



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL**

**ANÁLISIS DE VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE SERIES DE CAUDALES DE  
LA VII A XI REGIONES**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,  
MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL**

**EDUARDO ALBERTO RUBIO ÁLVAREZ**

**PROFESOR GUIA:  
JAMES MCPHEE TORRES**

**MIEMBROS DE LA COMISION:  
XIMENA VARGAS MESA  
ANTONIO LARA AGUILAR**

**SANTIAGO DE CHILE  
2013**

## **RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL**

**TÍTULO DE:** Ing. Civil Hidráulico, Sanitario y Ambiental y grado de Ms. en Rec. Y Med. Ambiente Hídricos.

**POR:** Eduardo Rubio Álvarez

**FECHA:** 09/2013

**PROF. GUÍA:** Sr. James Mcphee T.

Los recursos hídricos superficiales que proceden desde el lado oeste de la cordillera, al sur del paralelo 33°S constituyen un eje fundamental en el insumo a la actividad agrícola e industrial de Chile, ofertando el agua potable de casi la mitad de la población y representando un 70% de la capacidad instalada de energía hidroeléctrica. Durante la pasada década, se ha creado una mayor conciencia en la comunidad científica respecto de la alta variabilidad interanual y a largo plazo que afectan a los regímenes de precipitación, temperatura y escorrentía. Por otro parte, estudios recientes muestran una tendencia significativa a la baja en la precipitación de muchas estaciones en todo el país, junto con el aumento de tendencias crecientes de la temperatura en la depresión intermedia de Chile y en las cabeceras. La tendencia decreciente en la precipitación es más pronunciada en estaciones al sur de los 38° S, y la tendencia de la temperatura muestra signos opuestos para las estaciones de la costa (negativos) y del valle (positivos). Estos cambios tanto en la precipitación como en la temperatura se reflejan en la escorrentía, por lo que se hace necesario el estudio de la variabilidad espacial y temporal de la misma.

Este trabajo se concentra en el estudio series de tiempo de caudal a nivel anual y estacional para 44 ríos en el centro y sur de Chile, repartidas en la eco-región entre los 34°S y 45°S para el periodo 1952-2003. El objetivo es el análisis espacial y temporal de la variable para toda la región y su relación con los siguientes índices climáticos (IC): Índice de Oscilación del Sur (SOI), El Niño Oscilación del Sur (ENSO), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y el índice de Oscilación Antártica (AAO). La variabilidad espacial es estudiada a través de un procedimiento de clúster orientado a definir patrones regionales de caudal, debido a la naturaleza puntual y no distribuida de la variable. Este análisis probó la existencia de dos patrones principales (norte y sur) divididos aproximadamente por el paralelo 37,5° S.

Para el estudio de la variabilidad temporal se aplicó una metodología basada en el análisis espectral orientado a destacar los ciclos no regulares. Primero se procede a la aplicación análisis singular espectral (SSA) con el propósito de encontrar las componentes representativas de los ciclos no regulares y para poder filtrar las series, remover el ruido y así potenciar las señales a detectar. Posteriormente se incorporó la aplicación de los métodos “Multitaper” (MTM) y “Máxima Entropía” (MEM) para encontrar y validar respectivamente aquellas periodicidades o ciclos interanuales y decadales. Estos métodos son escogidos dada su aplicabilidad para series con una longitud de registro limitada ( 50 años), lo que representa el caso de este estudio. Las periodicidades encontradas fueron de 2 (concentrado en verano), 4, 7 y 10 años.

También se encontraron correlaciones significativas con IC en diferentes escalas espaciales y temporales. La influencia con ENSO es más fuerte en el patrón norte, mientras que existe una correlación fuerte entre la AAO y la PDO con los flujos de verano del patrón sur. Además se encontraron tendencias decrecientes que afectan a la región entre los 37,5° S y 40° S. estas tendencias son coherentes con las tendencias decrecientes encontradas con la precipitación en esta área, y también con una tendencia decreciente encontrada en el SOI. Tanto las tendencias como los ciclos encontrados son estadísticamente significativos al 95%. Se espera que estos resultados provean información relevante para una correcta toma de decisiones en el contexto de una creciente demanda de agua para diversos usos, así como también, como una contribución a la comprensión general de los patrones climáticos de variabilidad en la costa del pacífico.

- *Los grandes líderes son aquellos capaces de inspirar la grandeza en otros.*
  - *Crear no es una cuestión sobre elección, sino de convicción.*
- *El camino a la sabiduría es sencillo cuando no estás segado por el ego.*
  - *El mayor constructor de confianza es la experiencia.*
- *Confía en tus amigos y así ellos tendrán una razón para confiar en ti.*
- *El camino para alcanzar la paz siempre vale la pena, independiente de cuantas vueltas tenga.*
  - *Falla con honor en vez de triunfar con fraude.*
  - *La arrogancia disminuye la sabiduría.*
- *La verdad ilumina la mente, pero no traerá siempre la felicidad a tu corazón.*
  - *El miedo es una enfermedad que se cura con esperanza.*
- *El compromiso es una virtud a cultivar, no una debilidad a despreciar.*
  - *Un secreto compartido es una verdad formada.*
  - *Una lección aprendida es una lección ganada.*
- *El exceso de confianza es la forma más peligrosa de descuido.*
  - *El primer paso para corregir un error es la paciencia.*
    - *Cree en tí mismo, o nadie más lo hará.*
  - *A veces, aceptar ayuda es mucho más difícil que ofrecerla.*
- *Es la misma búsqueda de honor lo que hace a uno honorable.*
  - *Fácil no siempre quiere decir simple.*
  - *Si ignoras tu pasado, pones en peligro tu futuro.*
  - *No temas por el futuro, no llores por el pasado.*
    - *Un líder sabio sabe cuándo obedecer.*
  - *Escoge lo que es correcto, no lo que es más fácil.*
- *Quien era mi padre importa menos que mi recuerdo de él.*
  - *La venganza es una confesión de dolor.*
  - *Donde hay voluntad, hay un camino.*
- *Un fallo en la planificación es un plan para el fracaso.*
  - *El amor viene en todas las formas y tamaños.*
  - *El miedo puede ser un gran motivador.*
- *El camino más rápido hacia la destrucción es a través de la venganza.*
  - *El mal no nace, se enseña.*
- *El equilibrio se encuentra en el que se enfrenta a su culpabilidad.*
  - *El que se entrega a la esperanza, se entrega a la vida.*
- *El que trata de controlar el destino nunca encontrará la paz.*
  - *La adaptación es la clave para sobrevivir.*
  - *La esencia de una persona es invisible a los ojos.*
  - *El camino de la ignorancia es seguido del miedo.*
  - *El hombre sabio lidera, mientras el fuerte lo sigue.*
    - *Nuestras acciones definen nuestro legado.*
    - *La amistad nos muestra lo que realmente somos.*
- *Hay que dejar de lado el pasado para mantenerse en el futuro.*
  - *Buscar algo es creer en su posibilidad.*
  - *Aquél que se enfrenta a sí mismo, se encuentra a sí mismo.*
- *Cuando rescatamos a otros, nos rescatamos a nosotros mismos.*
  - *La humildad es la única defensa en contra de la humillación.*
- *Algunas veces la menor de las dudas puede sacudir la más poderosa de las verdades.*
  - ***Nunca pierdas la esperanza, no importa cuán oscuras parezcan las cosas.***

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mi familia, a mi tío Pato por su ejemplo de responsabilidad y por su increíble disposición a levantarse temprano. A mi Flaquita, ejemplo de lucha constante, de paciencia infinita conmigo, y por quererme como a un hijo desde que llegué a este mundo. Agradecer a mi Pochita, mi mamá, porque a ella le debo mi gusto por la cocina, el tiempo que tengo que tomar antes de decir algo, a fijarme tanto en la forma como en el mensaje mismo, a entender que la vida es cíclica, estás bien, estás mal, pero al final de cada noche, siempre termina saliendo el sol, le agradezco su amor y paciencia infinita conmigo, así como sus reportes telefónicos constantes y los “twitters” en vivo y en directo que me comunica cuando pasa algo en el mundo. Por último, a ti Papá, que nos miras desde arriba, decirte que esto es para ti y para mamá, que no tengo palabras que expresen cuanto te amo y cuanto te extraño, que cada día te veo a mi lado y pido ser al menos la mitad del magnífico ser humano que fuiste, a ti mi cómplice, sigue dándonos fuerza y amor. A mi tío Titin, mi tía Jani, y mis queridos primos Ale (Negro) y Paula (Negrita). Les deseo unidad siempre. A mi hermana querida, Marcela Villagrán, apoyo fundamental cuando el camino era oscuro y solitario. A mi hermoso ahijado chico, El Vicente, y a la Cote.

A mis eternos amigos del colegio: Jorge T (Lole), Nelson A., Oscar dII., José S., Chico G, Mono, Andrés G, Carlos G, Mauricio Duarte, mi ahijado querido, a F. Duarte, ejemplo de superación. A mi tío Jorge y a mi tía María Teresa, papás del Lole, por quererme como a un hijo más, y darme inolvidables momentos de felicidad.

A mi segunda familia, CROSS. No saben realmente lo importante y fundamental que son ustedes en mi vida. No podría haber pedido a la vida un grupo de amigos mejor que ustedes. Han estado a mi lado en los momentos en que me he sentido más perdido en la vida, y cuando pensé que ya nada valía la pena, ustedes me devolvieron a la vida. Gracias Negro, por tu cariño infinito, tu sinceridad y tu fantasía, por ser el primero que empezó. Sebastián, Senén, de verdad que no podría haber pedido mejores hermanos, gracias, de verdad gracias por todo. José, gracias por tu humildad y tu ejemplo constante que la sabiduría no viene de la mano con la arrogancia. Rodrigo, gracias por tu apoyo constante y disculpa el distanciamiento. Isa querida, amiga del alma, con la cuál compartimos la manera de amar a la gente, gracias por enseñarme a sacarme los prejuicios. Daniel, donde sea que estés, gracias por tu autenticidad. A mi nuevo “bro” Juan Lalo, por enseñarme a que debe importarme un comino lo que la gente opine de cómo bailo, “Que la fuerza te acompañe siempre”. Finalmente a los nuevos integrantes de la familia: Felipe, la Carito, Dámari, Katty, Sarita, Joaquín Tomás, Jazmín, Carmen, Giani y Roger, cuiden mucho a mis cabros. A Laura, la Tia Pily y a Guildreams por todos los bellos momentos que compartimos.

A mis queridos amigos de carrera: Camila, gracias por tu paciencia y cariño. Pablo M, un melómano crack, gracias por tu humildad y oreja. Feña y Juan Pablo, mis amiguis, gracias por sus concejos y cariño. Claudia, Shaggy y Laurita, por ser personas simplemente tan bellas. René (y Barbies), Diegoku, Carlitos, gracias por los partidos de PES, los cuáles dejé que ganaran para aumentarles su moral. Miguel, Álvaro, Gonzalo, Braulio, gracias por hacer la office un lugar agradable para trabajar. Abelardo, Carito E, gracias por su amistad incondicional. A Perro, Huaipe, Chago y Chirleys, Manuel y Juan, por los cafés y los asados de primer nivel. Al Javi Acosta y Seiya Carmona, por su apoyo incondicional en momentos de oscuridad.

Al Sr. James McPhee, por su inagotable fe y paciencia con mi persona, aun cuando no la merecía. Gracias por los desafíos y por su ayuda en este trabajo y por las diferencias de opinión de las cuáles saqué lecciones importantes. A la Sra. Ximena Vargas, por guiarme y entenderme, por darme una oportunidad, por preocuparse de mí, cuando yo no podía, por darme trabajo, y por presentarme a James. Al Sr. Antonio Lara, por presentarme Valdivia, y al equipo de trabajo más buena onda de la UACH (Little, Paz, Rocío y Duncan). Al Sr. A. Tamburrino por conseguirme mis papers para la tesis; al Sr. Y. Niño, la Tati y al Etan por no rendirse nunca. Al Sr. I. Bejarano, H. Arellano y E. Cordaro por sus concejos y guía en mi carrera.

A Mauricio y Rodrigo, por su paciencia, energía, amistad, apoyo, sueños, ilusiones, problemas, soluciones, sin ustedes, esto no se acaba nunca. Gracias por el desafío que es Eridanus. Algún día les diré a Emilio y Matías lo orgulloso que me siento de contar con ustedes. A la Dani, por todas sus “pelás” de cables psicológicas gratuitas. Escucharte siempre es bueno.

A Gabriel Castro, Don Ernesto Brown, Don Raúl Demangel, Don Tito Menchaca, Luis Huerta, Leo Ibarra, Pitu, Pato Valck, C. Reiher, M. Barahona, M. Gibbs, M. Gallegos, A. Torrent mil gracias por darme la oportunidad de trabajar con ustedes. A mi querida Universidad, por educarme y por dejarme trabajar en ella, a todos, gracias totales.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<i>i</i>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Contexto de la investigación</b> .....	<b>2</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>2</b>
1.2.1 Objetivo general .....	2
1.2.2 Objetivos específicos .....	2
<b>1.3 Organización del documento</b> .....	<b>3</b>
<b>2 METODOLOGÍA</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1 Construcción y validación de la base de datos de caudales</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2 El análisis espacial</b> .....	<b>8</b>
2.2.1 Tratamiento preliminar de la información. ....	8
2.2.2 Análisis de clúster. ....	9
<b>2.3 El análisis temporal</b> .....	<b>11</b>
<b>3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES</b> .....	<b>14</b>
<b>4 BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>16</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>A.1</b>
<i>Anexo A Metodología de relleno de información fluviométrica</i> .....	<i>A.2</i>
<i>Anexo B Índices Climatológicos</i> .....	<i>B.8</i>
<b>B.1 ENSO “El Niño-Southern Oscillation”</b> .....	<b>B.8</b>
<b>B.2 SOI: Southern Oscillation Index</b> .....	<b>B.9</b>
<b>B.3 PDO: Pacific Decadal Oscillation</b> .....	<b>B.9</b>
<b>B.4 AAO: Antarctic Oscillation</b> .....	<b>B.10</b>
<i>Anexo C Publicación</i> .....	<i>C.10</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Indicadores de calidad de información para las 44 estaciones seleccionadas. ....	6
Tabla 2.2: Resumen de los indicadores de calidad de la información. ....	7
Tabla 2.3: Valores del índice Cophenet para el análisis de consistencia del árbol de jerarquía para distintas normas y métodos de agrupación. ....	10

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Teleconexiones documentadas para ENSO (Ghil et al, 2002). Se puede apreciar que para la costa pacífica: “La información de las estaciones es insuficiente para el análisis” .....	2
Figura 2.1: Curva Doble Acumulada (CDA) para las estaciones Río Cautín en Almagro (izq) y Río Cautín en Rari-Ruca (der). ....	5
Figura 2.2: Diagnóstico de calidad de información según latitud (°). ....	5
Figura 2.3: Análisis de clúster para los diferentes grupos adoptados a una escala anual. ....	12

## 1 INTRODUCCIÓN

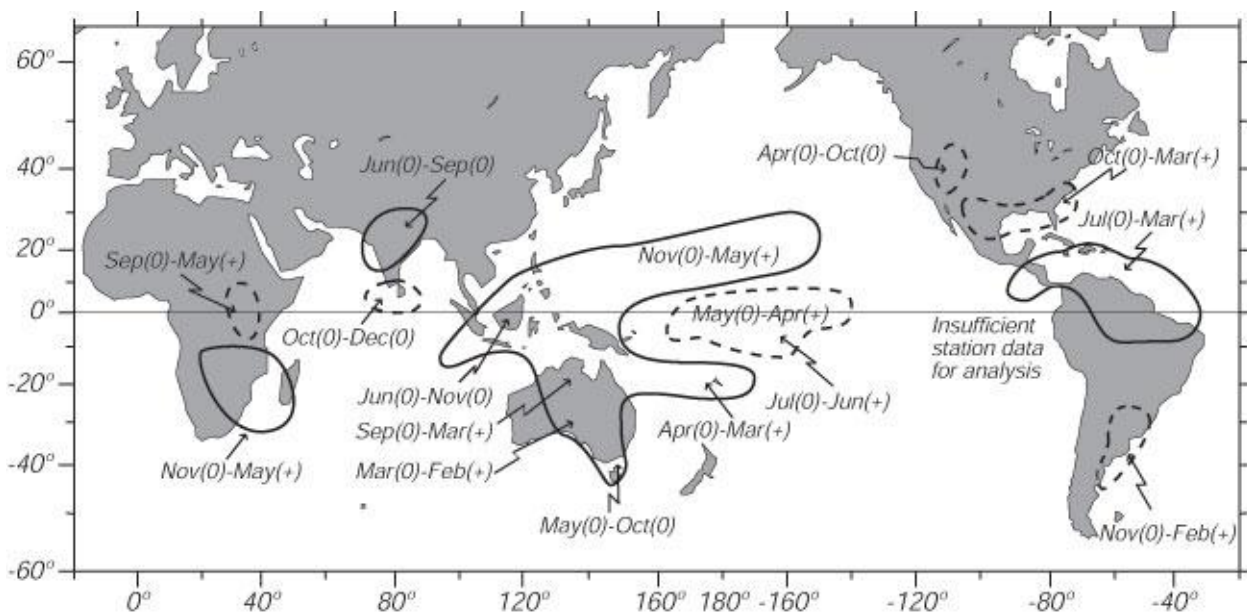
Los recursos hídricos que fluyen al oeste de la cordillera de los Andes al sur del paralelo 33° Lat. Sur constituyen la piedra angular para las actividades agrícolas e industriales de Chile, la oferta de agua potable para más del 50% de la población, y representan aproximadamente el 70% de la capacidad instalada en generación hidroeléctrica [Peña *et al.*, 1999]. Debido a esta ubicación única, entre la Cordillera de los Andes y el océano Pacífico, el régimen hidrológico de los ríos está altamente influenciado por el clima de la región con una variabilidad interanual muy cercana a la de la precipitación y con la temperatura como control de la acumulación nival y de los procesos de derretimiento en la Alta Cordillera.

A su vez, la mayor parte de la precipitación sobre el centro y sur de Chile se produce en Otoño, en los meses de Junio, Julio y Agosto (JJA), cuando los sistemas frontales derivados de las tormentas antárticas alcanzan las latitudes más bajas. Durante la pasada década, se ha acrecentado la preocupación entre la comunidad científica y de la ingeniería respecto de la alta variabilidad interanual y a largo plazo que afecta a los regímenes de precipitación y temperatura. Estudios recientes muestran una tendencia decreciente para la precipitación para muchas estaciones de medición a lo largo del país, en conjunto con tendencias crecientes en temperatura para esas estaciones localizadas en el valle central y el piedemonte de Chile. Esta tendencia a la baja en la precipitación es más pronunciada al sur del paralelo 38° Lat. Sur, mientras que la temperatura muestra signos opuestos para la costa (negativo) y al interior (positivo) para las estaciones con registro. [Comisión Nacional de Medio Ambiente, 2007; Pezoa, 2003].

En este trabajo se evalúa el grado en que las tendencias documentadas en la variabilidad climática afectan el régimen hidrológico de los ríos en Chile en la región definida entre los paralelos 34° y 45° Lat. Sur al oeste de la Cordillera de los Andes. Esta es la primera vez en la que un completo y amplio conjunto de datos (a nivel espacial y temporal) de escorrentía es ensamblado y analizado para esta región geográfica y construido sobre una serie de estudios que han mejorado la comprensión de las influencias climáticas generales sobre el cono sur de Sur América [e.g., Aravena and Luckman, 2009; Lara *et al.*, 2008; Masiokas *et al.*, 2006, 2008; Villalbalba *et al.*, 2003].

Se espera que la precipitación tenga una fuerte influencia en la variabilidad interanual, pero los efectos combinados de los gradientes de temperatura y la fisiografía debería introducir una complejidad adicional para las cuencas de régimen mixto, la cual se intenta descubrir mediante el análisis sistemático de una gran base de datos de registros revisados y validados de caudal.

Se espera que los patrones espaciales encontrados puedan ser un aporte al conocimiento de la variabilidad del caudal para la zona y que el análisis de la variabilidad temporal permita explicar la relación del caudal con índices climáticos de gran escala como el Índice de Oscilación del Sur (SOI), El Niño Oscilación del Sur (ENSO), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y el índice de Oscilación Antártica (AAO). Dicha relación aún no ha sido completamente estudiada (Figura 1.1) producto de la escasez de información de registros consolidados y confiables [Ghil *et al.*, 2002; Ropelewski., 1986].



**Figura 1.1: Teleconexiones documentadas para ENSO (Ghil et al, 2002). Se puede apreciar que para la costa pacífica: “La información de las estaciones es insuficiente para el análisis”**

## 1.1 Contexto de la investigación

Esta tesis se enmarca en el desarrollo del Proyecto “FONDECYT” #1050298. Este proyecto comenzó en el año 2005 y fue desarrollado en conjunto con el Departamento de Silvicultura de la Universidad Austral de Chile, en particular, con la Fundación Centro de los Bosques Nativos FORECOS, cuyo líder es el profesor Sr. Antonio Lara.

Desde un comienzo se estipuló que el resultado de la investigación efectuada debía canalizarse a través de una publicación científica, que finalmente fue aceptada el 14 de Diciembre del 2009 y publicada el 14 de Mayo del 2010 en la revista “Water Resources Research”.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Evaluar la variabilidad espacial y temporal de los caudales a una escala interanual y decadal, basado en los registros disponibles para los últimos 50 años y determinar las relaciones de los caudales con la precipitación y la temperatura a partir de estos registros.

Este objetivo corresponde a una de las metas del Proyecto “FONDECYT” #1050298, mencionado en el contexto.

### 1.2.2 Objetivos específicos

1. Construir una base de datos de caudales robusta y consistente a escala mensual y efectuar un análisis de la calidad de la información presente.



2. Construir o encontrar, mediante la aplicación de técnicas de análisis espacial, agrupaciones de estaciones de caudales, de manera de construir un indicador (es) o patrón (es) representativo (s) de la zona de estudio.
3. Efectuar un análisis de variabilidad temporal con el objetivo de determinar las frecuencias dominantes de los patrones espaciales escogidos.
4. Encontrar las teleconexiones que ayuden a la comprensión del comportamiento de los patrones encontrados en (2).

### **1.3 Organización del documento.**

Este documento ha sido elaborado con el objetivo de ser un complemento al producto final de este trabajo, que corresponde al artículo publicado en la revista “Water Resources Research”, por lo que se intenta no repetir los contenidos que se detallan en el mismo. Se divide en los siguientes capítulos:

En el capítulo 1 se presenta la introducción y objetivos de este trabajo.

El capítulo 2 presenta una breve metodología general de cómo se realizó esta investigación y del trabajo adicional llevado a cabo y que no fue incluido en el artículo elaborado por Rubio y McPhee (2010), que detalla los aspectos metodológicos del trabajo realizado.

El capítulo 3 presenta conclusiones y recomendaciones derivadas de este trabajo.

En los anexos se incluyen la metodología de construcción de la base de datos de caudales, una descripción de los índices climáticos y el artículo sobre patrones espaciales y temporales publicado en donde se detallan los resultados de la investigación.

## 2 METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo puede dividirse en los siguientes hitos:

1. Construcción y validación de una base datos de caudales: Este hito tiene por objetivo aplicar técnicas de homogenización y control de consistencia de la información sobre las estaciones fluviométricas disponibles para la zona de estudio.
2. Análisis Espacial: el objetivo de este hito es la generación de patrones espaciales mediante la aplicación de técnicas de agrupación espacial, en este caso análisis de clúster, que permitan agrupar conjuntos de estaciones que posean un comportamiento hidrológico o climático similar.
3. Análisis Temporal: En este hito se analizan las series de tiempo generadas de los patrones espaciales encontrados en (2). Se analiza la existencia de tendencias y periodicidades de ciclos no regulares estadísticamente significativos y su relación con los índices climáticos: SOI, AAO, PDO y ENSO para diferentes agrupaciones estacionales (verano, invierno, etc.).

A continuación se describen cada uno de los hitos o fases de este trabajo.

### 2.1 Construcción y validación de la base de datos de caudales

El procedimiento de construcción de la base de datos puede resumirse en las siguientes 4 etapas.

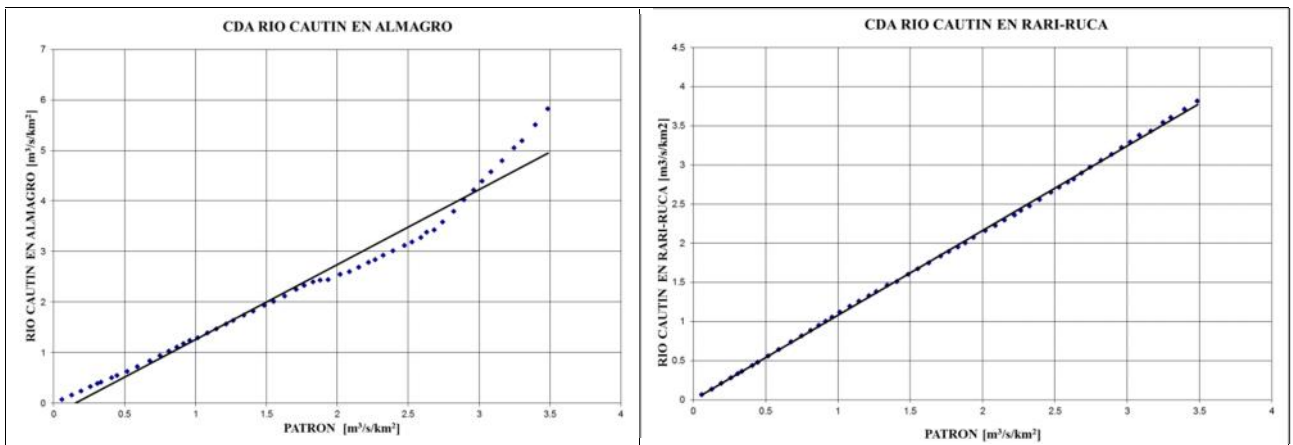
- i. Recopilación de información fluviométrica para la zona de estudio (VII a XI regiones).

Este primer proceso recopiló 88 estaciones fluviométricas en resoluciones diarias y mensuales y con longitud de registro variables.

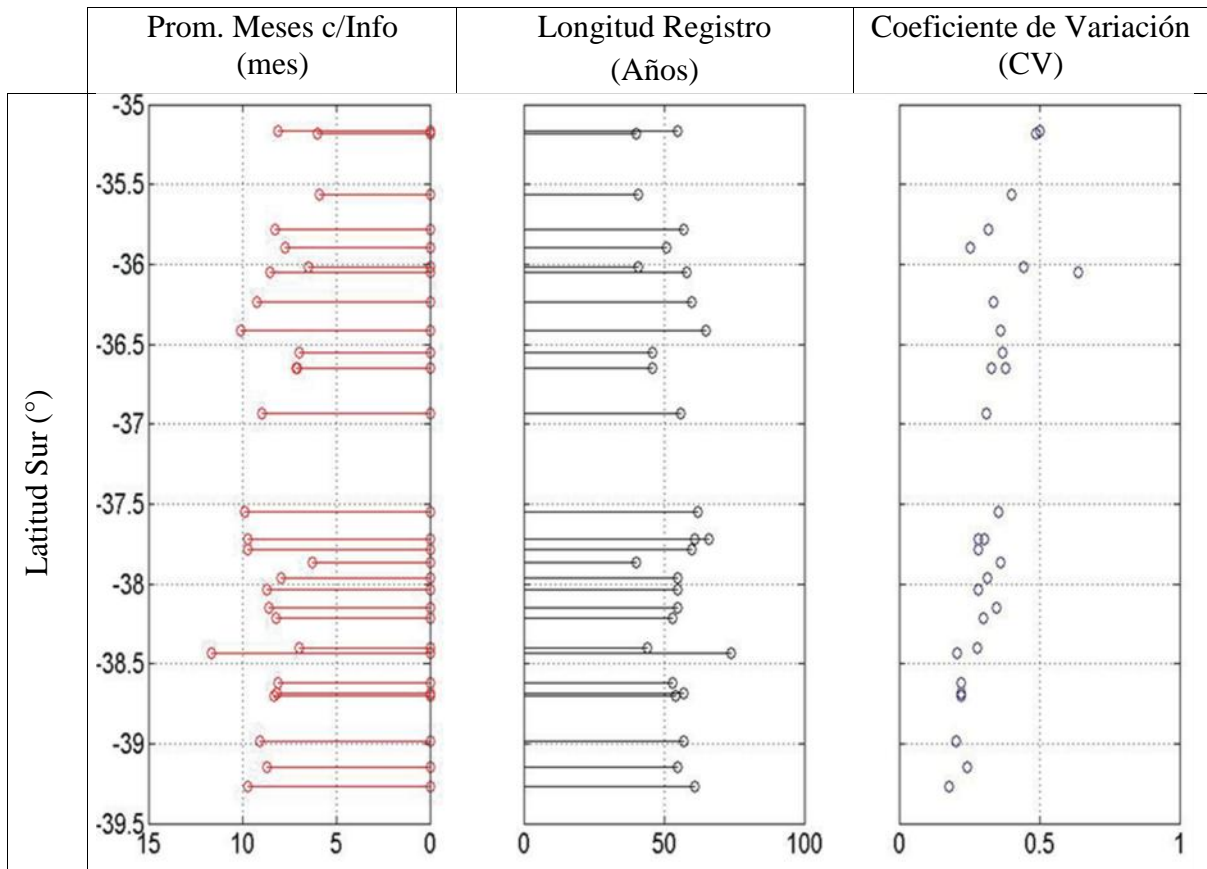
- ii. Análisis de consistencia de estaciones fluviométricas.

En este proceso se analizó la calidad de los registros de las estaciones recopilados para cada región. Con las estaciones de registro más completo se construyó un patrón representativo de la región y posteriormente se construyeron las curvas de doble masa (o doble acumuladas: CDA) para analizar y chequear la consistencia de la información de cada estación. La Figura 2.1 muestra un ejemplo de CDA generadas para la IX Región. Se presenta una estación escogida por su consistencia (Río Cautín en Rari-Ruca) y otra descartada en la revisión (Rio Cautín en Almagro).

El diagnóstico general de la información (Figura 2.2) permitió concluir que el promedio de meses por año con información, si bien varía de estación a estación, tiene un promedio de 9 a 10 meses y la longitud promedio del registro va desde los 40 a los 55 años de información. Los vacíos de información están concentrados entre los años 1967 – 1970 y 1972-1975. El segundo período corresponde a los años en que Chile estaba afectado por complejos momentos políticos y sociales que derivaron en que muchas instituciones públicas suspendieran o vieran afectadas su funcionamiento normal.



**Figura 2.1: Curva Doble Acumulada (CDA) para las estaciones Río Cautín en Almagro (izq) y Río Cautín en Rari-Ruca (der). Valores normalizados por el área de la cuenca aportante según estación y área del patrón formado para la IX Región.**



**Figura 2.2: Diagnóstico de calidad de información según latitud (°). Promedio de meses con información en registro (Izq). Longitud del registro en años (Cen). Coeficiente de Variación (Der).**

iii. Relleno de estaciones consistentes.

Uno de los requisitos del equipo de investigación del proyecto FONDECYT era evitar la transferencia de información de estación a estación, pues esto podía incurrir en forzar conexiones entre estaciones que no necesariamente estaban relacionadas. Es por esto que se diseñó una metodología de relleno que permitía completar la información faltante de cada estación minimizando la transferencia de información entre estaciones, de tal manera de evitar la generación de patrones espaciales ficticios. Dicha metodología se describe en el Anexo A.

iv. Validación de la base de datos.

Luego de efectuado los rellenos, cada dato fue revisado cautelosamente. Producto de los objetivos multidisciplinarios del proyecto FONDECYT, era necesario asegurar que cada dato relleno fuese consistente y robusto. En algunos casos, se consultó la hoja de vida de las estaciones fluviométricas en el Departamento de Hidrología de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas. Esto permitió revisar antecedentes tales como: cambios en curvas de descarga, cambios en secciones de aforo, mantenimiento de los equipos de medición, cambio de los equipos, vacíos de información, etc., que contribuyeron a la solidez de la base de datos generada.

Luego de completar exitosamente los 4 hitos descritos anteriormente se llegó a un total de 44 estaciones fluviométricas debidamente validadas para iniciar los análisis espaciales y temporales. Dichas estaciones son presentadas en el artículo elaborado por Rubio & McPhee (2010). La Tabla 2.1 resume los principales indicadores de calidad de información obtenidos del análisis, mientras que la Tabla 2.2 presenta un resumen de la variabilidad de dichos indicadores.

**Tabla 2.1: Indicadores de calidad de información para las 44 estaciones seleccionadas.**

N°	Nombre Estación	Lat. (°)	Long. (°)	L.R (años)	Meses s/info.	Prom. Meses c/info/año	CVE	% Vacíos
1	RIO PERQUILAUQUEN EN SAN MANUEL	-36.42	-71.50	65	34	11.48	0.40	4%
2	RIO LONGAVI EN LA QUIRIQUINA	-36.23	-71.47	60	38	11.37	0.33	5%
3	RIO ANCOA EN EL MORRO	-35.90	-71.30	51	42	11.18	0.25	7%
4	ESTERO UPEO EN UPEO	-35.18	-71.10	40	38	11.05	0.49	8%
5	RIO MAULE EN LONGITUDINAL	-35.57	-71.72	41	58	10.59	0.36	12%
6	RIO CLARO EN CAMARICO	-35.17	-71.38	55	63	10.85	0.52	10%
7	RIO PERQUILAUQUEN EN QUELLA	-36.02	-72.38	41	12	11.71	0.43	2%
8	RIO CAUQUENES EN EL ARRAYAN	-36.05	-72.08	58	64	10.90	0.62	9%
9	RIO PUTAGAN EN YERBAS BUENAS	-35.78	-71.58	57	72	10.74	0.30	11%
10	RIO LIRQUEN EN CERRO EL PADRE	-37.78	-71.87	60	3	11.95	0.28	0%
11	RIO DUQUECO EN VILLUCURA	-37.55	-72.03	62	15	11.76	0.35	2%
12	RIO MULCHEN EN MULCHEN	-37.72	-72.25	66	75	10.86	0.30	9%
13	RIO BUREO EN MULCHEN	-37.72	-72.23	61	13	11.79	0.30	2%
14	RIO MALLECO EN COLLIPULLI	-37.97	-72.43	55	72	10.69	0.32	11%
15	RIO ÑUBLE EN LA PUNILLA	-36.65	-71.37	46	26	11.43	0.30	5%
16	RIO CATO EN PUENTE CATO	-36.55	-72.05	46	38	11.17	0.37	7%
17	RIO DIGUILLIN EN SAN LORENZO (ATACALCO)	-36.93	-71.57	56	11	11.80	0.30	2%

N°	Nombre Estación	Lat. (°)	Long. (°)	L.R (años)	Meses s/info.	Prom. Meses c/info/año	CVE	% Vacíos
18	RIO MININCO EN LONGITUDINAL	-37.87	-72.40	40	15	11.63	0.32	3%
19	RIO ITATA EN Balsa Nueva Aldea	-36.65	-72.45	46	30	11.35	0.38	5%
20	RIO TOLTEN EN VILLARICA	-39.27	-72.23	61	13	11.79	0.20	2%
21	RIO PUYEHUE EN QUITRATUE	-39.15	-72.67	55	16	11.71	0.26	2%
22	RIO PUREN EN TRANAMAN	-38.03	-73.02	55	16	11.71	0.28	2%
23	RIO LUMACO EN LUMACO	-38.15	-72.90	55	27	11.51	0.34	4%
24	RIO CAUTIN EN RARI-RUCA	-38.43	-71.98	74	25	11.66	0.27	3%
25	RIO MUCO EN PUENTE MUCO	-38.62	-72.42	53	36	11.32	0.22	6%
26	RIO CAUTIN EN CAJON	-38.70	-72.52	54	34	11.37	0.23	5%
27	RIO ALLIPEN EN LOS LAURELES	-38.98	-72.23	57	12	11.79	0.21	2%
28	RIO TRAIGUEN EN VICTORIA	-38.22	-72.32	53	30	11.43	0.32	5%
29	RIO QUEPE EN VILCUN	-38.68	-72.23	57	80	10.60	0.22	12%
30	RIO QUILLEN EN GALVARINO	-38.40	-72.78	44	11	11.75	0.26	2%
31	BUENO EN RÍO BUENO	-40.22	-72.97	45	84	10.13	0.13	16%
32	RÍO CRUCES EN RUCACO	-39.57	-72.92	36	10	11.72	0.25	2%
33	RÍO FUI ANTES DESAGUE NELTUME	-39.82	-72.00	25	3	11.88	0.18	1%
34	FUI EN DES. LAGO PIRIHUEICO	-39.87	-71.90	54	10	11.81	0.26	2%
35	FUI ARRIBA EL SALTO	-39.87	-71.92	42	55	10.69	0.24	11%
36	FUI BAJO JUNTA TRUFUL	-39.85	-71.97	23	12	11.48	0.18	4%
37	HUANEHUE EN DESAGUE L. CALAFQUEN	-39.53	-72.12	42	3	11.93	0.16	1%
38	HUM HUM EN LA FRONTERA	-40.08	-71.68	28	9	11.68	0.27	3%
39	HUM HUM EN DES. L. PIRIHUEICO	-39.87	-71.90	42	5	11.88	0.21	1%
40	LIPINZA EN LAS SALERAS	-39.95	-71.68	26	4	11.85	0.18	1%
41	NELTUME EN DES L. NELTUME	-39.82	-72.02	49	48	11.02	0.16	8%
42	SAN PEDRO EN DESAGUE LAGO RIÑIHUE	-39.77	-72.47	39	18	11.54	0.27	4%
43	PUELO EN CARRERA BASILIO	-41.62	-72.25	56	2	11.96	0.17	0%
44	MAÑIHUALES ANTES JUNTA SIMPSON (MJS)	-45.40	-72.47	43	5	11.88	0.19	1%

Dónde:

L.R: Longitud de Registro (años).

Meses s/info: Meses sin información dentro del período de registro.

Prom. Meses c/info/años: Promedio de meses con información medida por año de registro.

CVE: Coeficiente de variación de la estación fluviométrica.

% Vacíos: Porcentaje de los meses sin información del total de meses registrados.

**Tabla 2.2: Resumen de los indicadores de calidad de la información.**

Estadístico	L.R (años)	Meses sin info.	Prom. Meses c/info/año	CVE	% Vacíos
<b>Promedio</b>	49.41	29.25	11.42	0.28	0.05
<b>Mínimo</b>	23.00	2.00	10.13	0.13	0.00
<b>Máximo</b>	74.00	84.00	11.96	0.62	0.16
<b>Desv. Est.</b>	11.34	24.00	0.46	0.10	0.04
<b>CV</b>	0.23	0.82	0.04	0.35	0.79

Tal como se puede apreciar el promedio de años de registro es de 49.4 años, pero se aseguró un período de 50 años para cada estación para el análisis espacial y temporal, esto es, desde el año 1952 hasta el año 2003. El promedio de meses sin información es de 30 meses aproximadamente (2.5 años). Sin embargo este valor no da cuenta de dónde se producen los vacíos, éstos pueden ser erráticos o bien, en algunos casos, ser consecutivos. En general, se observó que el período de 1967 – 1974 fue el más sensible a los vacíos de información, independiente de la región analizada. En este período es factible encontrar años consecutivos sin información pero, después del año 1974, los vacíos están repartidos de manera más errática. Con el objetivo de entender dicho comportamiento se realizó una visita a los profesionales del Departamento de Hidrología del Ministerio de Obras Públicas de Chile, los cuales informaron que la mayor cantidad de los vacíos estaban relacionados con la ocurrencia de eventos extremos que destruyen la instrumentación, producen cambios en las secciones de aforo y requieren de tiempo para poder normalizar su funcionamiento. Adicionalmente las estaciones tienen períodos de mantenimiento, pero esto sólo afectaría algún valor asociado al caudal medio diario. En algunos casos, los fallos provienen de las dificultades de acceder a las estaciones para rescatar las mediciones o las dificultades mismas que tienen los encargados de revisión y mantenimiento por cuanto deben abarcar una vasta red con muy poco personal. Esto produce retrasos en la entrega y publicación de la información.

## **2.2 El análisis espacial.**

Con la base de datos completada y correctamente validada, se procedió a determinar 3 series de tiempo para cada estación fluviométrica de acuerdo a las 3 escalas de tiempo adoptadas para este análisis:

- i) Escala Anual: Para evaluar la variabilidad en la disponibilidad total de la escorrentía.
- ii) Escala de Invierno: Para evaluar la variabilidad de la contribución del régimen de precipitaciones. Esta comprende los meses de Abril a Septiembre.
- iii) Escala de Verano: Para estudiar la variabilidad de disponibilidad en el período más crítico del año. Esta queda comprendida entre los meses de Enero a Marzo.

Dentro de las diversas técnicas que existen para efectuar este análisis, se trabajó originalmente con 2: El análisis de componentes principales y el método de clúster. Sin embargo, dada la naturaleza puntual de la variable escorrentía, al contrario de la precipitación, de naturaleza distribuida, se concluyó que la aplicación del método de componentes principales no era adecuada.

### **2.2.1 Tratamiento preliminar de la información.**

Independiente del método a aplicar, es un requisito la utilización de variables estandarizadas, debido a las siguientes razones:

- i) La normalización de los caudales: Centrar cada vector con respecto a su media permite adoptar un mismo orden de magnitud para todas las estaciones y hacerlas comparables.

- ii) La estandarización: Dividiendo cada vector de caudales por su respectiva varianza, permite integrar el efecto que tienen los distintos pulsos de precipitación en la escorrentía.
- iii) La alta variabilidad climática de la zona de estudio: Esto puede entenderse en 2 características importantes:
  - a. La zona de estudio posee una forma en que en el sentido del eje mayor se producen grandes cambios climáticos producto de los grandes cambios de latitud, favoreciendo los distintos regímenes de precipitación y temperaturas propios del sur de Chile.
  - b. En el eje menor, de acuerdo a la longitud, los ríos cambian fuertemente de regímenes nivales en cordillera hasta pluviales en su desembocadura.

Esto permite definir los patrones espaciales de caudal de manera adecuada. Para cada patrón espacial encontrado se define un índice regional, el cual es calculado como el promedio entre las anomalías de caudales de las estaciones que definen a dicho patrón.

### **2.2.2 Análisis de clúster.**

Debido a que el caudal es una variable en sí puntual y no distribuida como lo son la precipitación y la temperatura, las técnicas de análisis espacial, como por ejemplo, el análisis de componentes principales (ACP), no resultan adecuadas. El análisis con “clúster” se ha aplicado a este problema dado que se tienen realizaciones de una misma variable, en distintos lugares del espacio. Cada estación representa un vector con su respectiva escorrentía a lo largo del tiempo. Mediante el cálculo de las “normas” de estos vectores se va comparando, estación por estación, el grado de pertenencia o cercanía que existe con respecto a un clúster ya existente. Cuando se decide que las estaciones son lo bastante “cercanas” estas se agrupan en un conjunto. Luego este conjunto se va comparando sucesivamente con el resto de las estaciones existentes. Esto permite que estaciones que de por sí se rigen por un mismo patrón climático se agrupen en un mismo conjunto, permitiendo asociar las estaciones que se comportan siguiendo algún patrón general de control.

En la medida que el método va procesándose, se va generando un árbol de jerarquía, en donde al final del procedimiento todas las estaciones se encuentran agrupadas. El problema consiste en decidir en qué parte, dentro del procedimiento de agrupación anterior, se debe tomar la decisión de detener las asociaciones. La literatura no es determinante al adoptar un criterio de parada para el método. *Fovell* (1993) cita que mediante una prueba de Montecarlo es posible determinar la distancia a la cual es significativo seguir o no uniendo conjuntos. Por otro lado *Wilks* (2005) explica que cuando se lleva a cabo este proceso, es posible construir el grafo entre la distancia a la cual se producen las uniones entre los conjuntos v/s el número de estaciones agrupadas en el proceso. El punto en el cual se presenta un quiebre o un cambio abrupto de pendientes definirá la distancia a la cual el método debe detenerse y por ende obtener como resultado la cantidad de agrupaciones que hasta ese momento se presenten. Si bien se puede pensar que este criterio involucra una subjetividad, dado que depende del investigador decidir o no si este “cambio” se produce, se observó que en la mayoría de las realizaciones del método es posible detectar claramente esta diferencia. Además se debe tener en consideración que el número de conjunto a adoptar también obedece a razones físicas y deben estar de acorde también a la realidad climática de la zona de estudio.

Se testearon tres métodos de unión entre los clúster (Singular<sup>1</sup>, Promedio y Peso Ponderado<sup>2</sup>), y seis normas documentadas en la literatura (Euclidiana, Euclidiana estandarizada, Mahalanobis, Cuadra de ciudad<sup>3</sup>, Minkowski y Correlación). Se compararon los resultados mediante la observación del árbol de jerarquía de cada método, como también del índice de Cophenet, el cuál mide el grado de consistencia y relación presente en cada realización. Estos resultados se presentan en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3: Valores del índice Cophenet para el análisis de consistencia del árbol de jerarquía para distintas normas y métodos de agrupación.**

Norma	Método de Clúster.		
	Singular	Promedio	Ponderado WPGMA
<b>Euclidiana (ED)</b>	0.8073	0.8122	0.7737
<b>ED Estandarizada</b>	0.802	0.8062	0.7679
<b>Mahalanobis</b>	NAN	NAN	NAN
<b>Cuadra Ciudad</b>	0.7796	0.8076	0.7846
<b>Minkowski</b>	0.8004	<b>0.8552</b>	0.7288
<b>Correlación</b>	0.7937	0.7868	0.7371

De la tabla anterior se aprecia que el valor de índice de Cohenet más alto, corresponde a la combinación entre la métrica de Minkowski ( $p=3$ ) para el cálculo de la norma y al método “Promedio” de unión de conjuntos. El árbol de jerarquía obtenido es monótono y consistente. Ambos se muestran en el artículo elaborado por Rubio & McPhee (2010).

Sin embargo, el mayor problema es compatibilizar el registro de 52 años de las 3 primeras regiones de la zona de estudio con el de 25 años presentado en la X región de Los Lagos. Para esto se realizó un ejercicio previo. La estadística de caudales de 52 años de registro fue dividida en 3 grupos: 1952 – 1975 (Grupo A), 1964 – 1990 (Grupo B) y 1975 – 2003 (Grupo C). Se aplicó el método para los 3 grupos anteriormente descritos con el objetivo de comparar si la longitud de la ventana es o no una condicionante determinante para la realización del método. De esta manera, comparando cuáles son las agrupaciones que se forman en cada grupo, se podría explicar u observar si hay cambios significativos entre una y otra realización del método. De ser esto cierto el ejercicio se puede repetir para todas las 43 estaciones<sup>4</sup> de la zona de estudio, para la ventana de 25 años que lo condiciona la zona extremo sur. (X región). Si para los 3 grupos estudiados se tienen los mismos conjuntos seleccionados al final del método, éste es extensible a las estaciones de la X Región, considerando los 25 años de información.

Con las agrupaciones encontradas para las 43 estaciones y 25 años de información se construyeron los patrones espaciales. Para las series de tiempo de escorrentía se utilizaron sólo los datos con una longitud de registro de 52 años, dejando fuera a la estaciones de la X Región de Los Lagos, que carecen de la longitud necesaria para llevar un análisis robusto y sólo se

<sup>1</sup> También conocido como el vecino más cercano o “Nearest Neighbor”.

<sup>2</sup> Corresponde a la distancia WPGMA: Weighted Pair-Group Method with Arithmetic mean.

<sup>3</sup> Su nombre original es City Block y también es conocida como la distancia Manhattan, pues pretende emular el movimiento de una persona caminando entre 2 puntos de un ciudad, siguiendo las calles, pero no en línea recta (atravesando la ciudad) como lo sugiere la distancia Euclidiana.

<sup>4</sup> La estación Mañihuales (N° 44) no forma parte del proceso de clúster.



consideraron las estaciones de la IX Región de la Araucanía, por ende, los resultados obtenidos para el análisis de periodicidades del patrón espacial al sur de los 37° 30' se extienden a la X Región de Los Lagos (resultados como las periodicidades y sus relaciones a los índices climáticos.). La Figura 2.3 expone los resultados del análisis de clúster.

En la Figura 2.3 se aprecia la formación de 3 conjuntos en el caso de los grupos B y C y de 2 grandes conjuntos en el grupo A. En el caso del grupo A se ve la formación de 2 grandes zonas, una al norte de los 37° 30'' y otra al sur que se repite en los demás grupos, por lo que podemos concluir que independientemente del período que se analice, la formación de estos 2 patrones espaciales ocurre y se debe en parte a la diferencia entre la variabilidad interanual entre los caudales. Por ende la realización de la metodología de los “clúster” para ventanas de tiempo más pequeñas (25 años) es válida y no cambia mayormente la formación de los grandes patrones espaciales de caudal. Teniendo esto en cuenta lo que sigue es realizar esta metodología considerando un total de 43 estaciones de caudal y con una ventana de 25 años, definida por los años 1966 – 1990 (años hidrológicos). La aplicación del método a estas 43 estaciones para esa ventana se encuentra detallada en el artículo elaborado por Rubio & McPhee (2010).

### 2.3 El análisis temporal

Con el análisis espacial resuelto se determinaron los patrones o índices espaciales representativos de cada zona, esto es, las estaciones que se agrupan en un mismo conjunto. Como cada estación en si representa una serie de tiempo, se construyeron las series de tiempo de los patrones espaciales como el promedio ponderado con el área de las series individuales.

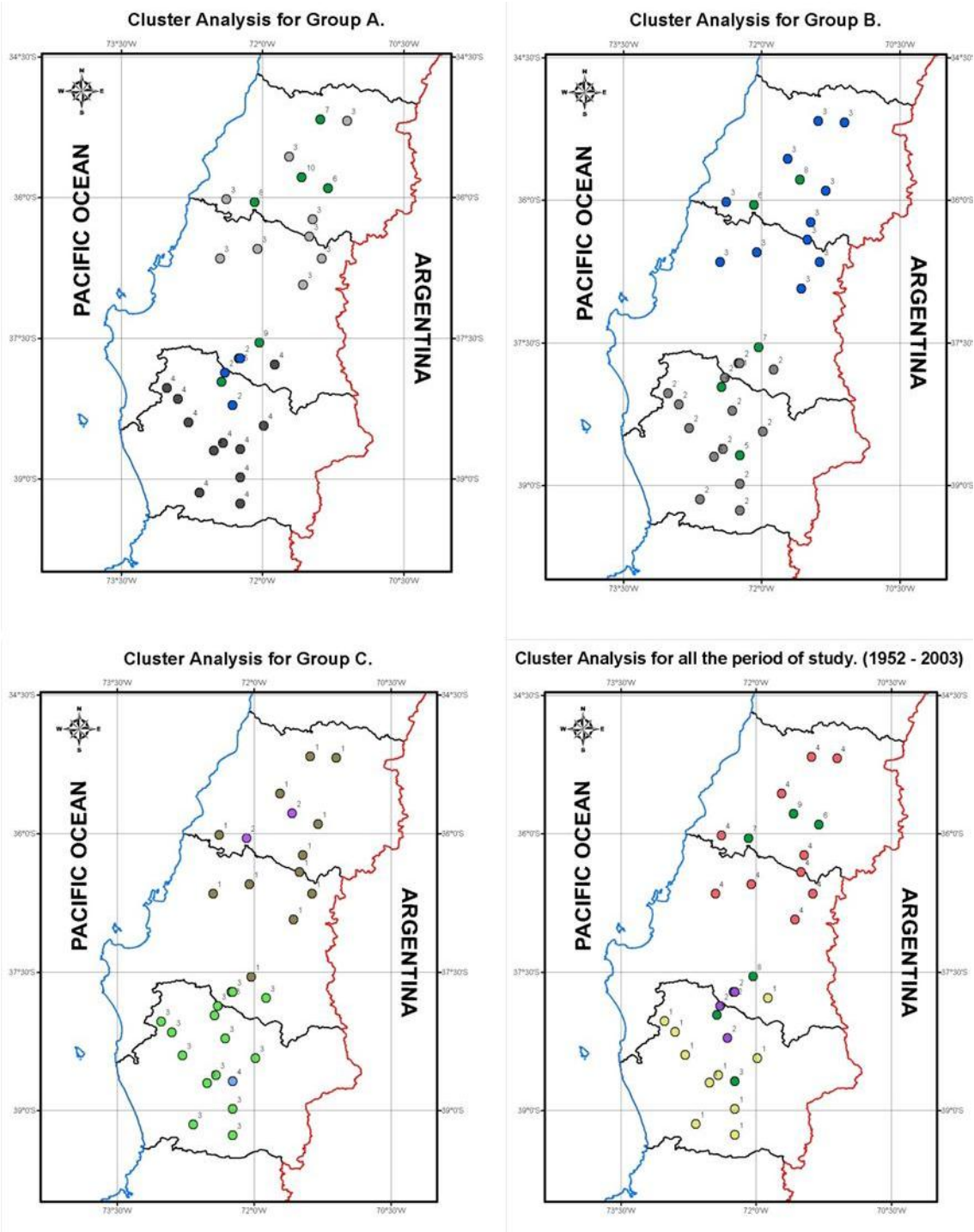
En general, el análisis espectral ha sido aplicado extensamente al análisis de variabilidad del clima, incluyéndose el análisis de series paleoclimáticas y la variabilidad interdecadal e interestacional del clima. Lo que hace el análisis espectral es dividir la serie de datos en 3 componentes: La tendencia, la parte oscilatoria y un ruido (serie aleatoria que muchas veces representa el error).

Existen diversas metodologías para aplicar el análisis espectral. Una de ellas es el análisis singular espectral o SSA<sup>5</sup>, donde se realizan intentos para discriminar entre la señal significativa como un todo, o en su defecto como partes individuales y un ruido blanco, aunque actualmente esta parte se está descomponiendo con un ruido rojo (AR (1)<sup>6</sup>), dado que las series climáticas y otras series de carácter geofísico tienden a tener mayores amplitudes y bajas frecuencias. El SSA analiza o sigue la amplitud y modulación de la fase de la señal. En este caso se utilizó el SSA como un filtro a cada serie de tiempo y así remover el ruido de cada serie.

---

<sup>5</sup> Singular Spectrum Analysis.

<sup>6</sup> Modelo Autoregresivo de Orden 1, con  $a_i < 0$ .



**Figura 2.3: Análisis de clúster para los diferentes grupos adoptados a una escala anual. Los números de los puntos indican al conjunto en que pertenecen. En el caso de los puntos de color verde con distintos números, estos representan aquellas estaciones de caudal que no pertenecen a ningún conjunto.**

Una vez aplicado el SSA se procedió a utilizar una técnica llamada “Multitaper” (MTM<sup>7</sup>) [Ghil, M., et al, 2002]. La principal diferencia de éste método con otros es que no necesita de una función “a priori” de los datos, sino que se enfoca en reducir la varianza espectral utilizando un pequeño set o conjunto de “tapers” o filtros, en vez de la utilización de sólo uno como en las metodologías clásicas. Para elegir estos “tapers” se sigue un proceso de optimización, en el cuál se obtiene una familia de funciones conocidas como “Discrete Prolate Spheroidal Sequences (DPSS)” que permiten resolver el problema de la variabilidad minimizando la merma fuera de una banda de frecuencia conocida como la frecuencia de Rayleigh. Este método suele ser menos heurístico que los métodos no-paramétricos tradicionales y al utilizar una familia de “tapers” se obtienen estimadores con menor varianza que los métodos tradicionales. Este método ha sido utilizado principalmente pues es capaz de detectar periodos significativos en series de tiempo más cortas (Robertson y Mechoso 1996).

Para corroborar las periodicidades encontradas se decidió recurrir a otro método de análisis, el de la Máxima Entropía (MEM<sup>8</sup>). La Entropía es en realidad un concepto que permite “medir” de alguna manera el Caos y Energía de un sistema. Un enfoque de este método [Ghil, M., et al, 2002], está basado en aproximar las series bajo estudio por un modelo auto regresivo (AR) de orden M, AR(M). Sin duda este procedimiento tiene por objetivo reconstruir o calcular la densidad espectral asociada a la serie. Los coeficientes de autocorrelación del modelo AR son calculados optimizando el número M. M de estos coeficientes, es decir, hasta que orden de antecedencia se considera en el modelo.

Para evaluar las metodologías relacionadas con SSA, es necesario construir periodogramas y correlogramas que muestran la relación entre la “potencia” o amplitud de la serie con la variación de la frecuencia. Para esto se utilizó una herramienta computacional llamada “SSA-Toolkit” [Ghil, M., et al, 2002]. Esta herramienta permite entre otras cosas, la aplicación de los métodos SSA, MTM y MEM, entregando el poder espectral de la serie, junto con sus intervalos de confianza y permite además encontrar las frecuencias dominantes no solo atribuidas a un ciclo anual u estacional (regulares); sino que además efectuar una reconstrucción de la serie con las componentes detectadas con los ciclos relevantes (no regulares).

Los detalles de las frecuencias encontradas como el detalle metodológico de la aplicación de cada una de estas técnicas se encuentran en el artículo elaborado por Rubio & McPhee (2010).

---

<sup>7</sup> Multi Taper Method. (M.T.M)

<sup>8</sup> Maximum Entropy Method (M.E.M).

### 3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

Sobre la calidad de la información se ha identificado una gran variabilidad entre los registros de caudales, en la región del Maule y hasta los 37° 30´ se observan las estaciones con mayor variación interanual de caudal y también las estaciones que presentan un mayor porcentaje de datos rellenados. Entre el paralelo 37° 30´ hasta los 38° 30´ se observa una fase de transición para la variabilidad interanual (se reduce el coef. De variación) y se observa una mayor completitud en los registros. De los 39° hacia el sur la variabilidad interanual es baja, pero los porcentajes de relleno observados en la zona anterior se mantienen y además la longitud de los registros en general es menor en al menos 20 años.

Los resultados de la aplicación de la metodología de análisis espacial arrojan 2 grandes agrupaciones. Se define un patrón Norte, que comprende a las estaciones ubicadas entre los límites de la VII Región del Maule hasta el paralelo 37° 30´. Se define un patrón Sur, que incluye las estaciones comprendidas entre los 38° hasta los 40° 30´. El Río Puelo y el río Mañihuales no presentan una unión a ningún clúster y cabe destacar que su inclusión obedece más al estudio de variabilidad temporal que espacial, pues la cantidad de estaciones de caudal al sur austral de Chile carece de una buena longitud de registro y de una buena densidad. Para la aplicación de la metodología de “clúster” se trabajó con una ventana de datos, entre el 1966 – 1990, para incluir las estaciones de la X Región. Se verificó esta hipótesis tomando diferentes ventanas de tiempo de 25 años para las estaciones de caudales entre la VII Región del Maule y IX Región de la Araucanía y aplicando la metodología de clúster a estas ventanas y comparándolas con la ventana del total de años de registros del período (52), se observó que los grupos formados esencialmente se mantienen. También se observa que el patrón norte, en el caso de la escala de verano, esto es, el promedio de caudales de los meses de Enero a Marzo, no tiene la agrupación de estaciones observada para las otras escalas temporales.

En cuanto al análisis de variabilidad temporal se detectaron períodos significativos al 99% de significancia que se presentan en el artículo elaborado por Rubio & McPhee (2010). Los períodos detectados entre los 3 a 6 años están en la literatura y son ampliamente atribuidos a los ciclos documentados de ENSO y SOI. También se detectaron ciclos importantes entre 6.8, 9 y 11 años que ocurren principalmente en el patrón sur y en el Río Puelo y Mañihuales y que podrían tener relación con los índices PDO y AAO, aunque el ciclo solar de Schwabe de 11 años podría ser otro antecedente a tomar en cuenta [*Compagnucci et al.*, (2013)].

En el estudio también se han detectado tendencias temporales importantes, la mayor parte asociada al descenso de los caudales, observada en el patrón sur y el río Puelo. Éstas pueden estar relacionadas tanto a la tendencia al descenso del índice de SOI como al descenso observado de las precipitaciones en la zona. Para el Río Mañihuales se ha detectado una tendencia al alza de los caudales de verano que comenzó aproximadamente el año 1985. Otra característica importante es que en el período de invierno del río Puelo la tendencia también presenta un período oscilatorio importante de 6 años, por lo que la tendencia cobra aún mayor importancia, porque en sí representa una variabilidad del recurso que se acentúa cada 6 años.

Finalmente las relaciones con las forzantes climáticas para los distintos índices climatológicos externos encontradas son:

- a. ENSO: Presenta una correlación positiva y altamente significativa al 95% para las 3 escalas de tiempo adoptadas (invierno, verano y anual) con los patrones Norte y Sur a una escala anual. También se observa una correlación positiva significativa al 90% con el río Puelo a la misma escala. Para la escala temporal de invierno ENSO también reporta correlaciones altamente significativas y positivas al 95% de significancia para las 3 escalas de tiempo adoptada. Las mayores correlaciones se observan para el patrón Norte y luego para el río Puelo y el patrón sur. En el caso de la escala de tiempo de verano, no hay mayores relaciones, salvo una correlación negativa con el río Puelo, con las escalas de ENSO a nivel a anual y de invierno.
- b. PDO: Presenta correlaciones altamente significativas al 95% y negativas con el patrón Sur y el río Puelo para todas las escalas de tiempo. Para el río Mañihuales también se observan las correlaciones significativas pero a las escalas de PDO a nivel anual y de invierno. Lo interesante a destacar para este índice es que la PDO presenta un quiebre o cambio de pendiente en el año 1976. Dicho quiebre también es observado en todas las series reconstruidas de los patrones.
- c. AAO: Presenta correlaciones altamente significativas y negativas al 95% para su escala anual y de invierno con los patrones Norte, Sur, río Puelo y Mañihuales a una escala anual. También presenta estas mismas correlaciones para la escala temporal de verano aunque el efecto de la forzante llega sólo hasta el río Puelo.
- d. SOI: Las relaciones encontradas para este índice corroboran perfectamente la relación que tiene este mismo tanto en su fase positiva como negativa con ENSO. Pese a que no siempre una fase positiva o negativa del SOI genera un evento extremo para ENSO (El Niño o La Niña según corresponda) en este caso se detectan que para todas las relaciones altamente significativas encontradas en SOI, éstas se ven reflejadas en la relación de los respectivos patrones a las distintas escalas con signo opuesto. En particular, para el Río Mañihuales, si bien este no presentó correlaciones negativas o positivas con ENSO; existen importantes correlaciones positivas a escala anual y de verano de SOI con el río, específicamente, en la escala de verano de este último, información que resulta interesante dado que se ha documentado una tendencia a la baja significativa del índice SOI [Ghil. M. et al., 2000], esto quiere decir que los caudales de verano al sur del río Puelo podrían experimentar un alza, mientras que para el patrón norte y sur, y en algunos casos el río Puelo, podrían exhibir un aumento de caudal en las temporadas de invierno.

#### 4 BIBLIOGRAFÍA

Aceituno, P. (1988), On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface climate, *Monthly Weather Review*, 116(3), 505-524.

Aceituno, P., et al. (1993), Climate along the extratropical west coast of South America, in *Earth systems responses to global change*, Academic Press, London, edited by H. A. Mooney, et al., pp. 61–70, Academic, New York, USA.

Allen, M. R., and L. A. Smith (1996), Monte Carlo SSA: Detecting irregular oscillations in the presence of colored noise, *Journal of Climate*, 9(12), 3373-3404.

Aravena, J. C., and B. H. Luckman (2008), Spatio-temporal rainfall patterns in Southern South America, *International Journal of Climatology*. DOI 10.1002/joc.1761.

Chen, J., et al. (2008), The Spatiotemporal Structure of 20 th Century Climate Variations in Observations and Reanalyses. Part II: Pacific Pan-Decadal Variability, *Journal of Climate*, v21, 2634-2650.

Comisión Nacional de Medioambiente (2007), Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI, technical report, edited by Department of Geophysics, University of Chile, Santiago.

Compagnucci, R. H., Berman, A. L., et al (2013), Are southern South American Rivers linked to the solar variability?, *Int. J. Climatol.* John Wiley & Sons, Ltd 1097-0088, <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3784>

Dettinger, M. D., et al. (1995), Software expedites singular-spectrum analysis of noisy time series, *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union*, 76(2), 12–21.

Dettinger, M. D., and H. F. Diaz (2000), Global characteristics of stream flow seasonality and variability, *Journal of Hydrometeorology*, 1(4), 289-310.

DGF-UCH (2007), Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el siglo XXI, edited by U. d. C. Departamento de Geofísica, Comisión Nacional de Medioambiente, Santiago.

Dominguez, F. and P. Kumar, (2008) Precipitation Recycling Variability and Ecoclimatological Stability - A Study using NARR Data. Part I: Central USA Plains Ecoregion, *Journal of Climate*, v21(20), 5165-5186.

Dominguez, F. P. Kumar, and E. Vivoni, (2008) Precipitation Recycling as a Mechanism for Ecoclimatological Stability Through Local and Non-Local Interactions Part II: North American Monsoon Region, *Journal of Climate*, v21(20), 5187-5203.

Fovell, R. G., and M. Y. C. Fovell (1993), Climate zones of the conterminous United States defined using cluster analysis, *Journal of Climate*, 6(11), 2103-2135.

Ghil, M., et al. (2002), Advanced spectral methods for climatic time series, *Rev. Geophys*, 40(1), 1003.

- Kresch, D. L. (1993), Variability of streamflow and precipitation in Washington. US Geological Survey, Earth Science Information Center, Open-File Reports Section, BOX 25286, MS 517, Denver, CO 80225 (USA).
- Lara, A., et al. (2008), A 400-year tree-ring record of the Puelo River summer–fall streamflow in the Valdivian Rainforest eco-region, Chile, *Climatic Change*, 86(3), 331-356.
- Mann, M. E., and J. M. Lees (1996), Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series, *Climatic Change*, 33(3), 409-445.
- Masiokas, M. H., et al. (2006), Snowpack variations in the central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: Large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the region, *Journal of Climate*, 19(24), 6334-6352.
- Masiokas, M. H., et al. (2008), 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia, *Global and Planetary Change*, 60(1-2), 85-100.
- McMahon, T. A. (1982), Hydrological Characteristics of Selected rivers of the World, *Technical documents in Hydrology UNESCO*.
- Miller, A. J., et al. (1994), The 1976–77 climate shift of the Pacific Ocean, *Oceanography*, 7(1), 21-26.
- Montecinos, A., and P. Aceituno (2003), Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies, *Journal of Climate*, 16(2), 281-296.
- Peña, H., et al. (1999), Política Nacional de Recursos Hídricos, edited by D. G. d. Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Santiago.
- Penland, C., et al. (1991), Adaptive filtering and maximum entropy spectra with application to changes in atmospheric angular momentum, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 96(D12).
- Percival, D. B., and A. T. Walden (1993), *Spectral analysis for physical applications: multitaper and conventional univariate techniques*, Cambridge University Press.
- Pezoa, L. S. (2003), Recopilación y análisis de la variación de las temperaturas (período 1965-2001) y las precipitaciones (período 1931-2001) a partir de la información de estaciones meteorológicas de Chile entre los 33° y 53° de latitud sur, Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Pittock, A. B. (1980), Patterns of Climatic Variation in Argentina and Chile—I Precipitation, 1931–60, *Monthly Weather Review*, 108(9), 1347-1361.
- Robertson, A. W. (1996), Interdecadal variability over the North Pacific in a multi-century climate simulation, *Climate Dynamics*, 12(4), 227-241.
- Robertson, A. W., and C. R. Mechoso (1998), Interannual and decadal cycles in river flows of southeastern South America, *Journal of Climate*, 11(10), 2570-2581.

- Ropelewski, C. F., and M. S. Halpert.(1989), Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation. *Journal of Climate* 2(3), 268-284.
- Searcy, J. K., and C. H. Hardison (1960), Double mass curves: Manual of hydrology: Part 1. General surface-water techniques, *US Geol Surv Water Supply Paper*.
- Rubio-Álvarez, E., and J. McPhee (2010), Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952–2003, *Water Resour. Res.*, 46, W05514, doi:10.1029/2009WR007982.
- Smith, T.M., R.W. Reynolds, Thomas C. Peterson, and Jay Lawrimore, 2008: Improvements to NOAA's Historical Merged Land-Ocean Surface Temperature Analysis (1880-2006). *Journal of Climate*,**21**, 2283-2296.
- Stahl, K., and S. Demuth (1999a), Linking streamflow drought to the occurrence of atmospheric circulation patterns, *Hydrol Sci J*, 44(3), 467-482.
- Stahl, K., and S. Demuth (1999b), Methods for regional classification of streamflow drought series: cluster analysis, University of Freiburg, Germany.
- Thomson, D. J. (1990), Quadratic-inverse spectrum estimates: applications to palaeoclimatology, *Philosophical Transactions: Physical Sciences and Engineering*, 539-597.
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace, 2000: Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *Journal of Climate*, 13, 1000-1016.
- Vautard, R., and M. Ghil (1989), Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 35(3).
- Vautard, R., et al. (1992), Singular-spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic signals, in *Conference proceedings on Interpretation of time series from nonlinear mechanical systems table of contents*, edited, pp. 95-126, Elsevier North-Holland, Inc. New York, NY, USA.
- Verdon, D. C., and S. W. Franks (2006), Long-term behaviour of ENSO: Interactions with the PDO over the past 400 years inferred from paleoclimate records, *Geophysical Research Letters*, 33(6), L06712.
- Villalba, R., et al. (2003), Large-scale temperature changes across the southern Andes: 20th-century variations in the context of the past 400 years, *Climatic Change*, 59(1), 177-232.
- Wilks, D. S. (2005), *Statistical methods in the atmospheric sciences*, 648 pp., Elsevier Science & Technology.
- Zhang, Y., J.M. Wallace, D.S. Battisti, (1997) ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. *Journal of Climate*, 10, 1004-1020.



# **ANEXOS**

## Anexo A Metodología de relleno de información fluviométrica

La forma en que se encuentran los datos fluviométricos, generalmente en formato DGA, es la que se presenta en la Tabla A.1. En este caso se muestra la estación “Duqueco en Villucura”, la cual posee años en que se desconocen de 1 a 3 meses de información y la longitud del registro es de 63 años (Pero sólo se muestra el período 1953-2003). Los meses o valores incompletos están destacados en color verde.

El método consiste en reconocer que el caudal medio mensual que pasa por un punto, independiente de su magnitud, es un porcentaje del total del caudal medio anual que se registra por ese punto, y por ende representa un porcentaje del caudal medio anual. Esto quiere decir que los meses de mayo, junio y julio, que generalmente presentan una mayor escorrentía, corresponden a un mayor porcentaje del caudal medio anual, mientras que los meses de menor escorrentía, representan un menor porcentaje del caudal medio anual registrado.

Con el fin de distinguir los años normales, secos y húmedos (N,Sc,H), se construye una curva de duración de la precipitación con una estación representativa de la zona a estudiar. Esto lleva un supuesto implícito, y es que el porcentaje de caudal medio mensual sobre el caudal medio anual para un mes y año dado puede ser distinto en condiciones secas que húmedas. Es así que se definieron 2 límites en la curva de duración de la precipitación, el primero al 33% de probabilidad excedencia, llamado límite seco y el segundo al 66%, denominado límite húmedo. Se definieron como años secos, como aquellos años donde la precipitación no supera el límite seco; los años normales, aquellos años donde la precipitación queda entre ambos límites y, finalmente, los años húmedos, como aquellos que superan el límite húmedo.

El primer paso consiste en sumar los caudales medios mensuales de todos los meses con información completa, para todos los años dentro de una clasificación (seca, húmeda o normal). Esto puede considerarse como una suma vertical “ $S_v$ ”, en donde, por ejemplo, para el mes de Enero, y una clasificación cualquiera (N,Sc, H), se procede a sumar todos los valores de ese mes para todos los años dentro de una clasificación (Tabla A.2). Asimismo se procede a calcular la suma de los caudales medios mensuales, “ $S$ ”, para todos los años dentro de una clasificación. Esta suma puede considerarse como una suma horizontal, en donde, para un año cualquiera “ $j$ ”,  $S_j$  es la suma de los caudales medios mensuales del año “ $j$ ”.

Paralelamente a este procedimiento, se determina para cada clasificación el valor de  $S_T$  como la suma de  $S_j$  para los años comprendidos en una clasificación. Esto hace posible definir entonces el coeficiente de aporte de una clasificación (N, Sc o H)  $C_i$  como:

$$C_i = \frac{S_v}{S_T}$$

**Tabla A.1: Estación Duqueco en Villucura. Ejemplo de estación con datos disponibles.**

<b>AÑO</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
1953	37.98	27.86	19.06	24.76	134.48	91.91	127.18	173.67	199.33	75.21	57.62	49.22
1954	31.62	23.03	19.96	14.99	41.43	112.03	139.24	123.14	62.64	51.04	45.44	39.03
1955	26.74	19.39	15.46	12.47	23.27	95.36	46.06	61.82	63.05	45.01	37.88	44.93
1956	55.69	21.99	39.74	50.04	93.35	55.83	115.44	88.64	46.32	48.2	39.63	28.48
1957	20.27	19.78	15.34	10.96	44.36	66.55	104.6	198.83	93.09	59.81	64.93	48.67
1958	22.99	28.23	20.18	13.23	64.66	185.95	175.42	102.6	78.77	69.82	67.03	33.86
1959	29.2	22.66		142.88	118.03	135.02	240.88	113.03	172.19	68.68	47.76	31.8
1960	21.87	18.95	16.05	17.1	19.44	150.06	99.88	60.11	65.4	111.38	51.6	31.26
1961	27.25	20.58	20.72	16.86	17.46	60.38	156.66	82.2	196.67	126.14	56.25	33.57
1962	23.2	19.86	15.04	14.45	13.62	62.04	36.95	96.1	55.91	47.51	26.56	20.35
1963	17.71	22.46	18.74	16.71	21.66	47.47	124.69	162.27	120.28	71.82	68.53	42.38
1964	24.24	17.13	13.92	8.93	13.77	42.82	49.99	64.85	88.59	51.42	40.11	63.25
1965	10.46	8.32	0.94	12.38	37.18	80.72	83.11	86.84	23.87	33.31	34.68	22.35
1966	7.09	0.95	0.02	0.65	8.55	36.31	74.6	34.04	29.89	19.83	17.34	52.32
1967	18.21	5.94	0.49	0.01	15.04	16.75	18.64	41.16			23.61	9.22
1968	0.68	1.23	0.29	0.03	0.46	2.24	8.2	14.54	12.85	9.44	12.96	7.18
1969	2.32	0.11		11.59	65.68	294.04	112.61	145.88	86.46	57.9	51.57	37.69
1970	21.47	31.68	13.38	16.99	23.08	86.73	83.49	90.32	49.79	48.47	39.03	46.9
1971	25.56	14.32	11.51	7.07	85.33	61.95	137.81	71.79	66.15	64.23	47.12	49.76
1972	31.52	22.17	20	13	283.32	199.96	105.2	187.51	115.49	129.02	96.91	55.29
1973	32.24	20.84	20.97	16.36	55.34	83.12	103.17	67.72	56.34		37.15	31.47
1974	26.14	22.27	18.94	8.84	28.43	133.96	86.39	64.65	75.63	53.37	48.71	30.07
1975	19.84	17.86	9.11	26.95	30.2			74.78	59.18	57.1	57.51	39.67
1976	20.99	13.59	8.05	5.5	8.66	82.33	45.93	47.9	58.1	94.63	50.56	35.24
1977	21.72	14.25	12.02	12.48	69.03	78.43	172.97	108.28	79.8	82.65	78.02	51.33
1978	21.46	15.1			20.76	60.67	226.81	55.97	91.44	85.1		20.24
1979	13.66	14.11	12	6.45	31.05	26.8	36.3	308.33	97.31	49.05	57.14	69.48
1980	23.56			70.01	167.11				38.61	31.57	29.7	26.41
1981	34.8	29.11	13.34	19	199.17	97.93	112.76	80.16	67.9	41.74	27.47	18.13
1982	16.61	16.57	12.71	7.59	53.52	132.52	192.25	89.26	124.7	129.67	68.16	46.94
1983	26.15	16.26	13.09	14.24	22.94	125.83	107.71	63.28	56.89	50.03	37.66	22.67
1984	15.94	12.38	9.89	8.22	57.39	68.77	161.54	61.42	79.05	96.24	78.91	44.27
1985	31.12	19.04	14.18	25.01	85.12	83.6	108.19	45.2	55.96	56.24	50.38	24.06
1986	16.01	16.06	11.82	24.18	98.24	174.04	55.77	81.39	55.61	43.94	64.22	54.34
1987	20.21	16.16	14.12	10.62	18.98	56.78	103.7	118.04	66.66	68.35	46.69	25.31
1988	18.73	17.43	17.07	17.57	22.7	55.04	73.9	115.89	53.58	42.79	38.27	26.77
1989	19.21	16.92	12.47	8.18	6.58	55.2	63.61	84.47	57.93	40.54	28.98	31.01
1990	14.49	13.66	9.35	21.33	39.82	53.92	39.41	78.31	114.95	50.63	28.89	15.83
1991	14.36	13.96	11.97	27.9	131.4	101.66	121.76	57.2	76.02	50.03	30.68	37.86
1992	20.21	12.39	10.15	18.52	174.95	169.09	83.07	41.68	53.33	59.09	44.93	30.29
1993	19.6	12.12	12.64	28.93	99.93	191.09	142.99	101.03	63.6	40.38	36	32.63
1994	13.58	6.69	7.27	18.49	31.48	91.12	128.83	50.32	72.62	63.66	35.44	29.48
1995	11.88	7.79	4.71	11.37	9.24	88.72	111.69	101.71	77.01	49.27	34.09	19.41

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1996	8.6	8.33	10.97	20.61	18.39	51.41	26.67	39.71	33.82	23.46	16.43	9
1997	8.94	7.08	4.98	29.1	46.31	142.77	85.95	99.26	114.38	86.2	62.7	28.87
1998	16.54	12.96	9.52	9.21	10.81	21.33	21.91	29.62	25.37	11.59	10.52	12.59
1999	11.37	7.97	5.46	4.47	17.36	72.54	52.51	88.79	149.96	52.74	30.95	16.06
2000	13.09	19.43	8.37	7.32	10.4	155.85	130.62	108.24	141.42	74.88	44.99	33.22
2001	26.88	16.67	13.59	11.36	104.58	126.69	244.94	108.87	60	37.82	28.99	23.69
2002	15.52	17.29	29.25	26.47	48.2	97.9	75.19	171.57	117.45	169.83	102.51	48.86
2003	27.54	13.74	14.48	10.79	12.12	126.86	92.52	55.15	74.37	60.43	39.95	26.37

(Valores en Verde representan vacíos de información).

**Tabla A.2: Cálculo del porcentaje o fracción del caudal medio mensual respecto del caudal medio anual para una clasificación.**

Parámetro	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
SUMA (S <sub>V</sub> )	1478	1151	989	1250	3850	6340	6663	6083	5201	4084	3182	2300
C <sub>i</sub>	0.035	0.027	0.023	0.029	0.090	0.149	0.157	0.143	0.122	0.096	0.075	0.054

Donde:

S<sub>V</sub>: Representa la suma de los caudales de cada mes para todos los años para una clasificación.

C<sub>i</sub>: Es el coeficiente o porcentaje de caudal medio anual que representa el mes “i”, es menor que 1 y se debe cumplir que la suma de todos los “C<sub>i</sub>” debe sumar 1. En estricto rigor es la razón entre S<sub>V</sub> sobre la suma de S (S<sub>T</sub>).

El índice “i” hacer referencia al mes en que se calcula este porcentaje. En otras palabras se está diciendo que la repartición del caudal del mes “i” equivale al cuociente de toda la suma de los caudales del mes “i” en el registro sobre la masa total de agua que se ha registrado en la estadística. Esto sería exacto si no faltara ningún mes con información.

Luego de este paso, le sigue un procedimiento iterativo. Para una clasificación dada, se calcula la suma S<sub>V</sub> de todo el período de registro, la que ahora incluye los meses que faltan en la estadística.

Para aquellos meses sin valor registrado (color verde) se define el caudal del mes “i” y año “j” como:

$$Q_{mes\ i,\ año\ j} = C_{mes\ i} S_j$$

En otras palabras más simples se está aseverando que, por ejemplo, el caudal del mes de marzo, del año 1959, es el producto entre el coeficiente “C<sub>marzo</sub>” y la suma anual de caudales del año 1959.

Una vez impuesta esta relación para los meses “en verde” de la Tabla A.1 se comienza la rutina. Dado que se han agregado nuevos datos, los totales o sumas anuales de esos años cambiarán, y por ende también lo harán los coeficientes “C<sub>i</sub>” de todos los meses, pues también ha cambiado S<sub>j</sub>. Adicionalmente se registra la diferencia de S<sub>j</sub>, S<sub>T</sub> y C<sub>i</sub> con los valores de la iteración anterior.

La rutina posee dos criterios de parada, el primero ocurre cuando la diferencia entre los “S<sub>T</sub>” de dos iteraciones consecutivas es menor a 0.001 y el segundo; cuando la diferencia entre los totales anuales “S<sub>j</sub>” para los años rellenados es inferior a 0.0001 respecto de la iteración anterior.

Es importante destacar que para utilizar este método se requiere de una estadística de 25 años en adelante, e intentar rellenar muchos meses en un mismo año puede llevar a resultados incorrectos, o en algunos casos, a la no convergencia del método, por lo que debe ocuparse con mucho criterio y revisar siempre sus resultados, principalmente que estén en un rango aceptable de los valores del mes que se está estimando y que no sea inconsistente con los valores anuales registrados para ese año. Se debe respetar siempre el régimen hidrológico de la cuenca en análisis como también las mediciones observadas disponibles.

Este trabajo fue realizado para todas las estaciones seleccionadas. Cada estación fue tipificada en años secos, normales y húmedos y fue rellenada cuidadosamente. Se consultaron expedientes del Departamento de Hidrología del Ministerio de Públicas con el objetivo de validar algunos de los rellenos con información disponible u actualizada. La Tabla A.3 muestra el proceso terminado.

**Tabla A.3: Estación Duquenco en Villucura rellenada y validada.**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1953	37.98	27.86	19.06	24.76	134.48	91.91	127.18	173.67	199.33	75.21	57.62	49.22
1954	31.62	23.03	19.96	14.99	41.43	112.03	139.24	123.14	62.64	51.04	45.44	39.03
1955	26.74	19.39	15.46	12.47	23.27	95.36	46.06	61.82	63.05	45.01	37.88	44.93
1956	55.69	21.99	39.74	50.04	93.35	55.83	115.44	88.64	46.32	48.20	39.63	28.48
1957	20.27	19.78	15.34	10.96	44.36	66.55	104.60	198.83	93.09	59.81	64.93	48.67
1958	22.99	28.23	20.18	13.23	64.66	185.95	175.42	102.60	78.77	69.82	67.03	33.86
1959	29.20	22.66	26.70	142.88	118.03	135.02	240.88	113.03	172.19	68.68	47.76	31.80
1960	21.87	18.95	16.05	17.10	19.44	150.06	99.88	60.11	65.40	111.38	51.60	31.26
1961	27.25	20.58	20.72	16.86	17.46	60.38	156.66	82.20	196.67	126.14	56.25	33.57
1962	23.20	19.86	15.04	14.45	13.62	62.04	36.95	96.10	55.91	47.51	26.56	20.35
1963	17.71	22.46	18.74	16.71	21.66	47.47	124.69	162.27	120.28	71.82	68.53	42.38
1964	24.24	17.13	13.92	8.93	13.77	42.82	49.99	64.85	88.59	51.42	40.11	63.25
1965	10.46	8.32	0.94	12.38	37.18	80.72	83.11	86.84	23.87	33.31	34.68	22.35
1966	7.09	0.95	0.02	0.65	8.55	36.31	74.60	34.04	29.89	19.83	17.34	52.32
1967	18.21	5.94	0.49	0.01	15.04	16.75	18.64	41.16	23.29	18.29	23.61	9.22
1968	0.68	1.23	0.29	0.03	0.46	2.24	8.20	14.54	12.85	9.44	12.96	7.18
1969	2.32	0.11	20.60	11.59	65.68	294.04	112.61	145.88	86.46	57.90	51.57	37.69
1970	21.47	31.68	13.38	16.99	23.08	86.73	83.49	90.32	49.79	48.47	39.03	46.90
1971	25.56	14.32	11.51	7.07	85.33	61.95	137.81	71.79	66.15	64.23	47.12	49.76
1972	31.52	22.17	20.00	13.00	283.32	199.96	105.20	187.51	115.49	129.02	96.91	55.29
1973	32.24	20.84	20.97	16.36	55.34	83.12	103.17	67.72	56.34	55.68	37.15	31.47
1974	26.14	22.27	18.94	8.84	28.43	133.96	86.39	64.65	75.63	53.37	48.71	30.07
1975	19.84	17.86	9.11	26.95	30.20	84.10	88.38	74.78	59.18	57.10	57.51	39.67
1976	20.99	13.59	8.05	5.50	8.66	82.33	45.93	47.90	58.10	94.63	50.56	35.24
1977	21.72	14.25	12.02	12.48	69.03	78.43	172.97	108.28	79.80	82.65	78.02	51.33
1978	21.46	15.10	15.92	20.10	20.76	60.67	226.81	55.97	91.44	85.10	51.18	20.24
1979	13.66	14.11	12.00	6.45	31.05	26.80	36.30	308.33	97.31	49.05	57.14	69.48

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	23.56	20.86	17.94	70.01	167.11	114.95	120.80	110.28	38.61	31.57	29.70	26.41
1981	34.80	29.11	13.34	19.00	199.17	97.93	112.76	80.16	67.90	41.74	27.47	18.13
1982	16.61	16.57	12.71	7.59	53.52	132.52	192.25	89.26	124.70	129.67	68.16	46.94
1983	26.15	16.26	13.09	14.24	22.94	125.83	107.71	63.28	56.89	50.03	37.66	22.67
1984	15.94	12.38	9.89	8.22	57.39	68.77	161.54	61.42	79.05	96.24	78.91	44.27
1985	31.12	19.04	14.18	25.01	85.12	83.60	108.19	45.20	55.96	56.24	50.38	24.06
1986	16.01	16.06	11.82	24.18	98.24	174.04	55.77	81.39	55.61	43.94	64.22	54.34
1987	20.21	16.16	14.12	10.62	18.98	56.78	103.70	118.04	66.66	68.35	46.69	25.31
1988	18.73	17.43	17.07	17.57	22.70	55.04	73.90	115.89	53.58	42.79	38.27	26.77
1989	19.21	16.92	12.47	8.18	6.58	55.20	63.61	84.47	57.93	40.54	28.98	31.01
1990	14.49	13.66	9.35	21.33	39.82	53.92	39.41	78.31	114.95	50.63	28.89	15.83
1991	14.36	13.96	11.97	27.90	131.40	101.66	121.76	57.20	76.02	50.03	30.68	37.86
1992	20.21	12.39	10.15	18.52	174.95	169.09	83.07	41.68	53.33	59.09	44.93	30.29
1993	19.60	12.12	12.64	28.93	99.93	191.09	142.99	101.03	63.60	40.38	36.00	32.63
1994	13.58	6.69	7.27	18.49	31.48	91.12	128.83	50.32	72.62	63.66	35.44	29.48
1995	11.88	7.79	4.71	11.37	9.24	88.72	111.69	101.71	77.01	49.27	34.09	19.41
1996	8.60	8.33	10.97	20.61	18.39	51.41	26.67	39.71	33.82	23.46	16.43	9.00
1997	8.94	7.08	4.98	29.10	46.31	142.77	85.95	99.26	114.38	86.20	62.70	28.87
1998	16.54	12.96	9.52	9.21	10.81	21.33	21.91	29.62	25.37	11.59	10.52	12.59
1999	11.37	7.97	5.46	4.47	17.36	72.54	52.51	88.79	149.96	52.74	30.95	16.06
2000	13.09	19.43	8.37	7.32	10.40	155.85	130.62	108.24	141.42	74.88	44.99	33.22
2001	26.88	16.67	13.59	11.36	104.58	126.69	244.94	108.87	60.00	37.82	28.99	23.69
2002	15.52	17.29	29.25	26.47	48.20	97.90	75.19	171.57	117.45	169.83	102.51	48.86
2003	27.54	13.74	14.48	10.79	12.12	126.86	92.52	55.15	74.37	60.43	39.95	26.37

(Valores en Verde, ahora rellenados)

Adicionalmente, en la Tabla A.4, se presenta un resumen de los valores de  $C_i$  para la clasificación “Año Normal” en donde puede apreciarse la alta variabilidad de estos coeficientes, la cual se concentra en los meses de verano.

**Tabla A.4: Resumen de valores de  $C_i$  para las estaciones entre la Región del Maule y de la Araucanía.**

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
RIO PERQUILAUQUEN EN SAN MANUEL	0.016	0.011	0.011	0.025	0.116	0.172	0.169	0.145	0.124	0.104	0.068	0.038
RIO LONGAVI EN LA QUIRIQUINA	0.039	0.038	0.027	0.031	0.096	0.145	0.141	0.120	0.113	0.103	0.088	0.058
RIO ANCOA EN EL MORRO	0.071	0.067	0.058	0.053	0.081	0.129	0.118	0.096	0.089	0.080	0.077	0.079
RIO CLARO EN CAMARICO	0.025	0.019	0.021	0.033	0.081	0.153	0.174	0.151	0.134	0.090	0.071	0.049
RIO CAUQUENES EN EL ARRAYAN	0.005	0.003	0.004	0.007	0.091	0.202	0.271	0.195	0.129	0.059	0.026	0.010
RIO PUTAGAN EN YERBAS BUENAS	0.048	0.046	0.052	0.061	0.101	0.145	0.155	0.108	0.096	0.070	0.062	0.054
RIO LIRQUEN EN CERRO EL PADRE	0.016	0.012	0.012	0.025	0.101	0.191	0.196	0.163	0.123	0.082	0.048	0.032
RIO DUQUECO EN VILLUCURA	0.035	0.027	0.023	0.029	0.090	0.149	0.157	0.143	0.122	0.096	0.075	0.054
RIO MULCHEN EN MULCHEN	0.024	0.019	0.019	0.025	0.082	0.156	0.198	0.179	0.129	0.080	0.053	0.037

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
RIO BUREO EN MULCHEN	0.019	0.014	0.016	0.027	0.111	0.173	0.186	0.160	0.129	0.080	0.052	0.032
RIO MALLECO EN COLLIPULLI	0.021	0.016	0.017	0.033	0.119	0.165	0.179	0.156	0.115	0.087	0.053	0.038
RIO DIGUILLIN EN SAN LORENZO (ATACALCO)	0.029	0.021	0.018	0.031	0.115	0.163	0.152	0.126	0.113	0.101	0.077	0.055
RIO TOLTEN EN VILLARICA	0.055	0.044	0.039	0.041	0.076	0.123	0.133	0.123	0.110	0.097	0.088	0.073
RIO PUYEHUE EN QUITRATUE	0.018	0.013	0.013	0.024	0.094	0.183	0.203	0.168	0.128	0.078	0.047	0.031
RIO PUREN EN TRANAMAN	0.031	0.025	0.024	0.030	0.075	0.137	0.185	0.164	0.133	0.091	0.062	0.042
RIO LUMACO EN LUMACO	0.018	0.015	0.014	0.018	0.065	0.162	0.227	0.186	0.139	0.080	0.046	0.029
RIO CAUTIN EN RARI-RUCA	0.046	0.038	0.033	0.040	0.089	0.137	0.137	0.125	0.109	0.096	0.082	0.069
RIO MUCO EN PUENTE MUCO	0.024	0.018	0.016	0.031	0.091	0.166	0.184	0.154	0.123	0.087	0.057	0.047
RIO CAUTIN EN CAJON	0.035	0.027	0.025	0.033	0.084	0.149	0.164	0.139	0.120	0.096	0.073	0.055
RIO ALLIPEN EN LOS LAURELES	0.053	0.046	0.042	0.049	0.090	0.126	0.133	0.116	0.101	0.091	0.082	0.071
RIO TRAIGUEN EN VICTORIA	0.015	0.010	0.010	0.017	0.082	0.179	0.217	0.176	0.132	0.083	0.049	0.031
RIO QUEPE EN VILCUN	0.049	0.043	0.041	0.048	0.092	0.136	0.149	0.119	0.102	0.088	0.072	0.061
<b>Promedio</b>	0.031	0.026	0.024	0.032	0.092	0.156	0.174	0.146	0.119	0.087	0.064	0.047
<b>Mínimo</b>	0.005	0.003	0.004	0.007	0.065	0.123	0.118	0.096	0.089	0.059	0.026	0.010
<b>Máximo</b>	0.071	0.067	0.058	0.061	0.119	0.202	0.271	0.195	0.139	0.104	0.088	0.079
<b>Desv. Est.</b>	0.016	0.016	0.014	0.012	0.014	0.021	0.036	0.027	0.013	0.011	0.016	0.017
<b>CV</b>	0.52	0.61	0.59	0.38	0.15	0.14	0.21	0.18	0.11	0.13	0.25	0.36

## Anexo B Índices Climatológicos

Este anexo tiene por objetivo principal hacer una breve descripción de los índices climáticos que se han seleccionado para las cuencas o zona en estudio.

### B.1 ENSO “El Niño-Southern Oscillation”

ENSO hace referencia a El Niño “Southern Oscillation”, o el sistema compuesto por la atmósfera y el océano, durante un evento cálido de El Niño. El ciclo de ENSO incluye las fases de La Niña y el Niño, así como fases neutras.

El Niño es una fase del ciclo ENSO, caracterizada por un calentamiento periódico de las aguas superficiales de la zona oriental del Pacífico tropical, así como por un desplazamiento hacia el Este de la convección del Pacífico occidental. Estas condiciones afectan a los patrones climatológicos a lo largo del mundo. Los episodios de El Niño suceden, aproximadamente, cada cuatro o cinco años y pueden durar hasta 12 o 18 meses. Se caracteriza por una temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) positiva respecto a la normal (calculada en el periodo base 1971-2000), promediada cada tres meses, mayor o igual a  $0.5^{\circ}$  en la región comprendida entre  $120^{\circ}\text{W}$ - $170^{\circ}\text{W}$  y  $5^{\circ}\text{N}$ - $5^{\circ}\text{S}$  (también denominada Niño 3.4).

El área de monitoreo del Pacífico tropical ecuatorial, para las fases del ciclo ENSO, se ha dividido en 4 secciones Niño 1+2, 3, 3.4 y 4 (Ilustración B.1)

- Niño 1+2 ( $0^{\circ}$ - $10^{\circ}$  S) ( $90^{\circ}$  W- $80^{\circ}$  W)
- Niño 3 ( $5^{\circ}$  N- $5^{\circ}$  S) ( $150^{\circ}$  W- $90^{\circ}$  W)
- Niño 4 ( $5^{\circ}$  N- $5^{\circ}$  S) ( $160^{\circ}$  E- $150^{\circ}$  W)
- Niño 3.4 ( $5^{\circ}$  N- $5^{\circ}$  S) ( $170^{\circ}$  W- $120^{\circ}$  W)

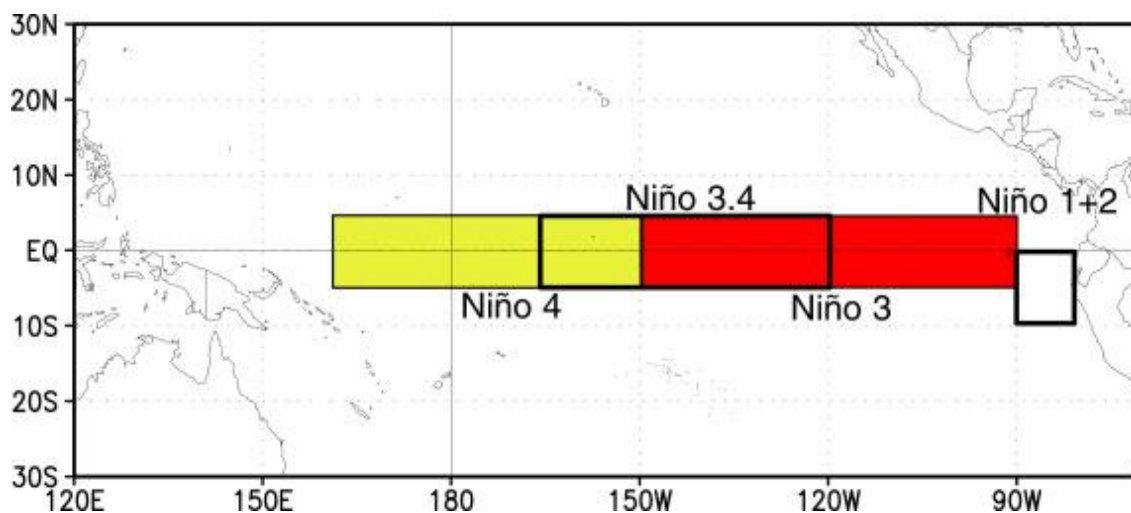


Ilustración B.1: Ubicación espacial de los índices del fenómeno de “El Niño”.



El motivo de esta división es que la mayoría de los impactos de la circulación atmosférica están relacionados con cambios en el patrón de convección de estas zonas. Las regiones Niño 3.4 y Niño 4, abarcan el área donde ligeras variaciones en SST pueden tener un fuerte impacto en si la convección se sitúa en el Pacífico occidental o central y son las áreas clave para monitorear y predecir los eventos ENSO. Para este trabajo se utilizó la zona 3.4

Avances tecnológicos recientes han hecho posible monitorear, diagnosticar y predecir los eventos de El Niño y La Niña prácticamente en tiempo real. Estas tecnologías incluyen información satelital, boyas oceánicas, radiosondas, y el uso de supercomputadores y modelos informáticos.

## **B.2 SOI: Southern Oscillation Index**

Se calcula a partir de las fluctuaciones mensuales o estacionales en la presión atmosférica entre Tahití y Darwin (Australia).

Valores negativos de SOI suelen indicar episodios de El Niño. Estos valores negativos están a menudo acompañados de un calentamiento de las regiones central y oriental del Océano Pacífico tropical, y de una disminución de la fuerza de los vientos alisios del Pacífico.

Los valores positivos del SOI se asocian con fuertes vientos alisios y temperaturas más cálidas del Pacífico (en el norte de Australia), fenómeno conocido como La Niña. Las aguas de la zona central y oriental de la región tropical del Pacífico experimentan un enfriamiento en dicho episodio. Este índice esta en desfase con ENSO.

## **B.3 PDO: Pacific Decadal Oscillation.**

Descrito recientemente, se trata de un patrón de variación climática, similar a ENSO, aunque en una escala temporal de décadas y no estacional. Se caracteriza por anomalías de la SST de un signo en el Pacífico centro-norte y anomalías de la SST de signo contrario en el Norte y Este de las Islas Aleutianas y el Golfo de Alaska. Principalmente afecta a los patrones del tiempo y la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico noroccidental, Alaska y algunas islas del Pacífico. Existen dos grandes diferencias entre PDO y ENSO, la primera es que los eventos de PDO que acontecieron durante el siglo XX duraron entre 20 y 30 años, mientras que los eventos típicos de ENSO, sólo duran entre 6 y 18 meses; en segundo lugar, las “huellas dactilares” climáticas del PDO son más visibles en el Pacífico Norte y América del Norte, mientras hay las huellas secundarias se sitúan en los trópicos, para ENSO sucede al revés. Distintos estudios independientes encontraron evidencias de dos ciclos completos de PDO durante el siglo pasado: regímenes de PDO “fríos” sucedieron entre 1980 y 1924 y de nuevo entre 1946 y 1976, mientras que los regímenes “cálidos” se dieron entre 1925 y 1946 y desde 1977 hasta (al menos) la mitad de 1990. Se desconocen las causas que provocan el PDO, así como el potencial predictor de la oscilación climática que pueda tener este índice.

#### **B.4 AAO: Antarctic Oscillation.**

El índice de oscilación antártica (AAO) es el patrón dominante de las variaciones no estacionales de circulación troposférica al sur de los 20° Lat. Sur, y está caracterizado por la anomalía de presiones de un signo centrada en la Antártica y anomalías de signo opuesto centradas alrededor de los 40°- 50° de latitud sur. El AAO se encuentra también en la literatura como el Modo Anular del Sur o “Southern Annular Mode” (SAM). Tiene su correspondiente análogo en el hemisferio norte, denominado la Oscilación Ártica (AO).

El AAO está definido como la primera componente principal (PC) de las anomalías de las alturas geopotenciales a los 850 hPa al sur de los 20° Lat. Sur. (Thompson and Wallace, 2000).

#### **Anexo C      Publicación.**

El trabajo realizado fue publicado en el artículo: “Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952–2003”, con fecha 14 de Mayo del 2010 en el Journal: “Water Resources Research”, vol 46. Se presenta a continuación la versión publicada del artículo.

## Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952–2003

Eduardo Rubio-Álvarez<sup>1</sup> and James McPhee<sup>1</sup>

Received 16 March 2009; revised 29 September 2009; accepted 14 December 2009; published 14 May 2010.

[1] In this work we study the time series of annual and seasonal streamflow for 44 rivers in southern Chile, spanning the ecoregion between 34°S and 45°S for the 1952–2003 period. We analyze spatial variability using a clustering process to define regional streamflow averages. We find two main regions, divided approximately by parallel 37.5°S. The analysis includes application of the multitaper (MTM) and maximum entropy (MEM) methods to find periodicities or interannual and decadal cycles. Singular spectral analysis (SSA) is applied in order to augment the signal-to-noise ratio. Significant correlation with climatic indexes was found at different spatial and temporal scales, with El Niño–Southern Oscillation (ENSO) influence being stronger at the northern subregion, and notably the Antarctic Oscillation (AAO) and the Pacific Decadal Oscillation (PDO) showing strong correlation with summer flows in the southern subregion. Also, we found significant decreasing trends affecting a region between 37.5°S and 40°S. These are coherent with decreasing trends observed in precipitation in the area, and also with a decreasing trend observed in the Southern Oscillation Index (SOI). These findings provide, for the first time, a comprehensive view of the streamflow variability in a sensitive ecoregion in South America. We expect that these results will inform decision making in a context of increasing water demands for diverse uses as well as contribute to the general understanding of climatic patterns of variability in the Pacific Rim.

**Citation:** Rubio-Álvarez, E., and J. McPhee (2010), Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952–2003, *Water Resour. Res.*, 46, W05514, doi:10.1029/2009WR007982.

### 1. Introduction

[2] Water resources flowing from the western slope of the Andes Cordillera south of parallel 33°S constitute the cornerstone of Chile's agricultural and industrial activities, supply drinking water to more than half the Chilean population, and represent roughly 70% of the country's hydro-power installed capacity [Peña *et al.*, 1999]. Because of its unique geographical location between the Andes Cordillera and the Pacific Ocean, the hydrologic regime of Chilean rivers is strongly modulated by the region's climate, with interannual variability following closely that of precipitation and with temperature controlling snow accumulation and melt processes in the high Andes. In turn, precipitation over most of central and southern Chile falls during winter (June–July–August (JJA)) months, when frontal systems stemming from the Antarctic storm track reach lower latitudes. During the past decade, there has been increased awareness within the scientific and engineering community regarding the high interannual and long-term variability affecting the precipitation and temperature regimes. Recent studies show a decreasing trend in precipitation for many stations throughout

the country, together with increasing trends in temperature for those stations located in Chile's central valley and piedmont. The decreasing trend in precipitation is more pronounced in stations south of 38°S, and the temperature trends show opposite signs for coastal (negative) and inland (positive) stations [Comisión Nacional de Medioambiente, 2007; Pezoa, 2003].

[3] In this work we assess the degree to which already documented trends in climatic variability affect the hydrologic regime of rivers in the Chilean ecoregion located between parallels 34°S and 45°S, west of the Andes Cordillera. This is the first time in which a comprehensive streamflow data set of this spatial and temporal coverage is assembled and analyzed for this geographic region, and we build upon a number of studies that have improved the understanding of general climatic influences over the southern cone of South America [e.g., Aravena and Luckman, 2009; Lara *et al.*, 2008; Masiokas *et al.*, 2006, 2008; Villalba *et al.*, 2003]. We expect precipitation to have a strong influence on interannual variability, but the combined interplay of temperature gradients and physiography should introduce additional complexity in mixed-regime watersheds, which we attempt to uncover through the systematic analysis of a large database of unimpaired streamflow records. The specific objectives of our work include to define spatial and temporal patterns of streamflow variation representative of the period of record (1952–2003) and to identify, within these patterns, relationships with long-term climatic variability indexes as

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

well as with regional patterns of variation in precipitation and temperature.

## 2. Data and Methods

### 2.1. Area of Study

[4] The area of study spans the Chilean territory between parallels 34°S and 45°S, which includes what can be considered the central, south central, and the northern boundary of southern Chile. This region includes the basins of important river systems such as, from north to south, the Maule, Biobío, Imperial, Valdivia, Puelo, and Aysén rivers. Combined, these river systems represent roughly 9000 m<sup>3</sup>/s, or 30% of the entire available mean annual streamflow in the country [Peña *et al.*, 1999]. Water uses include irrigated agriculture in the Maule and Biobío regions; hydropower generation, equivalent to more than 70% of the installed capacity in Chile (see [http://www.cne.cl/cnewww/opencms/06\\_Estadisticas/energia/Electricidad.html](http://www.cne.cl/cnewww/opencms/06_Estadisticas/energia/Electricidad.html)); domestic and industrial water supply as well as important environmental services such as dilution of industrial liquid waste, plus freshwater for fisheries located in estuaries, lakes, and fjords south of 41°S.

[5] The regional climate ranges from Mediterranean in the northern extreme of the study area, to wet temperate to wet oceanic in coastal Patagonia. Annual rainfall averages from 500 to 5000 mm yr<sup>-1</sup>, generally increasing southward with a strong shadow effect by the coastal range, which diminishes precipitation within the central depression and generates areas with heavy rainfall in the ecoregion denominated Valdivian temperate rain forest [Pezoa, 2003]. Precipitation variability is dominated by variations in the southeastern Pacific anticyclone [Aceituno *et al.*, 1993; Pittock, 1980], and El Niño–Southern Oscillation (ENSO) displays a dissimilar level of influence on interannual variability, with the northern portion of the study area being generally more sensitive to El Niño events than the southern subregion [Aceituno, 1988; Montecinos and Aceituno, 2003].

[6] An important factor modulating the streamflow regime in the study area is the Andes Cordillera. Within the study area, a transition zone develops, in which the elevation of the cordillera decreases, from approximately 3000 m above sea level (asl) at 34°S to less than 2000 m asl at 45°S. This transition combines with changes in temperature and precipitation along the latitudinal gradient producing rivers with different hydrologic regimes.

### 2.2. Stream Gage Data, Preprocessing, and Validation

[7] Basic data for this study consist of monthly streamflow records provided by the Ministry of Public Works's Dirección General de Aguas (DGA), which maintains the network of stream gages along the country. Data were initially gathered for 89 stations measuring unimpaired flow located between 34°S and 45°S in the administrative regions denominated (from north to south) Maule, Biobío, Araucanía, Los Ríos, Los Lagos, and Aysén. After filtering out those stations with less than 25 years of continuous period of record, and after verifying for consistency using traditional methods in hydrological analysis [Searcy and Hardison, 1960], we adopted a database of 44 stations. These data still presented gaps of varying length, which

had to be filled through documented techniques such as regression with nearby stations, as well as monthly distribution curves obtained from the observed record, discriminating among dry (probability of exceedance greater than 66%), normal (probability of exceedance between 33% and 66%), and wet (probability of exceedance less than 33%), water years (in Chile, April through March). Because the objective of this study is to identify patterns of spatial and temporal variability, gap-filling efforts were limited in order to avoid duplicating excess information from one station to another. Where insufficient continuous information was available, the station was eliminated from the analysis. A special case was that of a group of stations located in the Los Ríos region, which consistently presented a shorter period of record (25 years) than that of the bulk of the stations (52 years). These stations were included in the analysis for the sake of maintaining an adequate spatial coverage, and were analyzed as explained later.

[8] Table 1 presents the stations included in this study and lists their location, average annual discharge, and coefficient of variation. Part of this information is also presented in Figure 1a. As seen in Figure 1a, data are spatially distributed somewhat uniformly between latitudes 35°S and 40°S. Many stations retained for the analysis are located at lower elevations, at the outlet of mountain valleys or within the central depression. Drainage direction for the majority of stations is from east to west. The lack of unimpaired flow records at higher elevations explains the relative scarcity of data near the international border with Argentina. Similarly, coastal watersheds are underrepresented because many of these streams do not constitute major sources of water supply and therefore are not monitored by DGA. South of parallel 40°S, the availability of streamflow data of sufficient quality decreases dramatically. Some stations do exist, but their period of record and data quality were considered insufficient for the purposes of establishing regional averages. Therefore only two stations (PCB and MJS, numbered 43 and 44 in Table 1) were included for this subregion, and their data were used solely for temporal variability analysis. Figure 1b also presents streamflow variability, expressed as the coefficient of variation of annual streamflow. The preliminary information provided by the coefficient of variation suggests two distinct zones of streamflow variability, divided approximately by parallel 38°S. North of this latitude we find stations with larger interannual variability, with longer periods-of-record and in general with more data gaps. Between 38°S and 40°S, streamflow records are more complete and present smaller interannual variability but have shorter length (maximum of 25 years). This distribution of interannual variability with respect to latitude is very consistent with that suggested by McMahon [1982] and contributes to confirm those findings in what was, for the aforementioned study, an unsampled region of the world.

[9] Normalized annual (April through March) and seasonal mean flows (winter, April–September; and summer, January–March) were used in the analysis. Normalization is advantageous in this context because all stations are given equal weight and absolute-value bias is avoided, and also because the effect of precipitation magnitude and watershed contributing areas are equalized [Wilks, 2005].

**Table 1.** Stream Gages Included in the Analysis<sup>a</sup>

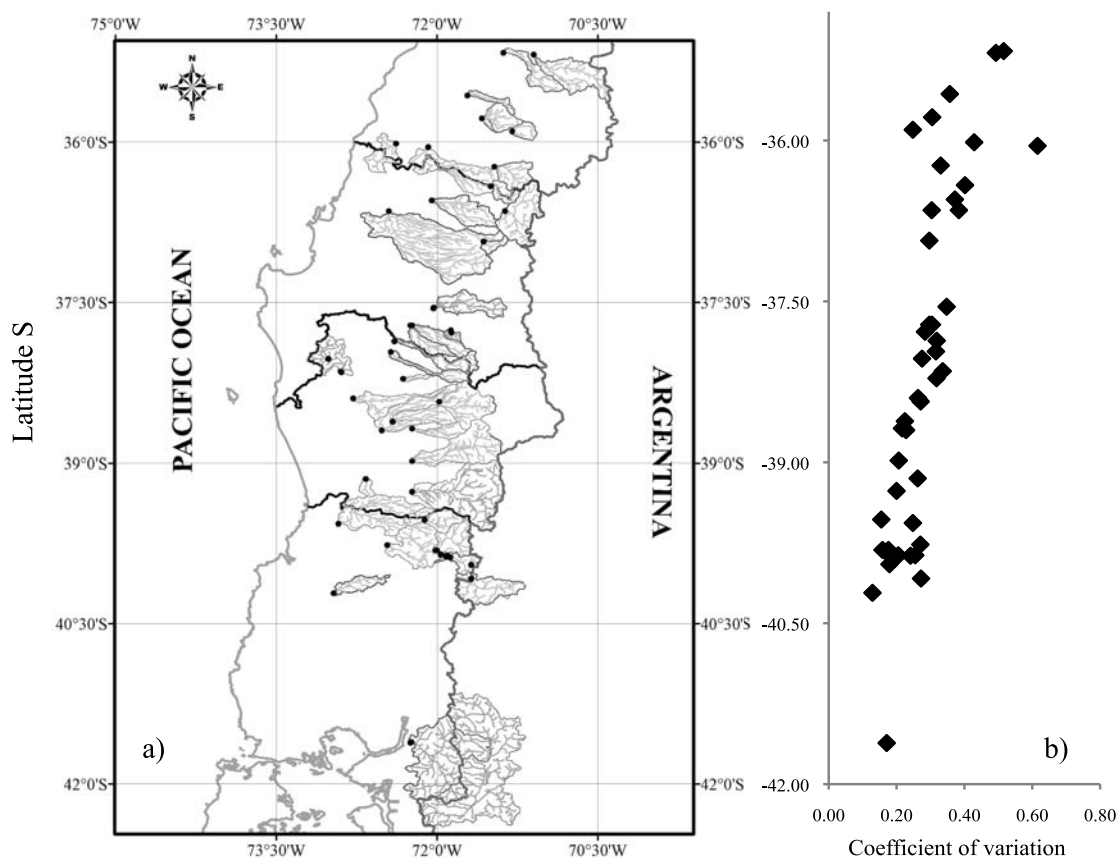
Number	Station Name	Latitude (deg)	Longitude (deg)	Annual Q (m <sup>3</sup> /s)	Coefficient of Variation	Area (km <sup>2</sup> )	Average Elevation (m above sea level)	Percent Q Winter	Percent Q Summer
1	Rio Perquilauquen En San Manuel	-36.42	-71.50	36	0.40	358	1305	63	4
2	Rio Longavi En La Quiriquina	-36.23	-71.47	47	0.33	669	1400	53	10
3	Rio Ancoa En El Morro	-35.90	-71.30	22	0.25	277	1374	48	20
4	Estero Upeo En Upeo	-35.18	-71.10	7	0.49	1412	2137	62	4
5	Rio Maule En Longitudinal	-35.57	-71.72	199	0.36	238	291	46	11
6	Rio Claro En Camarico	-35.17	-71.38	19	0.52	646	1037	59	7
7	Rio Perquilauquen En Quella	-36.02	-72.38	58	0.43	157	318	70	2
8	Rio Cauquenes En El Arrayan	-36.05	-72.08	8	0.62	1670	486	77	1
9	Rio Putagan En Yerbas Buenas	-35.78	-71.58	22	0.30	558	420	57	15
10	Rio Lirquen En Cerro El Padre	-37.78	-71.87	7	0.28	107	657	68	4
11	Rio Duqueco En Villucura	-37.55	-72.03	56	0.35	902	972	57	8
12	Rio Mulchen En Mulchen	-37.72	-72.25	21	0.30	417	469	64	6
13	Rio Bureo En Mulchen	-37.72	-72.23	42	0.30	545	666	66	5
14	Rio Malleco En Collipulli	-37.97	-72.43	29	0.32	420	811	65	5
15	Rio Ñuble En La Punilla	-36.65	-71.37	78	0.30	1434	1665	69	2
16	Rio Cato En Puente Cato	-36.55	-72.05	40	0.37	987	611	59	7
17	Rio Diguillin En San Lorenzo	-36.93	-71.57	17	0.30	196	1531	65	4
18	Rio Mininco En Longitudinal	-37.87	-72.40	16	0.32	702	826	67	3
19	Rio Itata En Balsa Nueva Aldea	-36.65	-72.45	136	0.38	4492	515	49	14
20	Rio Tolten En Villarica	-39.27	-72.23	272	0.20	2948	973	67	4
21	Rio Puyehue En Quitratue	-39.15	-72.67	7	0.26	145	207	59	8
22	Rio Puren En Tranaman	-38.03	-73.02	10	0.28	332	538	66	5
23	Rio Lumaco En Lumaco	-38.15	-72.90	18	0.34	539	252	53	12
24	Rio Cautin En Rari-Ruca	-38.43	-71.98	107	0.27	1201	1136	63	6
25	Rio Muco En Puente Muco	-38.62	-72.42	26	0.22	654	540	57	9
26	Rio Cautin En Cajon	-38.70	-72.52	144	0.23	2098	812	51	14
27	Rio Allipen En Los Laureles	-38.98	-72.23	142	0.21	1490	976	67	3
28	Rio Traiguén En Victoria	-38.22	-72.32	5	0.32	80	482	67	3
29	Rio Quepe En Vilcun	-38.68	-72.23	34	0.22	377	939	54	13
30	Rio Quillen En Galvarino	-38.40	-72.78	20	0.26	721	297	67	7
31	Bueno En Río Bueno	-40.22	-72.97	3724	0.13	437	179	50	15
32	Río Cruces En Rucaco	-39.57	-72.92	861	0.25	2572	409	65	6
33	Río Fui Antes Desague Neltume	-39.82	-72.00	1222	0.18	771	966	48	12
34	Fui En Des. Lago Piriñueico	-39.87	-71.90	874	0.26	1435	1180	48	8
35	Fui Arriba El Salto	-39.87	-71.92	839	0.24	1475	1172	49	8
36	Fui Bajo Junta Truful	-39.85	-71.97	1004	0.18	1552	1165	47	11
37	Huanehue En Des. L. Calafquen	-39.53	-72.12	673	0.16	736	734	47	16
38	Hum Hum En La Frontera	-40.08	-71.68	577	0.27	1063	1198	45	10
39	Hum Hum En Des. L. Piriñueico	-39.87	-71.90	638	0.21	1146	1193	46	11
40	Lipinza En Las Saleras	-39.95	-71.68	110	0.18	86	1332	48	9
41	Neltume En Des L. Neltume	-39.82	-72.02	886	0.16	770	966	58	10
42	San Pedro En Desague Lago Riniñue	-39.77	-72.47	4015	0.27	4214	914	53	12
43	Puelo En Carrera Basilio (PCB)	-41.62	-72.25	629	0.17	8718	1063	46	18
44	Mañihuales Antes Simpson (MJS)	-45.40	-72.47	176	0.19	4363	919	45	15

<sup>a</sup>Stations 1–30 and 43 with data for period 1952–2003. Stations 31–42 with data for period 1966–1990. Station 44 with data for period 1963–2006. Stations 43 and 44 not included in cluster analysis.

### 2.3. Spatial Analysis

[10] Identifying patterns of spatial variability involves the determination of geographical locations for which certain environmental variables display common features regarding distribution, temporal variability, extreme values, and the like. We applied clustering analysis to group the streamflow stations into homogeneous groups, which in turn we assumed represent homogeneous regions in terms of streamflow generation. This not an entirely rigorous concept, because streamflow generation even for closely located watersheds depends not only on the physical characteristics and meteorological forcings affecting a catchment but also on the scale of the watershed and its interaction with the physical processes that result in flow. However, here we assume that it might indeed be possible to define a “homogeneous region” for streamflow production based on point measurements related to each other through the clustering process. The theoretical basis of the clustering method has been described in detail

elsewhere [e.g., *Dettinger and Diaz, 2000; Kresch, 1994; Stahl and Demuth, 1999a, 1999b*], and therefore here we provide only the fundamentals of the application to the streamflow database. Each station’s time series is seen as a column vector in a matrix with  $n$ station columns and  $m$ times rows. Each column is normalized by its mean and standard deviation, and the distance between each pair of columns is computed using a norm. Two “close” columns are grouped together, and the distance between this group and the remaining columns is computed, so if the distance between a group and a vector is small enough, then the vector becomes part of the group. Intuitively, the records that are closest together are grouped first, so that the minimum distance between any station and an existing group increases at each successive grouping stage. A closing criterion is needed therefore to decide when to stop grouping variables. *Fovell and Fovell [1993]* suggest that Monte Carlo analysis can be used to determine the distance at which continued clustering



**Figure 1.** (a) Stream gage location, basin delineation, and river network. (b) Coefficient of variation as a function of latitude. Variability decreases as latitude increases within the study area.

ceases to be meaningful, but *Wilks* [2005] proposes a graphical method, in which a metric of the distance between the clusters and the next available vector is plotted versus the number of already grouped vectors. The point at which there is an abrupt change in the slope of this curve should be selected as the stopping level of aggregation. By and large, the stopping aggregation level remains a subjective decision, and judgment should be applied, by always verifying the physical significance of the obtained clusters.

[11] In this study, a special situation arose due to the fact that a specific subset of streamflow records, corresponding to the newly created Los Rios region (stations 32–42 in Table 1), present consistently shorter periods of record. The longest concurrent period of record with the remaining stations that could be achieved without recurring to inordinate amounts of gap filling was 25 years, from 1966 to 1990. In order to include these stations in the clustering process, we carried out a sensitivity analysis of the clustering results by separating the 52 year period of the remaining stations into three windows: 1952–1975, 1966–1990, and 1975–2003. We performed the clustering analysis for each window and verified the robustness of the method, i.e., that very similar clusters result from using the three time windows. We used different linkage methods and norms in order to test the stability of the resulting clusters, and we evaluated the quality of the association using the cophenetic correlation coefficient. By these criteria, we chose to retain the clusters

obtained by the combination of a Minkowski norm and an averaging linkage method, although the Euclidian norm yielded also results that were indistinguishable from the best combination. Because of space restrictions these results are not shown. In consequence, we conclude that it is possible to apply clustering to the entire group of 42 stations (not including stations 43 and 44, because of their geographical location, approximately 500 km south of the closest stream gage in the data set in the case of station 44) using only a 25 year record, in order to obtain representative spatial patterns of variation. Then the obtained spatial patterns can be used to compute regional normalized streamflow averages, this time using only those stations with the entire 52 year record, for time variability analysis.

#### 2.4. Temporal Variability

[12] The resulting normalized, regionally averaged annual and seasonal streamflow time series obtained from the clustering process were assessed in search of consistent patterns of temporal variability. This included trend analysis and a search for significant oscillatory cycles that may explain variability at decadal and subdecadal scales, taking into account the restricted length of the period of record. We augmented the signal-to-noise ratio of the streamflow regional averages using singular spectral analysis (SSA) and then estimated the periodogram of each SSA-reconstructed

time series by a two-step procedure, whereby the multitaper method (MTM) is applied to identify significant oscillatory periods and the maximum entropy method (MEM) is used to verify the robustness of the MTM estimation. The details of these methods have been documented intensively [e.g., *Allen and Smith*, 1996; *Dettinger et al.*, 1995; *Ghil et al.*, 2002; *Mann and Lees*, 1996; *Vautard et al.*, 1992] and therefore are not repeated here. Essentially, first SSA was applied to the original time series of composite streamflow anomalies, and a reconstructed time series (reconstructed component, or RC) was obtained by retaining a subset of the eigenvectors of the Toeplitz matrix of observed anomalies. The choice of eigenvectors or empirical orthogonal functions (EOFs) to keep in the reconstruction process is intended to increase the signal-to-noise ratio, and significant pairs of eigenvectors are identified by applying the same frequency and strong fast Fourier transform (FFT) tests [*Vautard and Ghil*, 1989]. Subsequently, we estimate the periodogram of the SSA-reconstructed time series using two independent methods. MEM [*Penland et al.*, 1991] is based on approximating a time series by an autoregressive (AR) process of order  $M$ , where  $M$  is the length of the time window used in scanning the data; it is a parametric method, in which the estimated parameters are the multiplying coefficients of harmonic functions that constitute the spectral density function at different frequencies. Unlike MEM, MTM is a nonparametric method that premultiplies the data by orthogonal tapers built to minimize the spectral leakage that arises from the finite length of the data set. The tapers are computed from the data set by solving a Rayleigh-Ritz minimization problem, as detailed by *Thomson* [1990] and *Percival and Walden* [1993]. In both methods, important considerations include the choice of length of the window used in estimating the autocorrelation function, and its relation to the number of available observations. We used a 10 year window length ( $M$ ) for the analysis of the 1952–2003 time series, and  $M = 8$  years for the MJS station (numbered 44 in Table 1, it has a shorter record, spanning the 1963–2003 period), which are consistent with the criteria presented by *Vautard and Ghil* [1989] and *Ghil et al.* [2002].

[13] Finally, we evaluate the relative influence of known climatic patterns by computing the correlation coefficients between the regional streamflow averages and ENSO [*Smith et al.*, 2008], Pacific Decadal Oscillation (PDO) [*Zhang et al.*, 1997], Antarctic Oscillation (AAO) [*Thompson and Wallace*, 2000], as well as Southern Oscillation Index (SOI) [*Ropelewski and Halpert*, 1989]. Each index was computed from original monthly values for the same temporal aggregation period applied to the streamflow series, i.e., annual (April–March), winter (April–September), and summer (January–March of the following year).

### 3. Results and Discussion

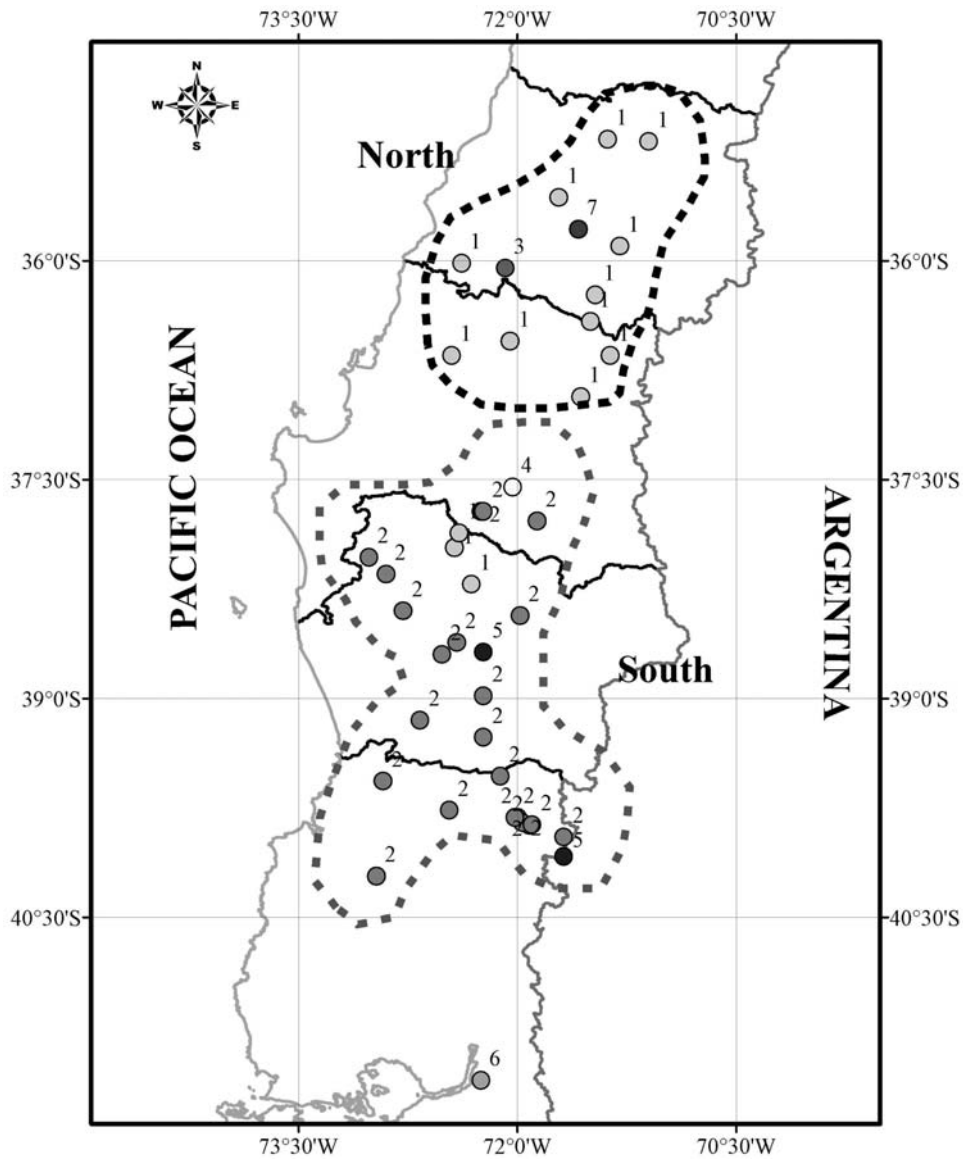
#### 3.1. Spatial Patterns of Variability: Cluster Analysis

[14] Figure 2 shows the clustering results for the annual streamflow anomalies time series. We found two large groups of stations, which we have called “north” (numeral 1) and “south” (numeral 2) clusters. The north cluster includes most stations located in the great Maule River watershed, and some stations at the northern edge of the Biobío region, although one station within the Biobío region also results

grouped in this cluster. The south cluster includes most stations within the Biobío region, plus stations in the northern edge of the Araucanía region (north of parallel 40°S). In delineating the regional patterns shown in Figure 2, we have attempted to reconcile the numerical results of the clustering method and physical meaningfulness of the regionalization. Therefore some stations that were not grouped with the larger clusters (which are shown at the far right edge of Figure 3a) are nevertheless shown within the hand-drawn limits of these. Figure 3b illustrates the criterion used to stop the grouping process, in which the threshold distance between merged clusters (approximately 3.0) corresponds to a change in slope of the distance versus stage curve. This method of supervised classification relies on a subjective definition of when a change in slope merits stopping of the clustering process; as such, the final clusters depend on human judgment. Stations Puelo en Carrera Basilio (PCB, shown in Figure 2a as the lowermost dot) and Manihuales antes Junta Simpson (MJS, not shown in Figure 2) are special cases in that they are analyzed as individual time series, despite the fact that the clustering method did not result in them being included within any homogeneous streamflow zones. We justify this decision on these stations being the only ones with long enough period of record and sufficient data quality within the southernmost part of the study area.

[15] Figures 4a and 4b show results of the clustering method applied to winter and summer flow anomalies. In this case, “summer” is defined as spanning the January–February–March (JFM) period only, after analysis of a 6 month period from September through March resulted in many clusters consisting on few stations each, and with many overlapping regions among different clusters; this result was considered not meaningful from a hydrologic standpoint, as we would expect dry-season flow to be consistent with precipitation and temperature regimes, modulated by watershed elevations. A first comment that arises from inspecting Figure 4a is that winter flow patterns correspond almost exactly to those of annual flow, indicating that interannual variability is strongly determined by winter streamflow. This is true even for the northern stations, which are located in a geographic region where the Andes Cordillera is higher, and therefore present hydrologic regimes more strongly dominated by spring and summer snowmelt. As in Figure 2, two regions are clearly defined, with the boundary located at approximately 37.5°S. The presence of this boundary is strikingly coincident with the “zero boundary” found in the second principal component (PC) for annual and seasonal precipitation during the 1962–2000 period reported by *Pezoa* [2003]. This PC accounts for between 10% and 15% of precipitation variability depending on the seasonal averaging, and displays a decreasing trend at the annual, spring, and fall aggregation levels.

[16] The summer grouping, shown in Figure 4b, shows a well defined southern cluster including most stations in the Biobío region plus the available stations in the Araucanía and Los Rios region (labeled with the numeral 4). The northern boundary of the south cluster again matches approximately the “zero boundary” found for the second PC of precipitation data presented by *Pezoa* [2003]. Remarkably, the north cluster does not appear at this aggregation level. Instead, smaller groups of stations appear, such as those indicated with the numerals 2, 6, and 9. The stations



**Figure 2.** Cluster results for 43 stream gages, mean annual flow, period 1966–1990. Spatial clusters from annual streamflow anomalies are delineated by hand; numerals labeling each station correspond to cluster number. Stream gage MJS is not shown.

belonging to these smaller clusters correspond to different watersheds, are located both close to the coast and at higher elevations, and in general do not present a common set of hydrologic features that could lead to an intuitive grouping of their summer streamflow. On addition, from Figure 1 it can be seen that many of the stations in this region present the highest degree of variability. In summary, we conclude that only the south cluster is reliable for summer flows and include only the latter regional average, plus stream gages PCB and MJS, in the analyses below.

**3.2. Temporal Variability**

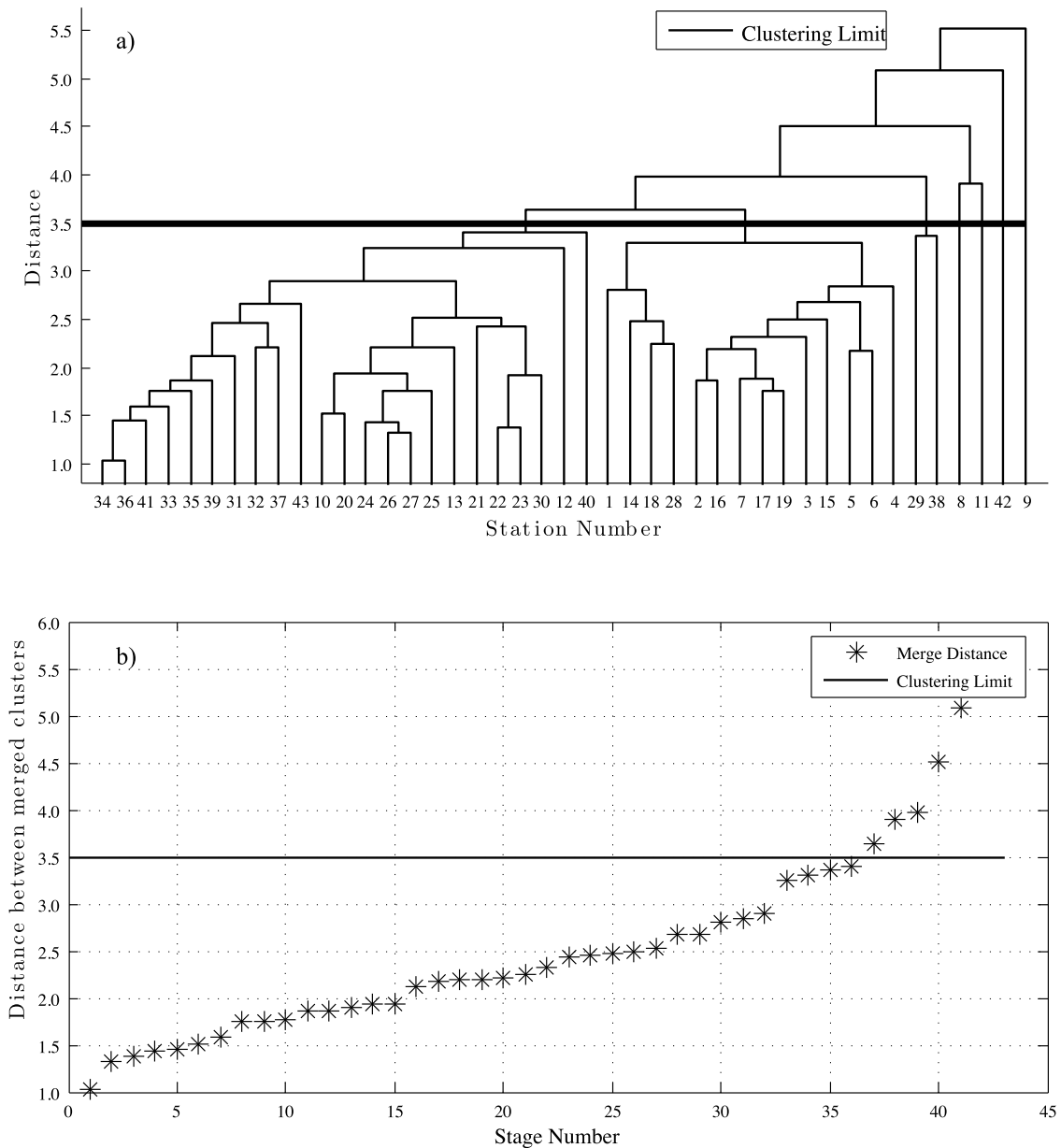
**3.2.1. Relationship With Climatic Indexes**

[17] Table 2 presents the corresponding correlation coefficient  $R$ , and  $p$ -value for different combinations of climatic forcings and streamflow series. We present in bold face the significant correlation coefficients at 95% confidence level.

The first group of results shows that annual flows for the north and south clusters are positively correlated with ENSO 3.4 and negatively correlated with SOI. The two stations located farther south in the study area do not show a significant relation with ENSO and SOI, which is consistent with the fact that the influence of these two indexes over precipitation diminishes consistently with south latitude. We also verify that AAO is negatively correlated with annual flows, and that this relation is robust for annual and winter values of AAO south of 37°S and even for summer AAO for the MJS stream gage. The negative correlation in the case of the MJS station contributes to strengthen the annual correlation and is explained by the fact that in this region, summer precipitation and snowmelt contribute significantly to river flows (see Table 1).

[18] When focusing on winter flows, the influence of ENSO and SOI, with different signs, expands to the Puelo River (PCB) such that positive ENSO phases are related to



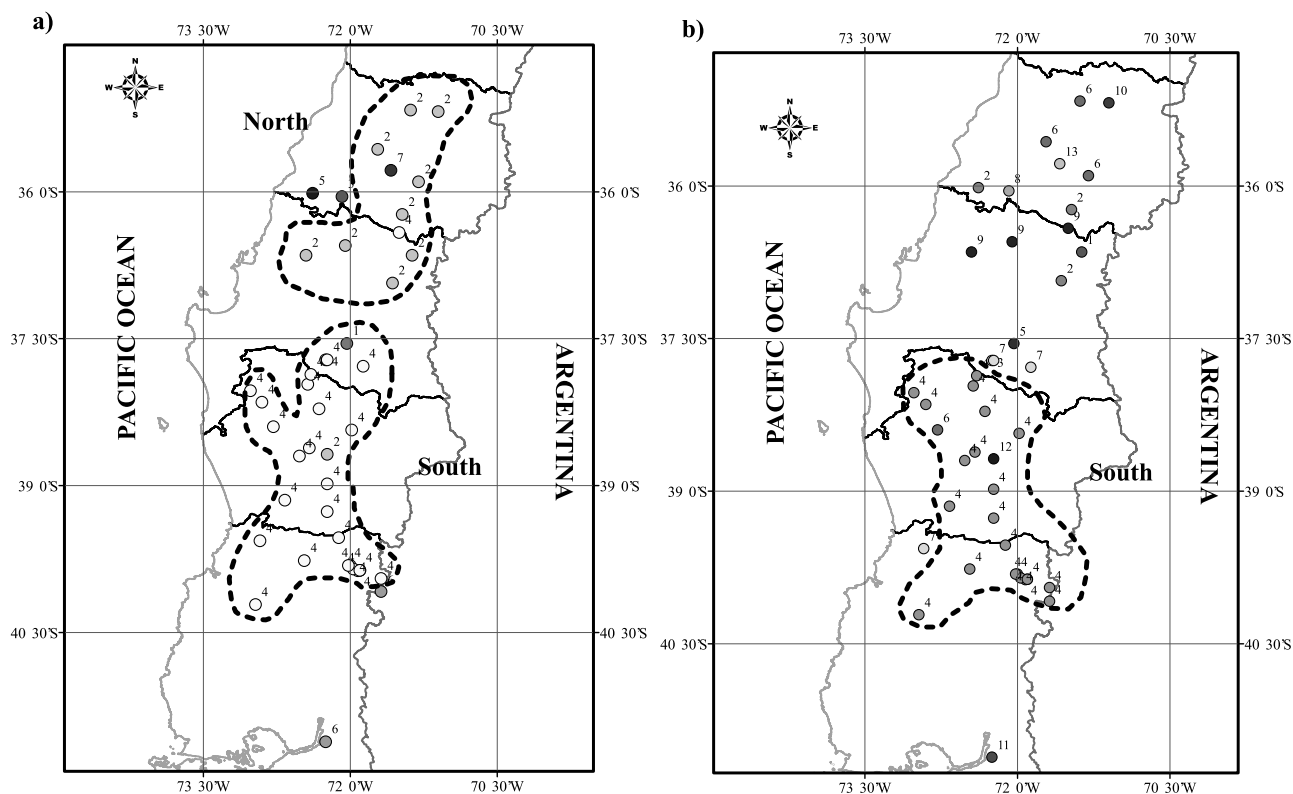


**Figure 3.** (a) Hierarchy tree resulting in spatial patterns shown in Figure 2. (b) Distance between merged clusters versus stage number in clustering process. Solid line indicates stopping threshold.

larger winter flows with correlation in the order of 0.3. AAO is negatively correlated to the south cluster and with the MJS station, but not to the north cluster nor to the PCB station. Finally we see strong negative correlations between summer flows for the south cluster, i.e., stations in south central Chile and same season as well as previous winter PDO and AAO values. Puelo River (PCB) summer flows are positively correlated to previous-season SOI and are therefore negatively related to previous-season ENSO. For coastal Aysén (MJS station), we find significant positive correlation with same-season SOI but negative correlation with previous-season PDO.

[19] *Verdon and Franks* [2006] use proxy climate records derived from paleoclimatic data to investigate the long-term behavior of ENSO and PDO. They find that the positive phase of PDO (or IPO) is associated with increasing frequency of El Niño events (warm ENSO episodes) and that

the negative phase of PDO is a favorable condition for the development of La Niña events (cold ENSO episodes). Hence, according to the results shown in Table 2 there is a negative correlation between PDO and the summer patterns flows so that during a negative phase of PDO, we expect increased summer streamflow south of the Maule River basin, associated with a possible reduction in the values of ENSO according to the *Verdon and Franks* [2006] hypothesis. However, given the positive correlation between ENSO and winter (as well as annual, although less intense and widespread) streamflow throughout the area of study (Table 2), we can also expect diminished winter flows under negative PDO conditions. Combined, these two results imply that intense negative phase of PDO would result in less overall flow and a shift to summer discharge for an extended geographical region between the Maule and Puelo river basins. The same pattern is observed for the MJS station, but

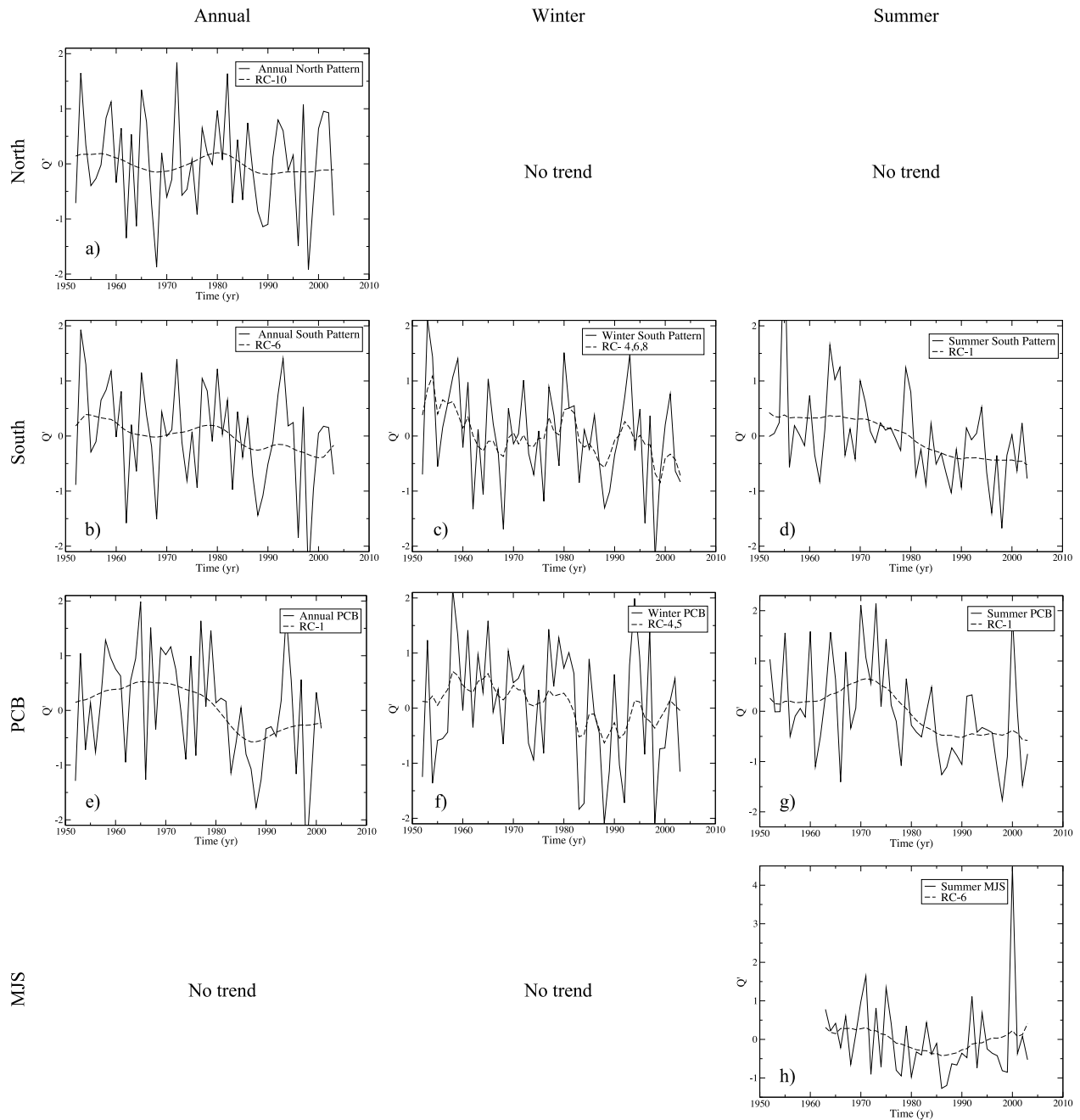


**Figure 4.** Streamflow clusters for (a) average winter flow anomalies (April through September) and (b) average summer flow anomalies (January through March). Clusters are delineated approximately, in order to convey spatial coherence. Stream gage MJS is not shown.

**Table 2.** Correlation Coefficients Between Annual Regional Streamflow and Climatic Indexes for the 1952–2003 Period<sup>a</sup>

	Add Heading	ENSO 3.4			PDO			AAO			SOI		
		Annual	Winter	JFM	Annual	Winter	JFM	Annual	Winter	JFM	Annual	Winter	JFM
Annual													
North	R	<b>0.503</b>	<b>0.515</b>	<b>0.422</b>	0.203	0.118	(0.243)	-0.191	(-0.243)	-0.078	<b>-0.534</b>	<b>-0.570</b>	<b>-0.382</b>
	p	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.002</b>	0.149	0.406	(0.083)	0.176	(0.083)	0.583	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.005</b>
South	R	<b>0.368</b>	<b>0.373</b>	<b>0.306</b>	0.114	0.077	0.092	<b>-0.291</b>	<b>-0.364</b>	-0.112	<b>-0.425</b>	<b>-0.464</b>	<b>-0.293</b>
	p	<b>0.007</b>	<b>0.007</b>	<b>0.027</b>	0.421	0.588	0.518	<b>0.037</b>	<b>0.008</b>	0.428	<b>0.002</b>	<b>0.001</b>	<b>0.035</b>
PCB	R	(0.263)	0.216	0.240	-0.107	-0.128	-0.046	<b>-0.299</b>	<b>-0.313</b>	-0.221	(-0.258)	(-0.257)	-0.191
	p	(0.065)	0.132	0.094	0.461	0.376	0.752	<b>0.035</b>	<b>0.027</b>	0.124	(0.071)	(0.072)	0.184
MJS	R	0.125	0.108	0.090	-0.194	-0.182	-0.125	<b>-0.493</b>	<b>-0.439</b>	<b>-0.379</b>	-0.042	-0.033	-0.007
	p	0.437	0.501	0.577	0.223	0.254	0.436	<b>0.001</b>	<b>0.004</b>	<b>0.015</b>	0.793	0.836	0.968
Winter													
North	R	<b>0.506</b>	<b>0.518</b>	...	<b>0.273</b>	0.189	...	-0.060	-0.131	...	<b>-0.536</b>	<b>-0.571</b>	...
	p	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	...	<b>0.050</b>	0.179	...	0.671	0.354	...	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	...
South	R	<b>0.308</b>	<b>0.332</b>	...	0.120	0.110	...	-0.224	<b>-0.338</b>	...	<b>-0.370</b>	<b>-0.415</b>	...
	p	<b>0.026</b>	<b>0.016</b>	...	0.396	0.440	...	0.111	<b>0.014</b>	...	<b>0.007</b>	<b>0.002</b>	...
PCB	R	<b>0.397</b>	<b>0.352</b>	...	0.006	0.012	...	-0.114	-0.198	...	<b>-0.364</b>	<b>-0.372</b>	...
	p	<b>0.004</b>	<b>0.010</b>	...	0.967	0.931	...	0.423	0.160	...	<b>0.008</b>	<b>0.007</b>	...
MJS	R	0.258	0.236	...	-0.017	0.034	...	(-0.295)	<b>-0.337</b>	...	-0.189	-0.176	...
	p	0.103	0.137	...	0.917	0.834	...	(0.061)	<b>0.031</b>	...	0.236	0.271	...
JFM													
South	R	-0.058	-0.096	0.006	<b>-0.366</b>	<b>-0.375</b>	<b>-0.318</b>	<b>-0.520</b>	<b>-0.389</b>	<b>-0.556</b>	0.064	0.082	0.054
	p	0.682	0.500	0.967	<b>0.008</b>	<b>0.006</b>	<b>0.022</b>	<b>0.000</b>	<b>0.004</b>	<b>0.000</b>	0.650	0.565	0.706
PCB	R	<b>-0.318</b>	<b>-0.308</b>	(-0.263)	<b>-0.409</b>	<b>-0.443</b>	<b>-0.369</b>	<b>-0.398</b>	<b>-0.319</b>	<b>-0.422</b>	<b>0.327</b>	<b>0.305</b>	(0.270)
	p	<b>0.022</b>	<b>0.026</b>	(0.060)	<b>0.003</b>	<b>0.001</b>	<b>0.007</b>	<b>0.004</b>	<b>0.021</b>	<b>0.002</b>	<b>0.018</b>	<b>0.028</b>	(0.053)
MJS	R	-0.236	-0.217	-0.219	<b>-0.316</b>	<b>-0.337</b>	-0.207	-0.221	-0.113	(-0.279)	<b>0.312</b>	0.244	<b>0.313</b>
	p	0.138	0.174	0.170	<b>0.044</b>	<b>0.031</b>	0.194	0.165	0.484	(0.077)	<b>0.047</b>	0.125	<b>0.047</b>

<sup>a</sup>MJS for 1963–2003 period. Bold face values are significant at 95% confidence level. Values in parentheses could be significant at lower confidence levels (>90%). PDO, Pacific Decadal Oscillation; AAO, Antarctic Oscillation; SOI, Southern Oscillation Index.



**Figure 5.** Significant trends found through Singular spectral analysis (SSA) decomposition of annual and seasonal streamflow series. Trends are significant at a 95% confidence level according to the Mann-Kendall nonparametric test applied to individual principal components.

this result is less conclusive from a statistical standpoint. From another point of view, if we look at the results shown in Table 2 in terms of summer regional discharge, it is interesting to note that the effects of PDO appear to be localized in two different zones (from a statistical standpoint). Summer PCB shows the strongest correlation with PDO and also is the only flow series showing a statistically significant relation with ENSO. However, MJS is positively correlated with SOI and weakly correlated with ENSO. It is usually accepted that SOI and ENSO are correlated, so the fact that MJS and SOI are significantly related could hint at ENSO having an extended area of influence farther south from central Chile.

**3.2.2. SSA Decomposition and Trend Analysis**

[20] Figure 5 shows the reconstructed trend and original, unfiltered series, and Table 3 presents a summary of significant oscillatory and trend components for each streamflow series. In Figure 5, the top two rows represent the different regional streamflow averages identified through clustering analysis, and the bottom two rows correspond to the individual gages PCB and MJS. Columns present the different levels of temporal aggregation. First, in terms of annual flows we see significant trends identified for the north, south and PCB series (Figures 5a, 5b, and 5e). These trends show different features: The stronger trends are those

**Table 3.** Significant Oscillatory Periods, Eigenlements, and Trend Components Resulting From SSA-MTM, MEM Analysis<sup>a</sup>

Regional Flow Index	Period					Pairs of Eigenlements			Trend Component		
	1	2	3	4	5	1	2	3	1	2	3
Annual											
North	5.95	2.42	...	...	...	(2,4)	...	...	10	...	...
South	5.95	3.61	2.01	...	...	(2,3)	(9,10)	...	6	...	...
PCB	4.21	2.32	...	...	...	(5,6)	(9,10)	...	1	...	...
MJS	6.69	3.08	...	...	...	(3,4)	(7,8)	...	1	...	...
Winter											
North	6.61	...	...	...	...	(1,2)	...	...	...	...	...
South	6.83	3.37	...	...	...	(2,3)	(9,10)	...	4	6	8
PCB	11.38	6.10	4.02	...	...	(1,2)	(4,5)	...	4	5	-
MJS	7.59	3.03	...	...	...	(1,2)	(5,6)	...	...	...	...
Summer (JFM)											
South	9.39	5.00	3.02	2.61	2.14	(2,3)	(4,5)	(6,7)	1	...	...
PCB	8.13	<b>4.65</b>	4.49	2.88	<b>2.69</b>	(2,3)	(4,5)	(7,8)	1	...	...
MJS	4.97	...	...	...	...	(2,3)	...	...	6	...	...

<sup>a</sup>Periods are significant at the 99% confidence level against a red-noise null hypothesis, except for boldface values, which are significant at 95% confidence level.

obtained for the south and PCB series, and the latter shows a distinct “rebound” behavior during the last decade of the twentieth century. This rebound is associated with the winter trend (Figure 5f), which not only displays this feature but also includes a cyclic component with a 6 year period. The shape of the reconstructed annual trend component for PCB is very similar to that of the reconstructed SOI series presented by *Ghil et al.* [2002], with an increasing phase lasting until approximately 1970, then a sudden drop lasting for about 10 years, and then a weaker trend during the last decade of the twentieth century. In comparison, the winter trend for the south series is much stronger than that of PCB, and also displays a cyclic component. The summer season series (Figures 5d, 5h, and 5i) also shows a decreasing trend for the south, PCB, and MJS series. It is interesting to note that the decreasing trend component does show a marked strengthening during the decade of 1970, to weaken in subsequent years. In MJS, the summer trend shows a similar “rebound” as the annual and winter trends in PCB, suggesting that there is a lagged effect influencing these two watersheds, separated by 500 km approximately. The timing of the trend reversal for PCB and MJS (around 1990) is approximately coincident with a noticeable change in the trend of PDO annual average from a strong increase to an oscillatory, decreasing trend [see *Chen et al.*, 2008].

### 3.2.3. MTM and MEM Periodogram Estimation and Series Reconstruction

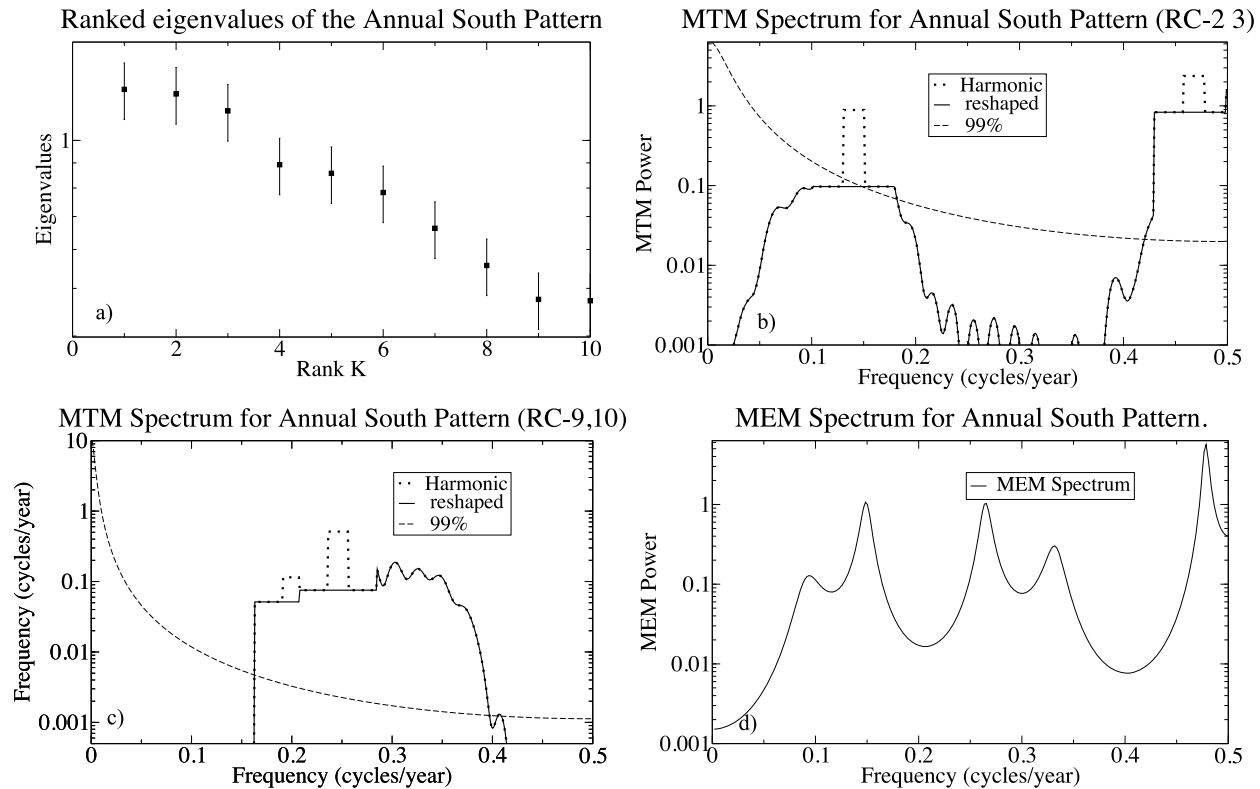
[21] The streamflow series were reconstructed using significant pairs of principal components obtained through SSA. These reconstructed series were analyzed with the multitaper method (MTM), and the identified oscillatory periods were verified using the maximum entropy method (MEM). All MTM-identified periods were validated by MEM. Because of space limitations, in Figure 6 we show only one example of the applied methodology. Figure 6a presents the singular spectrum of the annual south regional flow index. From the strong FFT and same frequency criteria, two pairs of significant eigenlements are identified, namely, 2–3 and 9–10. Figures 6b and 6c show the MTM spectrum for the RCs associated with these two pairs of eigenlements. It can be seen that at 99% confidence levels, all four frequencies are identified as harmonic against a red-noise null hypothesis. Figure 6d shows the MEM spectrum for the SSA-reconstructed series resulting from the two pairs

of eigenlements indicated above. The three main cycles identified by MTM (0.15, 0.26, and 0.48 cycles/yr) are also present in the MEM spectrum. This is also true for all other series and time periods (not shown).

[22] Table 3 summarizes the results obtained for this part of the analysis. A 2 year cycle is found for the north, south, and PCB annual and summer series, suggesting that at this frequency, interannual variability is strongly influenced by dry season discharge. A second group of periods, between 3 and 6 years, appear for all regional streamflow averages at different temporal aggregation levels. In particular a quasi-quadrennial period appears only for the annual, winter, and summer PCB series. The quasi-biennial and quasi-quadrennial periods have been associated to ENSO, and also are related with in tropical SSTs and zonal winds over the Pacific Ocean [*Robertson and Mechoso*, 1998]; with respect to the significant 6 year period shown in Table 3, this has been related with North Pacific SSTs [*Robertson*, 1996].

[23] The longer periods, of approximately 7, 8, 9, and 11 years, are found for series south of 37°S, with the lengthiest of these being associated with winter PCB streamflow. The period of 11.38 years is quite larger than the window length ( $M = 10$ ) adopted for the analysis. However, the frequency associated to this spell is 0.088 cycles/yr. Considering that our Rayleigh frequency is  $1/N = 1/52 = 0.019$  cy/yr, for the MTM method the frequency bandwidth is  $p \times f = 3 \times 0.019 = 0.058$  cy/yr, which represents the minimum frequency that MTM can detect. Therefore, although this frequency satisfies the main criteria for this method, and also is detected (not shown) for MEM spectrum, it represents a spell that may not be accurate due to its value, close to the length of the MTM window for this series. In view of the correlation analysis results shown below (Table 2) we believe that these long (near-decadal) periods found in summer flow could be related to the PDO and AAO indexes. Further research is needed on the spatial correlation structure of flows and climatological variables in order to ratify this assertion.

[24] Also, for the winter PCB time series, SSA identified the eigenlement pair (4,5) as a significant possible oscillatory mode (not noisy) with a 6.1 year period. On the other hand, the Mann-Kendall test yields that the trend present in the time series is also associated with this eigenpar. Therefore, by removing the trend for MTM analysis, we also are



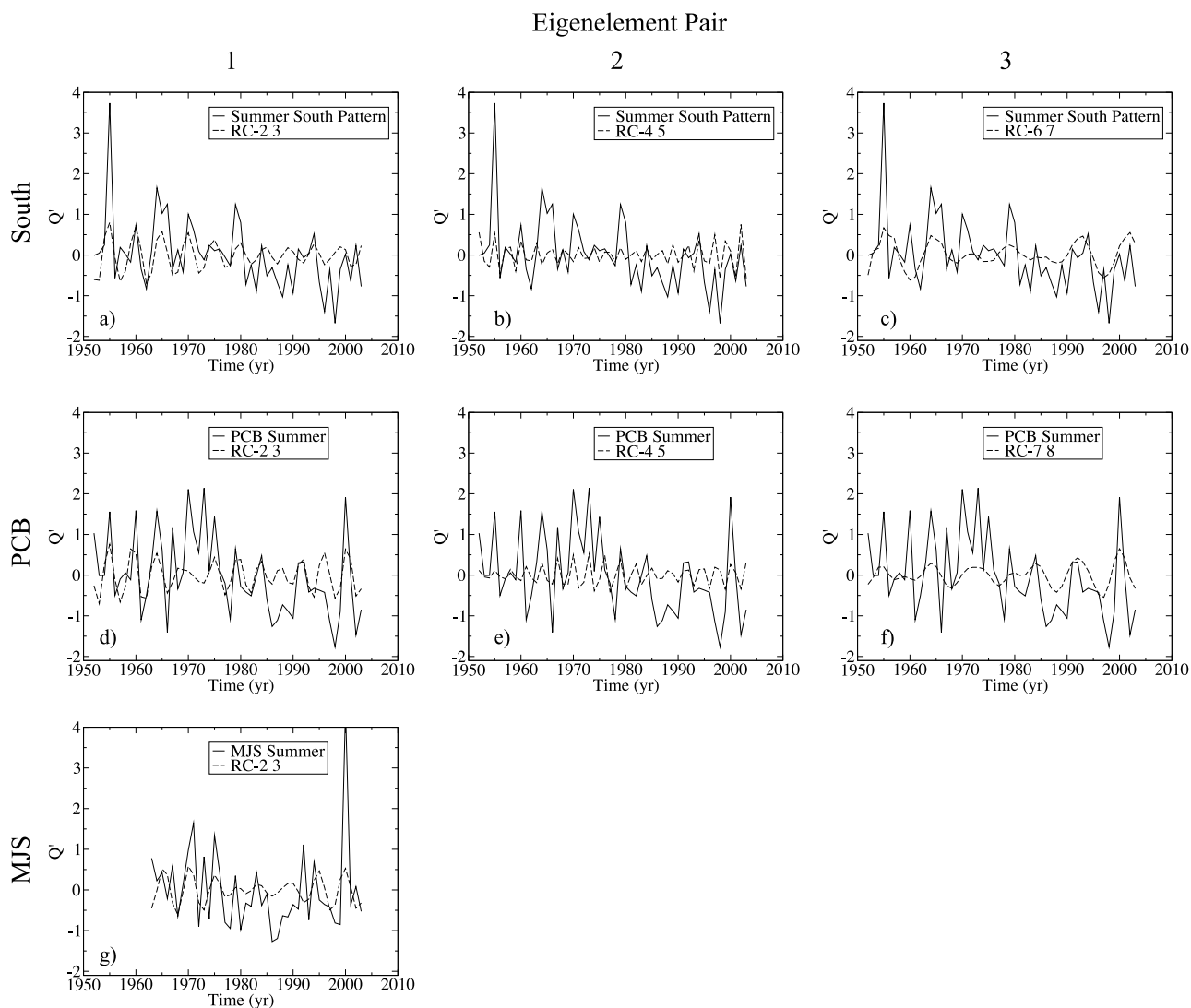
**Figure 6.** Example of application of SSA, multitaper (MTM), and maximum entropy (MEM) to annual streamflow index corresponding to the south subregion. (a) Ranked eigenvalues from SSA analysis; components 2–3 and 9–10 are significant and retained for variability analysis. (b and c) Multitaper periodogram estimation based on reconstructed components 2–3 and 9–10, respectively. (d) Maximum entropy periodogram estimation. Significant cycles in Figures 6b and 6c match those shown in Figure 6d.

losing this possible 6.1 year spell. The trend found in the winter PCB series may indicate several things (Figure 5f). For example, the trend component itself shows a distinct behavior before and after 1983, with a decreasing period leading to an increasing phase. Also, the trend shows a significant oscillation period so we might expect future increases of winter streamflow, modulated every 6 years. Of course, this is relatively short-term behavior that could very well be modulated by much larger scale oscillatory patterns, as shown by *Lara et al.* [2008].

[25] Figures 7, 8, and 9 present the MTM-reconstructed time series of significant RCs for every regional streamflow average for summer, winter, and annual aggregation levels respectively. For the south cluster, we note a decrease in the amplitude of the RC 2–3 oscillation, which occurs approximately in 1975 (Figure 7a). After 1985, the amplitude of this signal stabilizes at approximately one half standard deviation. For the other two RC pairs, we see again periods of relatively high amplitude at the beginning of the series, followed by periods of a more subdued behavior between 1970 and 1990, finishing with increased variability in the last 10 years (Figures 7b and 7c). The two southernmost stations within the area of study show a different behavior. We still observe variations in amplitude for each reconstructed component, but for PCB they are slighter than for the south pattern (Figure 7d) and occur out of phase with the latter, such that the 4–5 RC shows increased variability between 1965 and 1980, and smaller amplitudes thereafter

(Figure 7e). The summer MJS time series yielded only one significant eigenpar (RC 2–3, in Figure 7g), and this component behaves somewhat similarly to the south RC 2–3 series, with 15 year intervals of high, low, and high variability.

[26] For winter flows, the north cluster shows a slight decrease in variability starting from 1975 (Figure 8a). Farther south we find indication of a possible relation between streamflow variability and the behavior of large-scale climatic patterns. In Figure 8b a decrease in variability can be appreciated between 1970 and 1985, and a return to increased amplitude after 1990. This pattern is coincident with a sequence of negative and positive phases in PDO. A similar behavior can be seen for MJS, although in this case the transition is defined by a smooth (Figure 8f) and an abrupt pattern (Figure 8g) that closely replicate phase changes of the PDO. As suggested by *Verdon and Franks* [2006], positive phases in PDO are correlated with increased ENSO activity, in particular with El Niño events. This would explain a more active winter streamflow series for the south and PCB patterns, and the fact that although PCB and PDO are not strongly correlated (Table 2), influence of the latter would be felt through the relationship with ENSO. For MJS, however, there is no significant correlation with ENSO or PDO; from Table 2 we see that winter MJS flow is negatively correlated with winter and annual AAO, which has experienced increased phase shifts after 1990, in



**Figure 7.** MTM reconstruction of SSA reconstructed components (RCs) for annual regional streamflow composites resulting from cluster analysis. Solid line shows original time series, and dashed line shows reconstruction based on pair of RCs as indicated in legend.

effect generating a quasi-biennial cycle that could be affecting river flows at higher south latitudes.

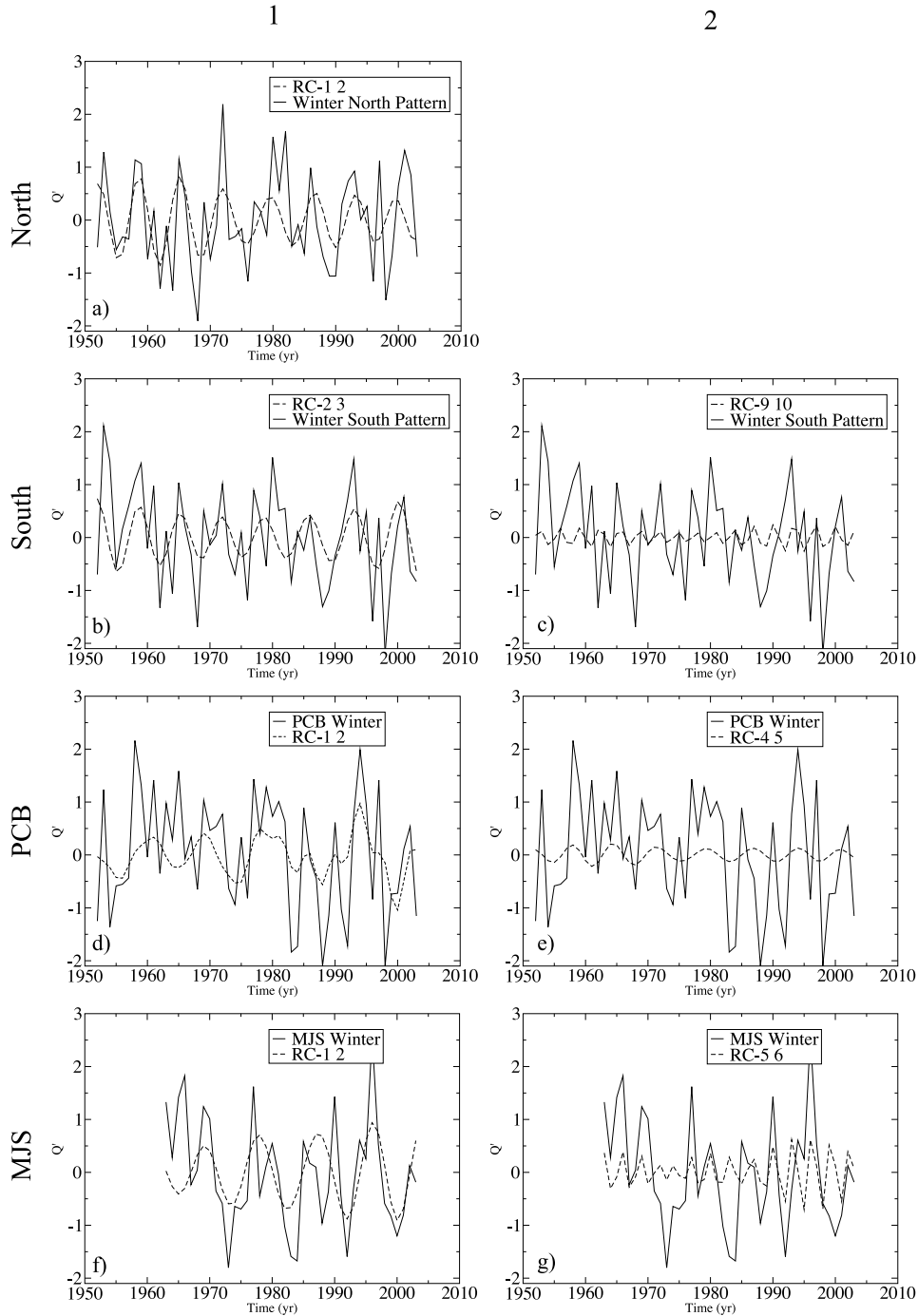
[27] Finally, at the annual aggregation level we see results that suggest that seasonal variability patterns do not cancel out, but instead reinforce each other. For the north cluster (Figure 9a), amplitude in the reconstructed RC 2–4 series is reduced approximately by one half after the mid 1970s, whereas for the south cluster this phenomenon is slighter (Figure 9b) while increased variability after 1990 can be seen in the RC 9–10 reconstruction (Figure 9c). For the Puelo River station (PCB), the reconstructed RC 5–6 pair also shows a shift (decreasing) in amplitude, but this occurs at a later date, around 1980 (Figure 9d), and is followed by increased variability at a larger frequency from approximately 1985 (Figure 9e). For the Mañihuales River station (MJS), for summer flows we identify three periods with distinct behavior (Figure 9f), although the length of record is insufficient for concluding emphatically. Figure 9g shows that the RC 7–8 reconstruction captures the same pattern identified for winter flows, which suggests a significant phenomenon affecting winter streamflow (precipitation

contribution to annual volume) related somehow to AAO through the increased variability displayed by this climatic forcing starting in the last decade of the twentieth century.

#### 4. Conclusions

[28] A myriad public policy and private decisions, such as land use planning and development, strategic decisions on government support for productive sectors such as forestry, aquaculture, and agriculture, private investment in hydropower and other areas, etc., are sensitive to current and future availability of water resources in the quantity, timing, and quality required for these objectives. In Chile, these questions acquire special relevance because of increased pressure on land and water resources by agricultural, logging, fisheries, and hydropower projects. In this paper we present a comprehensive analysis of current patterns of streamflow variability for a significant portion of the Chilean territory and suggest possible future scenarios in view of projected changes in regional and global climate.

Eigenelement Pair



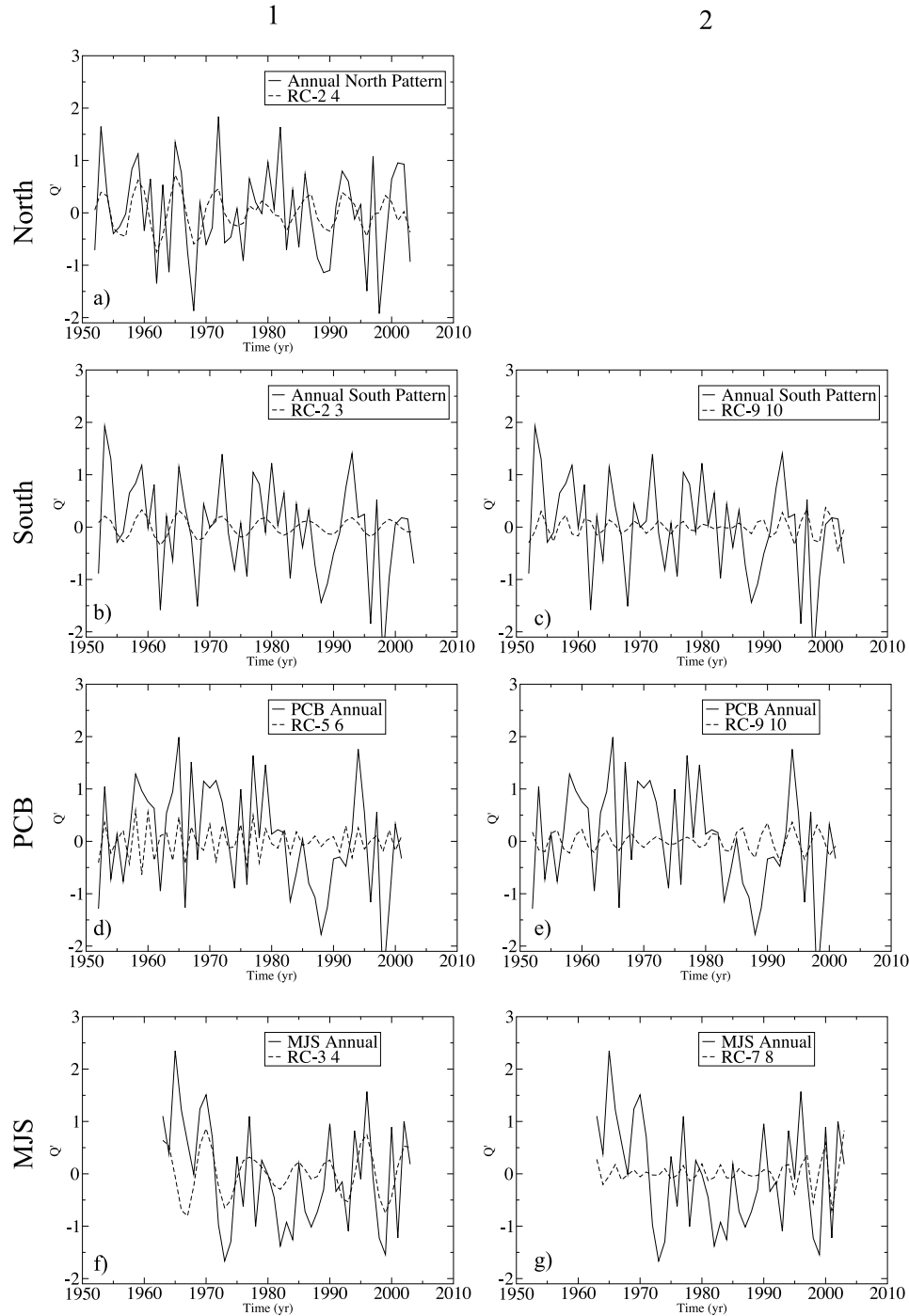
**Figure 8.** MTM reconstruction of SSA RCs for winter regional streamflow composites resulting from cluster analysis. Solid line shows original time series, and dashed line shows reconstruction based on pair of RCs as indicated in legend.

[29] Cluster analysis of 43 stream gages located in south central and southern Chile, between parallels 34°S and 40°S indicates that two major geographical zones can be considered homogeneous from the point of view of water availability variation. These zones include on one hand the greater Maule River basin and its tributaries (north) and on the other hand those rivers located within the Itata, Biobío, Imperial, and Valdivia river basins (south). On the basis of the clustering results, the Puelo River, located at the

southern edge of the Los Lagos region, presents a more distinct hydrologic regime than that of the stations included in the south cluster. An additional station, MJS, was included in the analysis in order to assess patterns of temporal variability that could be representative of a large geographic region between 40°S and 45°S.

[30] Advanced time series analysis techniques were applied to the regional streamflow averages suggested by the clustering process. Correlation analysis with climatic for-

Eigenelement Pair



**Figure 9.** MTM reconstruction of SSA RCs for summer (January–February–March) regional streamflow composites resulting from cluster analysis. Solid line shows original time series, and dashed line shows reconstruction based on pair of RCs as indicated in legend.

cings reinforce previous findings in terms of a decreasing influence of ENSO over annual flows with southern latitude, which can be traced to a positive/negative correlation between annual and winter ENSO and winter/summer flows at the PCB station. We also found significant negative correlation between PDO as well as AAO and summer flows south of 37°S. This correlation explains, in view of phase changes of these two climatic forcings observed approxi-

mately after 1990, what can be interpreted as an increase in streamflow variability (particularly for summer, but also for mean annual flows) observed from the decomposition of the flow series into oscillating modes. Although certain changes in streamflow regime can be located around 1975, we found no conclusive evidence of this being related to the Pacific Shift [Miller *et al.*, 1994]. A more defined behavior was found in some PCs of the streamflow time series, where



decreasing trends were identified for all geographical regions at least at one temporal aggregation level (annual, winter, and summer). This is especially true for the south cluster (which shows decreasing annual, winter, and summer streamflow) and is consistent with decreasing trends in precipitation for this region reported in the literature. An additional identified feature was an increasing pattern found in Puelo and Mañihuales rivers after 1990, which is possibly related to a shift in AAO and PDO regimes around the same date. The fact that this increasing pattern appears in winter PCB but in summer MJS suggests a lagged effect, with at least 6 months difference, of the climatic or physiographic factors affecting streamflow production in these two basins. Lags, interactions, and other characteristic behavior of streamflow with respect to multiple climatic indexes and different time scales can be further studied using variations of the techniques shown here [e.g., Dominguez and Kumar, 2008; Dominguez et al., 2008] and should be the subject of future work. Trend results should be interpreted with extreme caution in this context because of the available record limited length and also because of the high interannual variability affecting annual and seasonal streamflow. Nevertheless, the overall robustness of the clustering process for different seasons and time windows, together with the consistency between the time signals contained in the streamflow data and diverse climatic forcings, indicate that the patterns of variation shown here are plausible. The kind of analysis presented here has strong implications for water resource managers and planners because it represents in-depth analysis of underlying characteristics of river flows and their relation with global climate. This knowledge can be applied, for example, in (1) building better streamflow forecasting models with lags of a few months, and (2) going beyond the traditional hydrological engineering practice of computing flow duration curves and frequency analysis based on historical flows in order to characterize water availability at specific locations.

[31] This work was based on a large data set of discharge records that, while statistically comparable, correspond to a set of watersheds diverse in their physiographic characteristics. Future research should include efforts oriented to deepening our understanding of the physical controls of streamflow generation for selected watersheds in this ecoregion, in order to better predict the effect that projected changes in precipitation and temperature may have over water availability at different time scales.

[32] **Acknowledgments.** This research was supported by FONECYT grants 1050298 and 11060444. Support was also received from the Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) through grant CRN II 2047, which is funded by the U.S. National Science Foundation (grant GEO-0452325). The authors wish to thank Dirección General de Aguas for providing the streamflow data, as well as C. Little and A. Lara for their thoughtful comments to an earlier version of this manuscript. Finally, the authors thank the three anonymous reviewers for their substantial help in making this a better article.

## References

- Aceituno, P. (1988), On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector: part I. Surface climate, *Mon. Weather Rev.*, *116*(3), 505–524, doi:10.1175/1520-0493(1988)116<0505:OTFOTS>2.0.CO;2.
- Aceituno, P., et al. (1993), Climate along the extratropical west coast of South America, in *Earth Systems Responses to Global Change*, edited by H. A. Mooney et al., pp. 61–70, Academic, New York.
- Allen, M. R., and L. A. Smith (1996), Monte Carlo SSA: Detecting irregular oscillations in the presence of colored noise, *J. Clim.*, *9*(12), 3373–3404, doi:10.1175/1520-0442(1996)009<3373:MCSDDIO>2.0.CO;2.
- Aravena, J. C., and B. H. Luckman (2009), Spatio-temporal rainfall patterns in southern South America, *Int. J. Climatol.*, *29*(14), 2106–2120, doi:10.1002/joc.1761.
- Chen, J., et al. (2008), The spatiotemporal structure of 20th century climate variations in observations and reanalyses: part II. Pacific pan-decadal variability, *J. Clim.*, *21*, 2634–2650, doi:10.1175/2007JCLI2012.1.
- Comisión Nacional de Medioambiente (2007), Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI, technical report, edited by Department of Geophysics, University of Chile, Santiago.
- Dettinger, M. D., and H. F. Diaz (2000), Global characteristics of stream flow seasonality and variability, *J. Hydrometeorol.*, *1*(4), 289–310, doi:10.1175/1525-7541(2000)001<0289:GCOSFS>2.0.CO;2.
- Dettinger, M. D., M. Ghil, C. M. Strong, W. Weibel, and P. You (1995), Software expedites singular-spectrum analysis of noisy time series, *Eos Trans. AGU*, *76*(2), 12, 14, 21.
- Dominguez, F., and P. Kumar (2008), Precipitation recycling variability and ecoclimatological stability—A study using NARR data: part I. Central USA plains ecoregion, *J. Clim.*, *21*(20), 5165–5186, doi:10.1175/2008JCLI1756.1.
- Dominguez, F., P. Kumar, and E. Vivoni (2008), Precipitation recycling variability and ecoclimatological stability—A study using NARR data: part II. North American monsoon region, *J. Clim.*, *21*(20), 5187–5203, doi:10.1175/2008JCLI1760.1.
- Fovell, R. G., and M. Y. C. Fovell (1993), Climate zones of the conterminous United States defined using cluster analysis, *J. Clim.*, *6*(11), 2103–2135, doi:10.1175/1520-0442(1993)006<2103:CZOTCU>2.0.CO;2.
- Ghil, M., et al. (2002), Advanced spectral methods for climatic time series, *Rev. Geophys.*, *40*(1), 1003, doi:10.1029/2000RG000092.
- Kresch, D. L. (1994), Variability of streamflow and precipitation in Washington, *U.S. Geol. Surv. Open File Rep.*, *93-4132*, 36 pp.
- Lara, A., et al. (2008), A 400-year tree-ring record of the Puelo River summer-fall streamflow in the Valdivian rainforest eco-region, Chile, *Clim. Change*, *86*(3), 331–356, doi:10.1007/s10584-007-9287-7.
- Mann, M. E., and J. M. Lees (1996), Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series, *Clim. Change*, *33*(3), 409–445, doi:10.1007/BF00142586.
- Masiokas, M. H., et al. (2006), Snowpack variations in the central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: Large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the region, *J. Clim.*, *19*(24), 6334–6352, doi:10.1175/JCLI3969.1.
- Masiokas, M. H., et al. (2008), 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia, *Global Planet. Change*, *60*(1–2), 85–100, doi:10.1016/j.gloplacha.2006.07.031.
- McMahon, T. A. (1982), Hydrological characteristics of selected rivers of the world, *Tech. Doc. Hydrol.*, *SC-82/WS/51*, 41 pp., United Nations Educ., Sci., and Cult. Organ., Paris.
- Miller, A. J., et al. (1994), The 1976–77 climate shift of the Pacific Ocean, *Oceanography*, *7*(1), 21–26.
- Montecinos, A., and P. Aceituno (2003), Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies, *J. Clim.*, *16*(2), 281–296, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<0281:SOTERR>2.0.CO;2.
- Peña, H., et al. (1999), *Política Nacional de Recursos Hídricos*, edited by D. G. Aguas, Minist. de Obras Publ., Santiago, Chile.
- Penland, C., M. Ghil, and K. M. Weickmann (1991), Adaptive filtering and maximum entropy spectra with application to changes in atmospheric angular momentum, *J. Geophys. Res.*, *96*(D12), 22,659–22,671, doi:10.1029/91JD02107.
- Percival, D. B., and A. T. Walden (1993), *Spectral Analysis for Physical Applications: Multitaper and Conventional Univariate Techniques*, Cambridge Univ. Press, New York.
- Pezoa, L. S. (2003), Recopilación y análisis de la variación de las temperaturas (período 1965–2001) y las precipitaciones (período 1931–2001) a partir de la información de estaciones meteorológicas de Chile entre los 33° y 53° de latitud sur, Univ. Austral de Chile, Valdivia.
- Pittock, A. B. (1980), Patterns of climatic variation in Argentina and Chile: I. Precipitation, 1931–60, *Mon. Weather Rev.*, *108*(9), 1347–1361, doi:10.1175/1520-0493(1980)108<1347:POCVIA>2.0.CO;2.
- Robertson, A. W. (1996), Interdecadal variability over the North Pacific in a multi-century climate simulation, *Clim. Dyn.*, *12*(4), 227–241, doi:10.1007/BF00219498.
- Robertson, A. W., and C. R. Mechoso (1998), Interannual and decadal cycles in river flows of southeastern South America, *J. Clim.*, *11*(10),

- 2570–2581, doi:10.1175/1520-0442(1998)011<2570:IADCIR>2.0.CO;2.
- Ropelewski, C. F., and M. S. Halpert (1989), Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation, *J. Clim.*, *2*(3), 268–284, doi:10.1175/1520-0442(1989)002<0268:PPAWTH>2.0.CO;2.
- Searcy, J. K., and C. H. Hardison (1960), Double mass curves, *U.S. Geol. Surv. Water Supply Pap.*, *1541-B*, 66 pp.
- Smith, T. M., R. W. Reynolds, T. C. Peterson, and J. Lawrimore (2008), Improvements to NOAA's Historical Merged Land–Ocean Surface Temperature Analysis (1880–2006), *J. Clim.*, *21*, 2283–2296, doi:10.1175/2007JCLI2100.1.
- Stahl, K., and S. Demuth (1999a), Linking streamflow drought to the occurrence of atmospheric circulation patterns, *Hydrol. Sci. J.*, *44*(3), 467–482, doi:10.1080/02626669909492240.
- Stahl, K., and S. Demuth (1999b), *Methods for Regional Classification of Streamflow Drought Series: Cluster Analysis*, Univ. of Freiburg, Freiburg, Germany.
- Thomson, D. J. (1990), Quadratic-inverse spectrum estimates: Applications to palaeoclimatology, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, *332*, 539–597.
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace (2000), Annular modes in the extratropical circulation: part I. Month-to-month variability, *J. Clim.*, *13*, 1000–1016, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2.
- Vautard, R., and M. Ghil (1989), Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series, *Physica D*, *35*(3), doi:10.1016/0167-2789(89)90077-8.
- Vautard, R., et al. (1992), Singular-spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic signals, *Physica D*, *58*, 95–126.
- Verdon, D. C., and S. W. Franks (2006), Long-term behavior of ENSO: Interactions with the PDO over the past 400 years inferred from paleoclimate records, *Geophys. Res. Lett.*, *33*, L06712, doi:10.1029/2005GL025052.
- Villalba, R., et al. (2003), Large-scale temperature changes across the southern Andes: 20th-century variations in the context of the past 400 years, *Clim. Change*, *59*(1), 177–232, doi:10.1023/A:1024452701153.
- Wilks, D. S. (2005), *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 648 pp., Elsevier, New York.
- Zhang, Y., J. M. Wallace, and D. S. Battisti (1997), ENSO-like interdecadal variability: 1900–93, *J. Clim.*, *10*, 1004–1020, doi:10.1175/1520-0442(1997)010<1004:ELIV>2.0.CO;2.

---

J. McPhee and E. Rubio-Álvarez, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Ave. Blanco Encalada 2002, Santiago 8370449, Chile. (jmcphée@ing.uchile.cl)