

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XX CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

EFFECTIVIDAD DE LOS PROGRAMAS DE ESTIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL

**HUGO GLORIA V.¹
JACKELINE GONZÁLEZ B.²**

RESUMEN

La falta de agua afecta a diversos sectores de nuestro planeta, él que está sufriendo grandes transformaciones en su clima producto del calentamiento global. Para resolver el problema del déficit hídrico se han desarrollado e implementado varias técnicas, una de estas es la estimulación de precipitaciones, capaz de influir en los procesos físicos de la formación y crecimiento de las gotas y cristales de hielo de las nubes. En este trabajo se evalúa la efectividad de dos programas de estimulación de precipitaciones llevados a cabo en la cuenca del río Cachapoal, entre los años 2000 - 2003 y 2008 – 2011, mediante dos metodologías denominadas: análisis del comportamiento histórico y de correlación – regresión. Los resultados obtenidos del análisis del comportamiento histórico no son estadísticamente confiables por lo que se descarta el uso de esta metodología para este caso. La efectividad de estos programas no se puede afirmar con los resultados obtenidos del análisis de correlación – regresión, se requieren de más datos y análisis. Sin embargo, hay evidencia de un aumento del 16,9% en el caudal del río Cachapoal durante el segundo programa de estimulación, el cual favorece la caída de precipitación sólida, lo que alienta a seguir con este programa, ya que el caudal del río Cachapoal es la principal fuente de abastecimiento de agua en la cuenca.

¹Ingeniero Civil (e), Pontificia Universidad Católica de Valparaíso - mail: zero_hgv@hotmail.com

²Profesora Auxiliar, Carrera de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso - mail: jackelline.gonzalez@ucv.cl

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha presentado una progresiva escasez de recursos hídricos a nivel mundial, ocasionada por el crecimiento de la población, que exige un mayor consumo, y por posibles cambios en los ecosistemas, producto de la intervención del hombre en el medioambiente, que han ocasionado un desorden del clima en el mundo (Kunkel et al., 1999).

Mientras algunas zonas del planeta están siendo afectadas por mayor cantidad de lluvias, sufriendo inundaciones y temporales, existen otras donde las sequías están siendo cada vez más intensas y frecuentes. La única variable meteorológica que está variando en forma uniforme en todo el planeta es la temperatura, la cual aumenta en forma sostenida cada año. Este cambio en la temperatura está produciendo serios trastornos en los regímenes de lluvias, sufriendo alteraciones apreciables tanto en cantidad como en distribución de éstas (IPCC, 2001).

En la actualidad es posible afirmar que no es necesario aceptar con resignación que aquellas zonas donde había abundante agua y que por el cambio climático están comenzando a sufrir sequías o bien aquellas que siempre han padecido un clima seco deban continuar con esta situación. La ciencia y la experimentación han permitido aumentar la cantidad de precipitación que cae en una zona estimulando las precipitaciones mediante la siembra de nubes con yoduro de plata (Hidromet, 2008), la cual influye en los procesos físicos de la formación y crecimiento de las gotas y cristales de hielo de las nubes.

A nivel mundial se han llevado a cabo una gran cantidad de programas de estimulación de precipitaciones, especialmente en regiones áridas y semiáridas, destacando 150 programas operativos en 37 países (Hidromet, 2011a). Por ejemplo, en Chile, Brasil, Centro América, Australia, India, y algunas localidades de África se desarrollan programas de incremento de la lluvia; en Argentina y Canadá se desarrollan programas de lucha contra el granizo; y en Estados Unidos y gran parte de Asia y Europa se desarrollan ambos tipos de programa.

En Chile, específicamente en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins se han realizado dos programas de estimulación de precipitaciones a través de la siembra con generadores terrestres en la cuenca del río Cachapoal, entre los años 2000 - 2003 y 2008 - 2011, llevadas a cabo por la empresa Asesorías y Servicios Hídricos y Meteorológicos Hidromet S.A., y solicitadas principalmente por la Junta de Vigilancia del río Cachapoal Primera Sección y sus Afluentes y Codelco Chile División El Teniente. La efectividad de estos programas se evalúa en el presente trabajo.

A continuación se presentan conceptos básicos de la estimulación de precipitaciones, las metodologías más empleadas para evaluar la efectividad de estos programas, y la aplicación de éstas a los programas desarrollados en la cuenca del río Cachapoal.

2. ESTIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES

Los avances en el conocimiento de los procesos físicos de la formación de la lluvia y en la tecnología han permitido modificar la tradicional idea que las variables atmosféricas son inmanejables y solamente deben soportarse de la mejor forma posible. Han surgido tecnologías

que han puesto en la mano del hombre la posibilidad de aumentar el recurso hídrico, interviniendo el ciclo hidrológico en la fase de la precipitación (Hidromet, 2008).

Las nubes están formadas por gotas microscópicas de agua y cristales de hielo, las que por su escaso peso no pueden vencer la atracción que existe entre ellas y caer a tierra. Para la formación de sólo una gota de lluvia, hace falta que miles de estas gotas microscópicas se unan para adquirir el peso suficiente y caer a tierra por gravedad. Las gotas microscópicas no logran unirse unas con otras por sí solas, es necesaria la presencia de una partícula sólida, alrededor de la cual las gotitas comienzan a adherirse formando una gota de lluvia. Estas partículas, conocidas como núcleos de condensación, están presentes naturalmente en la atmósfera, en forma de sales, polvo, humo, etc.

La estimulación de precipitaciones interviene en este punto del ciclo del agua, aumentando artificialmente la cantidad de núcleos de condensación al interior de la nubosidad. Con ello se logra aumentar la cantidad de gotas de lluvia y, por consiguiente, incrementar la cantidad de precipitación que llega a tierra (Hidromet, 2008).

El núcleo de condensación o nucleante más utilizado es el Yoduro de Plata (Agl), el cual debe ser introducido en la nube a la altura de la isoterma -5°C o más fría para obtener la mayor efectividad (Hidromet, 2011b). Además de servir para multiplicar el proceso de coalescencia, cumple con otra importante función como es la de congelar las partículas de agua sobreenfriadas, es decir, partículas que se mantienen en estado líquido a pesar de estar a temperaturas bajo los 0°C . Este cambio de estado (líquido a sólido), libera cierta cantidad de calor latente a la atmósfera, produciendo un calentamiento en la nube del orden de 1 a 2°C y aumentando su inestabilidad, haciendo que las corrientes ascendentes de aire dentro de ellas las haga crecer, principalmente en la vertical. Ello conduce a una intensificación general de la actividad tormentosa en la nubosidad, y a un aumento de la precipitación que cae de ella.

Cada gramo de Agl aporta 10^{13} núcleos de condensación. Con la introducción en la nubosidad de esta enorme cantidad de núcleos extras, se obtiene un incremento promedio de precipitación del orden de 10 a 15%, dependiendo de muchos factores, como lo son la oportunidad de la siembra, el grado de actividad de los sistemas nubosos, la intensidad de las corrientes ascendentes, la cantidad de agua sobreenfriada presente en la nubosidad, entre otros (Hidromet, 2011b).

Existen diversos métodos para introducir el nucleante en la nubosidad, siendo los más conocidos y usados el sistema de generadores terrestres y la siembra aérea. La siembra aérea, emplea aeronaves para introducir el nucleante, asegura en un 100% la introducción del nucleante en la nubosidad, sin embargo tiene un alto costo, riesgo en la operación y la superficie que puede abarcar es restringida. Los generadores terrestres, utilizan las corrientes ascendentes de aire para la introducción del nucleante, permiten estimular la totalidad de la banda o sistema frontal asociado al área de baja presión aun cuando parte del nucleante puede perderse en el trayecto. Si bien estos generadores requieren de un costo inicial de implementación de la red, cuando ésta se instala en forma definitiva el costo de operación es varios órdenes más bajo que el sistema aéreo (Sepúlveda y Ormazábal, 2001).

Independiente del modo a utilizar, el éxito de esta técnica radica en su continuidad y permanencia en el tiempo (Hidromet, 2011b). Si se considera que la estimulación de lluvias consiste en generar un porcentaje extra de precipitación a la que caerá en forma natural, lógicamente esta

cantidad extra de agua será proporcional al agua que naturalmente caería. De acuerdo a esto, en un año seco la cantidad proporcional que será posible obtener mediante la siembra de nubes también será escasa. Al contrario, en un año con precipitación normal o abundante el porcentaje extra a obtener será también considerable.

3. METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA ESTIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES

Las metodologías más utilizadas para evaluar el efecto de la estimulación de precipitaciones se basan en métodos estadísticos o evidencia física. Los métodos estadísticos permiten detectar un cambio en una variable de respuesta (e.g. precipitación o caudal), mientras que la evidencia física permite establecer una relación de causa y efecto entre la intervención de la siembra y los cambios en la variable de respuesta (Bruintjes, 1999). A continuación hablaremos de los métodos estadísticos, ya que son los más empleados.

Un método eficaz en la determinación de la efectividad de estos programas es el denominado “aleatorio”, el cual está directamente relacionado con la política de operación, ya que se debe determinar anticipadamente que unidades de tormenta se siembran y cuáles no, de tal forma que se tenga la misma proporción entre lo que se siembra y lo que no. Con los datos registrados se compara la precipitación media sembrada con la precipitación media no sembrada. Esta metodología requiere de un tamaño de muestra grande y existen varias pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas que permiten determinar cuan significativas son las diferencias obtenidas (e.g. Gabriel, 1999). Sin embargo, muchos de los proyectos no emplean este sistema ya que desean obtener la mayor cantidad de agua, por lo que estimulan la mayor cantidad de tormentas. En estos casos, las metodologías que se emplean son menos rigurosas pero ofrecen una indicación de los efectos a largo plazo de los programas de estimulación de precipitaciones (Griffith y Yorty, 2009). Gabriel y Petrondas (1983) discuten algunos de los problemas asociados a estas metodologías.

A continuación se presentan dos de las metodologías más empleadas, las cuales utilizan series de datos de caudal o precipitación de la zona afectada por la estimulación de precipitaciones y de zonas no afectadas, denominadas área objetivo y de control respectivamente. El área de control debe poseer condiciones climáticas y geográficas similares a las del área objetivo.

3.1. Análisis gráfico del comportamiento histórico

La presente metodología analiza el comportamiento histórico de la variable meteorológica (caudal o precipitación) del área objetivo en relación al comportamiento histórico de la respectiva variable observada en el área de control, para luego extrapolarlo al periodo de estimulación (Hidromet, 2004). El procedimiento para realizar este análisis es el que se describe a continuación:

- 1) Se calculan los valores anuales de la variable meteorológica del área objetivo y de control. Para el caso del caudal se calculan los caudales promedio anual y para la precipitación las precipitaciones anuales.

- 2) Se grafican los valores anuales calculados en el período común, hasta antes de la aplicación del programa de estimulación, de manera de determinar y analizar la línea de tendencia de la variable meteorológica durante el período histórico.
- 3) Se calcula la razón entre los valores anuales del área objetivo y de control, de manera de determinar el comportamiento de la variable del área objetivo respecto a la del área de control.
- 4) Se determina la línea de tendencia entre las razones de los valores anuales del área objetivo y de control en el período histórico.
- 5) Se estiman las razones de los valores anuales del área objetivo durante los años estimulados mediante la proyección de la línea de tendencia obtenida previamente.
- 6) Se compara el valor estimado con el real, calculando el porcentaje de variación del valor anual del área objetivo en relación al del área de control.
- 7) Se calcula el promedio de los porcentajes de variación del valor anual del área objetivo en relación al del área de control.

En esta metodología se considera que hay efecto en la variable meteorológica en estudio producto del programa de estimulación de precipitaciones si el promedio de los porcentajes de variación del valor anual del área objetivo en relación al del área de control es mayor a 0, y en cuyo caso se considera este valor como el porcentaje de aumento en la variable meteorológica en estudio producto del programa de estimulación de precipitaciones.

3.2. Análisis de correlación - regresión

El análisis de correlación – regresión estima como se habría comportado la variable meteorológica (caudal o precipitación) del área objetivo en relación a lo observado en el área de control durante el periodo de estimulación, mediante una ecuación de regresión. La serie que se emplee del área de control debe ser la que presente la mayor correlación con la del área objetivo (Dennis, 1980). El procedimiento para realizar este análisis se describe a continuación:

- 1) Se determina la ecuación de regresión que relaciona la variable meteorológica del área objetivo con la del área de control hasta antes de la aplicación del programa de estimulación.
- 2) Se estiman los valores de la variable meteorológica del área objetivo durante el programa de estimulación mediante la ecuación de regresión determinada previamente.
- 3) Se comparan los valores estimados con los valores reales, calculando un porcentaje de variación mes a mes.
- 4) Se calcula el promedio de los porcentajes de variación calculados.

En esta metodología se considera que hay efecto en la variable meteorológica en estudio producto del programa de estimulación de precipitaciones si el promedio de los porcentajes de variación es mayor a 0, y en cuyo caso se considera este valor como el porcentaje de aumento en la variable meteorológica en estudio producto del programa de estimulación de precipitaciones.

4. PROGRAMAS DE ESTIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL

La cuenca hidrográfica del río Cachapoal forma parte de la Región del General Libertador Bernardo O'Higgins, se sitúa entre los paralelos 33°53' y 35°01' de latitud sur, drena una

superficie total de 6.370 km², y se caracteriza por un clima templado cálido con estación seca prolongada. El río Cachapoal de régimen nivo-pluvial y de 200 km de longitud, tiene su nacimiento en la cordillera de los Andes y desemboca en el río Rapel. Sus aguas y la de sus afluentes son utilizadas para actividades de riego, minería, hidroelectricidad e industrial, por lo que un déficit del recurso hídrico afecta considerablemente el correcto funcionamiento de las diferentes actividades productivas que se desarrollan en la zona.

En esta cuenca se han realizado dos programas de estimulación de precipitaciones, entre los años 2000 - 2003 y 2008 - 2011, los cuales han tenido por objetivo mantener o aumentar en algún porcentaje el caudal del río Cachapoal, de tal forma de reducir el riesgo de déficit hídrico en la zona. Ambos programas fueron ejecutados por la empresa Asesorías y Servicios Hídricos y Meteorológicos Hidromet S.A., contratada para el programa 2000 - 2003 por la Junta de Vigilancia del río Cachapoal Primera Sección y sus Afluentes, Codelco Chile División El Teniente, el Ministerio de Agricultura (Gobierno de Chile), la Empresa de Servicios Sanitarios El Libertador (ESSEL) y la empresa de agroinsumos COAGRA S.A., y para el programa 2008 - 2011 por la Junta de Vigilancia del río Cachapoal Primera Sección y sus Afluentes, Codelco Chile División El Teniente y la empresa hidroeléctrica Pacific Hydro S.A.

En el primer programa de estimulación (2000 - 2003) se privilegió la caída de precipitación líquida, a diferencia del segundo (2008 - 2011) que privilegió la caída de precipitación sólida. En el programa 2008 - 2011 el período de estimulación se inició el 15 de abril y concluyó el 15 de septiembre de cada año, a diferencia del programa 2000 - 2003 cuyo período de cada temporada se inició el 1 de marzo y concluyó el 30 de octubre. Además en el programa 2008 - 2011 se puso como norma de operación que la isoterma 0°C estuviera a una altura no superior a los 2500 m.s.n.m., en caso contrario no se realizaría la operación de estimulación.

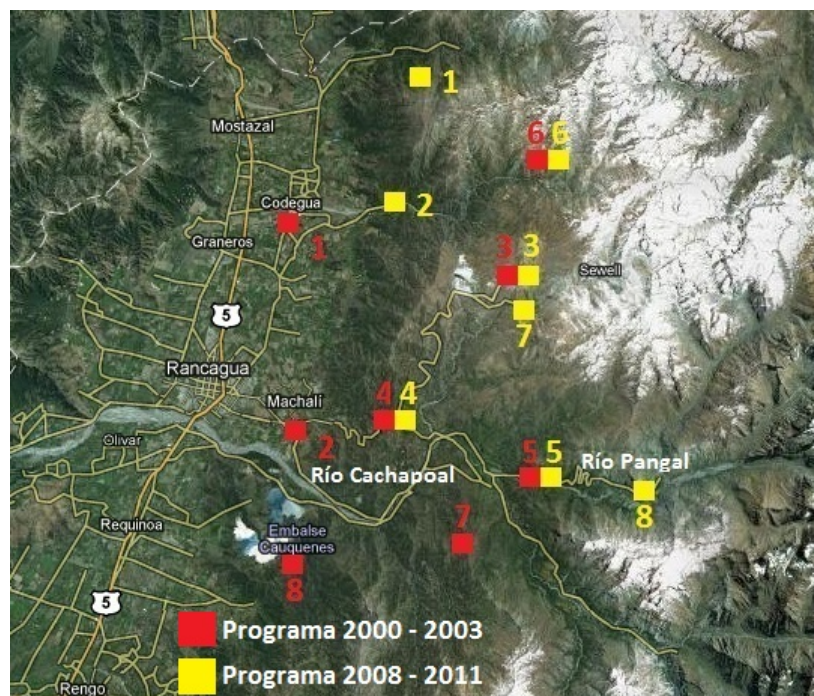


Figura 1: Ubicación de los generadores terrestres en la cuenca del río Cachapoal (adaptada de Google Earth)

En ambos programas se utilizaron 8 generadores terrestres de yoduro de plata, cada uno de ellos con efecto sobre un área de 150 km² (Hidromet, 2011a). Dichos generadores se ubicaron en la ladera de los cerros al este de la ciudad de Rancagua y dentro de la cuenca misma, entre la ciudad y el nacimiento del río Cachapoal. En el período 2008 - 2011, por el hecho de privilegiar la caída de precipitación sólida (nieve), se reinstalaron 4 equipos a cotas más altas respecto del programa 2000 - 2003 (ver Figura 1).

5. EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LOS PROGRAMAS DE ESTIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL

Las series de precipitación mensual y caudales medios mensuales seleccionadas para este estudio se indican en la Tabla 1. Las estaciones del área objetivo son las únicas que registran los efectos de los programas de estimulación de precipitaciones. Las estaciones del área de control son las más próximas al área objetivo, ubicándose en la misma cuenca o en cuencas adyacentes con condiciones climáticas y orográficas similares a las de la zona de estudio.

Cabe destacar que los datos de caudales medios mensuales registrados en las estaciones río Cachapoal en Puente Termas y río Pangal en Pangal, ubicadas en el área objetivo, son prácticamente naturales (las mayores extracciones se presentan aguas abajo), lo que permite atribuir cualquier alteración en el caudal durante la estimulación de precipitaciones a estos programas. Las estaciones fluviométricas empleadas en este estudio obedecen a régimen nival, salvo la estación río Tinguiririca en Bajo Briones que obedece a régimen nivo-pluvial.

Tabla 1: Estaciones pluviométricas y fluviométricas ubicadas en el área objetivo y de control

Área	Tipo	Nombre	Latitud S	Longitud W	Altitud m.s.n.m.
Objetivo	Pluviométrica	Sewell	34°05'	70°22'	2155
	Fluviométrica	Río Cachapoal en Puente Termas	34°15'	70°34'	700
		Río Pangal en Pangal	34°14'	70°19'	1500
Control	Pluviométrica	Graneros Exp. SNA	34°04'	70°44'	475
		Rengo Sendos	34°24'	70°52'	319
		San Fernando Sendos	34°35'	71°00'	350
		Tobalaba Aeródromo	33°27'	70°32'	638
		Pirque	33°40'	70°37'	640
		San José de Maipo Subcomisaría	33°38'	70°21'	940
	Fluviométrica	Río Tinguiririca en Bajo Briones	34°43'	70°49'	560
		Río Maipo en las Hualtatas	33°58'	70°08'	1820
		Río Maipo en San Alfonso	33°44'	70°18'	1092
		Río Maipo en el Manzano	33°35'	70°22'	850

Inicialmente se evalúa la correlación existente entre las series del área objetivo y de control, para determinar cuáles son los pares que presentan mejor correlación. Dichos pares son los que se emplearán en la evaluación de la efectividad de los programas de estimulación. Las mejores correlaciones se presentan entre:

- Sewell y San José de Maipo Subcomisaría, con un coeficiente de correlación de Pearson (r) de 0,847.
- Río Cachapoal en Puente Termas y río Maipo en El Manzano, con $r = 0,923$.
- Río Pangal en Pangal y río Tinguiririca en Bajo Briones, con $r = 0,927$.

5.1. Análisis gráfico del comportamiento histórico

La evaluación del comportamiento histórico de las precipitaciones en la cuenca del río Cachapoal se realiza respecto a las precipitaciones en San José del Maipo Subcomisaría, en el periodo común 1980 – 2003. En la Figura 2 se presentan las precipitaciones anuales del área objetivo y de control hasta antes de la aplicación del programa de estimulación de precipitación líquida. A pesar que la fluctuación temporal de las precipitaciones es similar no se mantiene una proporcionalidad entre las series, lo que se ve reflejado en la correlación existente en las series. Sin embargo las tendencias a largo plazo son similares, disminución en los valores de la precipitación, siendo levemente mayor en la estación Sewell.

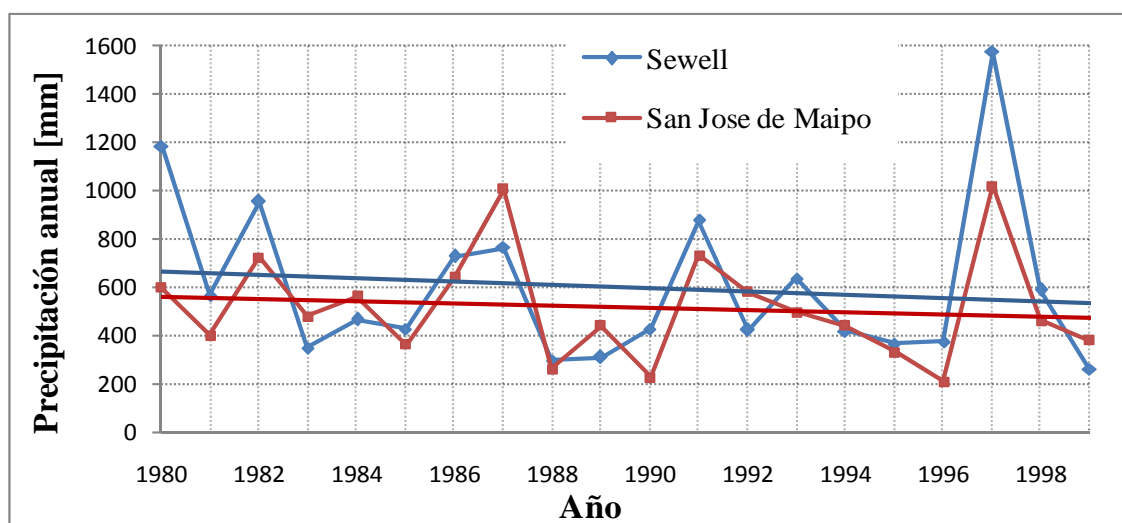


Figura 2: Precipitación anual en las estaciones Sewell y San José de Maipo

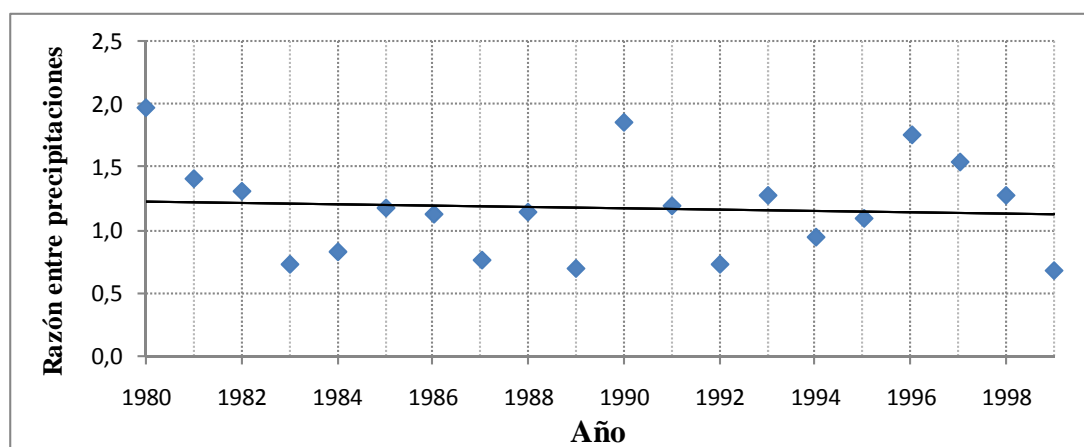


Figura 3: Tendencia de la razón entre las precipitaciones registradas en la estación Sewell y San José de Maipo

Las razones entre las precipitaciones anuales del área objetivo y de control se presentan en la Figura 3. Allí se puede apreciar que las precipitaciones en Sewell decrecen levemente en el tiempo en relación a las precipitaciones en San José de Maipo, lo cual es consistente con lo descrito anteriormente. Sin embargo la recta ajustada a estos datos tiene un coeficiente de determinación R^2 igual a 0,006, lo cual nos indica que las estimaciones hechas con esta ecuación, presentadas en la Tabla 2, no son confiables.

Según este análisis del comportamiento histórico de las series de precipitación, en promedio, se produjo un aumento en las precipitaciones del 11 %, con un coeficiente de variación de 1,8. Sin embargo, este resultado no es confiable debido a la baja bondad del ajuste de la ecuación empleada para estas estimaciones, como se mencionó previamente.

Tabla 2: Variación de la precipitación (P) registrada en la estación Sewell en relación a la registrada en San José de Maipo

Año	P Sewell / P San José de Maipo		Variación P Sewell	
	Real	Estimada	Anual (%)	Promedio
2000	1,27	1,13	13,1	11,0 %
2001	1,37	1,12	22,6	
2002	0,92	1,12	-18,0	
2003	1,40	1,11	26,4	

La evaluación del comportamiento histórico del caudal del río Cachapoal se realiza respecto al caudal del río Maipo en El Manzano, en el período común 1970 – 2009, y del río Pangal respecto al caudal del río Tinguiririca, en el período común 1985 – 2008. En la Figura 4 se presentan las series y las líneas de tendencia de los caudales promedio anual de las estaciones en estudio hasta antes de la aplicación de los programas de estimulación. La fluctuación temporal de los caudales es similar en las cuatro estaciones, y los caudales de los ríos Maipo, Cachapoal y Pangal

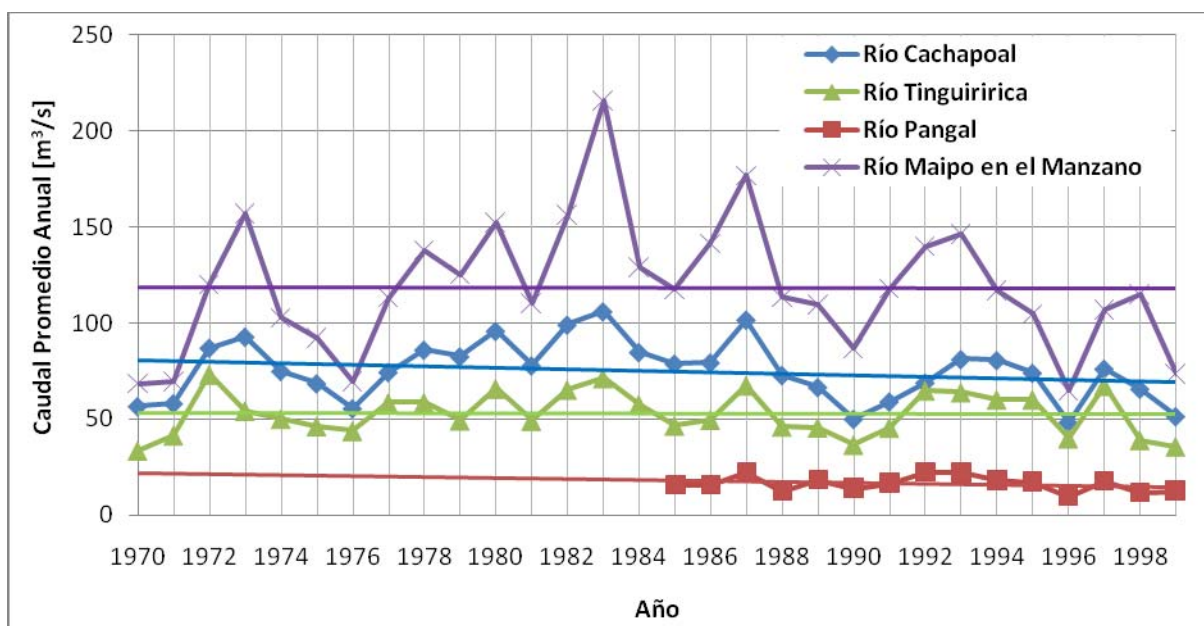


Figura 4: Caudal promedio anual de los ríos Cachapoal, Pangal, Maipo y Tinguiririca

presentan una tendencia a la baja durante los últimos años, lo que justifica la aplicación de los programas de estimulación, al contrario de los caudales del río Tinguiririca cuya tendencia es más estable en el tiempo.

En la Figura 5 se presentan las razones entre los caudales promedio anual de los ríos Cachapoal y Maipo y Pangal y Tinguiririca con sus respectivas líneas de tendencia. En ambos casos se observa una tendencia a la baja de los caudales en el área objetivo, consistente con lo observado en la Figura 4. El coeficiente de determinación de las rectas ajustadas a las razones entre los caudales del río Cachapoal y Maipo es de 0,162 y entre los caudales del río Pangal y Tinguiririca es de 0,115. De acuerdo con estos datos, las estimaciones hechas con estas ecuaciones, presentadas en la Tabla 3, no son confiables.

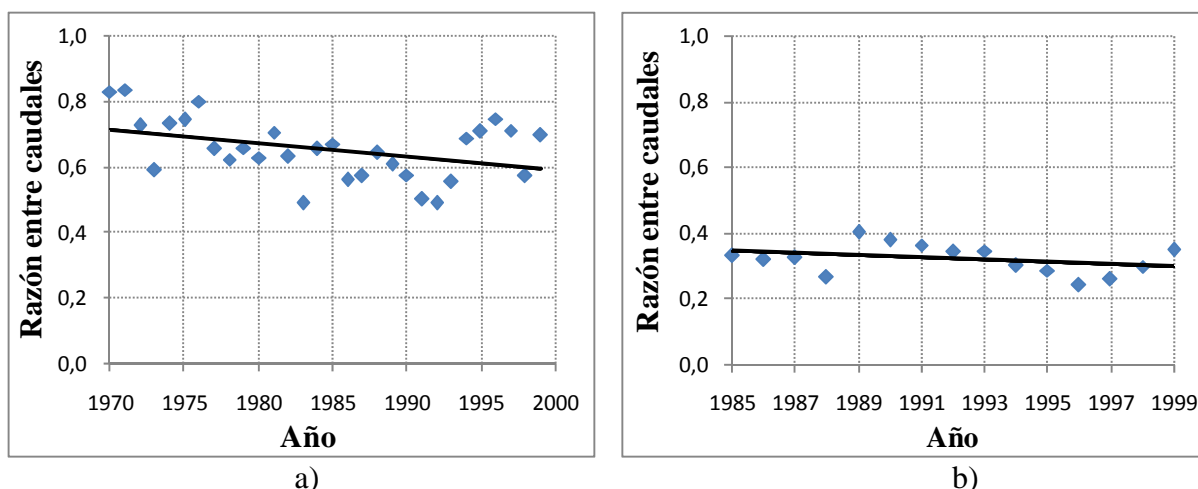


Figura 5: Tendencia de la razón entre los caudales promedio anual de los ríos:
a) Cachapoal y Maipo, y b) Pangal y Tinguiririca

Tabla 3: Variación del caudal (Q) del río Cachapoal en relación al caudal del río Maipo y del río Pangal en relación al caudal del río Tinguiririca

Año	Q Cachapoal / Q Maipo		Variación Q Cachapoal		Q Pangal / Q Tinguiririca		Variación Q Pangal	
	Real	Estimada	Anual (%)	Promedio	Real	Estimada	Anual (%)	Promedio
2000	0,64	0,60	7,4	5,5 %	0,36	0,30	18,3	1,5 %
2001	0,62	0,59	4,0		0,30	0,30	1,4	
2002	0,65	0,59	10,7		0,27	0,30	-9,7	
2003	0,58	0,58	-0,1		0,28	0,29	-4,3	
2008	0,75	0,56	32,9	32,5 %	0,31	0,28	11,5	11,5 %
2009	0,74	0,56	32,1					

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 3, se evidencia un aumento del caudal de los ríos ubicados en el área objetivo, siendo mayor durante el segundo período de estimulación, período en que se estimuló la precipitación sólida. Sin embargo, al igual que lo ocurrido en el análisis de la precipitación, estos resultados no son confiables debido a la baja bondad del ajuste de las ecuaciones empleadas para estas estimaciones.

5.2. Análisis de correlación - regresión

Las ecuaciones de regresión que relacionan las variables meteorológicas del área objetivo y de control que presentan mayores correlaciones, definidas al inicio de este capítulo, son:

$$P_i \text{ Sewell} = 0,9236 * P_i \text{ San José de Maipo} + 9,4994 \quad (1)$$

$$Q_i \text{ Cachapoal} = 0,5907 * Q_i \text{ Maipo en el Manzano} + 6,774 \quad (2)$$

$$Q_i \text{ Pangal} = 0,3922 * Q_i \text{ Tinguiririca} - 3,682 \quad (3)$$

donde $P_i X$ = precipitación en el mes i en la estación X (mm)

$Q_i X$ = caudal medio del mes i en la estación X (m³/s)

En las Tablas 4 y 5 se presentan las estimaciones de las variables meteorológicas del área objetivo durante los períodos de estimulación de precipitaciones, obtenidas a partir de las ecuaciones 1 a 3, y los respectivos porcentajes de variación. En el periodo 2000 – 2003 sólo se evalúan los meses en que se estimuló la precipitación líquida, es decir de mayo a septiembre. En el periodo 2008 - 2011 se evalúan los meses de deshielo, es decir de octubre a marzo, debido a que se estimuló la precipitación sólida.

Tabla 4: Variación de la precipitación en la estación Sewell durante programa de estimulación

Año	Mes	Precipitación (mm)		% Variación	Variación Promedio
		Real	Estimada		
2000	Mayo	40,3	33,5	20,3	11,7 %
	Junio	248,8	195,5	27,2	
	Julio	25,8	52,4	-50,8	
	Agosto	7,2	13,2	-45,4	
	Septiembre	76,6	123,1	-37,8	
2001	Mayo	121,2	64,0	89,4	
	Junio	42,1	18,7	124,7	
	Julio	266,5	269,0	-0,9	
	Agosto	182,3	110,2	65,5	
	Septiembre	35,6	32,6	9,2	
2002	Mayo	209,7	207,1	1,2	
	Junio	64,6	266,7	-75,8	
	Julio	68,4	124,0	-44,9	
	Agosto	292,6	173,9	68,3	
	Septiembre	52,6	54,8	-3,9	
2003	Mayo	88,1	64,5	36,7	
	Junio	131,2	87,1	50,7	
	Julio	55,5	108,3	-48,8	
	Agosto	13,9	12,7	9,2	
	Septiembre	64,5	46,0	40,3	

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 4, en promedio hubo un aumento del 11,7% en las precipitaciones en la zona de estudio durante el primer programa de estimulación atribuible a dicho programa, valor que se encuentra dentro del rango promedio aceptado

mundialmente para estos programas. Sin embargo al revisar los valores de variación mes a mes se observa una gran dispersión en los valores, el coeficiente de variación del valor promedio es de 4,5, donde el 40% del periodo analizado no refleja un aumento en las precipitaciones y el 45% del periodo analizado presenta un aumento mayor al 20%. Dicha variabilidad puede atribuirse a que la correlación entre las estaciones pluviométricas empleadas no es tan alta. Otro aspecto a considerar es la ubicación de la estación Sewell, la cual no representa el total de la zona estimulada, y el efecto del programa registrado en esta zona pudo verse afectado por diferentes condiciones climáticas y de operación.

Tabla 5: Variación de los caudales promedio del río Cachapoal y Pangal durante los programas de estimulación

Año	Mes	Caudal del río Cachapoal				Caudal del río Pangal			
		Real (m ³ /s)	Estimado (m ³ /s)	% variación	Variación promedio	Real (m ³ /s)	Estimado (m ³ /s)	% variación	Variación promedio
2000	Mayo	22,6	37,6	-39,9	5,9 %	3,0	0,9	239,7	-11,9 %
	Junio	54,1	55,1	-1,8		8,6	18,1	-52,5	
	Julio	66,3	52,2	27,0		8,8	8,5	3,8	
	Agosto	49,2	47,6	3,4		8,3	9,5	-13,1	
	Septiembre	60,1	50,1	19,9		10,1	18,0	-44,1	
2001	Mayo	41,9	50,1	-16,3		6,3	6,5	-4,0	
	Junio	46,6	43,1	8,1		6,2	12,6	-50,7	
	Julio	59,4	54,4	9,2		8,1	25,3	-67,8	
	Agosto	75,7	59,6	27,1		11,6	23,3	-50,2	
	Septiembre	72,3	56,1	29,0		13,2	13,9	-5,4	
2002	Mayo	44,0	43,9	0,2		7,6	10,6	-28,1	
	Junio	56,5	55,0	2,7		8,6	16,3	-47,4	
	Julio	50,8	45,7	11,3		8,5	13,5	-36,5	
	Agosto	120,6	68,0	77,3		16,8	41,7	-59,7	
	Septiembre	80,1	70,9	13,0		12,3	25,3	-51,2	
2003	Mayo	35,9	49,7	-27,8		5,8	5,5	4,3	
	Junio	49,5	50,2	-1,3		8,4	19,8	-57,8	
	Julio	45,3	48,9	-7,4		7,0	9,4	-25,1	
	Agosto	36,8	41,4	-11,2		6,0	2,9	103,2	
	Septiembre	46,3	47,9	-3,3		8,0	7,7	3,8	
2008	Octubre	98,6	75,6	30,4	17,6	21,1	-16,7	-3,2 %	
	Noviembre	180,6	154,7	16,8	37,8	41,8	-9,5		
	Diciembre	200,5	175,1	14,5	36,1	44,9	-19,6		
2009	Enero	161,8	123,6	30,9	21,6	35,0	-38,2		
	Febrero	120,0	92,5	29,8	16,6	14,3	15,5		
	Marzo	81,45	70,5	15,5	10,8	11,5	-5,9		
	Octubre	65,7	56,3	16,7	10,9	12,8	-14,9		
	Noviembre	89,4	78,8	13,5	20,1	14,3	40,8		
	Diciembre	156,3	125,4	24,6	33,0	27,5	20,0		
2010	Enero	154,3	122,9	25,5	16,9 %				
	Febrero	93,3	94,9	-1,7					
	Marzo	66,03	76,5	-13,7					

El comportamiento de las variaciones de caudal, presentadas en la Tabla 5, no es consistente entre estaciones, ya que el efecto de la estimulación de las precipitaciones no se ve reflejado en la estación del río Pangal y en la del río Cachapoal sí. Esta inconsistencia puede atribuirse a que la estación del río Pangal puede no registra por completo el efecto de la estimulación debido a que su área tributaria es pequeña en relación al radio de acción de los generadores terrestres de yoduro de plata, el cual puede variar por diferentes condiciones climáticas y de operación, adicionalmente para este análisis sólo se empleo un periodo de 15 años como base, siendo recomendable emplear periodos más largos (Dennis, 1980).

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 5, en promedio hubo un aumento del 5,9% en el caudal del río Cachapoal durante el primer programa de estimulación, mientras que el aumento durante las épocas de deshielo asociadas al segundo programa de estimulación fue del 16,9%, dichos incrementos son atribuibles a los programas de estimulación desarrollados.

Durante el primer periodo de estimulación el comportamiento de la variación de los caudales del río Cachapoal es similar al descrito para el caso de las precipitaciones, gran dispersión en los valores, con un coeficiente de variación del valor promedio de 4,1. Se requiere de un conocimiento más detallado de los eventos o número de veces que se operaron los generadores durante este periodo para realizar un análisis más detallado. Caso contrario ocurre durante el segundo periodo de estimulación, donde el agua es almacenada naturalmente en forma de hielo, ya que los valores obtenidos en la estación del río Cachapoal en su mayoría son positivos y poseen poca dispersión, el coeficiente de variación del valor promedio es de 0,79, el 83% del periodo de estudio analizado presenta un aumento en los caudales entre un 15 y 30 %.

6. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

El uso de la metodología denominada análisis gráfico del comportamiento histórico debe ser descartado para este caso en particular, ya que las ecuaciones obtenidas para estimar el efecto de los programas, a partir de los registros históricos, tienen un coeficiente de determinación R^2 menor a 0,2.

Los resultados obtenidos para el primer programa de estimulación de precipitaciones (período 2000 - 2003), el cual privilegió la caída de precipitación líquida, con la segunda metodología de análisis, denominada de correlación-regresión, evidencian un aumento del 11,7% en las precipitaciones en la estación Sewell y del 5,9% en el caudal del río Cachapoal, sin embargo los coeficientes de variación de estos datos son superiores a 4,0, por lo cual no es posible pronunciarse sobre la efectividad de este programa. Se requieren de más datos, asociados principalmente a las tormentas que se estimulan y que no se estimulan, para realizar un análisis más detallado que permita llegar a una conclusión fehaciente sobre la efectividad de estos programas que favorecen la caída de precipitación líquida.

Para futuros análisis, se recomienda incluir estaciones pluviométricas, correspondientes al área de control, ubicadas a una altura similar a la de Sewell, ya que esto podría mejorar el grado de correlación existente entre éstas, lo que influiría directamente en el grado de confiabilidad de la estimación de la efectividad de los programas de estimulación de precipitaciones.

Los resultados obtenidos para el río Pangal, con la segunda metodología de análisis, denominada de correlación-regresión, no evidencian la efectividad de los programas de estimulación, caso contrario a lo obtenido para el río Cachapoal, lo que hace suponer que esto ha ocurrido por alguna condición climática o de operación de los generadores, por lo tanto se requiere de un estudio de lo que ocurre dentro del área tributaria de la estación del río Pangal, la cual es una pequeña porción del área de acción de los generadores terrestres de yoduro de plata, para fundamentar estos resultados.

El caudal del río Cachapoal presenta un aumento promedio del 16,9 % durante el segundo programa de estimulación de precipitaciones (período 2008 - 2011), el cual privilegió la caída de precipitación sólida, valor que se encuentra dentro del rango promedio establecido mundialmente. A pesar de que este resultado es alentador no se puede confirmar la efectividad de este programa, ya que sólo se han analizado dos temporadas, y lo recomendado para tal fin es emplear 4 o más temporadas (Dennis, 1980).

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio no es posible afirmar la efectividad de los programas de estimulación de precipitaciones desarrollados en la cuenca del río Cachapoal, se requieren de más datos y análisis. Sin embargo, hay evidencia de un aumento en los caudales del río Cachapoal durante el segundo programa de estimulación, en el cual se favorece el almacenamiento del agua en las altas cumbres y glaciares, lo cual alienta a seguir con este programa, ya que el caudal del río Cachapoal es la principal fuente de abastecimiento de agua en la cuenca.

En general, se recomienda seguir monitoreando las variables meteorológicas de tal forma de aumentar los registros empleados para los diferentes análisis; llevar un registro de las características de los eventos de mal tiempo estimulados y no estimulados e incluirlo en los análisis; así como incorporar otras metodologías más modernas para la evaluación de la efectividad de los programas de estimulación de precipitación, como las empleadas por Silverman (2010).

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Junta de Vigilancia del río Cachapoal Primera Sección y sus Afluentes, Hidromet, Dirección General de Aguas y Dirección Meteorológica de Chile por proveer la información necesaria para el correcto desarrollo de este estudio.

REFERENCIAS

Bruintjes, R. 1999. A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects. Bulletin of the American Meteorological Society 80(5): 805-820.

Dennis, A. 1980. Weather Modification by Cloud Seeding. Academic Press, New York, 267 pp.

Gabriel, K. 1999. Ratio statistics for randomized experiments in precipitation stimulation. Journal of Applied Meteorology. 38, 290-301.

Gabriel, K. y Petrondas, D. 1983. On using historical comparisons in evaluating cloud Seeding operations. *Journal of Climate and Applied. Meteorology*. 22, 626–631.

Griffith, A. y Yorty, D. 2009. Estudio de factibilidad/diseño de modificación del clima para el proyecto Caserones, Chile. Minera Lumina Copper Chile S.A.

Hidromet, 1998. Estimulación de precipitaciones [en línea] <<http://www.hidromet.cl>> [consulta: 30 Julio 2010].

Hidromet, 2004. Programa de estimulación de precipitaciones cuenca del río Cachapoal: Informe del programa 2000 - 2003.

Hidromet, 2010. Programa de estimulación de precipitaciones cuenca del río Cachapoal: Evaluación temporadas 2008 y 2009.

Hidromet, 2011a. Empresa asesora en servicios hídricos y meteorológicos y sus programas de incremento de las precipitaciones.

Hidromet, 2011b. Fundamentos físicos de la siembra de nubes.

IPCC, 2001. Cambio climático 2001: La base científica. Tercer Informe de Evaluación, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. <http://www.ipcc.ch>.

Kunkel, K., Pielke, R. y Changnon, S. 1999. Temporal fluctuations in weather and climate extremes that cause economic and human health impacts: a review. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80(6):1077-1098.

Sepúlveda, G. y Ormazábal, B. 2001. Tema: Inducción de lluvias. “Experiencias del Ministerio de Agricultura en inducción de lluvias empleando Yoduro de Plata con fuentes fijas y aéreas”. En: III ENCUENTRO de las aguas. Octubre de 2001, Santiago de Chile.

Silverman, B. 2010. An evaluation of eleven operational cloud seeding programs in the watersheds of the Sierra Nevada Mountains. *Atmospheric Research*. 97, 526-539.