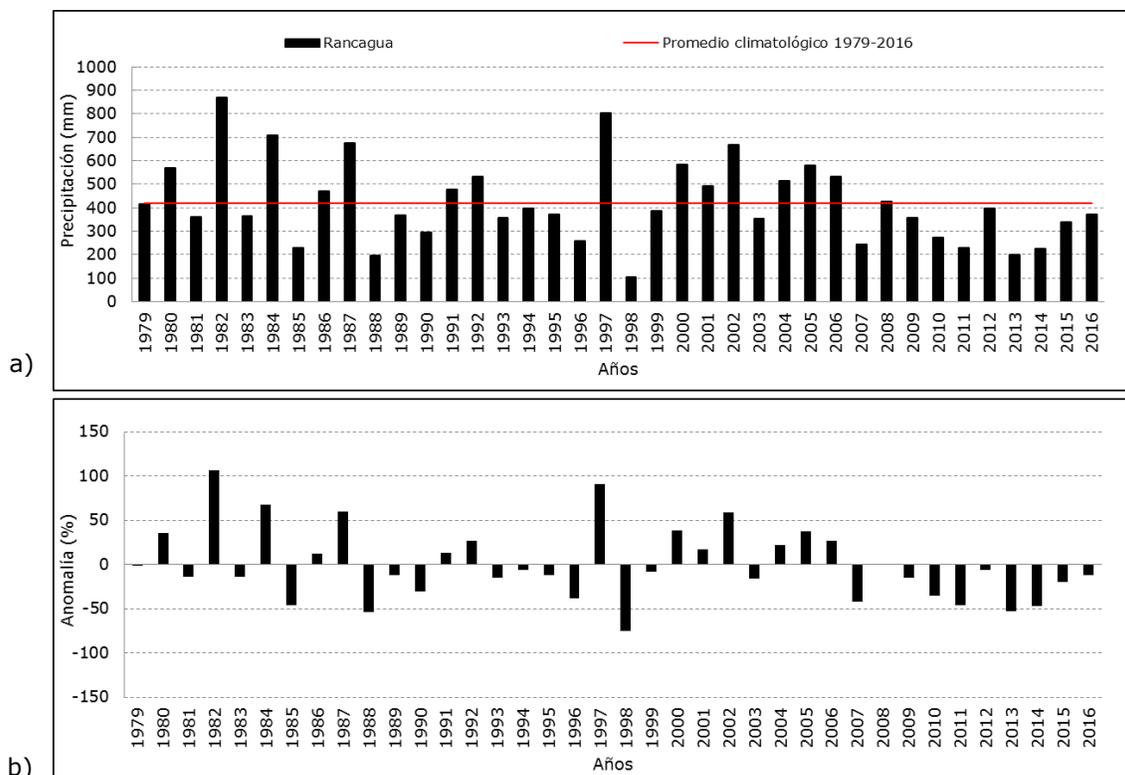


Figura 4. 14 Precipitación anual y variación respecto al promedio climatológico para el período 1979 a 2016 en la estación de Rancagua en los gráficos a) y b) respectivamente.

Al observar la precipitación entre los años de estudio 2009 a 2012 sobresalen dos características, inicialmente como la variabilidad año a año es similar en todas las estaciones, además como difieren los montos de precipitación entre las mismas (Fig. 4.15). Durante los meses invernales entre los años 2009 a 2012, hubo 23 meses de operación del programa siembra de nubes, de los cuales 14 fueron en presencia de un evento Neutro (sin ENOS), 5 ante un evento El Niño y 4 ante un evento La Niña según el ONI (Oceanic Niño Index). Además, hubo 11 meses (no consecutivos) bajo un Índice de la Oscilación Antártica (IOA) negativo y 12 positivos. Durante la campaña operativa invernal 2009 el IOA fue negativo y ONI positivo (Niño). A principios de mayo de 2010, en el Pacífico tropical surgieron las condiciones frías características de La Niña, que se mantuvieron en diversas intensidades hasta el año 2011. Posteriormente, a lo largo del año 2012 permanecieron condiciones ENOS neutras. Estas condiciones se reflejaron en los montos de precipitación de los años 2009 y 2012 siendo en promedio anual e invernal los más lluviosos, y los años 2010 y 2011 los más secos. Por ejemplo, el año 2009 se registró un total anual de 689 (mm) en la estación de Maitenes (1055 msnm) mientras que durante el mismo período en las estaciones de mayor cota como Teniente Alto (3052

msnm) y La Huacha (3026 msnm) acumularon 152 (mm) y 200 (mm), respectivamente. Por otro lado, el año más seco correspondió al 2011, donde se presentaron 257 (mm) en la estación Colón y 107 (mm) en la estación Teniente Alto (3052 msnm).

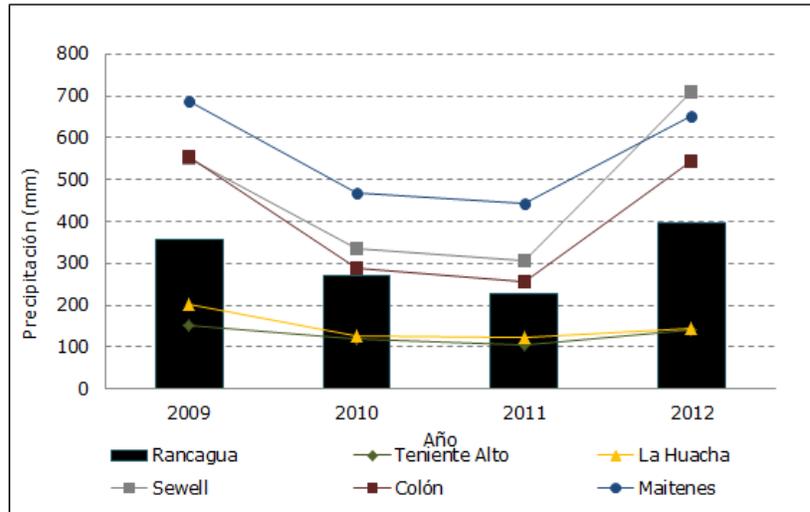


Figura 4. 15 Precipitación anual para el período 2009 a 2012 en la estación de Rancagua y en las cuatro estaciones meteorológicas de superficie utilizadas en este estudio.

#### 4.3.1.1 Comportamiento espacial

En el período de 2009 a 2012, la precipitación anual en la estación Rancagua ubicada en el valle central interior resultó ser menor respecto a las estaciones de precordillera. Para identificar donde se produjo el cambio en el tipo de precipitación, se obtuvo la matriz de correlación a partir del acumulado mensual durante el período 2009 a 2012 (tabla 4.8). Al respecto, es posible señalar que la distribución de la precipitación fue similar en las estaciones de la precordillera como Maitenes (1055 msnm), Colón (1943 msnm) y Sewell (2159 msnm), con la estación ubicada en el valle central interior como Rancagua (515 msnm). Por lo tanto, las estaciones por debajo de los 3000 (msnm) recibieron mayormente precipitación líquida y presentaron una buena correlación, a pesar que el valor de la precipitación acumulada mostró un incremento debido mayormente a la topografía. Condición que evidencia la alteración que sufren los sistemas frontales por efecto de la cordillera de los Andes, y como en consecuencia, las precipitaciones resultan incrementadas a barlovento de la misma. Respecto a la precipitación en las estaciones Teniente Alto (3052 msnm) y La Huacha (3026 msnm) ubicadas sobre los 3000 (msnm) se observó un alto grado de correlación entre sí, mientras que la correlación fue baja con

las estaciones Maitenes, Colón y Sewell ubicadas en la misma zona montañosa a una distancia aproximada de entre 4 a 10 km pero a altitudes menores. Esta diferencia estuvo relacionada con el cambio en el tipo de precipitación, variando de un registro mayormente líquido a sólido (nival) a medida que aumentó la altura.

Tabla 4. 8 Correlación de precipitaciones mensual entre las estaciones meteorológicas de superficie utilizadas en este estudio entre el año 2009 a 2012.

Nombre Estación	Ten. Alto	La Huacha	Sewell	Colón	Maitenes	Rancagua
Ten. Alto	1					
La Huacha	0,94	1,00				
Sewell	0,50	0,44	1,00			
Colón	0,40	0,32	0,94	1,00		
Maitenes	0,30	0,24	0,82	0,88	1,00	
Rancagua	0,26	0,18	0,81	0,88	0,97	1,00

Las frecuencias de precipitación a partir de las series diarias se muestran en la Fig. 4.16. Una diferencia se distinguió en la frecuencia de días con precipitación siendo un tanto menor conforme aumentó la altitud. La frecuencia en la ladera de barlovento (pendiente ascendente) entre los 1050 y 2159 (msnm) fue mayor que al este en las altas alturas, sobre 3000 (msnm). Es decir, se evidencia el cambio del tipo de las precipitaciones (líquida a nival). Los meses de mayo a septiembre registraron los períodos con mayor cantidad de días con precipitación. En general, la estación Maitenes se registró mayor número de días con precipitación (194 días), por el contrario, en la estación Teniente Alto fue la que registró menor número de días con precipitación (157 días) en un total de 4 años debido a presentar un régimen de precipitación mayormente nival.

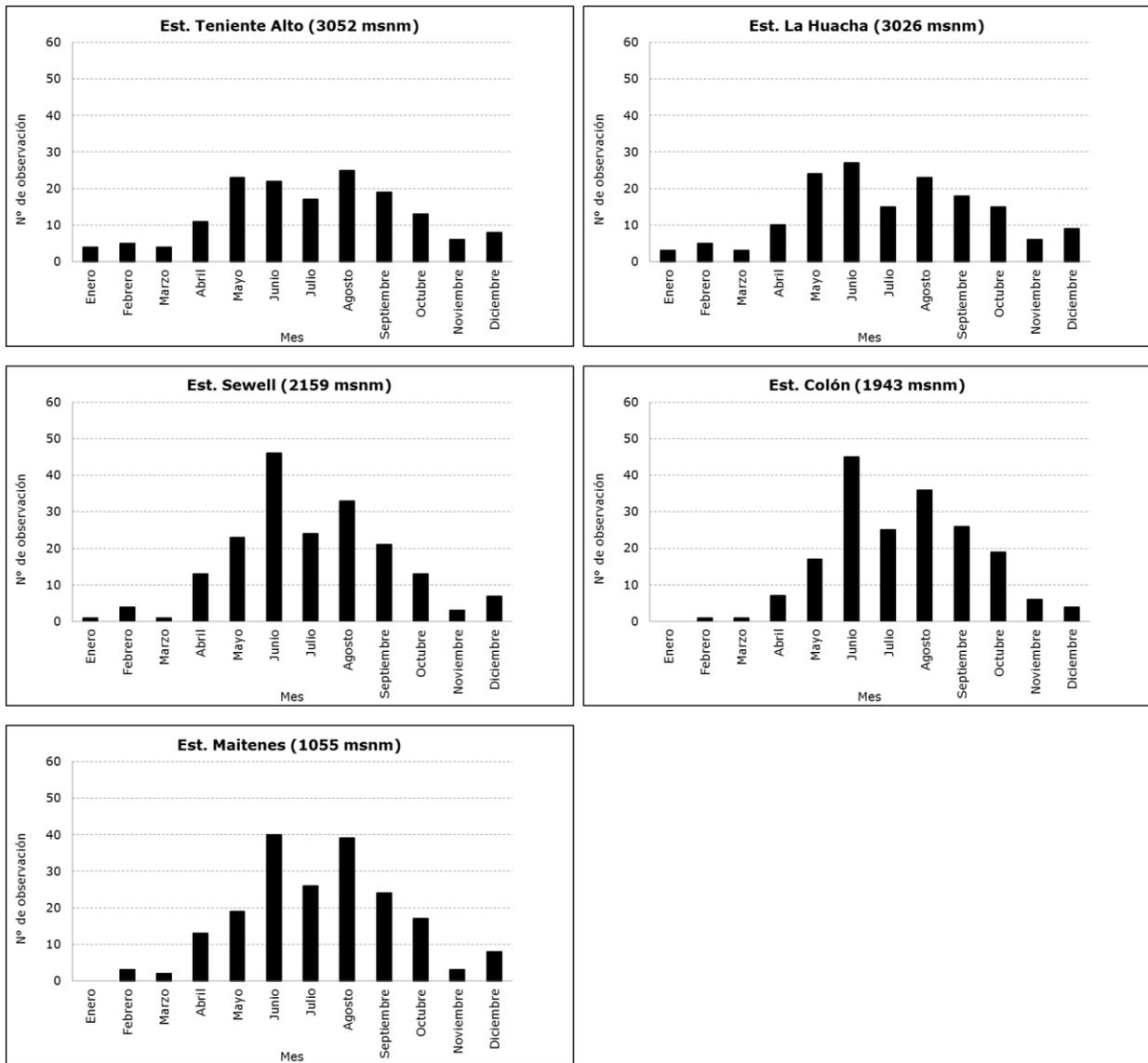


Figura 4. 16 Frecuencias de días con precipitación líquida a partir de las series diarias entre 2009 a 2012.

En cuanto a su ciclo estacional, se observó una distribución similar entre las estaciones meteorológicas con una ocurrencia de los valores máximos y mínimos en meses coincidentes. En abril y mayo, se observó la entrada de la temporada lluviosa, en junio siguió aumentando la precipitación con valores mayores a 270 (mm) en estación Maitenes (1055 msnm). Mientras que en los meses de julio y agosto, en las estaciones sobre los 1900 (msnm), se observó una disminución en los registros de precipitación. A partir de noviembre se manifestó claramente el patrón típico de la temporada seca con una disminución en las precipitaciones, a pesar de ello, se presentaron durante el año 2009 a 2013 eventos estivales durante los meses de noviembre a febrero.

#### 4.3.1.2 Comportamiento pluviométrico invernal durante el período de siembra

En la Fig. 4.17 se presentan las precipitaciones anuales e invernales (abril a septiembre) durante los años 2009 a 2012, incluyendo el porcentaje que represento la precipitación invernal de la total anual para estaciones representativas del valle central interior y precordillera. Al respecto, en los meses invernales los porcentajes de precipitación fueron claramente mayores con valores que alcanzaron hasta el 82% en estación la Huacha (3026 msnm) y 93% en estación Sewell (2159 msnm) ambos el año 2009. Menor porcentaje se observó los años 2010 y 2011 con un mínimo de 51% en la estación Ten. Alto (3052 msnm).

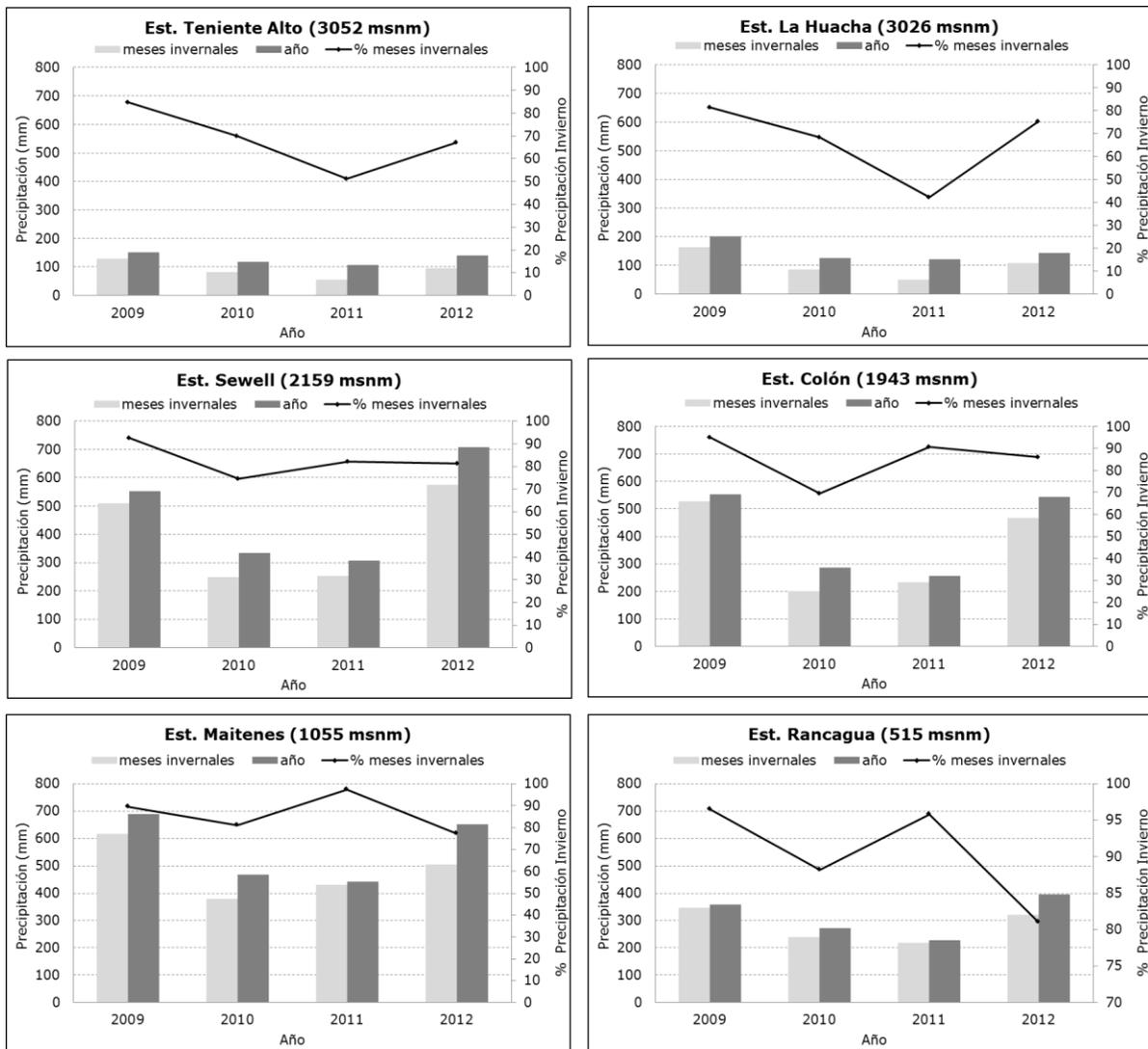


Figura 4. 17 Precipitación líquida en los meses invernales (barra gris claro) y anuales (barra gris oscuro) en el período 2009 a 2012. La línea continua y puntos indican el porcentaje que represento la precipitación de invierno sobre el total anual para cada estación

Como una primera aproximación para determinar la variación pluviométrica en los días de siembra con y sin condiciones se calculó el promedio diario de precipitación en cada período invernal y estación meteorológica (Fig. 4.18). Al comparar los resultados obtenidos, la primera observación que se impuso fue que hubo una gran diferencia entre el valor promedio por estación bajo la cota de los 2159 (msnm) con 4,5 a 14 (mm/24 h) y sobre dicho nivel alcanzó un máximo de 4,1 (mm/24 h). Condición que refleja la variación de un registro mayormente líquido a sólido (nival) durante el período invernal a medida que aumentó la altura.

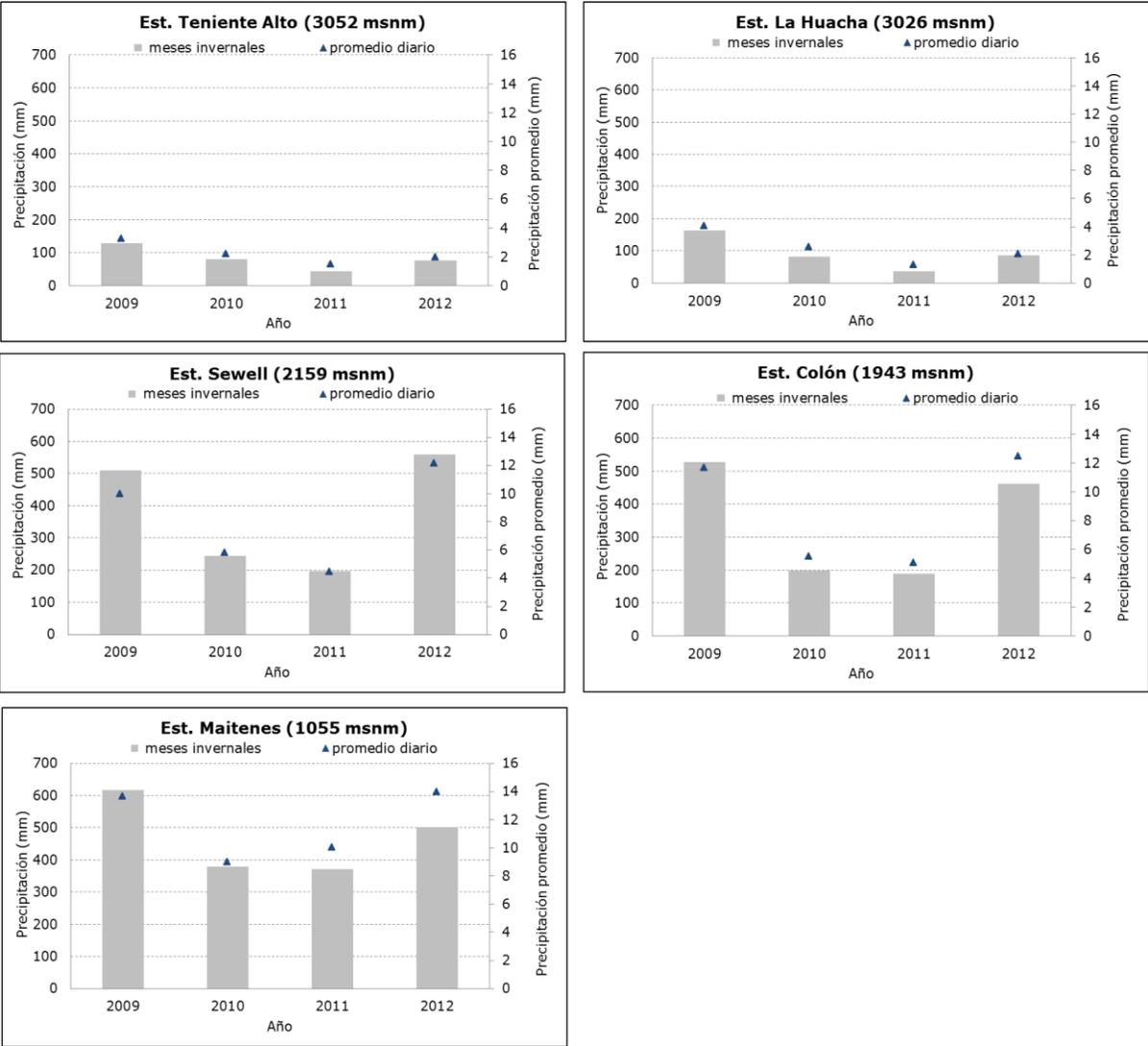


Figura 4. 18 Precipitación líquida en meses invernales (barra) y promedio diario (triángulos) en el período 2009 a 2012 para cada estación meteorológica.

#### 4.3.2 Determinación del efecto de la siembra basada en la pluviometría local

(i) Días con condiciones meteorológicas y equipos de siembra terrestre activados.

La Fig. 4.19 muestra la precipitación acumulada en el día de siembra y en las siguientes 24 horas (+1 día) y la variación porcentual (VP) de la precipitación acumulada en 24 horas respecto al promedio diario en cada período invernal correspondiente. En las estaciones meteorológicas ubicadas a mayor cota, La Huacha (3026 msnm) y Ten. Alto (3052 msnm) presentaron en conjunto 10 casos con precipitaciones mayor a 1 (mm/24 h) con valores que alcanzaron un máximo de 4,4 (mm/24 h). Este resultado indicó que en los días con condiciones meteorológicas y equipos de siembra terrestre activados hubo menor número de eventos de precipitación líquida, aun así, de ellos 6 presentaron una VP positiva del orden máximo de 120% para un valor de 2,4 (mm) mayor que la precipitación promedio. En forma contraria, 4 casos presentaron una disminución de hasta 2,3 (mm) en la precipitación media diaria equivalente a 69,7%. Se debe recordar que siendo la media en general muy baja para estas dos estaciones la VP tendió a ser alta.

Para las estaciones de menor cota, Sewell (2159 msnm), Colón (1943 msnm) y Maitenes (1055 msnm), en conjunto hubo 72 casos con precipitación mayor a 1 (mm/24 h) entre los cuales el 65% de los registros fueron por debajo del promedio mientras que el restante 35% lo superó. Respecto a este último resultado, los eventos que presentaron incrementos sobre el 10% en la estación Sewell fueron 8 de 9 alcanzado entre un 17,8% (5,3 mm/24 h) a 333% (19,5 mm/24 h), en la estación Colón solo 1 de 3 eventos alcanzaron un porcentaje de 207% (15,7 mm/24 h) y en la estación Maitenes los 13 eventos que superaron el promedio presentaron precipitaciones 16,7% (10,5 mm/24 h) a 383% (43,5 mm/24 h).

Considerando solo la precipitación acumulada en el día de siembra se obtuvo un 42% de los casos con precipitación acumulada mayor o igual a 1 (mm/24 h), 19% perteneció al intervalo entre 0,1 y 0,9 (mm) y 39% fueron días sin precipitación. Del 42% de los datos con registro hubo 21 casos con una VP negativa y 15 casos con una VP positiva. Al analizar la precipitación en el día de siembra, se obtuvo un dato interesante, en las estaciones de mayor cota La Huacha (3026 msnm) y Ten. Alto (3052 msnm) hubo 1 evento de precipitación mayor a 10%, en la estación Sewell 2 de 3 eventos alcanzaron un

porcentaje entre 17,8% (5,3 mm/24 h) a 48,6% (6,7 mm/24 h), en la estación Colón los dos eventos de precipitación fueron menores al 7% (13,4 mm/24 h) y en la estación Maitenes los 8 eventos de precipitaciones presentaron incrementos sobre el 10% respecto al promedio diario. Es decir, aunque la diferencia fue pequeña hubo mayor número de casos con precipitación menor que el promedio diario en los días donde hubo activación de la red de equipos del programa con condiciones meteorológicas.

En general, no aumento la precipitación líquida respecto a la media en el día de siembra, ni en las siguientes 24 horas, más bien hubo mayor número de casos con variación negativa. En estos casos es probable que haya caído menos precipitación líquida y mayor en forma de nieve en la cuenca, el cual es el objetivo principal del programa y se ajusta a la respuesta esperada en esta clasificación. Para corroborar esta última conjetura, sería necesario contar con el dato de altura nieve. Ya que en este estudio no se cuenta con dicha información se acudirá a observar la respuesta fluviométrica media mensual en la cuenca destino del programa. A continuación, en la tabla 4.9 se resume el número de casos por intervalo de tiempo en los días de siembra con condiciones meteorológicas y equipos de siembra terrestre activados.

Tabla 4. 9 Características de la precipitación a 48 y 24 (h) en los días con condiciones meteorológicas y equipos de siembra terrestre activados.

Categoría	Nº Casos (48 h)	Nº Casos (24 h)
Precipitación > 1 (mm/24 h)	82	36
Variación Positiva	31	15
Variación Negativa	51	21

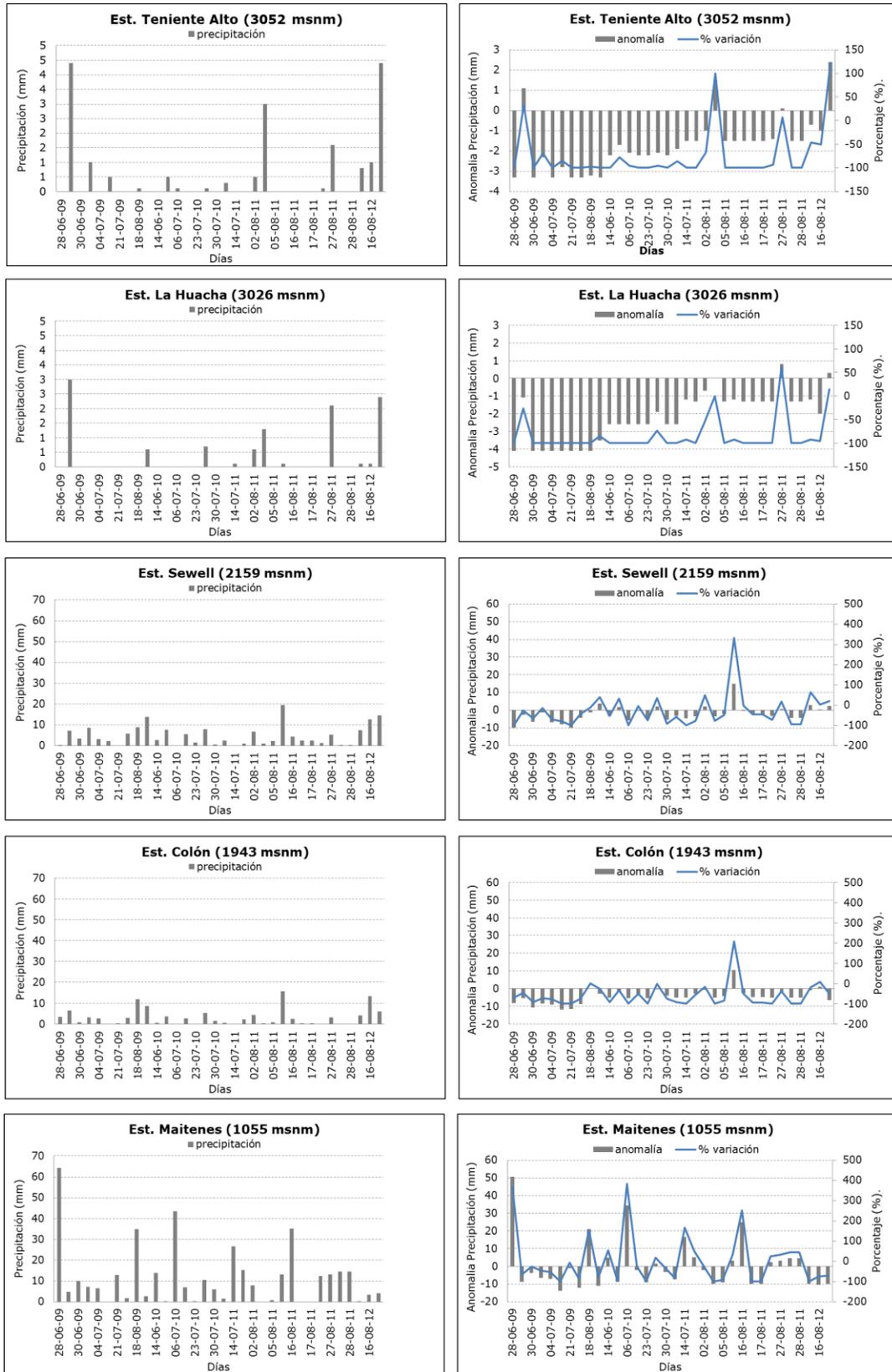


Figura 4. 19 Precipitación acumulada en el día siembra (+1 día) y la variación porcentual de la precipitación acumulada en 24 horas respecto al promedio diario en cada período invernal

(ii) Días sin condiciones meteorológicas y equipos de siembra terrestre activados

En el día de siembra (+1 día), en conjunto en las cinco estaciones, hubo 177 casos con precipitación acumulada mayor o igual a 1 (mm/24 h), de ellos el 59% presentó VP positivas concentradas mayormente entre los meses de mayo y junio (Fig. 4.20). Del 59% (103 casos) 96 casos presentaron incrementos sobre el 10% con una frecuencia mayor en la estación Colón (1943 msnm) la cual alcanzó una precipitación máxima de 58,2 (mm/24 h) con una anomalía de 46,5 (mm) el día 19 de junio 2009. La segunda estación que logró mayor número de días con incrementos fue Maitenes (1050 msnm) la cual presentó 21 días con anomalías positivas de hasta 69,9 (mm).

Se observó en el día de siembra, de los 81 casos de precipitación acumulada mayor o igual a 1 (mm/24 h), el 54% presentó una VP positiva respecto a 46% que presentó la situación contraria. Las máximas anomalías de precipitación oscilaron entre los 31,7 (mm) en estación Sewell y de 65,8 (mm) en estación Maitenes. La estación la Huacha (3026 msnm) presentó 8 días con precipitaciones mayor a 1 (mm) los cuales además presentaron incrementos sobre el 10% alcanzando anomalías de 49,1 (mm) el día 12 de mayo 2009 y de 12,5 (mm) 23 de junio 2010.

En general, en los días sin condiciones meteorológicas y equipos de siembra terrestre activados hubo mayor número de casos con un aumento en la precipitación líquida respecto a la media. Esta condición es contraria a lo esperado, debido a que el objetivo del programa es incrementar la nieve en las altas cumbres y contribuir al deshielo en la época estival. A continuación, en la tabla 4.10, se resumen el número de casos por intervalo de tiempo y VP.

Tabla 4. 10 Características de la precipitación a 48 y 24 (h) en los días sin condiciones meteorológicas y equipos de siembra terrestre activados.

Categoría	Nº Casos (48 h)	Nº Casos (24 h)
Precipitación > 1 (mm/24 h)	177	81
Variación Positiva	103	44
Variación Negativa	74	37

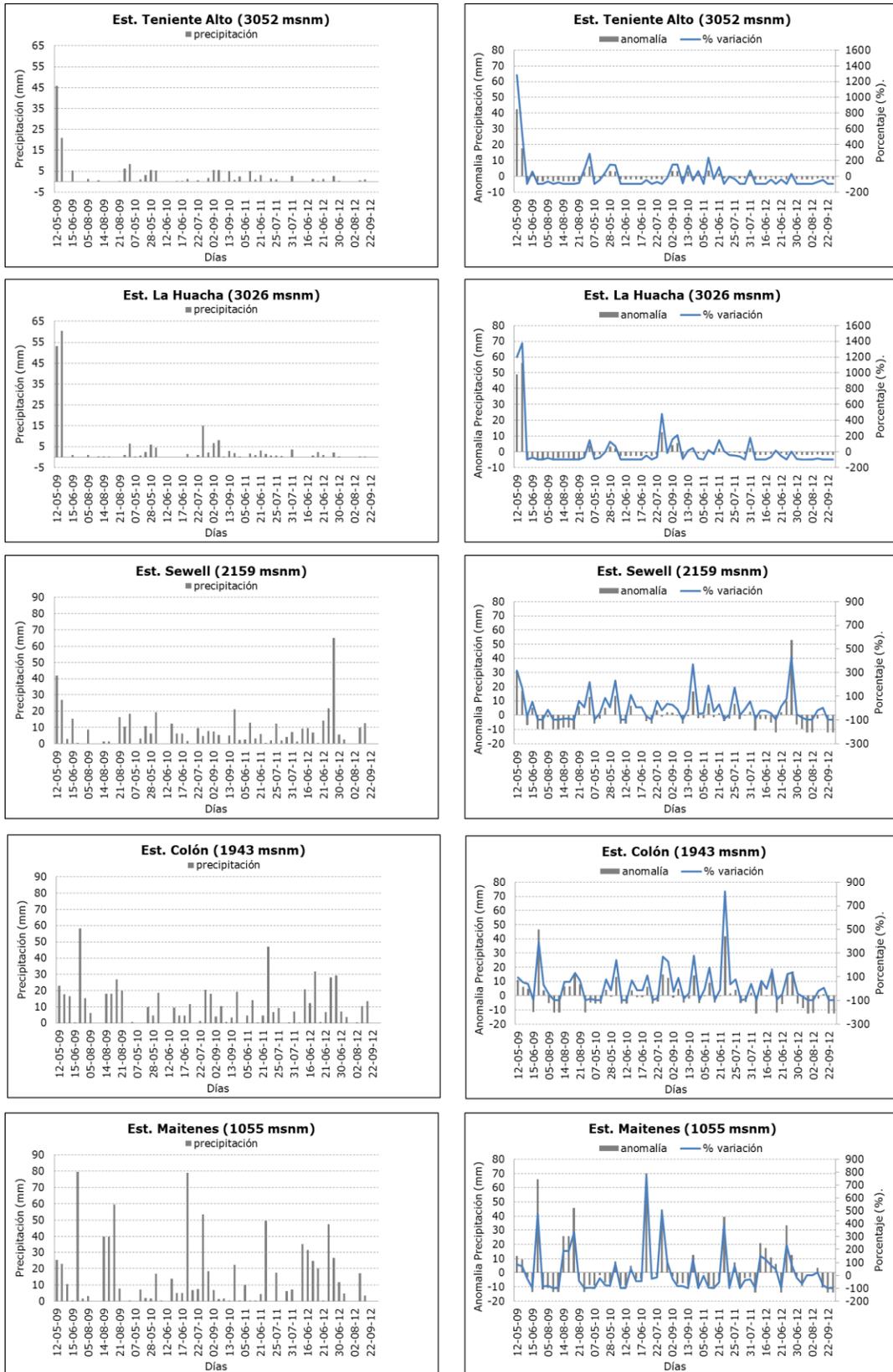


Figura 4. 20 Precipitación acumulada en el día siembra (+1 día) y la variación porcentual de la precipitación acumulada en 24 horas respecto al promedio diario en cada período invernal.

(iii) Días con condiciones meteorológicas sin equipos de siembra terrestre activados

En relación a los días con condiciones meteorológicas y sin equipos de siembra terrestre activados, se obtuvo un 42% con registros de precipitaciones acumuladas mayor o igual a 1 (mm/24 h), 16% perteneció al intervalo entre 0,1 y 1,9 (mm/24 h) y 42% fueron días sin precipitación. En las estaciones La Huacha (3026 msnm) y Ten. Alto (3052 msnm) no hubo registros de precipitación, condición contraria se presentó en las estaciones bajo la cota de 2159 (msnm) donde hubo entre 21 a 27 días con registros. De acuerdo al comportamiento de la precipitación en las cinco estaciones (Fig. 4.21), se apreció que estas se presentaron de manera similar con una tendencia a anomalías negativas de precipitación.

En conjunto, hubo 85 casos (41%) con precipitaciones sobre 1 (mm), de los cuales un 61% presento VP negativas y el restante 39% fueron positivas. De los 33 casos (39%) que presentaron precipitaciones mayor al promedio diario, hubo 30 que presentaron con incrementos mayor al 10% particularmente con anomalías positivas del rango de hasta 3,5 (mm) en las estaciones ubicadas sobre los 2000 (msnm). El mayor incremento se observó en la estación Maitenes el día 18 de junio 2011 con un evento de precipitación que presento una anomalía positiva de 69,9 (mm). En las estaciones de Sewell (2159 msnm), Colón (1943 msnm) y Maitenes (1055 msnm) hubo en conjunto 44 de 72 casos que presentaron registros de precipitación menor al promedio.

En general, los días con condiciones meteorológicas para la siembra sin equipos activados no aumento la precipitación líquida respecto a la media. Si no más bien hubo mayor número de casos con una variación negativa de la variable tal como se resume a continuación en la tabla 4.11.

Tabla 4. 11 Características de la precipitación en los días con condiciones meteorológicas y sin equipos de siembra terrestre activados.

Categoría	Nº Casos (24 h)
PP > 1 (mm/24 h)	85
Variación Positiva	33
Variación Negativa	52

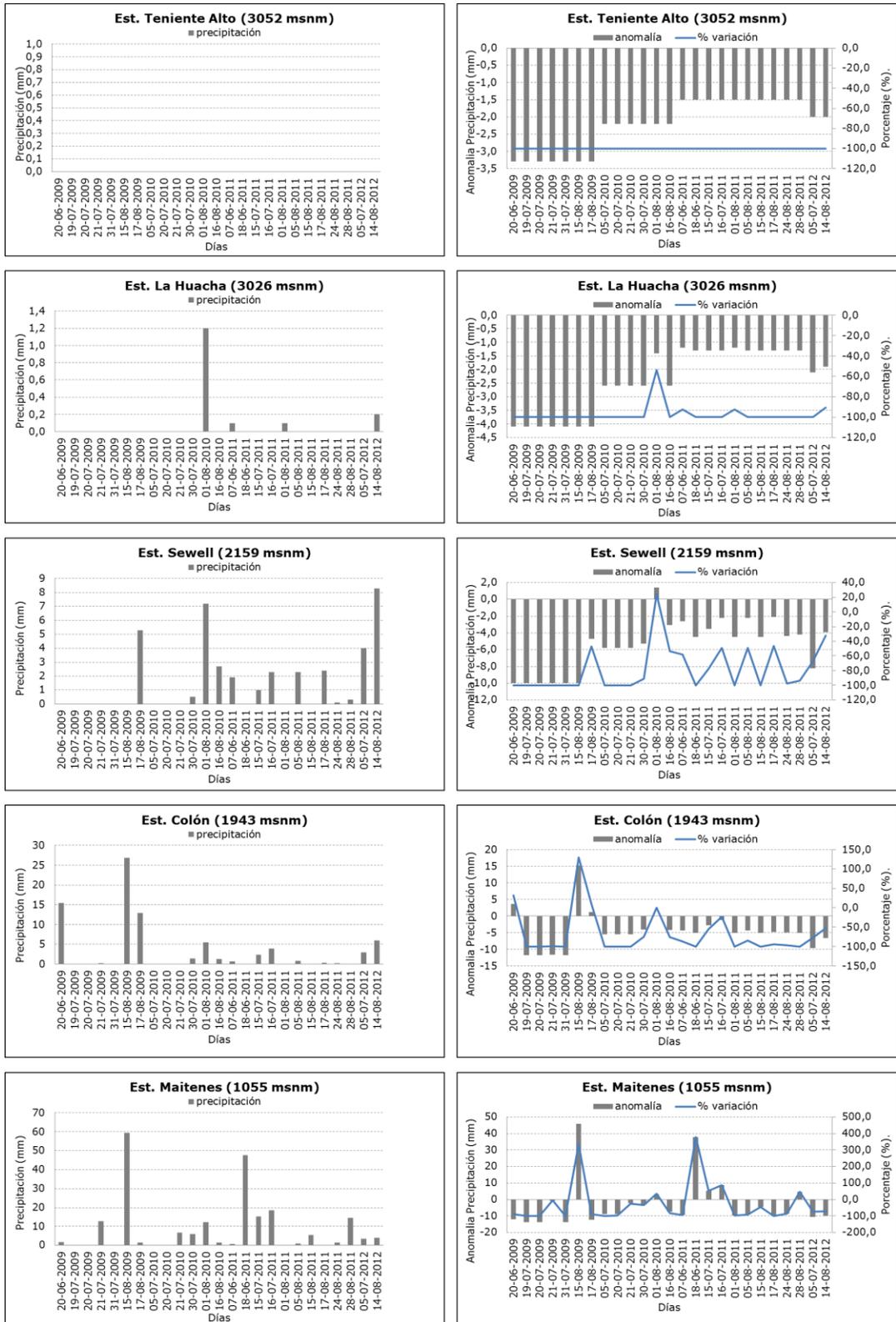


Figura 4. 21 Precipitación acumulada en el día con condiciones meteorológicas y sin equipos de siembra terrestre activados y la variación porcentual de la precipitación acumulada en 24 horas respecto al promedio diario en cada período invernal.

## 4.4 Análisis fluviométrico

### 4.4.1 Comportamiento fluviométrico histórico

El comportamiento fluviométrico mensual durante el período histórico de enero 1989 a febrero 2013 para las estaciones control de río Maipo en La Obra y Las Hualtatas, y destino de río Cachapoal en Puente Termas y Pangal en Pangal se presentan en la Fig. 4.22. En él se observa un caudal medio mensual con tendencia creciente desde primavera hacia estación estival, donde alcanza un máximo, seguido por un decaimiento suave. En el período de deshielo se generaron históricamente las mayores crecidas registrando, por ejemplo, en la estación de río Maipo en La Obra un caudal máximo de 538 (m<sup>3</sup>/s) y en el río Cachapoal en Puente Termas de 302 (m<sup>3</sup>/s), ambos en el mes de enero 2006. Durante el período pluvial, se presentó un registro mínimo de 24 (m<sup>3</sup>/s) en agosto 1996 y 18 (m<sup>3</sup>/s) en junio 1999 para las mencionadas estaciones respectivamente. Por otro lado, se observó un descenso en la magnitud del caudal a medida que aumentó la altitud. Las estaciones fluviométricas ubicadas sobre los 1500 (msnm) como en Pangal en el río Pangal, ubicada en la cabecera de la cuenca del río Cachapoal, registró un caudal máximo de 69 (m<sup>3</sup>/s) en diciembre 2012 durante el período de deshielo. Mientras que en la estación río Maipo en Las Hualtatas fue de 146 (m<sup>3</sup>/s) en enero 2006. Dichas diferencias se atribuyen al tamaño de sus superficies. En otras palabras, se determinó que las estaciones que abarcaron una mayor zona de aporte como La Obra y Puente Termas presentaron máximos de caudal registrado.

Es relevante recordar que el régimen natural del Maipo Alto se encuentra alterado por el embalse El Yeso (2475 msnm), debido a que su volumen promedio embalsado es regulado periódicamente. Por lo tanto, la estación fluviométrica La Obra está intervenida por uso, por lo tanto, no se recomienda su utilización como control para validar el efecto de la siembra terrestre de nubes en la cuenca del río Cachapoal. Sin embargo ya que históricamente se ha utilizado en este trabajo se conservó para mantener un referente.

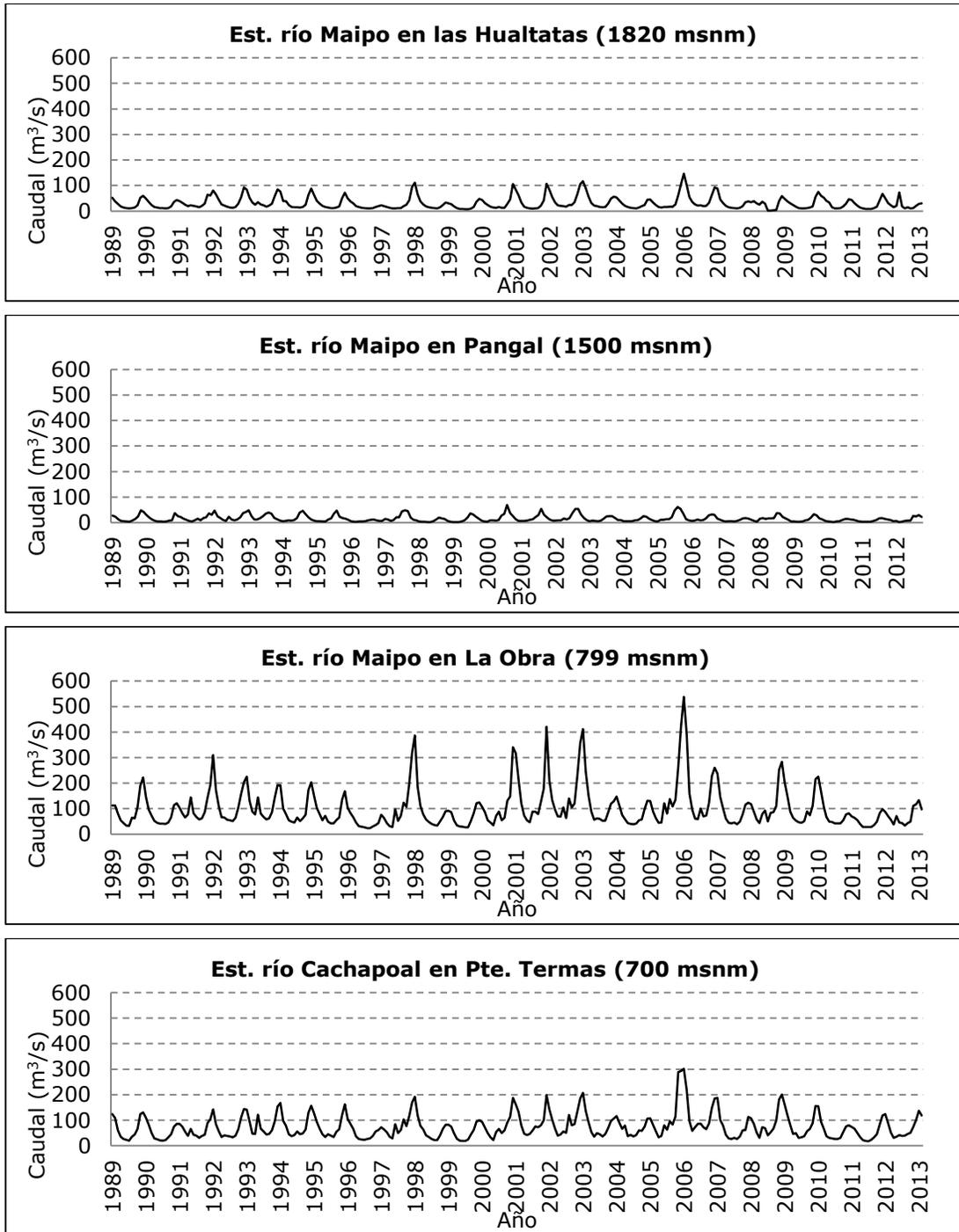


Figura 4. 22 Caudal medio mensual durante el período de enero 1989 a febrero 2013.

La técnica de regresión que utiliza información histórica de estaciones ubicadas en un área destino y control para estimar los efectos de los programas de siembra de nubes (Griffith et al, 2011; 2014) elimina de la serie de datos los años de fueron afectados por la siembra. El fin es separar el único elemento que pudo desestabilizar el sistema. En

nuestro caso, es relevante conocer previamente cómo varió el sistema con (y sin) aplicación del programa de siembra terrestre de nubes. En la tabla 4.12 se presenta el caudal medio por temporada de deshielo bajo los dos escenarios. El primero, contemplo el período histórico entre enero 1989 a febrero 2013 (con y sin siembra) donde hubo 24 temporadas de deshielo con un caudal medio entre 130 (m<sup>3</sup>/s) a 762 (m<sup>3</sup>/s). En el segundo escenario, se eliminó para el período histórico entre enero 1989 a febrero 2013 los años con siembra entre 2000 a 2003 y 2008 a 2012. Al eliminarlas el promedio histórico de deshielo este varió entre 132 (m<sup>3</sup>/s) a 739 (m<sup>3</sup>/s).

Tabla 4. 12 Caudal medio por temporada de deshielo (octubre a febrero) bajo los dos escenarios, con (y sin) aplicación del programa de siembra terrestre de nubes entre 1989 a 2013.

Temporadas deshielo	Maipo en La Obra (m <sup>3</sup> /s).	Cachapoal en Pte. Termas (m <sup>3</sup> /s).	Pangal en Pangal (m <sup>3</sup> /s).	Maipo en Las Hualtatas (m <sup>3</sup> /s).
Con y sin siembra	762	553	130	241
Sin siembra	739	541	132	242
Diferencia	23	12	-2	-1

Bajo el primer escenario (Fig. 4.23), se observó como la variación por temporada fue similar en las estaciones, reflejando en la fluviometría su dinámica interanual. Se destaca, la temporada de deshielo de los años 2009 a 2010 donde se presentó una anomalía positiva entre 1% a 4% en el caudal de las estaciones del río Cachapoal en Puente Termas y del río Maipo en La Obra, respectivamente. Por otro lado, en los ríos de cabecera como río Maipo en Las Hualtatas y río Pangal en Pangal presentaron entre las temporadas de deshielo 2009 a 2010 hasta 2012 a 2013 solo anomalías negativas respecto al promedio. Esta situación estuvo acorde con el déficit pluviométrico que presentó la Región central del país desde (al menos) el 2006. La persistencia de períodos secos repercutió en la acumulación nival en la zona cordillerana, manteniendo una constante anomalía negativa de esta variable.

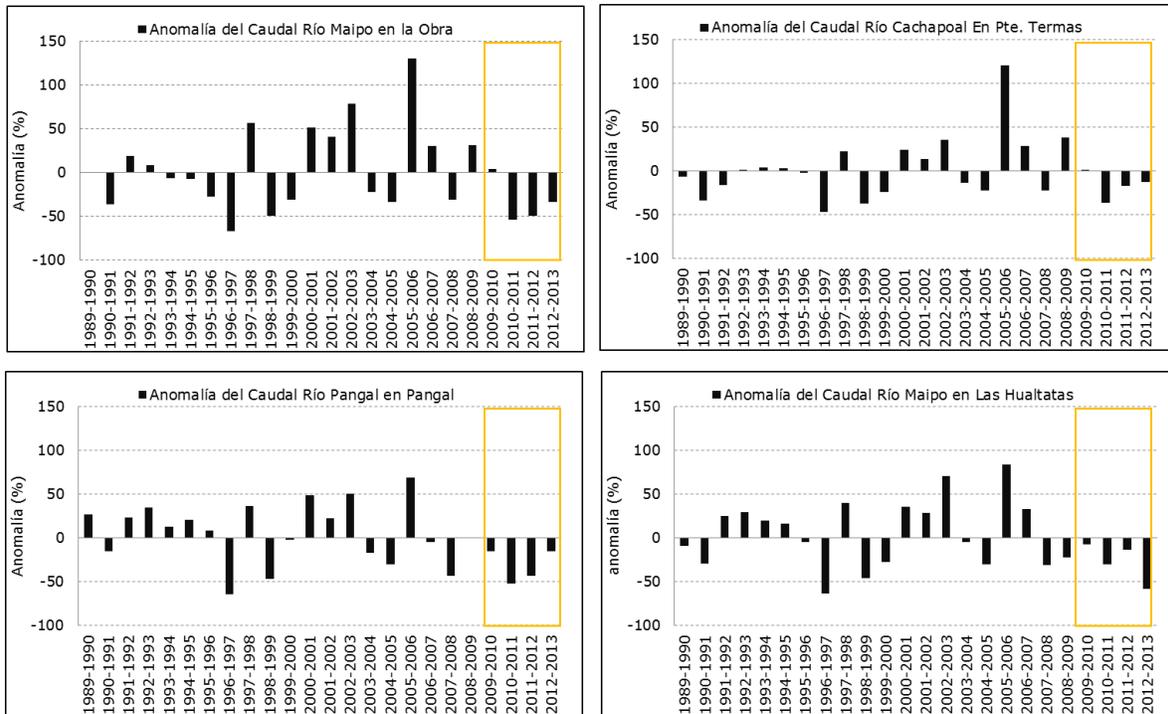


Figura 4. 23 Anomalia fluviométrica en temporada de deshielo respecto al promedio histórico de 1989 a 2013.

Bajo el segundo escenario se destaca que el sistema se mantuvo consistente, el patrón estacional se comportó de igual forma, en la fluviometría del río Pangal en Pangal y río Maipo en Las Hualtatas con o sin siembra durante el período de deshielo. Por otro lado, en las estaciones de río Cachapoal en Pte. Termas y río Maipo en La Obra hubo una diferencia positiva de 12 a 23 ( $m^3/s$ ). A pesar de esta diferencia, el comportamiento de los caudales deshielo mostró la misma variación manteniendo el patrón de anomalías negativas en los últimos 4 años de hasta el 50%. Demostrando que la tendencia del caudal por debajo del promedio climatológico durante el período de deshielo se mantuvo bajo ambos escenarios. Es importante destacar que el orden de magnitud de las anomalías y su correspondiente variación porcentual estuvieron relacionados con el régimen de los ríos analizados.

#### 4.4.2 Determinación del efecto de la siembra basada en la fluviometría

Los datos de caudal medio mensual al no seguir una distribución normal (Fig. 4.26), se normalizaron aplicando logaritmo natural, ajustándose entonces el resultado por la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk. El coeficiente de correlación lineal de Pearson entre las estaciones destino y control osciló entre valores de 0,7 y 0,9 para 15

temporadas de deshielo desde octubre de 1989 a febrero del 2000 y de octubre 2004 a febrero 2008, resultados que se pueden observar en la tabla 4.13 y Fig. 4.24 a 4.25.

Tabla 4. 13 Coeficiente de correlación normalizada para las estaciones destino y control.

Nombre Estación	Ln (Río Maipo en la Obra)	Ln (Río Maipo en las Hualtatas)
Ln (Río Cachapoal En Pte. Termas)	0,8	0,8
Ln (Río Pangal en Pangal)	0,8	0,7

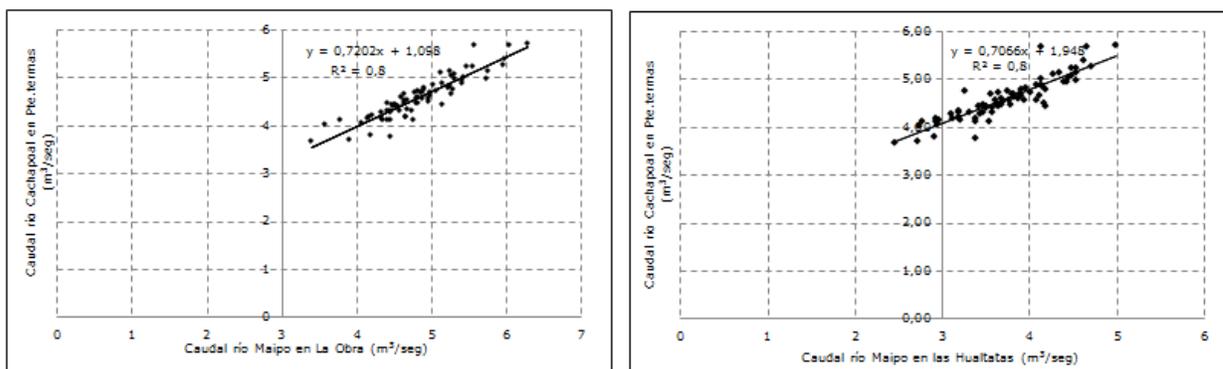


Figura 4. 24 Correlación entre estaciones fluviométricas destino y control: río Cachapoal En Pte. Termas versus río Maipo en La Obra y Las Hualtatas

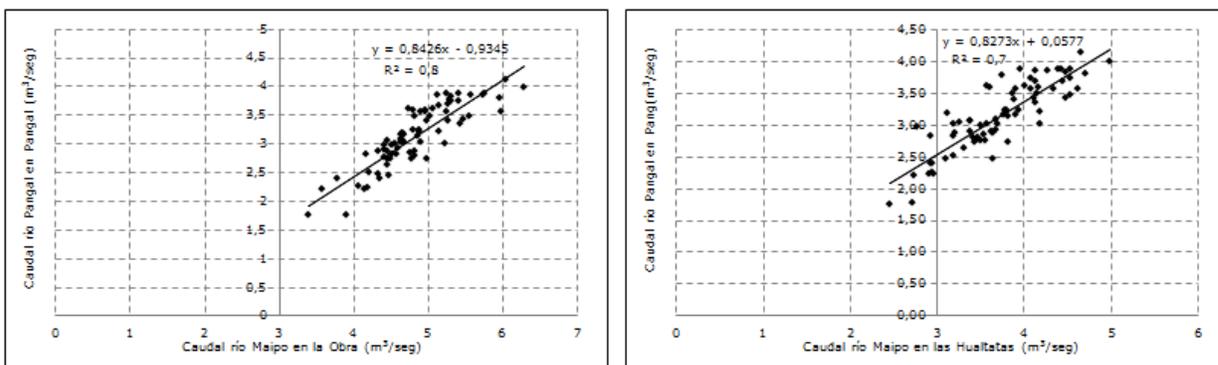


Figura 4. 25 Correlación entre estaciones fluviométricas destino y control: río Pangal en Pangal Termas versus río Maipo en La Obra y Las Hualtatas

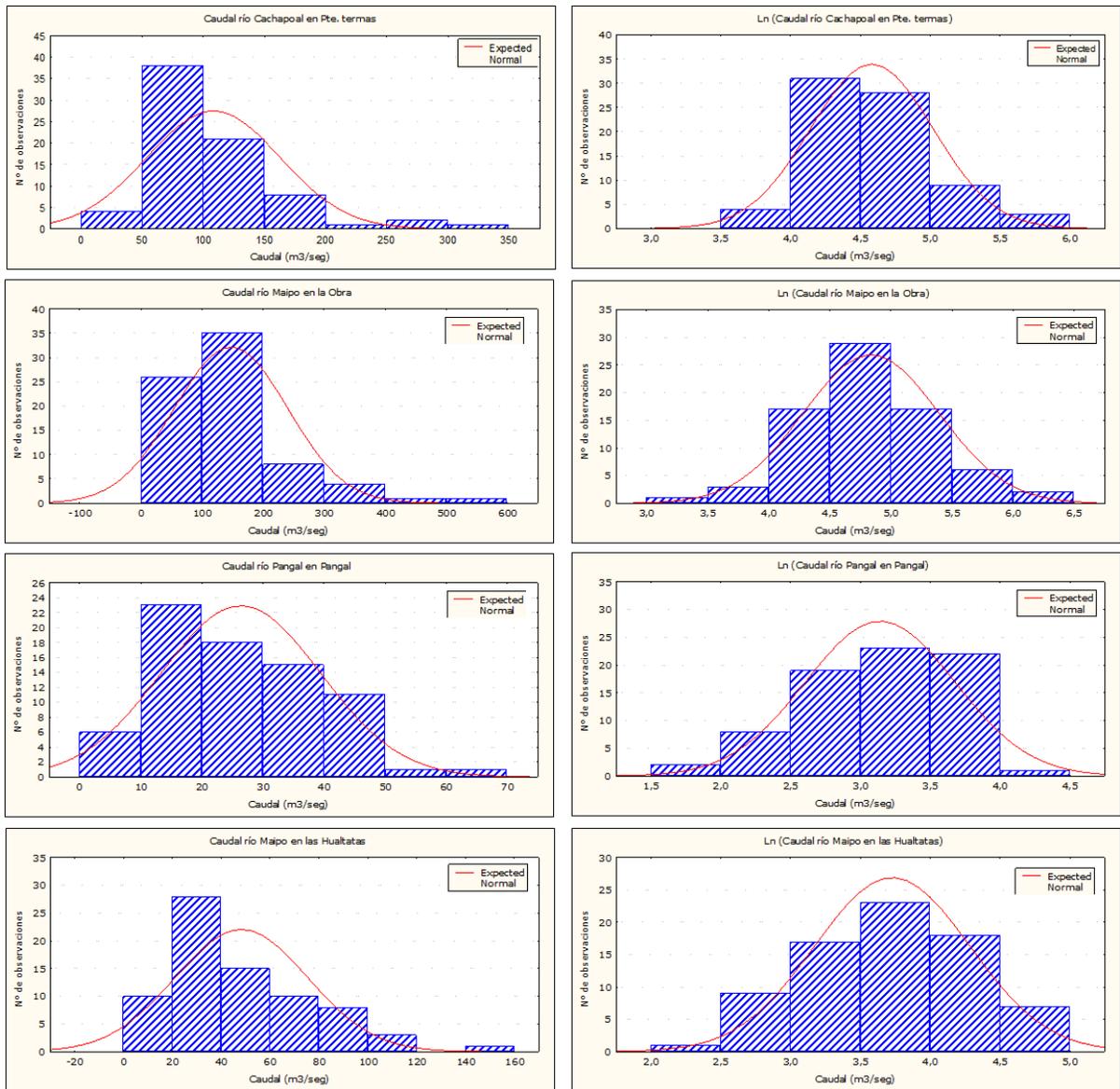


Figura 4. 26 Distribución de los datos de las estaciones fluviométricas destino y control (columna izquierda) y distribución datos normalizados (columna derecha)

Con el fin de ver de forma más clara los resultados se presentan inicialmente dos ecuaciones, la primera corresponde a la relación entre las estaciones de río Maipo en La Obra y Cachapoal en Pte. Termas, y la siguiente Maipo en La Obra ( $x_i$ ) y Pangal en Pangal (Y). La primera ecuación de regresión para Maipo en La Obra ( $x_i$ ) y Cachapoal En Pte. Termas (Y) es la siguiente:

$$(10) \quad \text{Ln} (Y (\text{Cachapoal})) = 1,098 + 0,7202 * \text{Ln} (x_i (\text{Maipo en la Obra}))$$

La segunda ecuación de regresión para Maipo en La Obra ( $x_i$ ) y Pangal en Pangal (Y) es:

$$(11) \quad \ln(Y(\text{Pangal})) = -0,9345 + 0,8426 * \ln(x_i(\text{Maipo en La Obra}))$$

Teniendo en cuenta los caudales observados y pronosticados, fue de interés conocer si los volúmenes producidos por éstos en la temporada de deshielo reflejaron variación. De las ecuaciones (10) y (11), se obtuvo un pronóstico por meses de los cuales se calculó su variación y un promedio por temporada. Los resultados alcanzados de la ecuación de regresión (10) y (11) son reflejados en la tabla 4.14 y 4.15. Además, se señaló en las siguientes tablas los meses que hubo precipitación estival en la cuenca destino y control representado por las estaciones de río Pangal en Pangal (1500 msnm) y embalse El Yeso (2475 msnm) respectivamente con el símbolo (\*).

Tabla 4. 14 Variación fluviométrica por temporada de deshielo de la estación destino río Cachapoal en Pte. Termas en relación a la estación control río Maipo en La Obra.

Mes-Año	ln(Río Maipo (X)) caudal observado	ln(Río Cach (Y)) caudal observado	ln(Río Cach (Y)) caudal estimado	Variación (%)
oct-09	4,30	4,19	4,19	-0,97 (*)
nov-09	4,71	4,49	4,49	0,3
dic-09	5,38	5,05	4,97	8,2
ene-10	5,42	5,04	5,00	3,8
feb-10	5,11	4,54	4,78	-21,5
Variación por temporada 2009-2010				-2,0
oct-10	3,99	3,99	3,97	1,9 (*)
nov-10	4,34	4,33	4,22	11,2 (*)
dic-10	4,41	4,39	4,27	12,1 (*)
ene-11	4,25	4,30	4,16	14,8
feb-11	4,17	4,21	4,10	11,2 (*)
Variación por temporada 2010-2011				10,3
oct-11	3,88	3,81	3,89	-7,6 (*)
nov-11	4,40	4,41	4,27	15,7
dic-11	4,58	4,77	4,40	45,9
ene-12	4,47	4,82	4,32	66,0 (*)
feb-12	4,25	4,49	4,16	39,2
Variación por temporada 2011-2012				31,8
oct-12	3,89	3,92	3,90	1,7 (*)
nov-12	4,71	4,30	4,49	-17,3
dic-12	4,76	4,62	4,53	10,1 (*)
ene-13	4,89	4,93	4,62	35,8 (*)
feb-13	4,58	4,78	4,40	46,5 (*)
Variación por temporada 2012-2013				15,3
Variación 4 temporadas deshielo				13,9

Tabla 4. 15 Variación fluviométrica por temporada de deshielo de la estación destino río Pangal en Pangal en relación a la estación control río Maipo en La Obra.

Mes-Año	ln(Río Maipo (X)) caudal observado	ln(Río Pangal (Y)) caudal observado	ln(Río Pangal (Y)) caudal estimado	Variación (%)
oct-09	4,30	2,39	2,69	-25,9 (*)
nov-09	4,71	3,00	3,03	-3,3
dic-09	5,38	3,50	3,60	-9,7
ene-10	5,42	3,35	3,63	-24,3
feb-10	5,11	2,84	3,37	-41,2
Variación por temporada 2009-2010				-20,9
oct-10	3,99	2,26	2,43	-15,2 (*)
nov-10	4,34	2,66	2,72	-6,0 (*)
dic-10	4,41	2,64	2,78	-13,3 (*)
ene-11	4,25	2,52	2,65	-11,5
feb-11	4,17	2,42	2,58	-15,1 (*)
Variación por temporada 2010-2011				-12,2
oct-11	3,88	2,33	2,33	-0,2 (*)
nov-11	4,40	2,83	2,77	6,1
dic-11	4,58	2,90	2,92	-2,9
ene-12	4,47	2,70	2,83	-12,3 (*)
feb-12	4,25	2,53	2,65	-11,0
Variación por temporada 2011-2012				-4,1
oct-12	3,89	2,08	2,34	-23,4 (*)
nov-12	4,71	3,26	3,03	25,0
dic-12	4,76	3,19	3,08	12,0 (*)
ene-13	4,89	3,39	3,19	23,1 (*)
feb-13	4,58	3,09	2,92	18,5 (*)
Variación por temporada 2012-2013				11,0
Variación 4 temporadas deshielo				-6,5

De la información de la tabla 4.14 se desprende para la estación destino río Cachapoal en Pte. Termas que las máximas variaciones positivas observadas fueron durante los meses de diciembre a febrero. Esta situación es producto del aumento en las temperaturas durante el periodo estival que generó un derretimiento de la nieve acumulada durante el invierno previo. En relación a los volúmenes de deshielo, se apreció que la temporada 2009 a 2010 fue la única que mostró en promedio (5 meses) un decrecimiento del 2%. Resultado bastante menor comparado con las siguientes tres temporadas entre 2010 a 2013 donde se obtuvo mayormente incrementos sobre 10%. De noviembre 2011 a febrero 2012 fue el período que presentó mayor variación alcanzando un incremento promedio por temporada del 31,8%. En general, se observó un aumento promedio de

caudal del río Cachapoal en Pte. Termas en relación al caudal del río Maipo en La Obra durante las cuatro temporadas consecutivas de deshielo. En contraste, el río Pangal presentó mayormente variaciones negativas en 14 de los 20 meses analizados, particularmente en las temporadas de deshielo 2009 a 2010 y 2010 a 2011 (tabla 4.15). Los resultados indican que hubo solo dos temporadas que presentaron incrementos solo en el mes de noviembre de los años 2011 y 2012, además, en la temporada 2012 a 2013 desde noviembre a febrero con porcentajes sobre el 10%. Por lo general, al comparar los resultados se obtuvo que el río Pangal en Pangal no presentó variación positiva del caudal durante el período de deshielo entre los años 2009 a 2013. Es decir, el efecto del programa no se ve reflejado en este río de cabecera de la cuenca del río Cachapoal.

Al relacionar los datos fluviométricos medios mensuales de la estación del río Maipo en Las Hualtatas ( $x_i$ ) versus Pangal en Pangal (Y) y Cachapoal En Pte. Termas (Y) se obtuvo las ecuaciones (12) y (13). Los resultados alcanzados son reflejados en la tabla 4.16 y 4.17.

$$(12) \quad \ln(Y \text{ (Cachapoal)}) = 1,948 + 0,7066 * \ln(x_i \text{ (Maipo en Las Hualtatas)})$$

$$(13) \quad \ln(Y \text{ (Pangal)}) = 0,0577 + 0,8273 * \ln(x_i \text{ (Maipo en Las Hualtatas)})$$

Tabla 4. 16 Resultados de la variación fluviométrica mensual y por temporada del río Cachapoal en Pte. Termas versus río Maipo en Las Hualtatas.

Mes-Año	ln(Río Hualtatas (X)) caudal observado	ln(Río Cach(Y)) caudal observado	ln(Río Cach(Y)) caudal estimado	Variación (%)
oct-09	2,6	4,2	3,79	49,9 (*)
nov-09	2,9	4,5	4,00	63,5
dic-09	4,0	5,0	4,77	31,7
ene-10	4,3	5,0	4,99	5,2
feb-10	4,1	4,5	4,85	-26,8
Variación por temporada 2009-2010				24,7
oct-10	2,9	4,0	4,00	-0,8 (*)
nov-10	3,4	4,3	4,35	-1,9 (*)
dic-10	3,8	4,4	4,63	-22,2 (*)
ene-11	3,8	4,3	4,63	-29,0
feb-11	3,4	4,2	4,35	-13,6 (*)
Variación por temporada 2010-2011				-13,5

Tabla 4. 16 (Continuación) Resultados de la variación fluviométrica mensual y por temporada del río Cachapoal en Pte. Termas versus río Maipo en Las Hualtatas.

Mes-Año	ln(Río Hualtatas (X)) caudal observado	ln(Río Cach(Y)) caudal observado	ln(Río Cach(Y)) caudal estimado	Variación (%)
oct-11	2,8	3,8	3,93	-11,3 (*)
nov-11	3,7	4,4	4,56	-13,4
dic-11	4,2	4,8	4,92	-13,5
ene-12	3,9	4,8	4,70	12,4 (*)
feb-12	3,5	4,5	4,42	7,0
Variación por temporada 2011-2012				-3,8
oct-12	2,4	3,9	3,64	30,8 (*)
nov-12	2,5	4,3	3,71	80,3
dic-12	3,0	4,6	4,07	74,6 (*)
ene-13	3,3	4,9	4,28	91,1 (*)
feb-13	3,4	4,8	4,35	53,5 (*)
Variación por temporada 2012-2013				66,1
Variación 4 temporadas deshielo				18,4

Si se observan los resultados del río Cachapoal en Pte. Termas versus río Maipo en las Hualtatas (tabla 4.16), se aprecia que continuó la tendencia decreciente en los volúmenes del caudal en el período analizado de deshielo de los años 2010 a 2011 y 2011 a 2012. En el resto de las temporadas, los incrementos en los volúmenes del caudal mensual oscilaron en un rango de 12,4% a un máximo de 91,1%. A partir de octubre 2012 a febrero 2013, se observó un sostenido incremento del caudal con un promedio por temporada de 66,1%. Los resultados promedio de las cuatro temporadas sugieren que hubo una variación positiva del caudal del 18,4% durante el período de deshielo.

Como una oportunidad de mejora se incluyeron en el análisis dos ríos de cabeceras ubicados sobre los 1500 (msnm) en las cuencas destino y control que presentan un menor uso consuntivo del recurso hídrico (tabla 4.17). Al estimar como se habría comportado la fluviometría del río destino en relación a lo observado en el control se obtuvo para el período 2009 a 2010 y 2012 a 2013 un mayor deshielo en el mes de noviembre continuando con máximos en los meses de diciembre y enero, para comenzar a declinar en febrero. En la temporada 2010 a 2011 y 2011 a 2012 se identificaron como períodos secos manteniendo una constante anomalía negativa de esta variable. Respecto a la variación de las cuatro temporadas el incremento promedio se encontró un 6,8%.

Tabla 4. 17 Resultados de la variación fluviométrica mensual y por temporada del río Pangal en Pangal versus río Maipo en Las Hualtatas.

Mes-Año	ln(Río Hualtatas (X)) caudal observado	ln(Río Pangal(Y)) caudal observado	ln(Río Pangal(Y)) caudal estimado	Variación (%)
oct-09	2,63	2,39	2,23	16,8 (*)
nov-09	2,89	3,00	2,45	73,7
dic-09	4,02	3,50	3,38	12,1
ene-10	4,32	3,35	3,63	-24,2
feb-10	4,10	2,84	3,45	-45,6
Variación por temporada 2009-2010				6,6

oct-10	2,91	2,26	2,47	-18,3 (*)
nov-10	3,39	2,66	2,86	-18,3 (*)
dic-10	3,85	2,64	3,24	-45,3 (*)
ene-11	3,76	2,52	3,17	-47,5
feb-11	3,43	2,42	2,90	-38,1 (*)
Variación por temporada 2010-2011				-33,5

oct-11	2,83	2,33	2,40	-6,4 (*)
nov-11	3,74	2,83	3,15	-27,4
dic-11	4,22	2,90	3,55	-48,0
ene-12	3,91	2,70	3,29	-44,7 (*)
feb-12	3,45	2,53	2,91	-31,7
Variación por temporada 2011-2012				-31,6

oct-12	2,36	2,08	2,01	6,9 (*)
nov-12	2,45	3,26	2,08	223,1
dic-12	2,99	3,19	2,53	93,3 (*)
ene-13	3,32	3,39	2,80	80,4 (*)
feb-13	3,40	3,09	2,87	25,1 (*)
Variación por temporada 2012-2013				85,8

Variación 4 temporadas deshielo				6,8
---------------------------------	--	--	--	-----

## 5 Discusión y conclusiones

### 5.1 Discusión

Satisfaciendo los objetivos específicos planteados se pudo verificar si es posible determinar el efecto de la siembra terrestre de nubes del programa desarrollado en la

cuenca del río Cachapoal entre los años 2009 a 2012 utilizando datos fluviométricos históricos. Inicialmente con datos pluviométricos, se identificó la anomalía diaria para los eventos con (sin) condiciones meteorológicas basado en cuatro parámetros AIC, ABN, viento medio y nubosidad. El objetivo de realizar esta clasificación fue no realizar una estimación del efecto global de la siembra a partir de la precipitación total invernal. Esto se debe a que la alta variabilidad natural de la precipitación hace difícil la detección de la siembra de nubes. La tabla 5.1 resume los resultados obtenidos durante el período de estudio. Se determinó que en las campañas operativas invernales 2009 a 2012 hubo activación de la red de equipos con (sin) condiciones meteorológicas lo cual representó un 35% y 65% de los casos, respectivamente. Los días que cumplieron con los aspectos básicos de operación del programa siembra de nubes y hubo activación la red de equipos de siembra terrestre se observó que, en general, no aumentó la precipitación líquida respecto a la media en 48 horas luego que se sembró. Esta tendencia se mantuvo similar al considerar el efecto de la siembra basado en el día de siembra, en donde 15 de 36 casos no presentó un aumento en la precipitación. Más bien, en ambos hubo una tendencia a presentar una variación negativa en la variable analizada. Posteriormente, en los días que no cumplieron con las condiciones meteorológicas y hubo activación la red de equipos de siembra terrestre, en general, hubo un aumento en la precipitación líquida respecto a la media en 48 y 24 horas luego que se sembró. Para finalizar, en los días que hubo condiciones meteorológicas y no hubo activación la red de equipos de siembra terrestre, en general, no aumentó la precipitación líquida respecto a la media. A pesar de haber realizado una clasificación previa en los tres casos se obtuvo en general incrementos y disminuciones de la variable sin presentar una tendencia marcada. Por lo tanto, si el programa busca aumentar la cantidad de nieve en la cuenca del río Cachapoal sería necesario contar con el dato de altura para verificar el efecto de la siembra terrestre.

Tabla 5. 1 Número de (i) Días con condiciones meteorológicas y equipos de siembra terrestre activados y (ii) Días sin condiciones meteorológicas y equipos de siembra terrestre activados.

Año	Día de Siembra (i)	Día de Siembra (ii)
2009	5 (42%)	7 (58%)
2010	4 (29%)	10 (71%)
2011	7 (54%)	6 (46%)
2012	1 (11%)	8 (89%)
Total 4 temporadas	17 (35%)	31 (65%)

Respecto a la fluviometría, en este estudio se replicó el método de verificación estadístico de regresión histórica utilizado en evaluaciones previas al programa de siembra terrestre de nubes de la cuenca del río Cachapoal. La modificación propuesta fue en el tratamiento de la fluviometría debido a que el análisis se enfocó solo en el período de deshielo histórico (octubre a febrero) eliminando así las fluctuaciones anuales, por ejemplo, la invernal. Las estaciones fluviométricas destino río Cachapoal en Pte. Termas y control río control Maipo en La Obra, son las que entre los años 2009 a 2013 se han utilizado para visualizar los vestigios de éxito o respuesta ante la aplicación durante el período de deshielo. Al comparar los resultados metodología previa versus nuestra propuesta de modificación la tendencia de incremento del caudal en la estación Cachapoal en Pte. Termas respecto a la estación control río control Maipo en La Obra continuó siendo positiva pero las magnitudes de esta fueron menores, lo que se debe principalmente a la forma en que se aplicó la metodología. Para reflejar los porcentajes de variación obtenidos utilizando como metodología el año hidrológico completo se presenta la tabla 5.2.

Tabla 5. 2 Porcentajes de variación obtenidos utilizando la metodología de evaluación de estudios previos.

	Cachapoal en Pte. Termas versus Maipo en La Obra	Cachapoal en Pte. Termas versus Maipo en Las Hualtatas
Temporada Deshielo	Variación (%)	Variación (%)
2009 a 2010	1,6	33,8
2010 a 2011	29,8	-7
2011 a 2012	51,8	1,5
2012 a 2013	28	91,4

Al realizar el análisis estadístico de regresión histórica utilizando datos fluviométricos fue de interés observar si la variación obtenida tuvo relación con la pluviometría en la temporada de deshielo. El resultado alcanzado fue interesante, debido a que durante el período de deshielo entre los años 2009 a 2013 hubo en 11 de 20 meses eventos de precipitación estival de diversas intensidades en la cuenca del río Maipo y del río Cachapoal. La precipitación estival acumulada por temporada de deshielo (octubre a febrero) se presenta en la Fig. 5.1. Las máximas precipitaciones se presentaron en la estación Pangal en Pangal (1500 msnm) en octubre 2012 con 84,2 (mm) y en diciembre 2012 con 113,7 (mm), además, en la estación Embalse El Yeso (2475 msnm) en noviembre 2010 con 58,8 (mm). La precipitación se refleja en el caudal rápidamente, por

tal motivo, en las temporadas de deshielo 2009 a 2010 y 2012 a 2013 al haber triplicado el registro de agua caída en la cuenca del río Cachapoal respecto a la del río Maipo se obtuvo incrementos en el caudal del río destino. En cambio, en las temporadas de deshielo 2010 a 2011 y 2011 a 2012 donde la precipitación estival acumulada fue relativamente homogénea en ambas cuencas hubo una variación negativa del caudal destino respecto al control. Por su parte, el único período de deshielo donde hubo 4 meses sin registro de precipitación presentó el menor descenso del caudal promedio por temporada (octubre a febrero) obteniendo disminución del 2% y 20,9% entre octubre 2009 a febrero 2010 en las estaciones control de río Cachapoal en Pte. Termas y Pangal en Pangal respecto a río Maipo en La Obra, respectivamente. En general, el caudal de deshielo entre octubre 2009 a febrero 2013 se vio incrementado en los meses estivales pero el origen de esta condición fue indeterminada. La variación obtenida pudo ser producto del deshielo, precipitación estival tanto como de las condiciones de explotación, uso, manejo y ubicación de los ríos analizados.

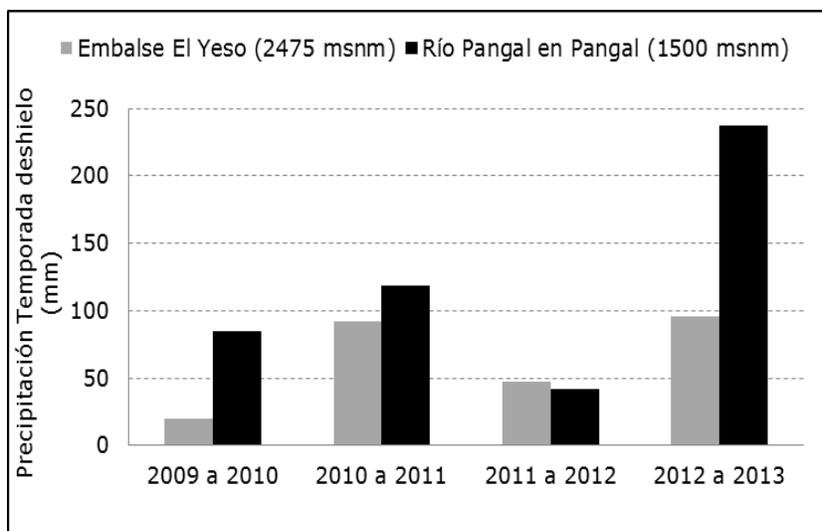


Figura 5. 1 Precipitación estival acumulada en las temporadas deshielo (octubre a febrero) para la estación control Embalse El Yeso y estación destino río Pangal en Pangal entre los años 2009 a 2013.

La variación fluviométrica de las estaciones destino Cachapoal en Pte. Termas y Pangal en Pangal no fue consistente, ya que, el incremento o disminución no se vio reflejo en forma homogénea. Al utilizar estaciones fluviométricas de menor cota como Cachapoal en Pte. Termas (700 msnm) versus Maipo en La Obra (799 msnm) se obtuvo mayormente variaciones positivas en las temporadas de deshielo del año 2010 a 2013 (Fig.5.2). Posteriormente, al relacionar ambas estaciones destino con respecto al río Maipo en Las

Hualtatas (1820 msnm) en su mayoría se reflejaron solo variaciones negativas. El único período de deshielo que presentó homogeneidad o la misma tendencia en los resultados obtenidos fue el año 2012 a 2013. Fluctuación que pudo ser respuesta a la precipitación estival presente a partir de octubre 2012 a febrero 2013 en la zona cordillerana de la Región central del país.

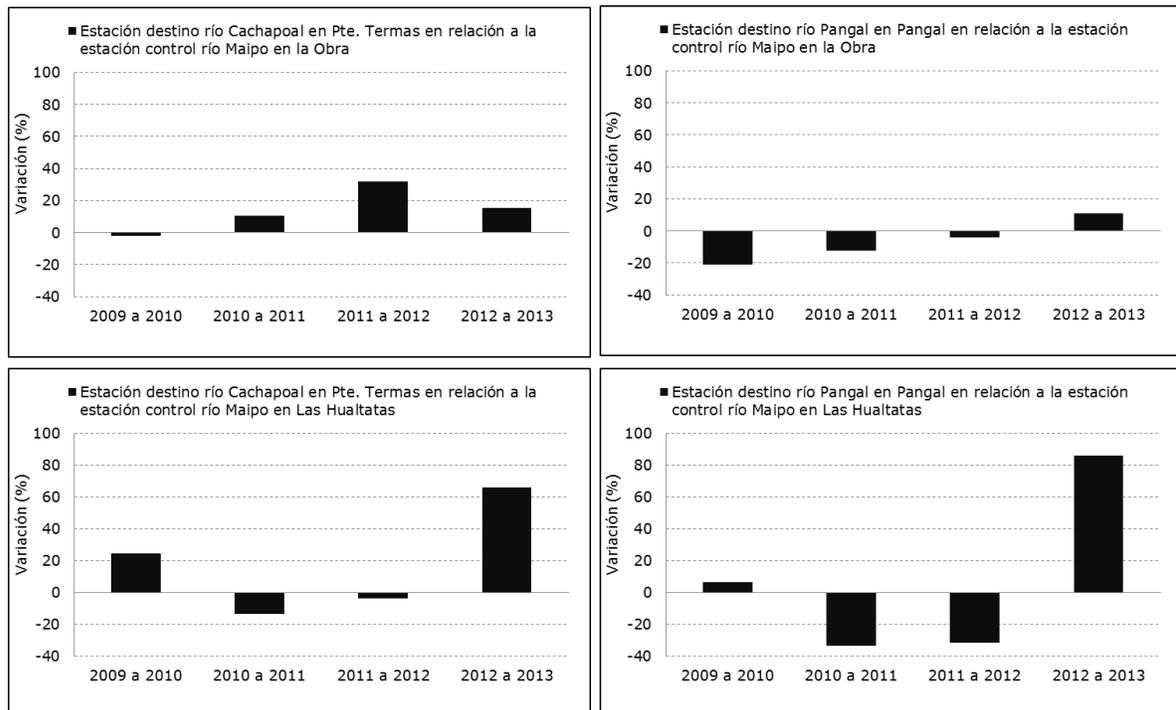


Figura 5. 2 Variación fluviométrica promedio por temporada de deshielo (octubre a febrero) entre los años 2009 a 2013.

## 5.2 Conclusiones

A continuación, se puntualizan las conclusiones que se derivan en cada tema tratado.

- La Región del Libertador General Bernardo O`Higgins cuenta con estaciones de superficie pero no de radiosondeo. Siguiendo a Lawrence (2005) utilizando la relación entre la  $t_a$  y  $t_d$  fue posible estimar la altura de la base de la nube (en metros sobre nivel de la estación) con valores de superficie en la cuenca del río Cachapoal bajo condiciones de temperatura  $0 < t^\circ < 30$  y de humedad relativa entre  $50\% < HR < 100\%$ . La comprobación de la ecuación con datos de radiosonda de Santo Domingo para las 00Z (124 casos) presentó una diferencia relativa (DR) de 2,23% y para las 12Z (130 casos)

de 3,04%, lo cual representaría una subestimación de la ABN de aproximadamente 3 (msnm)<sup>12</sup>.

- Se analizaron 560 (N) y 578 (D) casos en los cuales estuvo operativo el programa siembra terrestre de nubes. De ellos se obtuvo un 5% (30) y 6% (34) de casos donde existían condiciones para la siembra terrestre durante los meses invernales entre los años 2009 a 2012 basado en el cumplimiento de los cuatro parámetros propuestos como inicio de la activación de la red de equipos.

- Entre el año 2009 a 2012 hubo 48 de eventos de siembra de los cuales el 35% (17) la activación de la red se realizó bajo los cuatros parámetros propuestos: una AIC menor o igual a 2500 (msnm), ABN menor o igual a 2500 (msnm), dirección del viento medio con una componente del oeste y nubosidad en la cuenca destino. En el 65% (31) restante la activación se realizó bajo con una componente del vector viento en dirección este 3%, escasa nubosa 6%, o con dificultades con un conjunto de variables como la dirección viento medio y nubes 3%; AIC, dirección viento medio y nubes 6%; AIC y dirección viento medio 6%; AIC y nubosidad 29%; AIC 45%.

- Al determinar los días con (sin) condiciones y (sin) generador activado versus la pluviometría se obtuvo que en los días con condiciones y generador activado, en general, no aumento la precipitación líquida respecto a la media luego que se sembró. En los días sin condiciones meteorológicas y equipos de siembra terrestre activados hubo un aumento en la precipitación líquida respecto a la media. En los días con condiciones meteorológicas para la siembra sin equipos activados no aumento la precipitación líquida respecto a la media. Si no más bien hubo mayor número de casos con una variación negativa de la variable.

- Con respecto a la fluviométrica la atención se dirigió a los datos de caudal medio mensual de fines de primavera y verano. El valor de esta información fue considerado como indicador de la acumulación nival durante los meses invernales. En general, se observó un aumento promedio de 13,9% y 18,4% del caudal del río Cachapoal en Pte. Termas en relación al caudal del río Maipo en La Obra y Maipo en Las Hualtatas durante cuatro temporadas consecutivas de deshielo, respectivamente. Condición contraria se observó en el río Pangal, uno de sus ríos tributarios por el noreste, donde un descenso del

---

<sup>12</sup> msnm: metros sobre el nivel del mar.

6,5% en el caudal se presentó durante el mismo período de deshielo en relación al caudal del río Maipo en La Obra. Al comparar el caudal medio mensual de dos ríos de cabeceras ubicados sobre los 1500 (msnm) presentan un menor uso consuntivo del recurso hídrico en las cuencas destino y control como lo son Pangal en Pangal y Maipo en Las Hualtatas se obtuvo una variación positiva del rango del 6,8% en las cuatro temporadas de deshielo de los años 2009 a 2012.

- Con la utilización de datos pluviométricos diarios no se logró verificar el efecto local de la siembra terrestre de nubes en la cuenca del río Cachapoal durante las campañas operativas entre los años 2009 a 2012. A pesar de haber realizado una clasificación de casos se obtuvo en general incrementos y disminuciones de la variable sin presentar una tendencia marcada. En esta oportunidad utilizando la pluviometría no se definió una respuesta concreta, por lo tanto, es necesario contar con el dato de altura de nieve para verificar el efecto de la siembra terrestre. Por otro lado, al replicar el método de verificación estadístico de regresión histórica utilizado en evaluaciones previas al programa de siembra terrestre de nubes en la cuenca del río Cachapoal con una modificación en el tratamiento de la fluviometría la tendencia en los resultados continuó siendo positivo pero las magnitudes de esta fueron menores. Es importante mencionar que en el período de deshielo entre los años 2009 a 2012 hubo en 17 de 20 meses eventos de precipitación estival de diversas intensidades en la cuenca del río Cachapoal y del río Maipo. Por lo cual, no se puede discernir si las variaciones en la fluviometría fue producto de las condiciones meteorológicas, la precipitación o la propia demanda de agua (uso consuntivo y no consuntivo). Se cree que analizar el aumento (disminución) de la fluviometría durante los períodos de aplicación del programa no es el adecuado, ya que, si se utiliza debemos asegurarnos que durante ese período no se presenten precipitaciones estivales. Esta condición dificulta la observación del efecto de la siembra terrestre de nubes sobre la capa nival acumulada durante el período invernal previo. Además, para analizar este efecto se deben utilizar estaciones de medición que se ubiquen a mayor cota y que presenten menor influencia de uso tanto de la agricultura, minería, extracción de caudales, entre otros. Lo que deriva a pensar que no es válido evaluar un proceso de siembra con caudales manipulados, ya que, esta intervención no puede ser totalmente eliminada en el proceso de análisis. Para finalizar no fue posible verificar el efecto del programa siembra terrestre de nubes en la cuenca del río Cachapoal respecto a la cuenca del río Maipo durante las campañas operativas entre los años 2009 a 2012 utilizando datos fluviométricos históricos.

- Debido a que la siembra terrestre de nubes se trata de un proceso complejo sería necesario aumentar la confiabilidad de los resultados utilizando estaciones meteorológicas de superficie que midan, por ejemplo, altura de la nieve y realizar análisis químico de la superficie para comprobar la llegada del material de siembra al área destino. Contar con sistemas de percepción remota como radares, radiómetros de microondas, nefobasímetros o instrumentos en aviones laboratorio para medir con mayor precisión el efecto del programa.

## **6. Referencias**

Asar, M. Estudio de procesos físico-químicos en los que intervienen partículas de nube y precipitación. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 2013.

Benado, J. Patrimonio geológico del proyecto geoparque Cajón del Maipo Región Metropolitana-Chile. Tesis Doctoral. Universidade do Minho, Escola de Ciências, Portugal, 2013.

Breed, D., Rasmussen, R., Weeks, C., Boe, B., & Deshler, T. Evaluating winter orographic cloud seeding: design of the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(2), 282-299, 2014.

Cepeda, J. Los sistemas naturales de la cuenca del Río Elqui Región de Coquimbo, Chile: Vulnerabilidad y cambio del clima. Ediciones Universidad de La Serena, 66-164, 2008.

Correa, H. Análisis de rutas de nieve y pronóstico de caudales en Chile Central: variabilidad espacial y temporal. Memoria de título, Universidad de Chile, 2013.

Court, M. El agua, fuente permanente de energía. *Anales de la Universidad de Chile*, 0(5), 255-272, 2014.

Cuadrat, J.M., Pita, M.F. *Climatología*. 2a. ed. Madrid. Editorial Cátedra, 2006.

Chu, X., Xue, L., Geerts, B., Rasmussen, R., & Breed, D. A case study of radar observations and WRF LES simulations of the impact of ground-based glaciogenic seeding

on orographic clouds and precipitation. Part I: Observations and model validations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(10), 2264-2286, 2014.

Defelice, T. P., Golden, J., Griffith, D., Woodley, W., Rosenfeld, D., Breed, D., & Boe, B. Extra area effects of cloud Seeding An updated assessment. *Atmospheric Research*, 135, 193-203, 2014.

Devore, J. L. *Probabilidad y estadística para ingenierías y ciencias*. Cengage Learning Editores, 7ma edición, 2008.

Erickson, D. La modificación de las nubes. *Revista Tralka: revista de geofísica y meteorología*, Vol. 2, Nº2, 231-245, 1982

Houze Jr., R. A. *Cloud dynamics*. Academic press, Vol. 104, 2014.

Figuroa, R. Efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos a nivel de cuenca implementación de un modelo integrado a nivel superficial y subterráneo. Memoria de título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2008.

García, F. Modelo del balance hídrico del tranque de relaves ovejería, memoria de título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2007.

Garreaud, R. Warm winter storms in Central Chile. *Journal of Hydrometeorology*, 14(5), 1515-1534, 2013.

Godoy, A., Possia, N., Campetella, C., & Skabar, Y. Un caso de baja segregada en el sur de Sudamérica: procesos dinámicos y termodinámicos. *Revista Brasileira de Meteorología*, 26(4), 503-514, 2011

Griffith, D. A., Yorty, D. P., & Solak, M. E. A winter operational cloud seeding program: upper gunnison river basin, colorado. *The Journal Of Weather Modification*, 43(1), 29-43, 2011.

Griffith, D. A., Yorty, D. P. A brief history of evaluations performed on the operational Kings River winter orographic cloud seeding program. *The Journal of Weather Modification*, 46(1), 29-36, 2014

Guzmán, C. Incorporación de consideraciones ambientales en la operación horaria del Embalse Rapel. Memoria de título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2013.

Jing, X., Geerts, B., Friedrich, K., & Pokharel, B. Dual-polarization radar data analysis of the impact of ground-based glaciogenic seeding on winter orographic clouds. Part I: Mostly stratiform clouds. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(9), 1944-1969, 2015.

Lascano, M. E., & Villalba, R. Algunas precisiones sobre el rol de los glaciares en el escurrimiento andino. XXI Congreso Nacional del Agua, Tucumán, Argentina, 17, 1-6, 2007.

Lawrence, M. G. The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(2), 225-233, 2005.

Manton, M. J., Warren, L., Kenyon, S. L., Peace, A. D., Bilish, S. P., & Kemsley, K. A confirmatory snowfall enhancement project in the Snowy Mountains of Australia. Part I: Project design and response variables. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(7), 1432-1447, 2011.

Mayor, Y. G., Montejó, I. B., & Castro, D. M. (2014). Simulación numérica de la dispersión del yoduro de plata en la región oriental de Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 20(2), 87-97, 2014.

Méndez, N. G., Cuadrado, F. M., Acevedo, J. Y., Bueno, M. R., Yao, Z., Madariaga, A., & Donoso, M. Evaluation about the stimulation of rainfall program. *The Journal of Weather Modification*, 46(1), 37-44, 2014.

MOP-DGA, C. I. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivo de calidad. Cuenca Quebrada de Tarapacá. Santiago, Chile, 2004.

Pérez, C. A., Martínez, D., Gamboa, F., Petrov, V., Koloskov, B., & Danelyan, B. Diseño del experimento de incremento artificial de la lluvia en áreas extensas de Camagüey por siembra de nubes aleatorizada (EXPAREX). *Revista Cubana de Meteorología*, 17(1), 2011.

Pokharel, B., Geerts, B., & Jing, X. The impact of ground-based glaciogenic seeding on orographic clouds and precipitation: A multisensor case study. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(4), 890-909, 2014.

Pruppacher, H. R., Klett, J. D. *Microphysics of clouds and precipitation*. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, 2da edición, 2010.

Quintana, J. Estudio de los factores que explican la variabilidad de la precipitación en Chile en escalas de tiempo interdecadal. Tesis de Magister, Universidad de Chile, 2004.

Ritzman, J. M., Deshler, T., Ikeda, K., & Rasmussen, R. Estimating the fraction of winter orographic precipitation produced under conditions meeting the seeding criteria for the Wyoming weather modification pilot project. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(6), 1202-1215, 2015.

Rogers, R. R. *Física de las Nubes*. Reverté. 1977.

Rosengaus, M., & Bruintjes, R. Estimulación de lluvia por sembrado higroscópico. *Ingeniería hidráulica en México*. 17 (1), 13-29, 2002.

Silverman, B. A. A critical assessment of glaciogenic seeding of convective clouds for rainfall enhancement. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(5), 903-923, 2001.

Tesser, C. El agua y los territorios hídricos en la Región Metropolitana de Santiago de Chile. Casos de estudio: Tiltill, Valle de Mallarauco y San Pedro de Melipilla. *Estudios Geográficos*, 74(274), 255-285, 2013.

Viale, M. Características de las precipitaciones orográficas de invierno sobre los Andes subtropicales centrales. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 2010.

Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. Atmospheric science: an introductory survey, Academic press, Vol. 92,2006.

World Meteorological Organization. WMO Weather Modification Statement and Guidelines. Phisanulok, Thailand, 17-19, 2015.

Xue, L., Hashimoto, A., Murakami, M., Rasmussen, R., Tessendorf, S. A., Breed, D., & Blestrud, D. Implementation of a silver iodide cloud-seeding parameterization in WRF. Part I: Model description and idealized 2D sensitivity tests. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 52(6), 1433-1457, 2013.

## 7. Anexo 1: Índices estadísticos

Se ha cuantificado la exactitud de las ecuaciones (2) a (4) para estimar la altura de la base de la nube entre los períodos indicados en la tabla 3.2. El proceso de validación fue realizado comparando los valores observados en el radiosonda de Santo Domingo y los estimados a través de los índices estadísticos que se describen a continuación (Devore, 2008):

- El coeficiente de correlación lineal ( $r$ ), indica la medida de asociación lineal que existe entre las variables  $x$  e  $y$ , está dada por:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum (x_i - \bar{x})^2)(\sum (y_i - \bar{y})^2)}}$$

El coeficiente de correlación puede tomar valores dentro del rango  $[-1,1]$ . El valor  $-1$  representa una perfecta "correlación negativa", mientras que un valor de  $1$  representa una perfecta "correlación positiva". Un valor igual a  $0$  representa que no existe relación entre las variables.

- El Sesgo (BIAS), indica la tendencia a sobrestimar o subestimar la estimación de la variable meteorológica simulada.

$$BIAS(x) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_i - x_{iobs})$$

Donde  $x_i$  es el valor estimado,  $x_{iobs}$  es el valor observado en el radiosonda de Santo Domingo y  $N$  es el número de los datos observados.

- Error Cuadrático Medio (RMSE), es la raíz cuadrada de las diferencias individuales entre los valores estimados y los observados. Mide la exactitud de la estimación, esto es, la dispersión de los datos respecto al valor real.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_i - x_{iobs})^2}$$

Y la Diferencia Relativa (DR) expresada en porcentaje (%) se define como:

$$DR = \frac{RMSE}{\overline{x_{obs}}} * 100$$

Donde  $\overline{x_{obs}}$  es el promedio de los valores observados.