Resumen de resultados

El estudio titulado **"Evaluación compleja de las operaciones de siembra de nubes invernales para la cuenca del río Cachapoal en la región de O'Higgins de Chile Central"** es un análisis estadístico de los resultados obtenidos en el Programa de Siembra de Nubes del Río Cachapoal, que se ejecuta desde el año 2000 a la fecha, siendo el programa más duradero de Latinoamérica.

Este estudio fue realizado por el El Dr. Arquímedes Ruiz Columbié, profesor del National Wind Institute en Texas Tech University. El Dr. Ruiz tiene más de 35 años de experiencia en temas relacionado con el clima que incluyen climatología, pronóstico de mesoescala y modificación del clima. El presente estudio fue solicitado y patrocinado por Pacific Hydro Company Chile, quienes financian una gran parte del programa de siembra de nubes del Río Cachapoal.

Inicialmente se hace referencia a las condiciones fundamentales tanto meteorológicas como técnicas para una correcta aplicación de la técnica, sobre lo cual se concluye que el diseño del programa operativo para la cuenca del rio Cachapoal cumple con todos los requerimientos fundamentales. *(Pag.2)*

El análisis estadístico de los resultados en el incremento de la precipitación se realiza en base a la comparación de los caudales del Río Cachapoal (Objetivo) contra los ríos Maipo-El Manzano, Maipo- La Obra y Tinguririca (Controles). De estos ríos se realizó un análisis de datos desde 1970 a 1999 (años sin siembra de nubes) y 2000 al 2016 (años con siembra de nubes) y con ello una correlación histórica para comparar el comportamiento de los ríos antes y después del programa de siembra de nubes.

Para analizar los datos se realizaron tres ejercicios, el primero fue de razones e incrementos derivados de los Caudales, que separa el año en dos etapas, Recarga (Abril a Septiembre) y Deshielo (octubre a marzo). El resultado de este ejercicio arroja un incremento en el Caudal del Río Cachapoal de 7 % (octubre-marzo), 24% (abril-septiembre), y 13% (anual). *(Pag. 3-6)*

El segundo ejercicio evalúa las diferencias aritméticas del caudal, entre el Río Maipo y el Cachapoal, dando como resultado un incremento en el caudal de 22% (octubre-marzo), 56% (abril-septiembre), y 31% (anual). *(Pag. 7-8)*

Por último, el tercer ejercicio, la estimación de incrementos de precipitación por medio de regresiones lineales, en donde la elección de áreas de control cercanas al área de trabajo y con alta semejanza climática asegura altos valores del coeficiente de correlación, arrojó incrementos en el caudal de un 15% a partir de la razón simple, 28% a partir de la razón doble. *(Pag. 8-15)*

También se hacen observaciones a las mejoras a realizar en el programa, que son principalmente los controles más específicos de la información de operación, como horas operadas, dispersión de la pluma y dosis utilizada.

Este programa se inició el 2000 con la empresa Hidromet S.A. quienes desarrollaron el modelo meteorológico, la instalación de los primeros Generadores de Yoduro de Plata y su operación hasta el año 2013. Desde el año 2014 a la fecha, la red de Generadores de Yoduro de Plata ha sido operada por METTECH SPA, años en los cuales se ha ampliado a 12 Generadores y se ha automatizado la operación de la totalidad de la red.

Evaluación compleja de las operaciones de siembra de nubes invernales para la cuenca del río Cachapoal en la región de O'Higgins de Chile Central

"Conocer no es suficiente, debemos aplicar;
desear no es suficiente; debemos hacer".
Johann. W. Goethe (1749-1832)

Operaciones de siembra de nubes invernales para el incremento de la precipitación han sido realizadas desde el año 2000 sobre la cuenca del río Cachapoal, localizada en la región de O'Higgins en el centro de Chile. Dichas operaciones han utilizado generadores en tierra de aerosoles de yoduro de plata y han sido efectuadas, por obvias razones, en meses del otoño tardío y el invierno del hemisferio sur (período: mayo-septiembre). El presente reporte tiene como objetivo mostrar los resultados de una evaluación compleja de las operaciones durante el período 2000-2016, así como recomendaciones para futuras campañas.

1. Generalidades sobre el modelo conceptual y el diseño de operaciones

Proyectos operativos de siembra de nubes invernales datan desde 1947 sobre la Sierra Nevada en California. Dichos proyectos basaron sus operaciones en la idea científica que la precipitación podría ser aumentada por medio del incremento de la concentración de cristales de hielo a temperaturas por debajo del 0°C y por encima de los -20°C, debido a la presencia de agua sobreenfriada (agua líquida que a pesar de estar muy fría aún no ha condensado). Se esperaba que los cristales de hielo introducidos artificialmente (siembra) catalizarían la conversión de agua sobreenfriada en hielo, incrementando entonces la precipitación y las corrientes de escurrimiento. Los proyectos operativos actuales también se basan en esa idea y la mayoría de ellos utilizan generadores en tierra de aerosoles de yoduro de plata debido a su asequibilidad económica.

Los aerosoles de yoduro de plata son muy eficientes en la cristalización de hielo. Esto se debe a su gran similitud con los cristales naturales de hielo, una observación original de Bernard Vonnegut en 1947, cuando descubrió que humos de yoduro de plata tenían la propiedad de formar copos de nieve a partir de una nube sobreenfriada. Muestras de estos humos obtenidas en los primeros experimentos realizados en túneles de viento y cámaras de niebla mostraron bajo el microscopio que un gran porcentaje de los aerosoles de yoduro de plata eran muy pequeños (≤ 0.001 micrones) y probablemente no aptos para devenir núcleos de cristalización. Además:

- la razón de formación de núcleos de hielo es muy dependiente de la temperatura, siendo mayor a temperaturas más bajas;
- la temperatura de activación de los aerosoles es a -5°C;
- existe una razón de pérdida de aerosoles. Si los aerosoles muy pequeños terminan inmersos en gotas de agua y son disueltos mucho antes de iniciar la cristalización de hielo.

Es muy importante controlar la calidad del humo generado, así como las condiciones necesarias para que una siembra sea efectiva. Los generadores modernos tienen en cuenta lo antes dicho.

Modelo conceptual para la siembra efectiva de nubes invernales:

A. Para que una nube invernal sea sembrable, una porción de su volumen debe contener agua sobreenfriada;

B. La temperatura umbral de activación del yoduro de plata es -5°C, por lo que una porción de la nube debe estar a dicha temperatura;

C. La temperatura del tope de la nube no debe ser más fría que -15°C. Nubes con topes muy fríos tienden a precipitar de forma natural;

D. Las estructuras del campo de vientos y de temperatura a diferentes alturas son importantes. El viento al nivel de 700 HPa (700 mb) es usualmente un buen indicador de cómo se mueven las nubes. A dicho nivel la temperatura se espera que esté alrededor de los -5°C o ligeramente más fría, un nivel adecuado para la activación del yoduro de plata. La siembra debe efectuarse cuando no existan inversiones de temperatura que puedan resultar en barreras para el ascenso del material de siembra.

El diseño del programa operativo para la cuenca del rio Cachapoal cumple con todos esos requerimientos fundamentales. En particular, los generadores de yoduro de plata se encuentran localizados viento-arriba del polígono de trabajo con una distancia promedio no mayor que 10 km. y utilizan al viento como agente dispersante del material de siembra en nubes frontales ricas en agua sobreenfriada. Las siembras se efectúan en un escenario orográfico donde toma lugar una circulación forzada del viento hacia arriba (debido a la presencia de Los Andes).

2. Consideraciones generales sobre la evaluación

Las operaciones de siembra de nubes pueden considerarse en general como acciones complejas sobre sistemas también complejos (los sistemas de nubes sembrables). La complejidad en ambos casos abarca múltiples componentes por lo que cualquier intento de evaluación debe mostrar también esa complejidad. En términos generales, una evaluación de acciones de modificación del tiempo atmosférico intenta detectar señales de modificación del régimen natural de evolución de los sistemas que son objetivos de dichas acciones (en nuestro caso particular, una modificación del régimen natural de precipitación). Existe una alta variedad de metodologías para desarrollar evaluaciones y el conocimiento del contexto concreto de aplicación es decisivo en la elección de las metodologías a usar y en el diseño apropiado de los ejercicios evaluativos. Otro aspecto importante lo constituye la disponibilidad y calidad de los datos a usar pues las conclusiones finales dependen mucho de estos dos aspectos. En el caso particular de la evaluación de programas operativos de siembra de nubes, el diseño y la implementación de las operaciones se basan en la Física de dichos procesos, pero las decisiones y las evaluaciones posteriores son guiadas por los datos (physics-based, data-driven) y las estimaciones estadísticas. En general, los modelos conducen a la recolección de datos, y los datos, cuando son apropiados y suficientes, guían a la disminución de las incertidumbres.

Dos observaciones son pertinentes. Primero, el estándar dorado de las evaluaciones de trabajos experimentales lo constituye el diseño y control aleatorio de las acciones. Sin embargo, los programas operativos de siembra de nubes no se adhieren a esa norma porque su operatividad se basa precisamente en la utilización de todos los recursos nubosos sembrables con el propósito de incrementar la precipitación, mitigar el granizo, o disipar nieblas. En estos casos la evaluación es aún necesaria y se utilizan controles similares para establecer la comparación por contraste. En el caso particular que nos ocupa, los caudales de ríos con cuencas similares al río Cachapoal son utilizados. No hay lugar para la siembra aleatoria en los programas operativos. Segundo, las acciones de siembra se efectúan sobre nubes sembrables que de forma natural producirán precipitación, y el objetivo de la siembra es el incremento de los niveles de precipitación. La siembra debe considerarse como una causa contributiva. Eso permite juzgar los efectos de modificación, muchas veces modestos, como no decepcionantes.

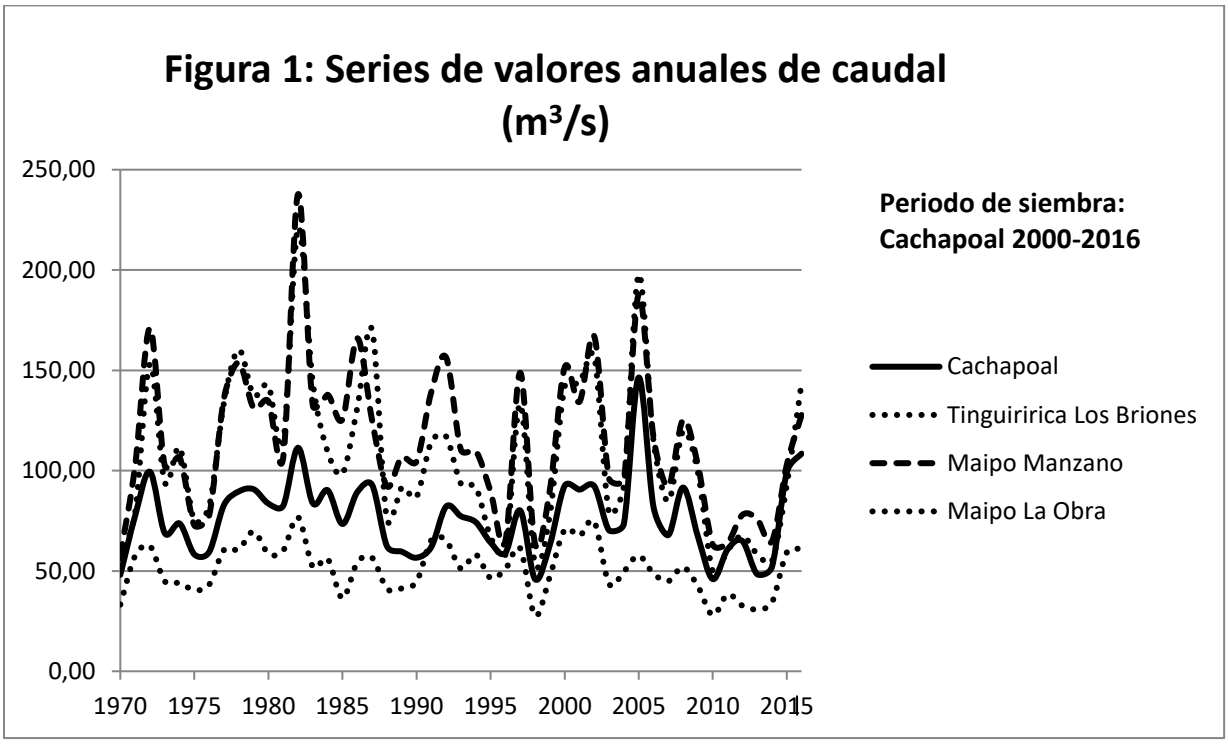
3. Evaluación compleja de las operaciones para la cuenca del río Cachapoal: 2000 - 2016

3.1 Primer ejercicio evaluativo: Caudales, razones e incrementos derivados

Promedios mensuales derivados de datos diarios de caudal fueron la fuente principal para los ejercicios evaluativos que siguen. Las bases de datos fueron confeccionadas para los ríos Cachapoal (objetivo o blanco), Tinguiririca (control) y Maipo (dos controles, uno llamado Maipo

Manzano, el otro Maipo La Obra). Como las operaciones de siembra fueron efectuadas entre los meses de mayo y septiembre del período 2000-2016, los mencionados ejercicios evaluativos fueron realizados para tres períodos diferentes: deshielo (octubre a marzo del siguiente año, mitad caliente del llamado año hidrológico), recarga (abril a septiembre, todo en próximo año), y el año completo, que corre de octubre a septiembre del próximo año (de la mitad caliente a la mitad fría). Estos lapsos responden a una caracterización hidrológica que toma al año hidrológico como un período de 12 meses comenzando en abril y terminando en marzo del año siguiente. Como se espera que las operaciones afecten primero la segunda mitad de dicho año hidrológico, las evaluaciones comenzaron con el deshielo (octubre-marzo). Además. la etapa 1970-1999 de 30 años, previa a las operaciones, se utilizó como período de control.

La figura # 1 muestra las series temporales de valores anuales para los caudales de las cuatro cuencas mencionadas.



Promedios anuales del caudal (1970-2016)
Cachapoal 76.50 m^3/s; Tinguiririca 51.14 m^3/s; Maipo Manzano 114.88 m^3/s; Maipo La Obra 107.05 m^3/s

La Tabla # 1 debajo presenta los valores de caudal para las cuatro estaciones escogidas, así como el cálculo de las razones simples, R, las razones dobles, RD, y los incrementos derivados (Δ). Las razones simples fueron definidas como los cocientes entre el período de siembra (2000-2016) y el período de control (1970-1999) para una misma estación, mientras las razones dobles fueron definidas como los cocientes entre las razones simples del blanco (Cachapoal) y cada uno de los

controles (Tinguiririca, Maipo Manzano, y Maipo La Obra). Los incrementos se determinaron como las diferencias entre las razones y la unidad, expresadas en porciento.

Tabla # 1: Caudales (m^3/s), razones simples, razones dobles e incrementos derivados

	Octubre-Marzo (marzo año siguiente)				Abril-Septiembre				Oct-Sep (año)			
	1970-99	2000-16	R	Δ(%)	1970-99	2000-16	R	Δ(%)	1970-99	2000-16	R	Δ(%)
Cachapoal	108.4	108.3	**0.999**	**-0.1**	41.1	47.3	**1.15**	**15**	74.7	79.6	**1.07**	**7**
Tinguiririca	71.1	64.7	0.910	- 9	33.4	30.8	0.92	-8	52.8	49.2	0.93	-7
Maipo M	167.2	148.8	0.890	-11	69.8	65.0	0.93	-7	118.5	108.5	0.92	-8
MaipoLaO	154.7	144.5	0.934	-6.6	63.5	57.1	0.90	-10	109.1	103.4	0.95	-5

	RD	Δ(%)	RD	Δ (%)	RD	Δ (%)
Cachapoal/Tinguiririca	$\frac{0.999}{0.910} = 1.10$	10	$\frac{1.15}{0.92} = 1.25$	25	$\frac{1.07}{0.93} = 1.15$	15
Cachapoal/MaipoMzo	$\frac{0.999}{0.890} = 1.12$	12	$\frac{1.15}{0.93} = 1.24$	24	$\frac{1.07}{0.92} = 1.16$	16
Cachapoal/MaipoLaO	$\frac{0.999}{0.934} = 1.07$	**7**	$\frac{1.15}{0.90} = 1.28$	**28**	$\frac{1.07}{0.95} = 1.13$	**13**

Las razones simples de Cachapoal (comparación de períodos) fueron siempre cercanas a uno o mayores que uno: 0.999, 1.15, 1.07; mientras para las áreas de control los valores correspondientes siempre fueron menores que uno, indicando que excepto para la cuenca del Cachapoal, el período 2000-2016 fue siempre más seco que el período 1970-1999 (hecho evidente en los valores del caudal). Los incrementos derivados de las razones simples sugieren un impacto positivo de la siembra para la cuenca del Cachapoal, mientras para las cuencas de control (no siembra) esos valores son negativos.

Las razones dobles son aún más elocuentes porque incluyen no sólo la comparación entre períodos sino también la comparación entre cuencas y ofrecen estimaciones de incremento para los tres períodos analizados. Llaman mucho la atención los altos valores de incremento aparente para la cuenca del Cachapoal durante el invierno (≥ 24 %). Una observación resulta pertinente: la relativa alta variabilidad asociada a los procesos de precipitación hace que cualquier conclusión

derivada de estos cálculos debe ser tomada con precaución, sobre todo porque las razones aquí calculadas han tenido en cuenta sólo los valores medios de caudal para los períodos analizados y no sus varianzas y además porque las series utilizadas no son suficientemente largas para asegurar significación estadística. Con el objetivo de mejorar la narrativa, el apéndice A muestra cálculos similares usando las medianas (buscando robustez), mientras el análisis de correlación-regresión en páginas posteriores (ejercicio 3.3) intenta explicar la naturaleza de las tendencias observadas.

De forma adicional, es importante notar que, para obtener una mejor validación de estos incrementos aparentes, un análisis de la semejanza climatológica entre las cuencas debe ser establecida, en particular la similitud entre los caudales usados en la evaluación. Desde el punto de vista climático general, las cuatro cuencas están localizadas en la zona central de Chile y comparten un clima mediterráneo con inviernos moderados y lluviosos y veranos calientes y soleados. La pregunta oportuna es: ¿Es esta semejanza climática también presente en los valores del caudal de las cuencas que nos ocupan?

El análisis de la correlación lineal entre los caudales para los años previos a la siembra y para los tres períodos evaluativos es presentado en la tabla # 2:

Tabla # 2: Valores del coeficiente de correlación lineal entre la cuenca de trabajo y las de control previo a las operaciones de siembra (1970-1999), y para los tres períodos:

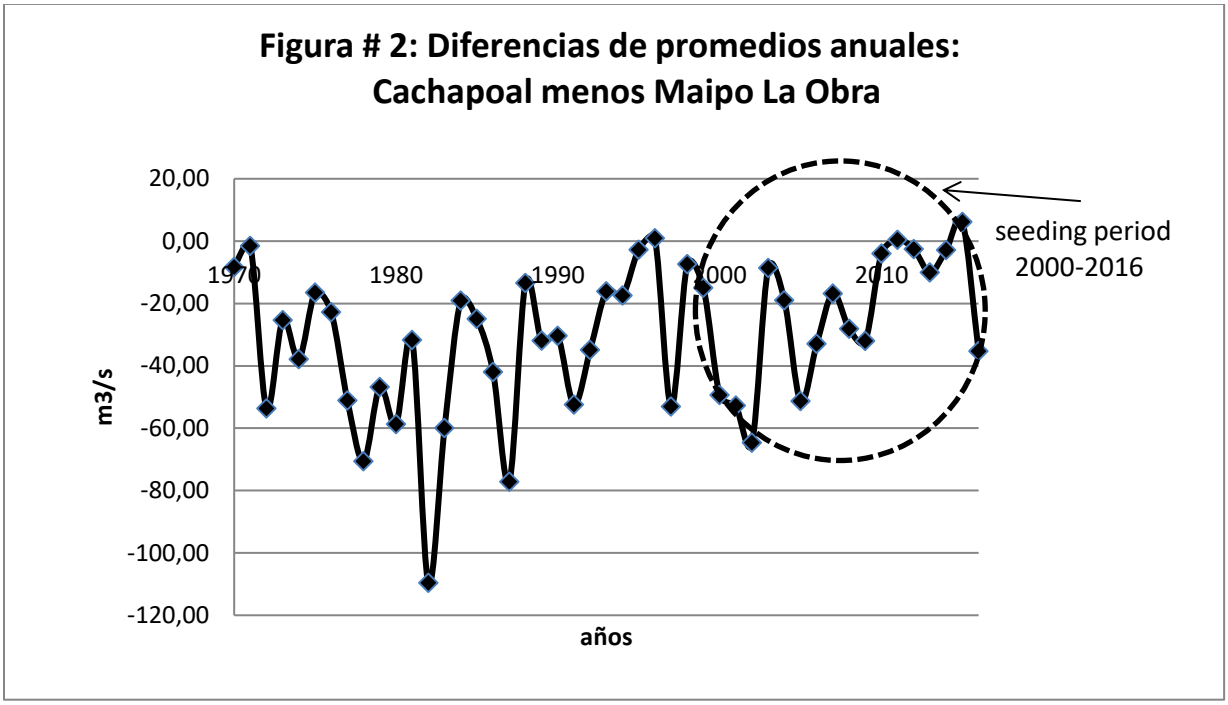
	Octubre-Marzo	Abril-Septiembre	Oct-Sept (año)
Cachapoal-Tinguiririca	r = 0.89	r = 0.81	r = 0.80
Cachapoal- Maipo Mzo	r = 0.89	r = 0.82	r = 0.87
Cachapoal-Maipo La O	r = 0.92	r = 0.78	r = 0.89

Estos valores son indicativos de una alta correlación de los valores de caudal entre la cuenca de trabajo y las tres cuencas de control, corroborando así su semejanza climática y la validez de las comparaciones. La matriz previa incluso sugiere que Maipo La Obra es el mejor de los controles (particularmente para los períodos de deshielo y anual).

Conclusión parcial: Con ayuda de la matriz de correlaciones, los incrementos aparentes derivados de las razones dobles que pueden ser aceptados para cada período son: **7 % (octubre-marzo), 24 % (abril-septiembre), y 13 % (anual).**

3.2 Segundo ejercicio evaluativo: diferencias

Las diferencias aritméticas del caudal fueron consideradas con el objetivo de obtener una mejor estimación de incrementos. La figura # 2 muestra la serie temporal de las diferencias de promedios anuales entre el Cachapoal y Maipo la Obra (considerado el mejor control) desde 1970 hasta el 2016:



Promedio de las diferencias (1970-1999): -34.4 m^3/s (desviación estándar: 25.4 m^3/s)

Promedio de las diferencias (2000-2016): -23.8 m^3/s (desviación estándar: 21.6 m^3/s)

Incremento aparente estimado: Δ = -23.8 -(-34.4) = 10.6 m^3/s (desviación estándar: 33.3 m^3/s)

Este incremento significa cerca de un 31 % a favor del valor previo a la siembra ($\frac{10.6}{34.4} \approx 0.308$). Sin embargo, las desviaciones estándares son muy altas y los intervalos de confianza al 95% de confianza resultan:

1970-1999: [- 43.5 m^3/s, - 25.3 m^3/s]; centro en - 34.4 m^3/s, incertidumbre: 4.6 m^3/s

2000-2016: [- 35.3 m^3/s, - 12.3 m^3/s]; centro en - 23.8 m^3/s, incertidumbre: 5.4 m^3/s

Estos dos intervalos se solapan, mostrando que el incremento estimado no es estadísticamente significativo. La única manera de lograr significación es a través de muestras mayores que

disminuirían las incertidumbres. Por esa razón se añadió un ejercicio de remuestreo, para crear datos sintéticos (ver apéndice B) capaces de producir intervalos de confianza disjuntos y, por consiguiente, significación estadística.

Tabla # 3: Valores de las diferencias actuales (Cachapoal menos Maipo La Obra)

	Octubre-Marzo	Abril-Septiembre	Oct-Sept (año)
1970-1999:	- 46.3 m^3/s	- 22.5 m^3/s	- 34.4 m^3/s
2000-2016:	- 36.2 m^3/s	- 9.8 m^3/s	- 23.8 m^3/s
Incrementos:	**10.1 m^3/s** (22 %)	**12.7 m^3/s** (56%)	**10.6 m^3/s** (31%)
Incertidumbres:	± 9.1 m^3/s	± 2.8 m^3/s	± 5.2 m^3/s

Los incrementos en las diferencias son notables. Si aceptamos los valores actuales (en negrita), un incremento del caudal del río Cachapoal alrededor de 10 m^3/s (para todos los períodos) parece ser una buena estimación (conservadora) del impacto de la siembra, aunque con incertidumbres relativamente altas (especialmente para el período octubre-marzo). La mejor señal de incremento aparece para el período abril-septiembre (incertidumbre más baja).

3.3 Tercer ejercicio evaluativo: regresiones lineales

La estimación de incrementos de precipitación por medio de regresiones lineales ha sido muchas veces recomendada. En términos generales, la elección de áreas de control cercanas al área de trabajo y con alta semejanza climática asegura altos valores del coeficiente de correlación, algo ya mencionado aquí. La evaluación se basa entonces en la idea de que las mejores estimaciones del comportamiento natural de la precipitación en el área de trabajo (lo que pasaría de no haber siembra) se pueden obtener a partir de lo observado en el área de control durante las operaciones. Este diseño llamado "área de trabajo - área de control" guía entonces a estimados de incrementos como diferencias entre la precipitación real en el área de trabajo y la precipitación que hubiese ocurrido de no ocurrir la siembra (valores obtenidos de las regresiones lineales). Una condición crucial es la siguiente: Para evitar contaminación por siembra de las áreas de control, éstas deben ser escogidas viento arriba o en dirección cruzada (perpendicular) con el viento predominante. Este último es el caso para las cuencas del río Cachapoal y los ríos Maipo y Tinguiririca, como ilustra el mapa en la figura 3:

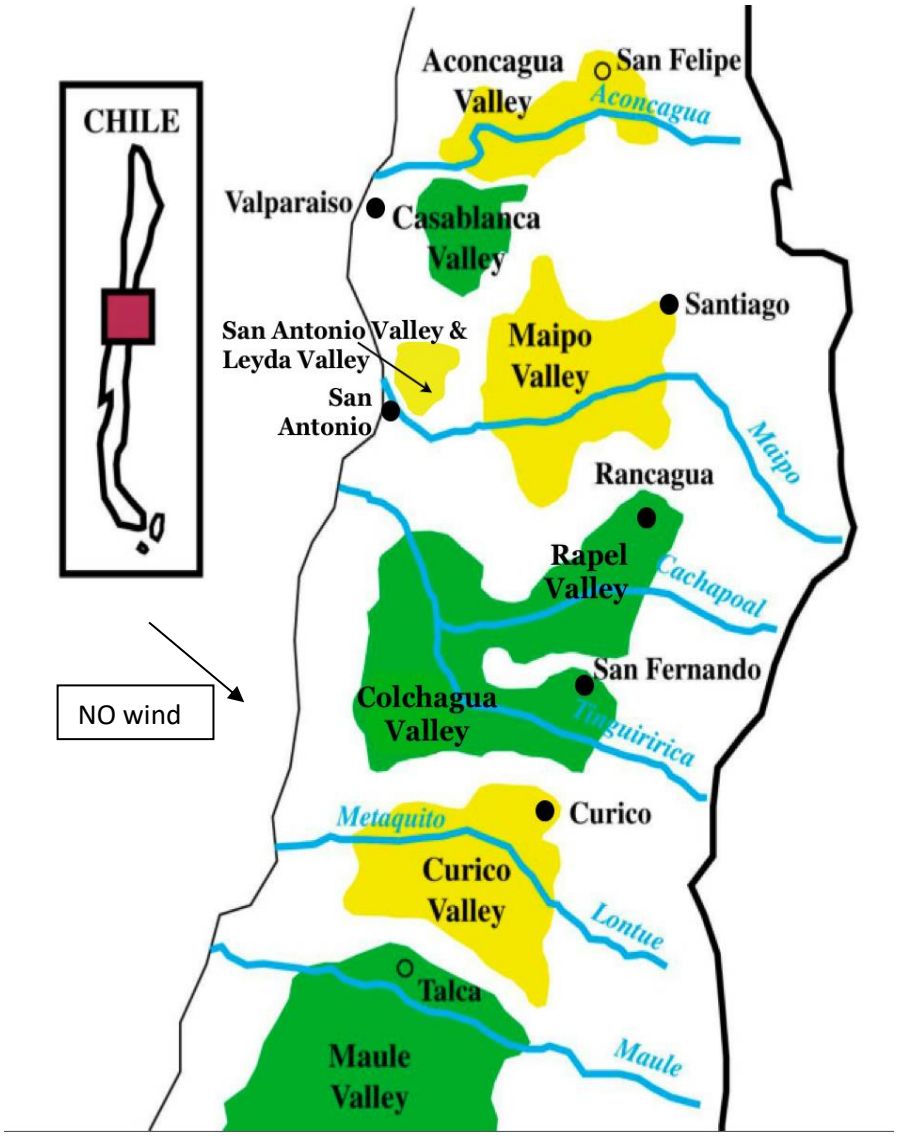
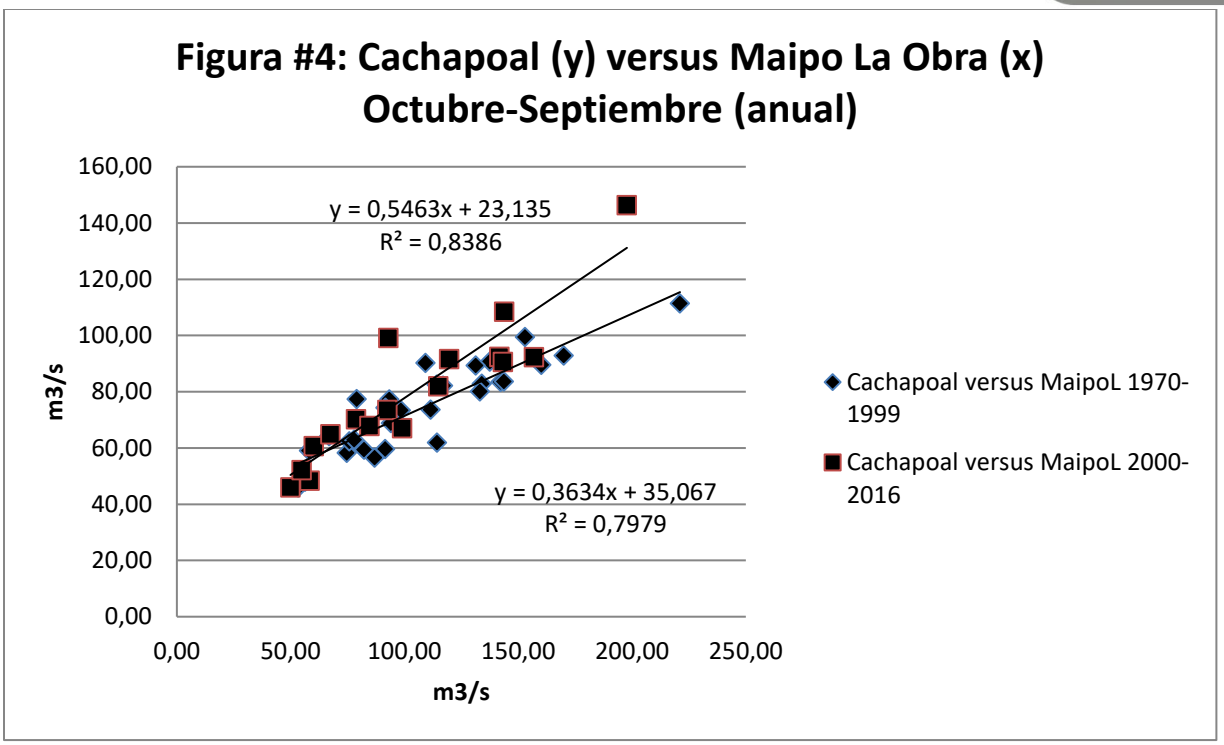


Figura # 3: Cuencas de los ríos Cachapoal, Maipo y Tinguiririca. El viento predominante fluye desde el Océano Pacífico hacia el continente con dirección aproximada del noroeste (ver la flecha).

Nótese también que las cuatro cuencas de interés son similares en relieve y en su exposición a los vientos predominantes y comparten el clima mediterráneo propio al Chile Central.

Análisis de regresión lineal fueron realizados entre los valores de caudal para las tres cuencas. La figura # 4 muestra los resultados para el período anual Cachapoal versus Maipo La Obra:



Esta figura muestra un cambio de pendiente en el comportamiento de la regresión lineal, de un valor 0.36 (antes de la siembra, 1970-1999) a un valor de 0.55 (período de siembra sobre la cuenca del Cachapoal, 2000-2016). Esto significa un incremento en pendiente de 53 % ($\frac{0.55}{0.36} \approx 1.53$). Los modelos, a partir de los valores medios del control (Maipo), reproducen los valores medios del objetivo (Cachapoal) en la tabla # 1, columna anual:

1970-1999: <Cachapoal> = 0.3634 <Maipo> + 35.07; <Maipo> = 109.13 => <Cachapoal> = 74.73

2000-2016:<Cachapoal> = 0.5463 <Maipo> + 23.14; <Maipo> = 103.38 => <Cachapoal> = 79.61

Y las razones: $R_{simple}^{Cachapoal} = \frac{79.61}{74.73} \approx 1.07$; $R_{simple}^{Maipo} = \frac{103.38}{109.13} \approx 0.95$; $RD = \frac{1.07}{0.95} \approx 1.13$

Los incrementos: **7 %** a partir de la razón simple, **13 %** a partir de la razón doble. Oportuno es volver a destacar que el incremento derivado de la razón doble siempre recibe más crédito porque tiene en cuenta una doble comparación, en períodos (siembra versus no siembra) y en área (objetivo versus control). Además, estos incrementos ahora parecen tener una mejor explicación pues el modelo de regresión incluye consideraciones acerca de las incertidumbres, y sobre el comportamiento global de la secuencia. Como nota interesante, el modelo para el período de siembra muestra un mejor ajuste (mejor coeficiente de correlación: 0.92 > 0.89).

Como ya se ha dicho, el modelo de regresión antes de la siembra se usa para estimar incrementos año por año, los cuales toman forma como la diferencia entre los valores reales y aquellos estimados por el modelo. La siguiente tabla # 4 muestra los resultados (unidad de los números, m^3/s):

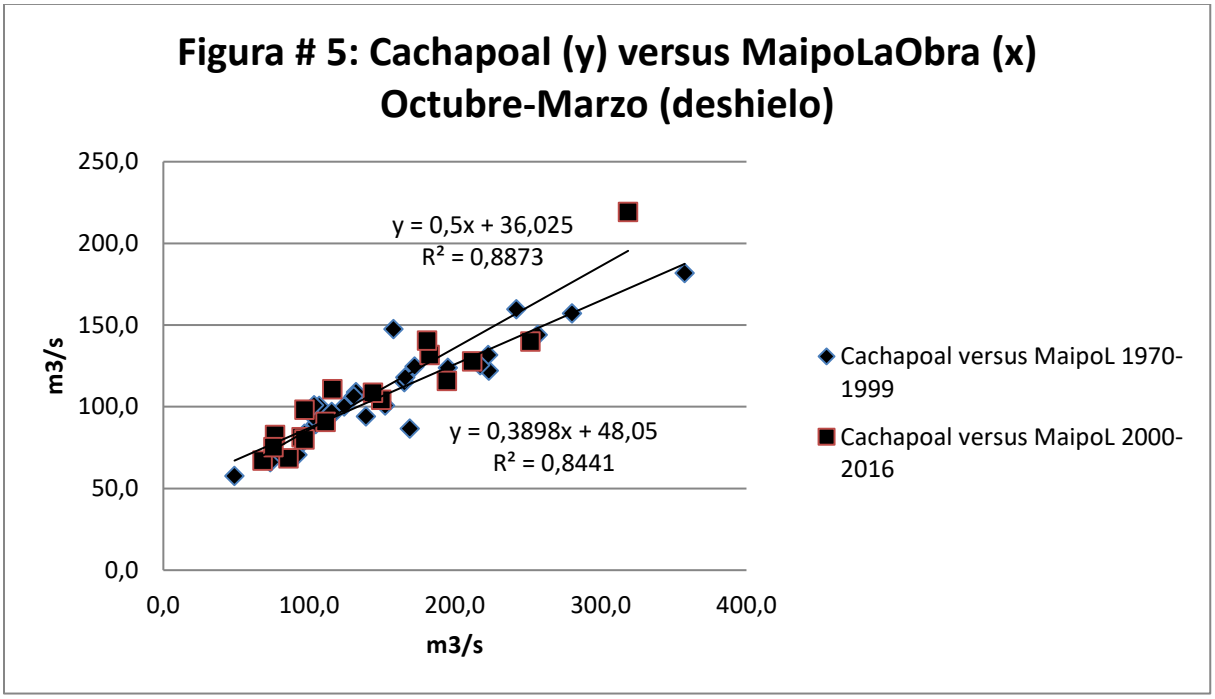
Tabla 4: Anual	Cachapoal	Maipo	Cachapoal predicted	delta
2000	92.40	141.83	86.61	5.79
2001	90.54	143.33	87.15	3.38
2002	92.27	157.00	92.12	0.15
2003	70.22	78.83	63.72	6.50
2004	73.54	92.50	68.68	4.86
2005	146.40	197.75	106.93	**39.47**
2006	81.93	114.92	76.83	5.10
2007	67.86	84.67	65.83	2.02
2008	91.57	119.67	78.55	**13.02**
2009	67.08	99.08	71.07	-3.99
2010	45.93	49.92	53.21	-7.28
2011	60.69	60.25	56.96	3.73
2012	64.89	67.50	59.60	5.30
2013	48.38	58.42	56.30	-7.92
2014	52.08	54.93	55.03	-2.95
2015	99.13	92.98	68.86	**30.28**
2016	108.48	143.83	87.33	**21.14**

promedio:	6.98
desviación:	12.72
coeficiente de variación:	1.82

El modelo de regresión antes de la siembra obtuvo una desviación estándar de la estimación de 7.13; valores absolutos de deltas (incrementos o decrementos) menores que dicho valor deben considerarse no significativos. En la lista hay 13 valores de ese tipo (menores que 7.13 o negativos), y 4 valores positivos y significativos (en negrita), correspondientes a los años 2005, 2008, 2015, y 2016. Uno de los problemas de los modelos de regresión es que muchas veces muestran intermitencia en las señales, aunque para el conjunto de datos analizados el cambio de pendiente ya mencionado es una señal clara de un comportamiento diferente asociado con la siembra. A partir de este modelo, la señal de modificación debe entenderse como una propiedad de la serie, mientras para los valores individuales dicha señal puede quedar oculta por el ruido (la alta variabilidad). El promedio de los deltas resulta 6.98 con una desviación estándar de 12.72. El

modelo de regresión antes de la siembra no puede explicar el nuevo patrón de comportamiento de los datos: un nuevo modelo de regresión ha emergido como resultado de la siembra sostenida por años.

Para el período de deshielo se siguió la misma metodología. La figura # 5 ilustra los resultados obtenidos:



Un cambio de pendiente en el comportamiento de la regresión lineal también apareció en este caso, aunque menor, de un valor 0.39 (antes de la siembra) a un valor de 0.50 (período de siembra sobre la cuenca del Cachapoal). Esto significa un incremento en pendiente de 28% ($\frac{0.50}{0.39} \approx 1.28$). Los modelos, a partir de los valores medios del control (Maipo), reproducen los valores medios del objetivo (Cachapoal) en la tabla # 1, columna octubre-marzo:

1970-1999: <Cachapoal> = 0.3898 <Maipo> + 48.05; <Maipo> = 154.7 => <Cachapoal> = 108.35

2000-2016:<Cachapoal> = 0.5000 <Maipo> + 36.05; <Maipo> = 144.5 => <Cachapoal> = 108.30

Y las razones: $R_{simple}^{Cachapoal} = \frac{108.30}{108.35} \approx 1.0$; $R_{simple}^{Maipo} = \frac{144.5}{154.7} \approx 0.93$; $RD = \frac{1.00}{0.93} \approx 1.08$

Los incrementos, **0 %** a partir de la razón simple, **8 %** a partir de la razón doble.

Los cálculos año por año a partir del modelo de regresión en este caso llevan a la siguiente tabla # 5 (unidad de los números, m^3/s):

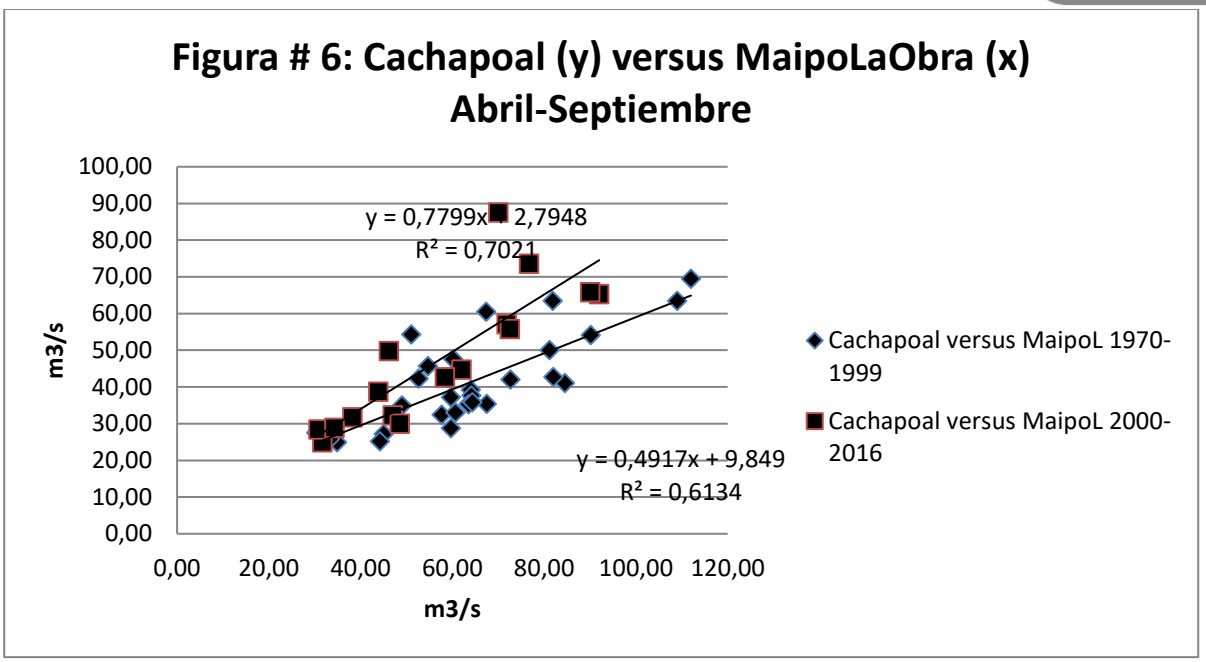
Tabla # 5: Deshielo	Cachapoal	Maipo	Cachapoal predicted	delta

2000	127.65	211.83	130.62	-2.97
2001	115.75	194.67	123.93	-8.18
2002	139.85	252.00	146.28	-6.43
2003	90.65	111.50	91.51	-0.87
2004	81.28	95.00	85.08	-3.80
2005	219.23	318.83	172.33	**46.90**
2006	131.57	182.83	119.32	**12.25**
2007	79.93	96.83	85.80	-5.86
2008	140.51	181.00	118.60	**21.90**
2009	104.16	149.67	106.39	-2.23
2010	66.91	68.17	74.62	-7.71
2011	82.63	76.67	77.93	4.69
2012	98.08	96.83	85.80	**12.28**
2013	68.30	86.00	81.57	-13.27
2014	75.26	75.58	77.51	-2.25
2015	110.76	115.98	93.26	**17.49**
2016	108.48	143.83	104.11	4.36

promedio:	3.90
desviación:	14.75
coeficiente de variación:	3.78

El modelo de regresión antes de la siembra obtuvo una desviación estándar de la estimación de 11.87; valores absolutos de deltas (incrementos o decrementos) menores que dicho valor deben considerarse no significativos. Hay 11 valores de este tipo, 5 valores de incremento significativo (en negrita) correspondientes a los años 2005, 2006, 2008, 2012, y 2015; y un valor de decremento significativo (año 2013). El modelo muestra una vez más intermitencia en valores puntuales, pero el conjunto señala la presencia de una señal positiva de modificación.

Para el período de recarga (abril-septiembre) los resultados correspondientes siguen. La figura # 6 ilustra el modelo de regresión:



Cambio de pendiente en el comportamiento de la regresión lineal: 59 % ($\frac{0.78}{0.49} \approx 1.59$)

Valores medios del objetivo (Cachapoal) en la tabla # 1, columna abril-septiembre:

1970-1999: <Cachapoal> = 0.4917 <Maipo> + 9.85; <Maipo> = 63.56 => <Cachapoal> = 41.10

2000-2016:<Cachapoal> = 0.7799 <Maipo> + 2.79; <Maipo> = 57.11 => <Cachapoal> = 47.33

Y las razones: $R_{simple}^{Cachapoal} = \frac{47.33}{41.10} \approx 1.15$; $R_{simple}^{Maipo} = \frac{57.11}{63.56} \approx 0..90$; $RD = \frac{1.15}{0.90} \approx 1.28$

Los incrementos, **15 %** a partir de la razón simple, **28 %** a partir de la razón doble.

Los cálculos año por año a partir del modelo de regresión en este caso llevan a la siguiente tabla # 6 (unidad de los números, m^3/s):

Tabla # 6 recarga	Cachapoal	Maipo	Cachapoal predicted	delta
2000	57.15	71.83	45.17	**11.98**
2001	65.33	92.00	55.09	**10.24**
2002	44.70	62.00	40.33	4.36
2003	49.79	46.17	32.55	**17.24**
2004	65.80	90.00	54.10	**11.70**
2005	73.56	76.67	47.55	**26.02**
2006	32.29	47.00	32.96	-0.67
2007	55.78	72.50	45.50	**10.28**
2008	42.64	58.33	38.53	4.10
2009	30.01	48.50	33.70	-3.69
2010	24.95	31.67	25.42	-0.47
2011	38.75	43.83	31.40	7.35
2012	31.71	38.17	28.62	3.09
2013	28.45	30.83	25.01	3.44
2014	28.90	34.27	26.70	2.20
2015	87.51	69.98	44.26	**43.25**

promedio:	**9.40**
desviación:	14.75
coeficiente de variación:	3.78

El modelo de regresión antes de la siembra obtuvo una desviación estándar de la estimación de 7.77; valores absolutos de deltas (incrementos o decrementos) menores que dicho valor deben considerarse no significativos. Hay 9 valores de este tipo, y 8 valores de incremento significativo (en negrita) correspondientes a años 2000, 2001, 2003, 2004, 2005, 2007, y 2015, pero también en el promedio (**9.40**). El modelo muestra una vez más intermitencia en valores puntuales, pero el conjunto señala la presencia de una señal positiva de modificación. Incluso puede decirse que dicha señal es más fuerte para este período (más valores en negrita).

Como conclusión parcial puede decirse que, a pesar de la alta variabilidad presente, los modelos de regresión corroboran la presencia de una señal de modificación, intermitente en ocasiones para valores particulares, pero evidente en el comportamiento de largo plazo (cambio en la pendiente del ajuste lineal e incluso mejor calidad en el ajuste, i.e. mejores valores del coeficiente de correlación al cuadrado). Además, las regresiones lineales llevan a las mismas razones y los mismos incrementos mostrados en la tabla # 1, ofreciendo sustento teórico.

4. Conclusiones y Recomendaciones

C1) Incrementos aparentes, derivados de las razones dobles para las medias aritméticas, indican la presencia de una señal de modificación positiva del caudal para la cuenca del río Cachapoal cuando se compara con el caudal del río Maipo (mejor control). Dichos incrementos resultaron ser:

7 % (octubre-marzo), 24 % (abril-septiembre), y 13 % (anual)

C2) El uso de diferencias aritméticas de los mismos caudales guía a incrementos aparentes de

22 % (octubre-marzo), 56 % (abril-septiembre), y 31 % (anual)

C3) Los modelos de correlación-regresión usando medias aritméticas corroboran los valores expuestos en C1, pero además esclarecen que las señales de modificación deben entenderse como una propiedad de las series, mientras para los valores individuales dicha señal puede quedar oculta por el ruido (la alta variabilidad). *Las operaciones de siembra de nubes invernales para la cuenca del río Cachapoal han modificado positivamente el régimen natural de precipitación.*

R1) Controles de calidad de las operaciones deben ser incluidos en las operaciones diarias. Junto al pronóstico preciso de los recursos nubosos, consideraciones sobre el impacto de las plumas de aerosoles sobre dichos recursos sobre el área de trabajo son cruciales para las valoraciones diarias de calidad (tiempo preciso de las operaciones, dosis utilizadas, porción impactada de los recursos nubosos, no contaminación de las áreas de control).

R2) En futuras campañas, las valoraciones diarias permitirán una mejora permanente de las operaciones y guiarán a una mejor evaluación final como sumario y síntesis de ellas.

2017-06-30

Dr. Arquímedes Ruiz Columbié
Active Influence & Scientific Management (owner)
Faculty, National Wind Institute at Texas Tech University
Lubbock, Texas, USA, June 2017

Bibliografía

Braham R., Jr., 1986: *Precipitation Enhancement - A Scientific Challenge*; *AMS Monographs, volume 21, 171 pages*

Dennis, Arnett S., 1980: *Weather Modification by Cloud Seeding*, Academic Press, 267 pages

Ruiz-Columbié, A., 2016: *Winter Cloud Seeding Operations: A Review*, (copia disponible con el autor o el Ing. Robert Hilliard)

Apéndice A: Razones a partir de la mediana

El uso de medianas muchas veces ayuda a esclarecer las señales de modificación pues esta medida de tendencia central es menos afectada por valores extremos. Además, la mediana permite el uso de una prueba estadística no paramétrica, *U* de Mann-Whitney, utilizada en muchas ocasiones, y que como toda prueba no paramétrica es muy confiable cuando las muestras son relativamente pequeñas y no se conocen las distribuciones poblacionales.

Tabla A1: Razones simples y dobles de los caudales usando las medianas

Período Octubre-Marzo

	Cachapoal	Maipo La Obra	R	RD	Δ
1970-1999	100.8 m^3/s	135.6 m^3/s	0.74		
2000-2016	104.2 m^3/s	116.0 m^3/s	0.90	1.21	**21%**

Período Abril-Septiembre

	Cachapoal	Maipo La Obra	R	RD	Δ
1970-1999	37.6 m^3/s	61.3 m^3/s	0.61		
2000-2016	44.7 m^3/s	58.3 m^3/s	0.77	1.25	**25%**

Período anual

	Cachapoal	Maipo La Obra	R	RD	Δ
1970-1999	75.8 m^3/s	103.9 m^3/s	0.73		
2000-2016	73.5 m^3/s	93.0 m^3/s	0.79	1.08	**8%**

La prueba *U* de Mann-Whitney fue utilizada para comprobar si las medianas antes del período de siembra (1970-1999) y durante el período de siembra eran diferentes. En este caso la hipótesis de nulidad es la de identidad de mediana para los dos períodos.

Período Octubre-Marzo

Cachapoal: $U = 242$, $p = 0.78$: *resultado no significativo para* $p < 0.05$ *(5%)*

Maipo La Obra: $U = 220$, $p = 0.76$: *resultado no significativo para* $p < 0.05$ *(5%)*

Período Abril-Septiembre

Cachapoal: *U*= 199, *p = 0.28: resultado no significativo para p < 0.05 (5%)*

Maipo La Obra: *U*= 202.5, *p =0.32: resultado no significativo para p < 0.05 (5%)*

Período Anual

Cachapoal: *U*= 229, *p = 0.58: resultado no significativo para p < 0.05 (5%)*

Maipo La Obra: *U*= 236, *p =0.68: resultado no significativo para p < 0.05 (5%)*

La prueba indica que las medianas de los caudales no se distinguen significativamente entre un período y otro para ambas regiones (se aceptan las hipótesis de nulidad).

Este ejercicio fue extendido al análisis de las diferencias de caudal entre Cachapoal y Maipo La Obra. Los resultados siguen:

Período Octubre-Marzo

U= 210, *p = 0.35: resultado no significativo para p < 0.05 (5%)*

Período Abril-Septiembre

U= 103, *p = 0.001:* ***resultado significativo*** *para p < 0.05 (5%)*

Período Anual

U= 197, *p = 0.2: resultado no significativo para p < 0.05 (5%)*

Llama la atención que la prueba de Mann-Whitey ofrece un resultado significativo para la diferencia en el período invernal (abril-septiembre), cuando la siembra se efectúa. Precisamente es en este periodo cuando las razones indican también una señal más fuerte.

Apéndice B: Remuestreos (bootstrapping)

Muestras sintéticas muy grandes (2500 años), semejantes a las reales pero generadas matemáticamente, fueron utilizadas para explorar la significación. Los intervalos de confianza al 95 % de confidencia resultaron ser:

2500 años antes de la siembra: [- 35.8 m^3/s, - 33.8 m^3/s]; centro en - 34.8 m^3/s

2500 años de siembra 'sostenida': [- 24.5 m^3/s, - 22.7 m^3/s]; centro en - 23.3 m^3/s

Estos intervalos son disjuntos, no se solapan, por lo que el incremento Δ = - 23.3 - (-34.8)

= **11.5 m^3/s** sería estadísticamente significativo bajo el supuesto de que las operaciones fuesen extendidas por un período de 2500 años. El incremento relativo en este caso resulta del **33 %** ($\frac{11.5}{34.8} \approx 0.33$).

Análisis similares fueron hechos para los períodos de deshielo (octubre-marzo) y recarga (abril-septiembre). La siguiente tabla # 3 ofrece el sumario de los resultados:

Tabla # B1: Valores de las diferencias actuales y de remuestreo (Cachapoal menos Maipo La Obra)

	Octubre-Marzo		Abril-Septiembre		Oct-Sept (año)	
	actual	remuestreo	actual	remuestreo	actual	remuestreo
1970-1999:	-46.3 m^3/s	-46.6 m^3/s	-22.5 m^3/s	-22.3 m^3/s	-34.4 m^3/s	-34.8 m^3/s
2000-2016:	-36.2 m^3/s	-35.6 m^3/s	-9.8 m^3/s	-10.0 m^3/s	-23.8 m^3/s	-23.6 m^3/s
Incrementos:	**10.1 m^3/s** (22 %)	11.0 m^3/s (24 %)	**12.7 m^3/s** (56%)	12.3 m^3/s (55%)	**10.6 m^3/s** (31%)	11.2 m^3/s (33%)
Incertidumbres:	± 9.1 m^3/s	**± 0.7** m^3/s	± 2.8 m^3/s	**± 0.2** m^3/s	± 5.2 m^3/s	**± 0.4** m^3/s

Los incrementos a partir del remuestreo corroboran los incrementos actuales, pero con menos incertidumbres. **Nótese que la señal aparente es más fuerte para el período abril-septiembre.**

Apéndice C: Comparación de espectros de potencia: un postre

El análisis espectral de los datos previamente utilizados se realizó con el propósito de esclarecer aún más la naturaleza de las acciones de siembra. El análisis espectral es uno de los métodos más ampliamente usados en las ciencias asociadas con los sistemas abiertos (por ejemplo, la atmósfera, el océano, etc.) que en esencia describe cualquier serie temporal de datos como una superposición de las tradicionales funciones trigonométricas del seno y el coseno con el propósito de detectar la presencia o no de armónicos en la serie (frecuencias y amplitudes asociadas). Las frecuencias de los armónicos más importantes obtienen una mayor amplitud. Una propiedad muy importante del análisis espectral es que la suma de las amplitudes de todos los armónicos resulta ser igual a la varianza de la serie, i.e., la varianza de la serie (desviación estándar al cuadrado) es separada en partes de diferentes frecuencias. Así, el método deviene también en un análisis de las incertidumbres. Al final, un gráfico que muestra a la amplitud de los armónicos como función de la frecuencia es llamado espectro de potencia. Series con pocos armónicos siempre muestran menos picos (máximos relativos) que aquellas series con muchos armónicos.

La parte superior de la siguiente figura C1 (siguiente página) muestra las series temporales de valores mensuales de los caudales del río Cachapoal y el río Maipo durante el período 1970-1999 (antes de las operaciones de siembra). Ciclos son evidentes en esta porción del gráfico. Por otra parte, la porción inferior presenta los espectros de potencia de las dos series, que en el intervalo [0, 0.4] de frecuencias normalizadas parecen tener picos (máximos) coincidentes. Esta coincidencia parece perderse para valores de frecuencia mayores (menores períodos). Es claro además que las amplitudes para el Maipo son casi siempre mayores que las del Cachapoal, una indicación de mayores valores del caudal, aunque en ocasiones algunos mínimos relativos del Maipo resultaron menores que los valores del espectro del Cachapoal. Además, para las frecuencias más altas, el espectro del Maipo parece tener más armónicos

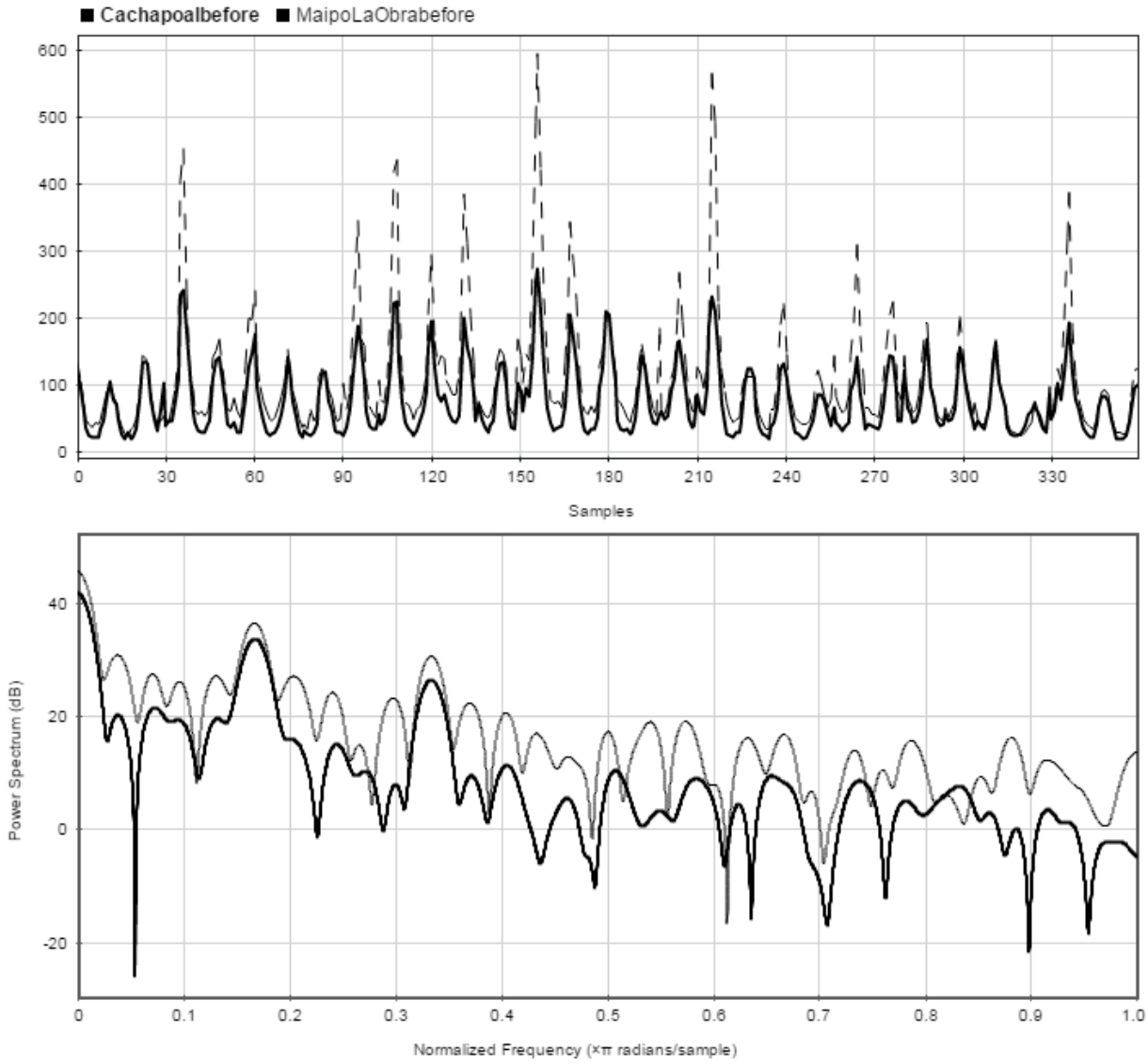


Figura C1: Series temporales y espectros de valores mensuales (1970-1999): Cachapoal (negro fuerte) y MaipoLaObra (negro claro).

La figura C2 (siguiente página) muestra los resultados correspondientes al período 2000-2016 (siembra para la cuenca del Cachapoal). Los espectros parecen menos complicados para ambos ríos, probablemente porque son menos los años en dicho período. La coincidencia de las frecuencias parece perderse para valores mayores que 0.45.

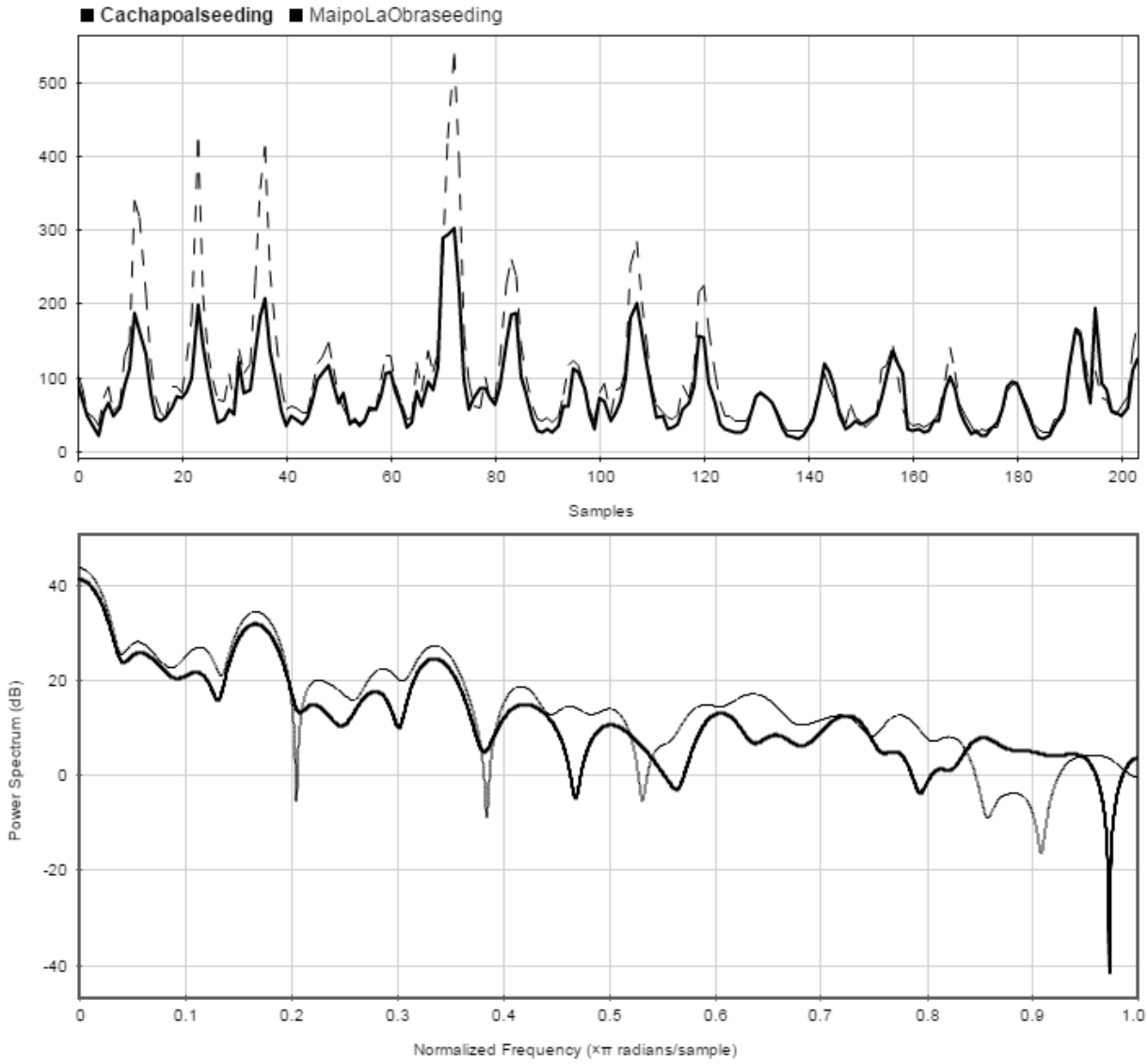


Figura C2: Series temporales y espectros de valores mensuales (2000-2016): Cachapoal (negro fuerte) y MaipoLaObra (negro claro).

Un análisis similar para valores anuales se muestra en las figuras # 10 y # 11. En estas figuras los espectros son menos complejos debido al uso de valores anuales que filtran muchos de los ciclos presentes en los valores mensuales. Debe notarse además que la diferencia entre los espectros del Maipo y el Cachapoal es menor para el período de siembra (en valores del espectro y también en la forma. Una conjetura de valor heurístico pudiera enunciarse: ¿Acaso la siembra de nubes sobre la cuenca del Cachapoal permite parcialmente contrarrestar factores ambientales que son detrimentales para la evolución natural de la precipitación?

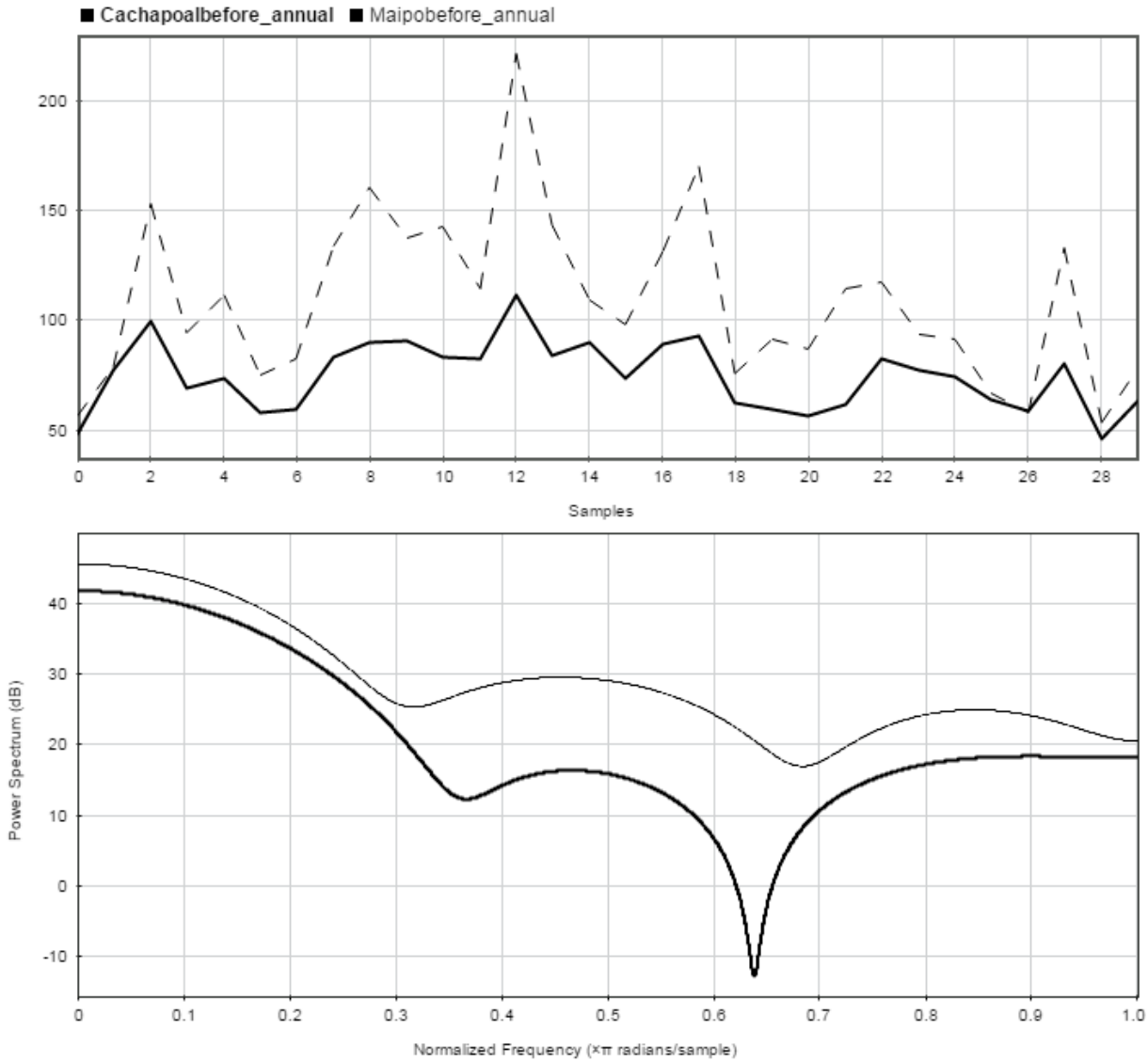


Figura C3: Series temporales y espectros de valores anuales (1970-1999): Cachapoal (negro fuerte) y MaipoLaObra (negro claro).

Nótese como el espectro de Maipo siempre tiene una amplitud mayor que el espectro de Cachapoal.

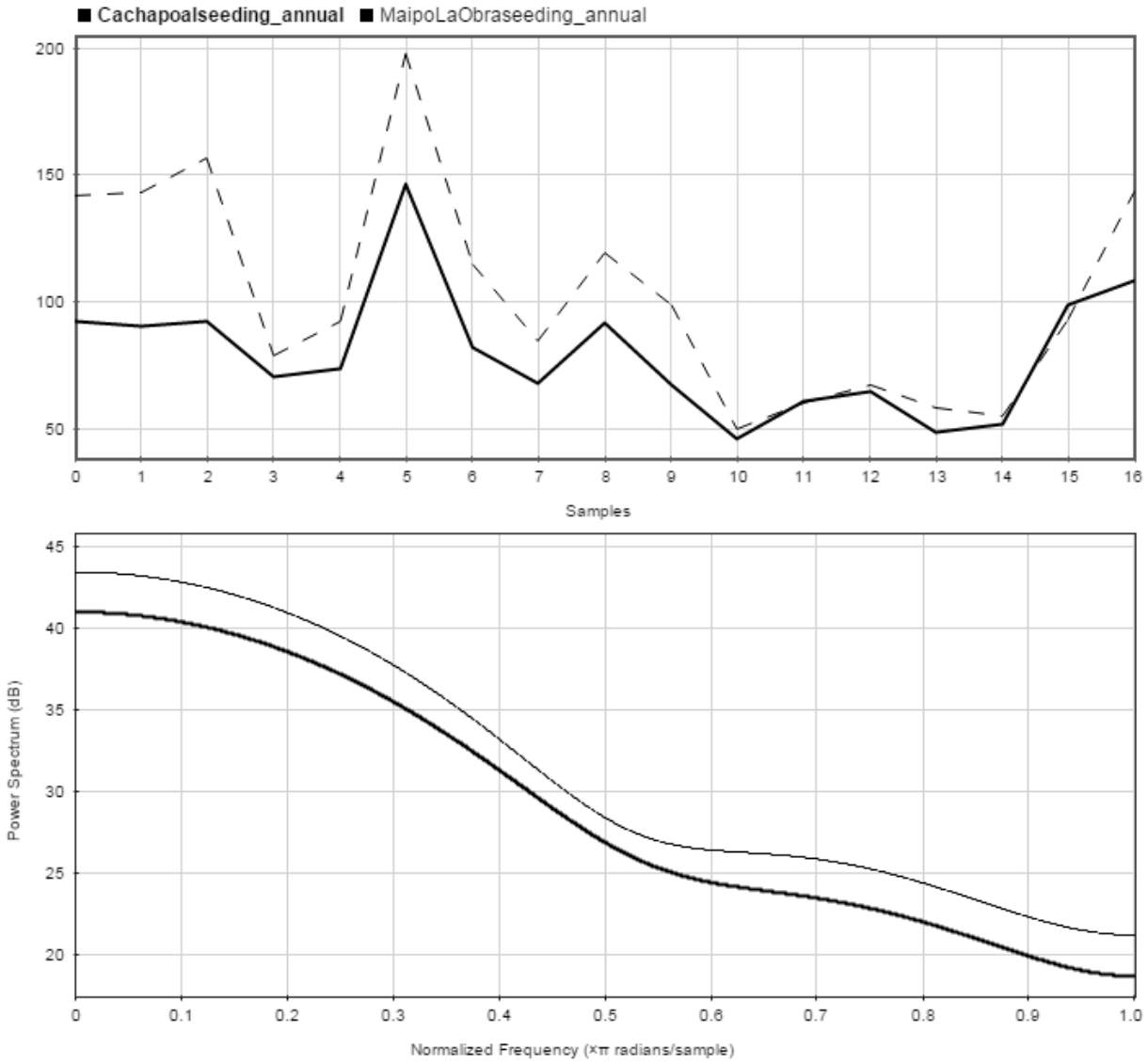


Figura C4: Series temporales y espectros de valores anuales (2000-2016): Cachapoal (negro fuerte) y MaipoLaObra (negro claro).

En esta última figura los dos espectros parecen más sincronizados, ¿acaso la siembra con yoduro de plata restaura un régimen natural perdido, y muy afectado por otros factores?

Agradecimientos a las juntas de vigilancia de los ríos Maipo, Cachapoal y Tinguiririca que facilitaron los datos originales, así como a la Dirección General de Aguas.

Junio 30, 2017