



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado
Carrera de Geografía

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Memoria para optar al título de Geógrafo

Cristóbal Araya Escobar

Profesor Guía: Pablo Sarricolea Espinoza

Santiago de Chile
2014

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

“I fear you will follow this same inclination in the future and thus fail to discover all the wonderful things that God has placed around us to discover. Don't settle down and sit in one place. Move around, be nomadic, make each day a new horizon”

Alex McCandless

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a toda mi familia que se ha hecho parte de esta memoria de título, de forma directa o indirecta, sus buenos deseos me permitieron salir adelante y finalizar este proceso, de la familia quiero agradecer en especial a mis padres Mauricio y Adriana, los cuales me entregaron todo su apoyo durante toda la carrera.

A toda la gente partícipe de la FAU, los que pasaron y los que van quedando, en especial a los docentes y ayudantes que me formaron y hoy me hacen ser un profesional, también a todos los tíos con quienes tuve relación, en especial a los porteros Richard y Luis, que nunca me negaron un saludo.

No puedo dejar afuera a Pablo Sarricolea quien me acogió a principios de semestre en el año 2013, sinceramente fuiste un verdadero guía, tu dedicación, tiempo y voluntad hacia mí, me hizo dar cuenta de la calidad de persona que eres, más que un docente, siento que gané un compañero de vida.

A los amigos de la FAU y a los amigos personales también; de la FAU quiero agradecer, a Daniela, que me cuidó como una mamá (sin dejar de lado a sus hermanas que me ayudaron mucho), a Isabel con sus consejos y a Diego con sus tallas. Tampoco quiero dejar afuera a Pamela F., con quien nos ayudamos memorísticamente y Pamela S., que sin algunos de sus cálculos esta memoria no tendría resultados concretos, además agregar a Rodolfo, Cristián, David, Jean, Sinchi, Misael y Alejandra, a todos ellos mis más sinceros agradecimientos.

Finalmente quiero dar gracias a quien me ha sostenido en este largo proceso, que si bien llegó al final me ha alegrado un montón, gracias Hernán por tu amor incondicional.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Índice de contenidos

RESUMEN	7
CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN	9
1.1 INTRODUCCIÓN	9
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.3 ÁREA DE ESTUDIO	13
1.4 OBJETIVOS	16
1.5 HIPÓTESIS	17
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE CHILE CENTRAL	18
2.2 CARACTERIZACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN	20
2.3 TIPOS DE TIEMPO	22
2.4 VARIABILIDAD DE BAJA FRECUENCIA.....	24
2.5 TENDENCIAS CLIMÁTICAS	27
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
MATERIALES	30
MÉTODOS	33
3.1 TEST DE HOMOGENEIDAD	33
3.2 ÍNDICE DE CONCENTRACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES.....	35
3.3 ÍNDICE DE CONCENTRACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES APLICADAS A LOS PERÍODOS 1965 – 1988 Y 1989 – 2010.....	40
3.4 MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE LAS PRECIPITACIONES	41
3.5 DISTRIBUCIÓN INTERANUAL DE LA PRECIPITACIÓN Y PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE DISPERSIÓN.....	43
3.6 PATRONES DE BAJA FRECUENCIA ASOCIADO A PRECIPITACIONES Y TELECONEXIÓN ENSO.....	45
3.7 PRECIPITACIONES MÁXIMAS ASOCIADAS A TIPOS DE TIEMPO Y CLASIFICACIÓN AUTOMÁTICA	48
CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....	52
4.1 HOMOGENIZACIÓN	52
4.2 ÍNDICE DE CONCENTRACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES.....	55
4.3 PERÍODOS DEL ÍNDICE DE CONCENTRACIÓN.....	59
4.4 PATRONES ESPACIALES DEL CI.....	66
4.5 ÍNDICE DE CONCENTRACIÓN ANUAL PCI Y COEFICIENTE DE VARIACIÓN CV.....	71
4.6 PATRONES DE VARIABILIDAD DE BAJA FRECUENCIA Y PRECIPITACIONES	76
4.7 TIPOS DE TIEMPO Y PRECIPITACIONES MÁXIMAS.	84
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	87
DISCUSIÓN	87
CONCLUSIONES	92
BIBLIOGRAFÍA	95

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Índice de figuras

Figura 1: Mapa del área de estudio	15
Figura 2: El sistema climático.	19
Figura 3: Carta sinóptica de Sudamérica, para un día representativo de una situación meteorológica cualquiera, obtenida con valores reales de presión en superficie. Las líneas en tonos verdes a violeta representan áreas de bajas presiones y las de tono amarillo a rojo altas presiones.	23
Figura 4: Efectos globales del ENSO.....	26
Figura 5: Cambios observados en la precipitación anual sobre la tierra	27
Figura 6: Distribución de las precipitaciones y los observatorios meteorológicos.	32
Figura 7: Número de días de precipitación acumulados (en %) frente a cantidad de precipitación acumulada (en %) para Almendral (1972 – 2010).	37
Figura 8: Concentración de la curva de Lorenz con dos estaciones ficticias.....	38
Figura 9: Índice de Oscilación del Sur período 1950-2010.....	47
Figura 10: Rejilla de 9 puntos para obtención de la presión reducida a nivel del mar.....	50
Figura 11: Distribución Espacial del CI entre 1965 y 1988.	57
Figura 12: Valores Empíricos (curvas de concentración) y equidistribución (exponencial) para La Serena, Vilcuya y Carmen de las Rosas.....	58
Figura 13: Distribución Espacial del CI entre 1965 y 1988.	61
Figura 14: Distribución Espacial del CI entre 1989 y 2010.	63
Figura 15: Distribución Espacial del CI y sus distintos subperíodos.	65
Figura 16: Mapa del Índice de Concentración (CI), período 1965 - 2010	67
Figura 17: Mapa del Índice de Concentración (CI), sub período 1965 - 1988	68
Figura 18: Mapa del Índice de Concentración (CI), sub período 1989 - 2010	69
Figura 19: Mapa de las tendencias del CI período 1965-2010.	70
Figura 20: Mapa de distribución del PCI	74
Figura 21: Mapa de distribución del CV	75
Figura 22: Índices anuales de teleconexiones.....	76
Figura 23: Correlación gráfica entre SOI y PP anuales.....	80
Figura 24: Mapas de correlación entre el SOI y las precipitaciones anuales.....	81
Figura 25: Mapas de correlación entre la PDO y las precipitaciones anuales.	82
Figura 26: Mapas de correlación entre la AAO y las precipitaciones anuales.	83
Figura 27: Catalogo tipo de tiempo según J&C.....	86

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Índice de tablas

Tabla 1: Escalas de variabilidad climática según Montealegre & Pabon (2000).....	28
Tabla 2: Estaciones Meteorológicas, localización geográfica, precipitación anual, longitud de la serie y fuente	30
Tabla 3: Distribución de la frecuencia en clases de 1 mm, frecuencias porcentuales acumuladas de días (X) y porcentajes de precipitación (Y) correspondientes a Almendral (1972 – 2010).	36
Tabla 4: Distribución en períodos y serie completa de las marcas de clase para la estación meteorológica de Almendral	40
Tabla 5: Distribución de las precipitaciones (mm) anuales en la estación Cerro Calán (1974 -2010)	46
Tabla 6: características generales de las precipitaciones.....	48
Tabla 7: Homogeneización de la serie de datos pluviométricos.....	53
Tabla 8: Índice de Concentración de las Precipitaciones	56
Tabla 9: Índice de Concentración Período 1965 - 2010.....	60
Tabla 10: Índice de Concentración Período 1989 - 2010.....	62
Tabla 11: Cálculos del PCI y CV según estación meteorológica	72
Tabla 12: Correlación entre precipitación anual y teleconexiones.	78
Tabla 13: Clasificaciones de Lamb a los 100 días más lluviosos.	84
Tabla 14: Correlación entre las teleconexiones y los 100 días más lluviosos	85
Tabla 15: Diez estaciones más lluviosas sobre 160mm en 24 hrs.	86

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Resumen

La presente memoria de título analiza la precipitación a resolución diaria por medio del índice de concentración diaria (CI) de la precipitación de Martín-Vide (2004) en Chile central. Para ello, se analizaron 56 estaciones meteorológicas en el período 1965-2010, basado en clases de 1 mm de amplitud y funciones exponenciales, donde los porcentajes acumulados de precipitación se ajustan con los días acumulados de precipitación. Los resultados sugieren una amplia variación del CI de 0,47 a 0,75, lo que espacialmente evidencia una disminución parcial del índice de modo latitudinal. Por consiguiente, la distribución del CI queda determinada más bien por factores climáticos (subtropicales) y geográficos (orográficos), que posea la localización de las estaciones meteorológicas. Las tendencias indican una disminución del CI hacia las cordilleras de la Costa y de los Andes, debido a que su precipitación se torna menos irregular, posiblemente por forzamiento orográfico, a diferencia de las zonas de costa y valles centrales de Chile donde el CI sí alcanza valores medios a altos. En cuanto a las teleconexiones, su presencia viene a explicar, en parte, la variabilidad interanual de las precipitaciones, por ejemplo, cuando se presenta la situación de SOI negativo, PDO positiva y AAO negativa, registrándose las mayores precipitaciones que, analizadas bajo la clasificación de Jenkinson y Collison (1977) se relacionan con la componente oeste (W), la cual transporta los sistemas frontales. Finalmente, se propone al CI como un buen estimador de torrencialidad pluviométrica y caracterizador de las precipitaciones diarias en Chile central, ya que las tendencias analizadas arrojan un aumento en la concentración de las precipitaciones en el último período (1989-2010).

Palabras Clave: Índice de Concentración, Regionalización, Precipitación Diaria, Chile Central, teleconexiones.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Abstract

This report analyzes the daily resolution precipitation through the daily concentration index (CI) of precipitation of Martín-Vide (2004) in central Chile. For this, 56 weather stations were analyzed in the period 1965-2010, based on classes of 1 mm amplitude and exponential functions, where the cumulative percentages of precipitation are adjusted accrued precipitation. The results suggest a wide variation in CI from 0,47 to 0,75, which spatially evidence a partial decrease of the latitudinal mode. Therefore, the distribution of CI is rather determined by climatic (subtropical) and geographic (orographic) factors, which the location of each weather station possess. Trends indicate a decline in CI to the mountain ranges of the Coast and the Andes, because its precipitation becomes less irregular, possibly by orographic forcing, unlike coastal areas and central valleys of Chile where the CI does reach medium to high values. Regarding the teleconnections, their presence partly explains the interannual variability of rainfall, for example, the highest rainfall occurs when the situation of negative SOI, positive PDO and negative AAO is presented. The high rainfall, analyzed under the classification of Jenkinson and Collison (1977) is related to the westerly component (W), which carries the frontal systems. Finally, the CI is proposed as a good estimator of torrential rainfall and daily rainfall characterizing in central Chile, as analyzed trends show an increase in the concentration of rainfall in the last period (1989-2010).

Keywords: Concentration Index, Regionalization, Daily precipitation, Central Chile, Teleconnections.

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN

1.1 Introducción

La presente memoria de título se constituye de cinco capítulos. El primer capítulo consta de una presentación del tema y traza los lineamientos a seguir durante el transcurso de la lectura. El segundo, es un estado del asunto sobre el índice de concentración de las precipitaciones y los tópicos ligados a la pluviosidad. El tercer capítulo consta del planteamiento metodológico que se basa en detallar cómo son llevados a cabo los resultados. El cuarto, uno de los más importantes, los resultados y finalmente, en el quinto apartado, compuesto por una discusión de los resultados para terminar con las conclusiones alcanzadas.

El clima en Chile central, está controlado por una serie de factores geográficos que determinan su variedad local y regional, entre ellos destacan la latitud, la altitud, la orografía y la influencia del océano Pacífico. Es por esto, que según Sarricolea *et al.* (2013) en la zona central del país es clasificado como clima subtropical, además domina un clima de tipo mediterráneo, debido a su extensión latitudinal. La influencia orográfica presente en ambas cordilleras, afecta la distribución de las lluvias tanto para vertientes orientales (secas) y occidentales (húmedas). Por su parte, la presencia de las teleconexiones como el anticiclón subtropical del pacífico sur oriental (APSO), la oscilación decadal del pacífico (PDO) y el fenómeno de El Niño conocido como Oscilación del Sur (ENSO), permiten a su vez, explicar la variabilidad interanual y estacional de las precipitaciones en gran parte del área de estudio (Sarricolea & Martín-Vide, 2012).

La climatología analítica en Chile, ha estado enfocada en gran parte a determinar las medias mensuales y anuales de las precipitaciones. Análisis cómo el de Sanz Donaire (2012) presenta una observación exhaustiva de la precipitación empleando datos anuales para todo el país. De esta manera, la información que entrega la precipitación a partir de las medias mensuales y anuales es valiosa territorialmente, fácil de manejar y acceder al poseer una base de datos de menor tamaño que una que registre la precipitación diaria. Por el contrario, la precipitación registrada a nivel diario expresa la frecuencia y el número de días con lluvias, logrando así determinar la cantidad de días precipitados al mes. En síntesis, los montos mensuales y anuales dejan fuera información primordial sobre los montos de precipitación a nivel diarios tan escasamente empleados en el país y tan necesarios para una modelación climática, glaciológica e hidrológica.

Estudios como el Quinto informe del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013), anuncian que, los comportamientos de la lluvia podrían ser más extremos, por un lado, con períodos de sequía más extensos que los normales, y por otro, episodios de lluvias más intensas. Actualmente se presentan cambios en los patrones pluviométricos en Chile central, con una tendencia hacia la disminución y concentración

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

(Sarricolea *et al.*, 2013). Casos particulares afectan gravemente zonas de escasas hídrica donde el único *input* es la lluvia (Ramos & Martínez-Casanovas, 2006). El análisis de los cambios en la distribución de la precipitación leve y fuerte es estudiado por Karl *et al.* (2009), así los resultados, son a partir de una función exponencial negativa construida por medio de las cifras entregadas en la precipitación diaria.

En cuanto a las teleconexiones, el ENSO con presencia en el centro del país, se manifiesta con tres escenarios según la anomalía de presión atmosférica o temperatura superficial del mar (TSM), ya sea como El Niño, La Niña o neutro conforme a los parámetros establecidos por Escobar & Aceituno (1998). Según la temperatura superficial del mar (TSM) será catalogado como evento El Niño, cuando existan anomalías positivas en la TSM superiores a $+1^{\circ}\text{C}$, por el contrario La Niña, cuando se presenten anomalías negativas en la TSM inferiores a $-0,5^{\circ}\text{C}$; las condiciones neutras se establecen entre el $+1^{\circ}\text{C}$ y el $-0,5^{\circ}\text{C}$ de cada fenómeno ENSO identificado (Escobar & Aceituno, 1998).

Por otro lado, el índice de concentración de las precipitaciones (CI) ha sido estudiado por Sarricolea & Martín-Vide (2012) para todo Chile, aplicando el CI a 17 estaciones meteorológicas nacionales para el período comprendido entre los años 1965 y 2005. Los resultados indican que el mayor CI se registra en La Serena con un valor de 0,76 disminuyendo hacia el norte con valores de 0,57 en la región de Antofagasta y llegando a los valores bajos del CI hacia el sur del país, localizándose en Puerto Montt con un 0,56. Asimismo, se enfocó el estudio en Chile central calculando el CI a 16 estaciones meteorológicas abarcando entre los $32^{\circ}50'S$ y $34^{\circ}12'S$ (Sarricolea *et al.*, 2013).

En otros lugares del mundo, el CI ha sido estudiado con énfasis en Europa; en primera instancia se ha hecho para toda la Península Ibérica analizado por Martín-Vide (2004) y más tarde por Sánchez-Lorenzo & Martín-Vide (2006). Éste último estudio se realizó mediante el cálculo a 9 estaciones localizadas en Portugal junto con otras 32 localizadas en España, arrojando los valores más altos de CI en la ciudad de Valencia con 0,70 y por otro lado un bajo CI alrededor de 0,55 hacia La Coruña. La irregularidad de las precipitaciones al interior de la PI dan a entender que si se toma como referencia un CI de 0,61, corresponde al hecho que el 70% del total pluviométrico registrado se concentra en el 25% de los días lluviosos (Sánchez-Lorenzo & Martín-Vide, 2006).

La precipitación en el clima mediterráneo presenta un comportamiento con marcada estacionalidad de las lluvias, preferentemente en los meses de invierno (Benhamrouche & Martín-Vide, 2012). Con un comportamiento nulo durante muchos días y con elevada intensidad durante unas horas o minutos; los efectos de la alta concentración en determinadas horas de la precipitación se establecen, entre otros, en una alta erosividad del fenómeno sobre el suelo, más aún en cubiertas vegetales escasas, escorrentías súbitas, entre otros, fenómenos los que son posibles de analizar mediante el empleo del CI

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

(Benhamrouche & Martín-Vide, 2012). De igual forma Sánchez-Lorenzo & Martín-Vide (2006), proponen al CI como un buen índice de torrencialidad pluviométrica, convirtiéndose en un buen estimador de las áreas con mayor riesgo climático, a causa de una concentración de las precipitaciones en zonas que presenten desertificación y sin contar con la protección que ofrezca la cubierta vegetal en cada caso.

Esta memoria de título, se enmarca en el proyecto U-Apoya CSSOC – 2012-292 y el Fondecyt de Iniciación N° 11130629. Este último lleva por título: Configuración espacial de la irregularidad pluviométrica en Chile centro-sur (29°S–44°S) y su relación con los tipos sinópticos y los patrones de variabilidad de baja frecuencia, que tiene como objetivo principal conocer y entender cómo influyen las distintas circulaciones atmosféricas expresadas en tipos sinópticos, variabilidad de baja frecuencia (teleconexiones, tales como ENSO, PDO y AAO), la latitud (componente subtropicalidad) y la orografía, en la distribución espacial de las precipitaciones y su irregularidad, medida a distintas resoluciones temporales (anual, mensual y diaria), con el propósito de disponer y explicar la variabilidad climática de las precipitaciones.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

1.2 Planteamiento del problema

La precipitación es una variable ampliamente utilizada en diversos estudios, convirtiéndola en una de las caracterizadoras de áreas de estudios más usadas en numerosos trabajos de investigación. Su utilidad varía según el enfoque que le asignen los investigadores, más allá del énfasis, la predominancia en estos trabajos consiste en la utilización de cifras mensuales y anuales de precipitación. Si bien, los resultados son válidos y sus resultados consistentes no expresan a cabalidad la precipitación en la zona o región que buscan reflejar, pues utilizan un promedio de precipitaciones que distan de la realidad sobre la distribución de las precipitaciones en el territorio.

No sólo los estudios climáticos utilizan precipitaciones en sus registros, sino también los de tipo hidrológico, agrológico y glaciar, que emplean cifras de pluviosidad mensual y anual. La precipitación es una variable vital para caracterizar comportamientos fluviales durante las distintas estaciones, como adicionalmente puede ser el comportamiento de la lluvia y un determinado frutal o relaciones entre precipitaciones y teleconexiones (Aceituno, 1992).

Como es posible de estimar, el uso de la precipitación a nivel mensual y anual es ampliamente difundido en contraste con un uso de precipitaciones diarias, sin embargo, y debido a la escasa red meteorológica en el país, las cifras de precipitación a nivel diario son insuficientes y acotadas, pues son relativamente nuevas y no superan los 50 años de registro diario promedio, es por esto que las cifras anuales son ampliamente utilizadas por su simple acceso y fácil procesamiento (Sanz Donaire, 2012).

Últimamente y debido a una mayor disposición de estaciones meteorológicas y por ende de datos pluviométricos a nivel diario, se han realizados investigaciones que tienen en su fuente dichas cifras, con esto se logra destacar la importancia de las precipitaciones diarias lográndose un destacado y acabo estudio utilizando montos diarios de precipitación.

Si bien se pueden tener opiniones dispares sobre la utilización de montos de precipitación mensuales por sobre los diarios, estos últimos caracterizan de mejor manera la distribución de las precipitaciones de un lugar a fin, no obstante, los registros de las precipitaciones diarias conforme avanzan los años se han hecho más contundentes y han aportado en buena forma a entender de mejor manera los comportamientos pluviométricos asociados a eventos torrenciales de precipitaciones con fenómenos como el ENSO y sus efectos, por ejemplo, sobre la cordillera de los Andes, provocando flujos de barro y detritos en Antofagasta, donde se registraron un máximo de 42 mm en 24 hrs (Vargas *et al.*, 2000).

A partir de lo presentado se propone como problemática establecer una caracterización de las precipitaciones a nivel diario empleando el índice de concentración de las precipitaciones de Martín-Vide (2004), con el propósito de generar una espacialización y comportamiento de las precipitaciones a nivel diario en Chile central.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

1.3 Área de estudio

La extensión de las estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo de Chile central, abarcan desde los 30°S hasta los 35°S, analizando 560 kilómetros de largo aproximadamente y posicionándose a diferentes alturas, desde la costa hasta la cordillera de los Andes. La precipitación promedio en el área de estudio es de 445 mm, aumentando latitudinalmente iniciándose con 77 mm promedio en estación La Serena, hasta terminar con 1339 mm promedio en la estación Los Queñes (ver figura 1).

Chile central es una región de transición y su régimen de lluvias, es muy diferente que la del resto de la parte sur del continente, no sólo en cuanto a la cantidad anual sino también, en su estacionalidad y los mecanismos asociados (Quintana & Aceituno, 2012). Ésta región concentra una importante área en términos demográficos y económicos, entre ellas la capital del país. Dicha región posee una alta variabilidad interanual en sus condiciones hidrometeorológicas, asociadas a un carácter climático de transición, por lo que el carácter de transición climática en la zona subtropical se traduce en características episódicas de las precipitaciones mayoritariamente asociados a la actividad frontal invernal (Garreaud, 1995).

Según el atlas bioclimático de Chile (Uribe *et al.*, 2012), en el área de estudio se presentan dos grandes regiones climáticas: una de los climas áridos subtropicales y otra de climas templados cálidos con sus diferentes subcategorías. Para los climas áridos subtropicales, presentan la estepa con nubosidad abundante localizada en las zonas costeras, como es el caso de La Serena. Hacia el interior aparece la estepa con gran sequedad atmosférica con cielos despejados y humedad del aire muy baja, como es el caso de la ciudad de Los Andes.

La segunda categoría de climas templados-cálidos presentan una estación seca y una lluviosa, distinguiéndose 3 subcategorías: Templado cálido con estación seca prolongada y gran nubosidad, donde las oscilaciones térmicas están suavizadas debido a la acción oceánica que se presenta en la costa, como en la ciudad de Valparaíso. Hacia el interior en la ciudad de Santiago, muestra un clima templado cálido con lluvias invernales y estación seca prolongada de 7 u 8 meses, se conoce también y debido a su manifestación en ésta zona como clima mediterráneo. Finalmente hacia el sur aparece el clima templado cálido con una estación seca que varía de 4 a 6 meses con precipitaciones anuales que bordean los 700 mm en la ciudad de Curicó.

De igual forma, bajo una sinopsis bioclimática de Luebert & Pliscoff (2006) que clasifican la zona de estudio con un Macrobioclima mediterráneo, que a su vez presentan tres bioclimas en orden de norte a sur aparecen: Desértico-oceánico, xérico-oceánico y pluviestacional. Además, se menciona que aparte sumado a una presencia oceánica, es

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

posible apreciar una continentalidad en los bioclimas producto del efecto barrera que produce la cordillera de la Costa a ambas vertientes de esta.

Asimismo, la clasificación climática de Köppen (Kottek *et al.*, 2006) en el área de estudio, se define 4 regiones climáticas, de norte a sur se presentan: la clasificación desértico normal (BWk), semiárido templado con lluvias invernales (BSk), templado cálido con lluvias invernales (Csb) y clima frío de altura (ETh). Por otro lado, la clasificación climática empleada por Strahler & Strahler (1997) para el área de estudio se define como clima mediterráneo, localizado entre los 30° a 45° Sur, abarcando lo que son latitudes medias más específicamente la de tipo subtropical.

La variación de la precipitación a lo largo del área de estudio está influenciada por la acción del relieve y la localización que las estaciones meteorológicas posean (Luebert & Pliscoff 2012). Determinan que la influencia está dada por los dos relieves montañosos importantes en el país, la cordillera de la Costa y de los Andes, configurando tres grandes unidades geomorfológicas: Vertiente occidental de la cordillera de la Costa, incluyendo planicies litorales; depresión intermedia, incluyendo la vertiente oriental de la cordillera de la Costa y vertiente occidental de la cordillera de los Andes (Luebert & Pliscoff 2012).

Por consiguiente, el rol que juegan estas grandes unidades geomorfológicas son detalladas por Uribe *et al.* (2012), donde la vertiente occidental de la cordillera de la Costa es más lluviosa que la oriental, la depresión intermedia es más lluviosa que la parte oriental de la cordillera de la Costa y menos lluvioso que el Piedmont de la cordillera de los Andes.

La delimitación del área de estudio estará sujeta a la clasificación climática mediterránea de Strahler & Strahler (1997), la cual fija sus límites entre las latitudes 30° a 45°S y se caracteriza por abarcar un amplio abanico climático que puede oscilar desde lo semiárido hasta lo húmedo con veranos secos y calurosos e inviernos suaves y húmedos.

Además, las clasificaciones bioclimáticas también fijan los macrobioclimas mediterráneos entre las latitudes 23° a 52°S (Rivas-Martínez, 2004), de igual forma son empleados por (Luebert & Pliscoff, 2006) para determinar el macrobioclima mediterráneo donde determinan su distribución fundamental en la zona de Chile central, la cual es semejante con el área de estudio repartido entre los 30 a 35°S.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

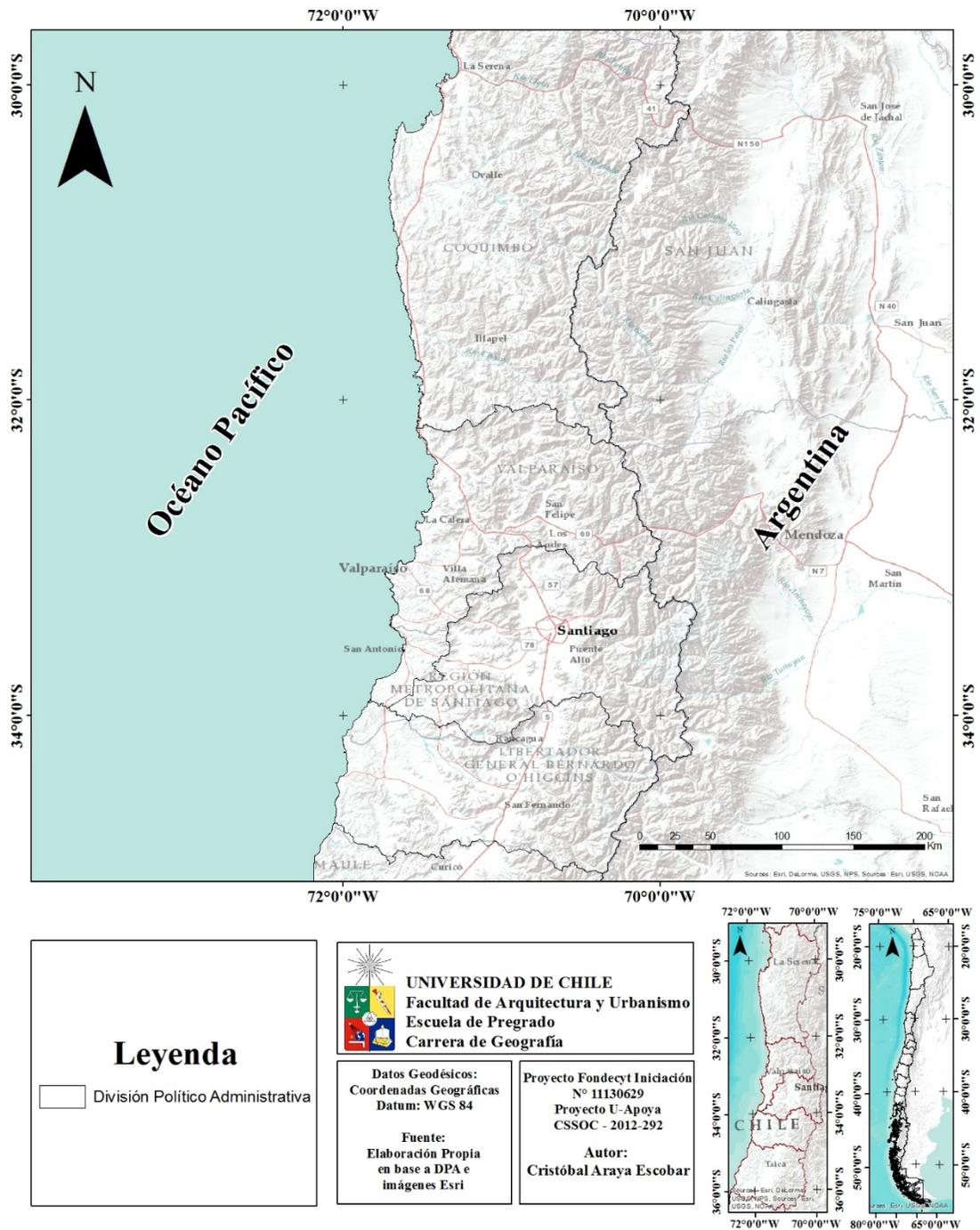


Figura 1: Mapa del área de estudio

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

1.4 Objetivos

General:

- Conocer y comprender cómo influye la componente subtropical y la componente orográfica en la distribución espacial del CI en Chile central entre los 30°S y 35°S con el propósito de generar una regionalización climática a partir de la información de precipitaciones diarias.

Específicos:

1. Revisar y validar la base de datos de las estaciones meteorológicas disponibles para el área de estudio a resolución diaria, por medio del test de homogeneidad absoluta de Von Neumann y el test de Thom, de las rachas o alternancias.
2. Calcular el valor del índice de concentración (CI) a las series pluviométricas homogeneizadas a un período representativo desde el punto de vista climático.
3. Analizar la variabilidad estacional del índice de concentración en dos períodos temporales entre 1965-1988 y 1989-2010.
4. Calcular el índice de concentración mensual y el coeficiente de variación para el período 1965-2010
5. Realizar una interpolación del CI mediante *Spline* de tensión, además para el CV y el PCI, mediante modelos de regresión múltiple lineal, considerando como variables independientes a la latitud, altitud y la precipitación media anual.
6. Evaluar las tendencias de variabilidad climática regional con respecto a los totales pluviométricos y las teleconexiones en Chile central.
7. Caracterizar el comportamiento de las precipitaciones máximas en Chile Central y compararlas con el catálogo de tipos de tiempo de Jenkinson & Collison.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

1.5 Hipótesis

La concentración de las precipitaciones en Chile central, está establecida por dos factores geográficos: la componente subtropical y la acción del relieve. La primera es característica de los climas mediterráneos y provoca una disminución latitudinal de la irregularidad en las precipitaciones desde los 30° a los 35°S. La segunda de tipo orográfica, se presenta entre las cordilleras de la Costa y los Andes y tiene sus efectos en la convección e irregularidad de las precipitaciones, de modo que las planicies litorales y valles centrales concentran la precipitación en mayor medida, que un gradiente altitudinal donde tienden a descender en irregularidad. Además, la presencia de las teleconexiones como el ENSO y por otra parte la variabilidad climática, modificarían el comportamiento de las precipitaciones a la baja en sus montos precipitables, en síntesis, las lluvias serían más torrenciales y concentradas.

La hipótesis se enfoca en establecer cómo afecta la latitud y el relieve a la concentración de las precipitaciones, en cuanto disminuyen de norte a sur en el área de estudio y que además la precipitación es más “regular” en la montaña debido al forzamiento orográfico. Con esto se pretende generar una regionalización climática para Chile central abarcando entre los 30°S y 35°S, a partir del análisis de una serie de estaciones meteorológicas, empleando para ello el cálculo del CI en cada una de estos observatorios a nivel de clases de 1 mm.

CAPÍTULO 2: Marco Teórico

2.1 Caracterización climática de Chile central

Para comprender el clima en Chile es necesario considerar al sistema climático (Figura 2) en su totalidad y no sólo la atmósfera y sus flujos, de ahí que se comporta como un complejo sistema constituido por tres subsistemas principales: la atmósfera, la hidrósfera y la litosfera, y por dos subsidiarios: la biosfera y la criosfera (compuesta por las superficies cubiertas de hielo y nieve). Producto del cambio climático, se considera un sexto subsistema: el socioeconómico, el que resulta diverso, complejo y con una significativa incidencia dentro del sistema climático (Martín-Vide, 2003).

El clima en Chile central ha sido clasificado por innumerables autores, los cuales se basan en distintos factores climáticos para determinar las extensiones de éste a lo largo de la llamada zona central, dichos factores principales son la latitud, el relieve, proximidad al mar, corrientes marinas entre otros, los cuales, según el investigador, caracterizarán la zona de la cual se están obteniendo los datos climatológicos básicos, como la temperatura y precipitaciones expresados en la mayoría de los casos mediante diagramas ombrotérmicos (Luebert & Pliscoff, 2006).

Los factores del clima en Chile son descritos por Fuenzalida (1971), en estos la latitud influye sobre los regímenes de los vientos a través de la ubicación, que se define según el patrón general de circulación de la atmósfera. Para la zona centro tienen predominancia los vientos del SW. Además, la latitud determina la distribución de las precipitaciones y el desplazamiento de los sistemas frontales aumentando su intensidad hacia latitudes altas, de forma contraria, las temperaturas medias disminuyen desde las latitudes medias hacia los polos. La acción del relieve modifica la distribución de los vientos, por donde pueden obstruir o canalizar los flujos atmosféricos, modificar la distribución de la insolación y el régimen de las precipitaciones según ladera. La proximidad al mar es un compartamiento térmico entre el océano y el continente, en la cual, las masas de agua actúan como reguladores térmicos debido a su inercia, y finalmente, las corrientes marinas por medio de las corrientes frías, como la de Humboldt que afecta la costa de la zona central en toda su extensión.

El comportamiento de las temperaturas medias y su amplitud entre invierno y verano austral se configuran según su ubicación, pues afectan en gran medida la altitud (Fuenzalida, 1971). Por otra parte, las precipitaciones si muestran una tendencia que aumenta latitudinalmente, pero que no es contundente de oeste a este, ya que el efecto orográfico que produce la cordillera de la Costa intensifica las precipitaciones en las laderas a barlovento (Fuenzalida, 1971).

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

La mediterraneidad asociada a Chile central, comparte situaciones climáticas similares a otras zonas subtropicales de fachada occidental en ambos hemisferios (Strahler & Strahler, 1997). Una revisión confeccionada a los orígenes de esta clasificación climática es investigada por Gil Olcina (2007), en la que señala que la variedad de matices climáticos que posee el clima mediterráneo y sus distintas variantes alrededor del globo son definidas por diferentes autores.

Chile central ha sido clasificado como clima mediterráneo y sus respectivas variantes por diferentes autores entre los que se destacan: Quintanilla (1974), Di Castri & Hajek (1976), Romero (1985), Rivas-Martínez (1993), Amigo & Ramírez (1998) y Luebert & Plissock (2006). No obstante, surgen discrepancias a partir de la delimitación y alcance de ésta clasificación, debido a que cada autor emplea una metodología acorde a sus alcances. Di Castri & Hajek (1976) realizan un exhaustiva revisión de los inconvenientes que implica delimitar el clima mediterráneo en Chile, señalando que el problema que afecta al país sobre dicha temática es la aridez. Asimismo, surgen otras temáticas que influyen en la delimitación del clima mediterráneo siendo la parte árida hacia el norte, en la zona central la influencia de los relieves altoandinos y hacia el sur la presencia de la humedad (Luebert & Plissock, 2006).

Los alcances del clima mediterráneo en Chile central son dispares, mientras que Quintanilla (1974) y Romero (1985) lo sitúan cercanos al río Aconcagua, Di Castri & Hajek (1976), Amigo & Ramírez (1998) y Luebert & Plissock (2006) los sitúan por sobre dicho límite fluvial extendiéndolo por sobre La Serena. En la zona centro destaca la incorporación de la zona alto andina realizada por Romero (1985), Amigo & Ramírez (1998) y Luebert & Plissock (2006), por el contrario Quintanilla (1974) y Di Castri & Hajek (1976) incluyen la zona alto andina dentro de otra clasificación climática (Luebert & Plissock, 2006). Los límites sur se sitúan entre 36° y 38° S propuestos por Quintanilla (1974) y Romero (1985), en cambio Di Castri & Hajek (1976), Rivas-Martínez (1993), Amigo & Ramírez (1998) y Luebert & Plissock (2006), los sitúan más al sur debido a un aumento en el régimen pluvial y presentan al menos 2 meses de sequía estival (Luebert & Plissock, 2006).

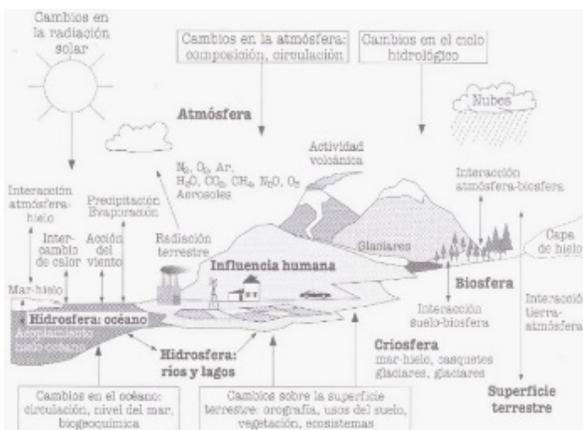


Figura 2: El sistema climático.

Fuente: Martín-Vide, 2003

2.2 Caracterización de la precipitación

La variación de la precipitación anual a lo largo del país se presenta de norte a sur como de oeste a este, por ello, existen zonas de escasa precipitación en la aridez del norte grande a excepción de los territorios alto andinos, y por el sur regiones australes donde la precipitación se presenta durante todo el año, esto se ve reflejado en los tipos más diversos de regímenes de precipitación a lo largo del país (Fuenzalida, 1971).

La zona central del país, se caracteriza por una distribución bastante homogénea de la precipitación, donde las lluvias son de tipo frontal con la modificación que la orografía introduce (Fuenzalida, 1971). Similar situación frontal es expuesta por Romero (1985) señalando que las lluvias proceden de la incursión del frente polar activo, que se presentan en la estación fría, en cantidades y secuencias de episodios que aumentan gradualmente de N a S. Además agrega que se produce una irregularidad en el régimen pluviométrico, a diferencia de Fuenzalida (1971) tanto en tiempo como en espacio, debido a que es una región de transición. Asimismo, las tendencias generales variación espacial de los patrones climáticos se ven modificadas por la influencia del relieve expresadas en la alineación paralela de ambos ejes cordilleranos (Romero, 1985).

Del mismo modo, la estructura de la precipitación en Chile central comprendida entre el norte chico y hasta los 42°S de latitud presenta un máximo de lluvia en invierno con un mínimo o ausencia de ellas en el verano, hacia el norte de los 33°S la precipitación es muy irregular ya que corresponde a una zona marginal del desierto del norte y la región mediterránea más lluviosa hacia el sur (Aceituno, 1980).

En un primer acercamiento, el carácter invernal de las precipitaciones se explican por un desplazamiento anual norte-sur de la trayectoria promedio de los sistemas migratorios que originan la precipitación en forma similar al del anticiclón subtropical (Aceituno, 1980). Hacia las latitudes subtropicales a lo largo de la costa oeste del continente sudamericano, más del 50% de la precipitación cae durante el invierno austral (JJA) y se asocia sobre todo con los frentes fríos extratropicales que llegan a esta región cuando el anticiclón subtropical en el sur del Pacífico y la banda de latitudes medias de sistemas de baja presión de tipo migratorias están en su posición más septentrional (Montecinos & Aceituno, 2003).

Esta anomalía representa una condición de bloqueo al flujo de los oestes, que con un anticiclón debilitado, favorece el desvío de las trayectorias ciclónicas hacia las zonas central y norte de Chile (Rutllant & Fuenzalida, 1991). Los aspectos sinópticos de las grandes tormentas invernales durante episodios El Niño, son abordadas por Rutllant & Fuenzalida (1991), en la ocurrencia de las situaciones de bloqueo al suroeste del extremo austral del continente que, desvían hacia el norte el intenso flujo de los oestes a latitudes

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

medias, estos bloqueos responden a esquemas de teleconexiones típicas que se producen durante eventos El Niño.

De igual forma, los episodios de precipitación en Chile central presentan duraciones típicas entre 1 y 2 días, y están mayoritariamente asociados a la penetración de sistemas frontales fríos, que concentran la precipitación entre los meses de mayo a septiembre (Garreaud & Rutllant, 1996). En particular, los mecanismos que explican el aumento de las precipitaciones de invierno en el centro de Chile (30-35°S) durante los episodios de El Niño, se han asociado con cambios en la circulación atmosférica a gran escala en el hemisferio sur, incluyendo aumento de la frecuencia de los episodios de bloqueo en las latitudes medias en el sureste del Pacífico (Quintana & Aceituno, 2012).

Los episodios de precipitaciones extremas durante los meses del invierno austral ocurren en la zona central por el paso de oeste a este de bandas frontales (Falvey & Garreaud, 2007). Hacia una escala interanual, el régimen pluviométrico de Chile central presenta una variabilidad significativa asociada con los excesos de la Oscilación del Sur (Garreaud & Rutllant, 1996). Por lo que, el exceso pluviométrico en Chile central durante los eventos El Niño está relacionado con el desplazamiento hacia el este de la actividad convectiva en el pacífico central y la banda de convergencia del Pacífico Sur (Aceituno , 1992).

Con esto se configura la variabilidad interanual de la precipitación en Chile central, durante la fase negativa del ENOS en los episodios El Niño, así la precipitación tiende a exceder el valor normal, mientras que en la fase positiva (La Niña), suele ocurrir un déficit pluviométrico (Aceituno, 1992) (Rutllant & Fuenzalida, 1991).

Las precipitaciones en el verano austral (Meses DEF), producidas en la vertiente oeste de los Andes subtropicales, se presentan a gran altitud en la región hasta los 4000 m.s.n.m, muy por sobre el nivel de la isoterma cero en las tormentas invernales (aumentando las probabilidades que se produzcan deslizamientos de tierra en las laderas empinadas de la cordillera de los Andes) y representan menos del 10% total de precipitaciones acumuladas al año, concentrado en eventos que se extienden desde 1 a 3 días de duración (Viale & Garreaud, 2014).

La precipitación estival en los Andes de Chile central es de origen convectiva, se presenta de forma episódica, ocurriendo en promedio entre 5 y 6 eventos, con una precipitación acumulada diaria entre 0,1 y 10 mm, promediando los 3 mm/día; en cuanto a las tendencias de la lluvia su duración, extensión espacial y magnitud están condicionadas por la topografía y por la persistencia de la configuración meteorológica que las produce (Garreaud & Rutllant, 1997).

2.3 Tipos de tiempo

Para comprender la climatología sinóptica y sus respectivas configuraciones presentes en la atmósfera (ver figura 3), es necesario comenzar por precisar los procesos de la circulación atmosférica y las variables atmosféricas, cómo la presión atmosférica y el viento, detalladas por Martín-Vide (2005). La primera definida por el peso del aire por unidad de superficie y la segunda, el viento que es aire en movimiento paralelo al suelo y se origina por las variaciones horizontales de la presión atmosférica, por lo tanto, es a través del viento donde se realizan importantes intercambios térmicos y hacia donde fluyan los vientos resultantes según la fuerza de coriolis y la fuerza de presión, quedarán configuradas las bajas presiones en el hemisferio sur hacia la derecha (Martín-Vide, 2005).

El estudio simultáneo de los procesos de circulación atmosférica y las variables atmosféricas se realiza mediante el uso de clasificaciones sinópticas, ya que permiten asociar los tipos de tiempo que se producen con valores particulares de las variables climáticas en cada región (Fernández García *et al.*, 2003).

Existen dos grandes tipos de clasificaciones sinópticas: la clasificación sinóptica subjetiva y automática, la primera va a depender de la región, el investigador, su enfoque y experiencia, entre otros aspectos, con esto, se generarán clasificaciones de tipo manuales, pues responden a las necesidades de quien las está elaborando (Grimalt *et al.*, 2013). Situaciones de clasificaciones subjetivas o manuales en España son descritas por Fernández García *et al.* (2003), la variedad en las situaciones sinópticas empleadas por los diferentes autores provoca la inexistencia de una clasificación general y aceptada, debido a la complejidad atmosférica presente en la PI y a los factores mencionados propios de cada investigador. Es por esto, que nacen las clasificaciones automáticas u objetivas, entre sus ventajas permiten realizar comparaciones con los métodos subjetivos que han sido de gran aporte a la comprensión climática (Llop Garau & Alomar Garau, 2012).

Las clasificaciones objetivas o automáticas constituyen metodológicamente la vía idónea para encontrar una solución aceptable con generalidad (Fernández García *et al.*, 2003). La más conocida es la elaborada por Jenkinson & Collison (1977), la cual permite conocer el tipo de circulación atmosférica a partir de la presión atmosférica reducida a nivel del mar en un mínimo de nueve puntos arrojando como resultado 27 tipos sinópticos: 8 advectionales puros, 1 ciclónico, 1 anticiclónico, 8 híbridos advectionales-ciclónicos, 8 híbridos advectionales-anticiclónicos y 1 indeterminado (Sarricolea *et al.*, 2014). Además, la clasificación de J&C posee la cualidad de generar un análisis detallado de las relaciones entre los episodios de la precipitación y la situación sinóptica que los ha propiciado, para ello, se vale única y exclusivamente datos de presión en superficie (Llop Garau & Alomar Garau, 2012).

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

La clasificación climática mediterránea es compartida tanto por la Península Ibérica como por Chile central, es por esto que resulta favorable comparar las posibles tendencias de tipo de circulación entre ambas, mediante el uso de la clasificación de J&C (Sarricolea *et al.*, 2014).

De esta manera, la circulación atmosférica que rige las características climáticas de Chile y especialmente en la zona central, está sometida por el anticiclón subtropical de Pacífico sur-oriental (APSO) y el cinturón de bajas presiones subpolares (CBPP). El primero afecta las zonas comprendidas entre los 30° y 40° de latitud sur y el CBPP se ubica entre los 45° y 55° de latitud sur, desplazándose hacia latitudes medias en invierno austral, permitiendo el ingreso y desarrollo de sistemas frontales a la zona central de Chile (Sarricolea *et al.*, 2011).

En cambio, hacia la PI la clasificación de J&C surgen inconvenientes, ya que Chile no presenta casos indeterminados, debido a que las condiciones de circulación y geográficas que dominan el país; por consiguiente resultan diferentes a las del Mediterráneo occidental (Sarricolea *et al.*, 2014). Las limitaciones surgen a partir que las clasificaciones sean automáticas o manuales suponen una simplificación excesiva de la realidad resultando incapaces de captar la dinámica atmosférica a lo largo de varias jornadas (Fernández García *et al.*, 2003), prueba de ello es el claro predominio en el Mediterráneo Occidental de tipos indeterminados, producto de situaciones de pantano barométrico (Sarricolea *et al.*, 2014).

Estudios previos sobre los impactos de las teleconexiones en Chile, en especial la del fenómeno ENOS y sus efectos sobre la biota marina y terrestre a partir de la interacción entre los fenómenos atmosféricos-oceanográficos son señalados por Jaksic (1998).

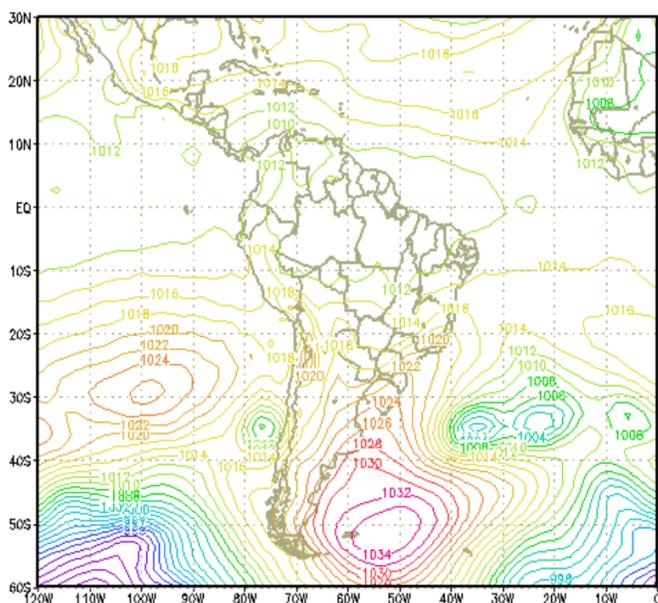


Figura 3: Carta sinóptica de Sudamérica, para un día representativo de una situación meteorológica cualquiera, obtenida con valores reales de presión en superficie. Las líneas en tonos verdes a violeta representan áreas de bajas presiones y las de tono amarillo a rojo altas presiones.
Fuente: Inzunza (2007)

2.4 Variabilidad de baja frecuencia

Las teleconexiones son un fenómeno de estudio reciente en la climatología y se remonta hacia principios del siglo XX donde es primeramente mencionado, no obstante, a finales del siglo XIX las anomalías climáticas ya eran estudiadas en el continente Asiático bajo el nombre de oscilaciones (Bridgman & Oliver, 2006). Hacia finales del siglo XIX y principios del XX, los climatólogos creen que la variabilidad en un solo lugar se relaciona con los cambios en una locación diferente, mientras que el investigador más reconocido fue Walker, otros señalaron por ejemplo, que la sequía en África del Sur parecía ocurrir al mismo tiempo que en la India, lo que sugiere una conexión entre los hemisferios (Glantz, 1996). En cierto modo, la palabra “teleconexión” no fue utilizado en un contexto climático hasta que apareció en un artículo de Armstrong hacia 1935 (Bridgman & Oliver, 2006).

En forma breve, las teleconexiones pueden definirse como la relación que existe entre anomalías del clima a cierta distancia una de otras, las grandes diferencias en el espacio y tiempo entre fenómenos dificultan la creencia que un evento pueda influenciar al otro a pesar de todo, estas conexiones sí existen (Glantz, 1996). Las teleconexiones desempeñan un papel fundamental en el estudio de las interacciones aire-mar y los procesos climáticos globales, a menudo constituyen la pieza que falta en la comprensión de los patrones climáticos tanto espaciales como temporales que se producen en todo el mundo (Bridgman & Oliver, 2006). Una relación aparente entre los factores tales como la temperatura, la fuerza del viento, presión o precipitación de un par de lugares separados por miles de kilómetros, explicaría las alteraciones climáticas simultáneas (Mauro, 2002). Del mismo modo, el sistema climático el cual no sólo se restringe a considerar la atmósfera e hidrósfera y sus intercambios de energía y vapor, se relaciona con las teleconexiones a modo de vínculo con áreas distantes conectadas entre sí por medio del fenómeno El Niño y se refleja en las anomalías pluviométricas que caracterizan a éste fenómeno en muchas regiones del planeta (Martín-Vide, 2003).

Cualquier fenómeno que tiende a variar por encima o por debajo de un valor promedio en algún tipo de forma periódica se designa apropiadamente como una oscilación (Bridgman & Oliver, 2006). Las investigaciones de oscilaciones clásicas indican que, la oscilación se produce cuando un sistema se altera desde una posición de equilibrio estable (Bridgman & Oliver, 2006). En consecuencia, son tres las oscilaciones que afectan el país: la Oscilación del Sur (OS), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y la Oscilación Antártica (AAO) (Romero & Mendonça, 2011). La mayoría de estas oscilaciones están involucrados con la fuerza y la ubicación de los centros de acción, los grandes altas y bajas globales, y las temperaturas superficiales del mar (Bridgman & Oliver, 2006).

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

La denominación técnica de la palabra teleconexión se menciona como patrones de variabilidad de baja frecuencia, el cual lo conforma un dipolo constituido por un anticiclón y una depresión localizadas sobre unas áreas determinadas separadas por unos miles de kilómetros (Martín-Vide, 2003). Como ejemplo de patrones de variabilidad de baja frecuencia se encuentran:

La Oscilación del Sur: Consta de una anomalía de presión fuertemente anti-correlacionada sobre los océanos Índico y Pacífico Sur; tiene un período ligeramente variable con un promedio de ocurrencia cada 2,33 años y, a menudo se analiza como parte de un evento ENOS (Bridgman & Oliver, 2006). Las variaciones del Índice de Oscilación del Sur, se calculan como la diferencia normalizada entre la presión atmosférica a nivel del mar registrada en las estaciones de Tahití y Darwin (Australia), que representan los bordes occidentales y orientales de la cuenca del Pacífico Sur (Romero & Mendonça, 2011).

La Oscilación Decadal del Pacífico: Fenómeno de larga vida, es definido por las temperaturas oceánicas superficiales en el noreste y oeste del Océano Pacífico (Bridgman & Oliver, 2006). Su ocurrencia persiste en ciclos que van de los 20 a 30 años, se caracteriza por una fase positiva o cálida que se registra cuando las anomalías de las temperaturas superficiales del mar en el Pacífico de NW (o SW en el Pacífico Sur) son negativas (positivas), mientras que las anomalías de la superficie del mar en el Pacífico Ecuatorial Oriental son positivas (negativas) (Romero & Mendonça, 2011).

La Oscilación Antártica: Es una oscilación en los valores de las presiones en superficie hacia latitudes medias-altas en el hemisferio sur; se mide bajo el Índice de Oscilación Antártica (Bridgman & Oliver, 2006). También se denomina Modo Anular del Sur (SAM o Southern Anular Mode) y corresponde a la diferencia estandarizada de la presión atmosférica zonal a nivel del mar entre latitudes 40° y 65° S, además los patrones atmosféricos asociados al SAM son anulares y giran en torno a un centro de bajas presiones centrado en el polo sur y que se eleva hacia anillos de alta presión ubicados en latitudes medias (Romero & Mendonça, 2011).

Uno de los mejores ejemplos, de la íntima relación entre las componentes del sistema climático y la conexión a distancia o teleconexión de mayor afectación planetaria es El Niño (Martín-Vide, 2003). La elevación de la temperatura de las aguas marinas tiene lugar en fechas próximas a las de Navidad, motivo que justifica el empleo del término popular de El Niño por los pescadores peruanos en el siglo XIX, si bien, su periodicidad no está establecida, va desde los dos a siete años, siendo el rasgo del calentamiento de las aguas el más importante y es ahí cuando se habla con propiedad de un evento El Niño (Martín-Vide, 2003).

La influencia de las variaciones interanuales que afectan a Chile, entre ellas el fenómeno de El Niño, son descritas por Romero (1985) el que señala que, los efectos climáticos

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

principales son una intensificación de los vientos en el norte de Chile y un incremento de las precipitaciones en Chile central. No sólo el autor menciona a el fenómeno de El Niño, sino también la presencia del Anti-Niño (también llamado La Niña) y se refiere a la situación contraria de El Niño, de esta manera predominan los alisios intensos asociados a altos Índices de Oscilación del Sur, lo que permite esperar fuertes surgencias, temperaturas superficiales del mar y lluvias anormalmente bajas en el Pacífico Ecuatorial.

La figura 4, muestra los efectos mundiales de la teleconexión El Niño, en la cual se presentan regiones en el globo que serían afectadas por períodos lluviosos (wet) y períodos secos (dry) de escasas de precipitación. Para la elaboración de esta imagen, se citaron los estudios en los patrones de precipitaciones asociados al índice OS hecho por Ropelewski & Halpert (1989) y las probabilidades de anomalías de precipitación ENSO elaboradas por Mason & Goddard (2001). Para la zona central de Chile, la figura 4 muestra una etapa húmeda que va entre los meses de junio a septiembre, en pleno invierno austral.

En síntesis, el fenómeno de El Niño se asocia a anomalías positivas del índice de Oscilación del Sur y a las altas temperaturas superficiales del mar, produce lluvias abundantes en Chile Central y en muchos otros lugares del subcontinente (Romero & Mendonça, 2011).

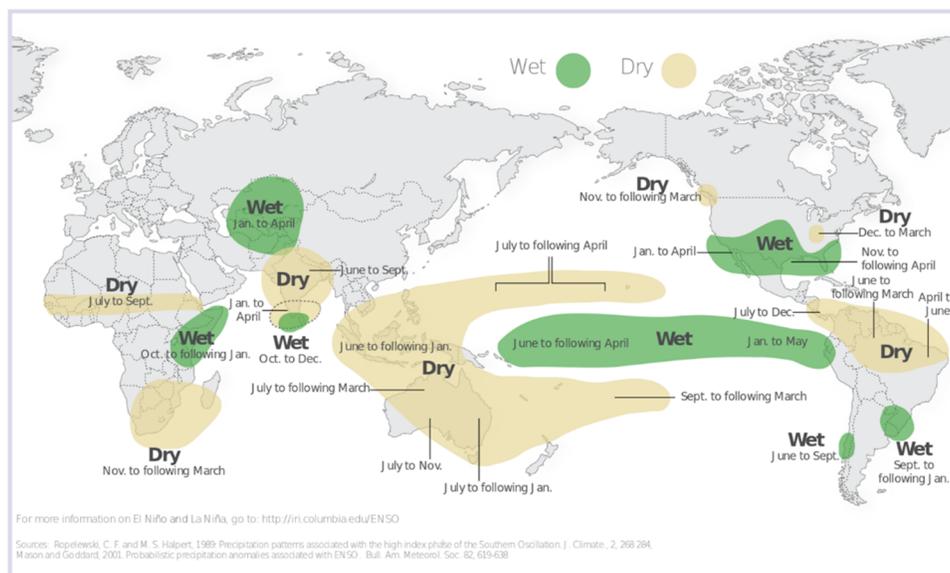


Figura 4: Efectos globales del ENSO.

Fuente: Ropelewski & Halpert (1989), Mason & Goddard (2001).

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

2.5 Tendencias climáticas

Es probable que las influencias antropocéntricas hayan afectado al ciclo global del agua desde 1960, éstas influencias que han contribuido a los aumentos observados en el contenido de humedad en la atmósfera, sumado a los cambios de escala global en los patrones de precipitación en la superficie terrestre (figura 5) y a la intensificación de las precipitaciones fuertes sobre regiones continentales donde se dispone de suficientes datos pluviométricos producirán, cambios en el ciclo global del agua, por lo tanto, se acentuará el contraste de las precipitaciones entre regiones húmedas y secas, y a su vez entre las estaciones lluviosas y secas sin descartarse excepciones regionales (IPCC, 2013).

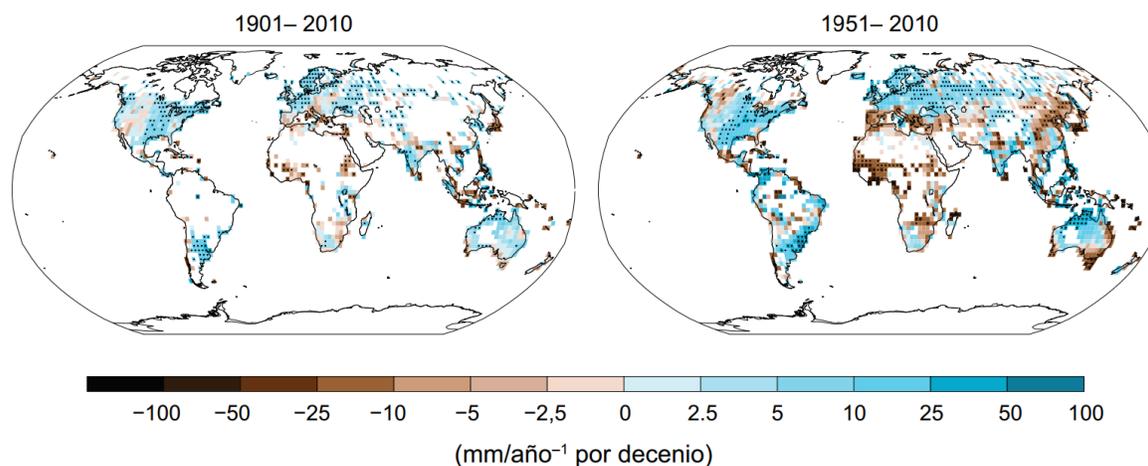


Figura 5: Cambios observados en la precipitación anual sobre la tierra

Fuente: IPCC, 2013

Los cambios de temperatura durante el siglo XX muestran una considerable variabilidad temporal y espacial, las tasas de calentamiento en el hemisferio norte son mayores que la del hemisferio sur, esto se debe a que el primero posee mayor masa continental que el segundo donde, la superficie oceánica es mucho mayor; con todo esto, un cambio climático de carácter global no sólo afectaría la temperatura del planeta sino también la circulación de la atmósfera y por ende los regímenes de precipitación (Garreaud, 2011).

La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones observadas en el clima durante períodos de tiempo relativamente cortos registrando valores por encima o bajo lo normal, es decir, a la diferencia entre el valor registrado de la variable y su promedio se le conoce como anomalía. Así pues, la secuencia de las oscilaciones en los valores de las normales climatológicas (precipitación, temperatura, etc.) se les conoce como variabilidad climática y su valoración se logra mediante la determinación de las anomalías (Montealegre & Pabon, 2000). Además, la variabilidad se da en forma natural y actúa a través de amplias

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

escalas de tiempo, y superpuestos sobre estas variaciones naturales del clima se hallan los efectos de la actividad humana (Barry & Chorley, 1999).

El concepto de variabilidad climática, puede ser definido en función de términos temporales o espaciales en la escala temporal (ver tabla 1) y más allá del orden de la escala sinóptica, se puede hablar de variabilidad intra-estacional, estacional, del ciclo anual o inter-anual, para caracterizar las señales o elementos que distinguen las condiciones de un área o región con respecto a sus promedios sobre el período elegido (Amador & Alfaro, 2009).

De esta manera, la variabilidad climática si se analiza desde un punto de vista estadístico y a partir de una serie climática, puede definirse y evaluarse a partir de los índices de dispersión propios de la estadística descriptiva (Martín-Vide, 2003). A su vez un cambio climático puede producirse de varias formas distintas, por ejemplo, puede haber un desvío en el nivel medio o una tendencia gradual en la media, asimismo la variabilidad puede ser periódica, casi periódica o no periódica, o bien puede presentar alternativamente una tendencia progresiva (Barry & Chorley, 1999).

Tabla 1: Escalas de variabilidad climática según Montealegre & Pabon (2000)

Escalas de la Variabilidad Climática			
Estacional	Intraestacional	Interanual	Interdecadal
<p>Escala correspondiente a la fluctuación del clima a nivel mensual. La determinación del ciclo anual de los elementos climáticos es una fase fundamental dentro de la variabilidad climática a este nivel. En latitudes medias, la secuencia de las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño es algo común para los habitantes de dichas regiones y la planeación de sus actividades gira alrededor de esta alternancia.</p>	<p>Es una escala mayor que la sinóptica (de horas a unos pocos días), se presentan dentro de las estaciones. Las oscilaciones que determinan las condiciones de tiempo durante semanas e inclusive de uno a dos meses. Su amplitud es pequeña en comparación con las del ciclo anual. Dentro de las oscilaciones intraestacionales se destaca una señal de tipo ondulatorio, denominada de 30-60 días.</p>	<p>Escala correspondiente a las variaciones que se presentan en las variables climatológicas de año en año. La variabilidad climática, enmarcada dentro de esta escala, podría estar relacionada con alteraciones en el balance global de radiación. Un ejemplo típico de esta variabilidad corresponde a los fenómenos dentro del ciclo El Niño - La Niña – Oscilación de Sur.</p>	<p>Esta escala manifiesta las fluctuaciones del clima a nivel de décadas. Comparativamente con la variabilidad interanual, la amplitud de estas oscilaciones es menor. Estas oscilaciones de largo plazo están influyendo notablemente en las actividades de la sociedad en ciclos interdecadales y resultan muy importantes en la determinación de posibles tendencias en las variables climáticas.</p>

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Los estudios de cambio climático más relevantes son a nivel global y, por ende, sus resultados tienen a relacionarse con amplias regiones en el globo, ya sea como continentes o como zonas en determinadas latitudes del planeta. Es por ello, que en el caso de Chile se presentan una serie de inconvenientes debido a su gran extensión latitudinal y sus diferentes relieves este-oeste, es por ésta razón que los modelos globales de predicción en el cambio climático tienen la desventaja que deriva de una baja resolución espacial (centenas de kilómetros), que al momento de ser utilizados para un análisis de impacto resulta ser muy pobre, particularmente en el caso de regiones costeras o con importantes variaciones de relieve como es el caso de Chile (Fuenzalida *et al.*, 2006).

La variabilidad en la temperatura y precipitación en Chile son mencionados por Garreaud (2011), en la cual destaca la transición climática con la cuenta Chile central de oeste a este, esto se refiere a que pasa de condiciones oceánicas frías a continentales más cálidas y húmedas. En cuanto a las temperaturas, se aprecia que las oceánicas y costeras han disminuido $-0,15^{\circ}/\text{década}$, las estaciones en los valles centrales muestran un ligero aumento y las temperaturas en cordillera muestran un aumento significativo de casi $+1/4^{\circ}\text{C}$ por década. En cambio, las precipitaciones es más difícil de cuantificar debido a una mayor variabilidad interanual de la cual para la zona central, incluyendo la cordillera en la región Metropolitana, no exhibiría tendencias significativas en la variabilidad de la distribución de las precipitaciones más allá de la causada por la alternancia de los eventos El Niño/La Niña, concordante con Quintana & Aceituno (2012), ya que las precipitaciones para el período entre los años 1950-2007 en la región comprendida entre los $30-37^{\circ}\text{S}$ mantuvo un régimen estacionario.

Es precisamente en la zona central donde la distribución de las precipitaciones presenta una relación de alternancia con el fenómeno ENSO (Montecinos & Aceituno, 2003), con esto el último IPCC señala que existe un nivel de probabilidad alto sobre el fenómeno ENSO seguirá siendo el modo dominante de variabilidad interanual en el Pacífico tropical, con efectos que se sentirán a nivel mundial en el siglo XXI. Asimismo, con el aumento en las tasas de humedad existentes es probable que, a escalas regionales se intensifique la variabilidad en la precipitación conexas al fenómeno ENSO (IPCC, 2013).

Aunque los modelos predictores no han convergido en una idea sobre la proyección del fenómeno ENSO a futuro, en promedio sugieren que los cambios del comportamiento actual no serán muy grandes, pero la dispersión de los modelos es muy amplia para tener una certeza acerca del comportamiento del Pacífico Ecuatorial (Sarachik & Cane, 2010) (Marcos V., 1999). En cuanto a la variabilidad de las precipitaciones interanual, estudios han documentado la tendencia a que las precipitaciones superiores a lo normal en el centro de Chile durante la fase negativa del SOI y condiciones opuestas que se informa de la fase positiva SOI, asociada a La Niña (Montecinos *et al.*, 2000; Quintana & Aceituno, 2012).

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

CAPÍTULO 3: Materiales y Métodos

Materiales

En la presente memoria de título, se utilizó un total de 56 estaciones meteorológicas distribuidas entre las regiones de Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana, Del Libertador Bernardo O'Higgins y Maule para un período máximo de 46 años (1965–2010), comprendido entre los 25 a 46 años con un promedio de 40 años. Las estaciones pertenecen en su gran mayoría a la Dirección General de Aguas (DGA) con 51 estaciones y en menor medida a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) con 5 estaciones respectivamente¹.

Tabla 2: Estaciones Meteorológicas, localización geográfica, precipitación anual, longitud de la serie y fuente

Nº	Estación	Lat. S	Lon. W	Alt. (m)	Pp (mm)	Serie	Años	Fuente
1	La Serena	-29,9	-71,2	142	77	1965-2010	46	DMC
2	Almendral	-30,0	-70,9	370	88	1972-2010	39	DGA
3	La Laguna Embalse	-30,2	-70,0	3160	162	1965-2010	46	DGA
4	Pabellón	-30,4	-70,6	1920	147	1969-2010	42	DGA
5	Recoleta Embalse	-30,5	-71,1	350	101	1965-2010	46	DGA
6	La Torre	-30,6	-71,4	120	122	1979-2010	32	DGA
7	Paloma Embalse	-30,7	-71,0	320	133	1965-2010	46	DGA
8	Cogotí Embalse	-31,0	-71,1	840	171	1965-2010	46	DGA
9	Las Ramadas	-31,0	-70,6	1380	297	1965-2010 [^]	46	DGA
10	Mincha Norte	-31,6	-71,5	50	173	1974-2010	37	DGA
11	San Agustín	-31,7	-70,8	1050	233	1965-2010	46	DGA
12	La Tranquilla	-31,9	-70,7	1000	251	1966-2010	45	DGA
13	Pedernal Hacienda	-32,1	-70,8	1100	281	1977-2010	34	DGA
14	Quilimarí	-32,1	-71,5	25	284	1980-2010 ^{\$}	31	DGA
15	Chalaco Hacienda	-32,2	-70,8	880	216	1965-2010	46	DGA
16	El Trapiche	-32,2	-70,7	1180	250	1975-2010	36	DGA
17	Palquico	-32,3	-71,1	450	261	1973-2010	38	DGA
18	Alicahue Hacienda	-32,3	-70,8	750	275	1965-2010	46	DGA
19	Esterero Rabuco	-32,9	-71,1	300	385	1965-2010 ⁺	46	DGA
20	Vilcuya	-32,9	-70,5	1100	354	1965-2010	46	DGA
21	Riencillos	-32,9	-70,4	1290	504	1965-2010	46	DGA
22	Caleu	-33,0	-71,0	1120	539	1965-2010 [*]	46	DGA
23	Rungue Embalse	-33,0	-70,9	700	356	1965-2010	46	DGA
24	Valparaíso	-33,1	-71,6	41	412	1965-2005	41	DMC
25	Lago Peñuelas	-33,2	-71,5	360	708	1974-2010	37	DGA
26	Colliguay	-33,2	-71,2	490	622	1965-2010	46	DGA

¹ Ver anexo N°1

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

27	Cerro Calán	-33,4	-70,5	848	419	1976-2010	35	DGA
28	Santiago	-33,4	-70,8	527	324	1965-2010	46	DMC
29	Los Panguiles	-33,4	-71,0	195	350	1981-2010	30	DGA
30	Terraza Oficina Central DGA	-33,5	-70,6	560	323	1965-2010	46	DGA
31	Tobalaba	-33,5	-70,5	650	352	1969-2010	42	DMC
32	Antupirén	-33,5	-70,5	904	456	1980-2010	31	DGA
33	Bocatoma Maitenes	-33,5	-70,3	1143	361	1988-2010	23	DGA
34	San Antonio	-33,6	-71,6	80	397	1971-2010*	40	DGA
35	Cerrillos de Leyda	-33,6	-71,5	180	440	1965-2010	46	DGA
36	San José de Maipo	-33,6	-70,4	943	536	1972-2010	39	DGA
37	Pirque	-33,7	-70,6	659	450	1972-2010	39	DGA
38	El Yeso Embalse	-33,7	-70,1	2475	563	1965-2010#	46	DGA
39	Melipilla	-33,7	-71,2	170	380	1976-2010	35	DGA
40	Carmen de las Rosas	-33,8	-71,2	165	427	1965-2010	46	DGA
41	San Gabriel	-33,8	-70,2	1266	645	1978-2010	33	DGA
42	Las Melosas	-33,9	-70,2	1527	743	1965-2003\$	39	DGA
43	Rapel	-33,9	-71,7	16	544	1965-2010	46	DGA
44	Rancagua	-34,2	-70,8	515	445	1979-2010	32	DGA
45	Cocalán	-34,2	-71,3	120	530	1979-2010	32	DGA
46	Pichilemu	-34,4	-72,0	5	503	1981-2010	30	DGA
47	Rengo	-34,4	-70,9	310	529	1971-2010	40	DGA
48	Viña Vieja	-34,5	-71,1	220	619	1979-2003	25	DGA
49	Millahue	-34,5	-71,2	200	695	1972-2010	39	DGA
50	Nilahue Barahona	-34,6	-71,8	90	567	1969-2010	42	DGA
51	San Fernando	-34,6	-71,0	350	749	1972-2010	39	DGA
52	La Rufina	-34,7	-70,8	743	1133	1965-2010	46	DGA
53	Convento Viejo	-34,8	-71,1	239	709	1972-2010	39	DGA
54	Curicó	-35,0	-71,2	225	704	1965-2010	46	DMC
55	El Manzano	-35,0	-70,9	574	1292	1976-2010	35	DGA
56	Los Queñes	-35,0	-70,8	668	1339	1965-2010	46	DGA

Año (s) de estaciones faltantes: ^ Falta 1969// + Falta 1979 y 1996// *Falta 1976// # falta 1972// \$ Falta 1984

Fuente. Elaboración Propia en base a estaciones meteorológicas de la DGA y DMC

La tabla 2, muestra la distribución latitudinal y altitudinal de las 56 estaciones a analizar, presente en los distintos relieves de la zona central del Chile.

La figura 6 contiene los respectivos puntos de cada estación presentados la tabla 2, se aprecia la distribución latitudinal de precipitaciones medias a lo largo de las cinco regiones, en base a la superficie climática de las precipitaciones anuales (1950-2000) de Pliscoff *et al.* (2014).

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

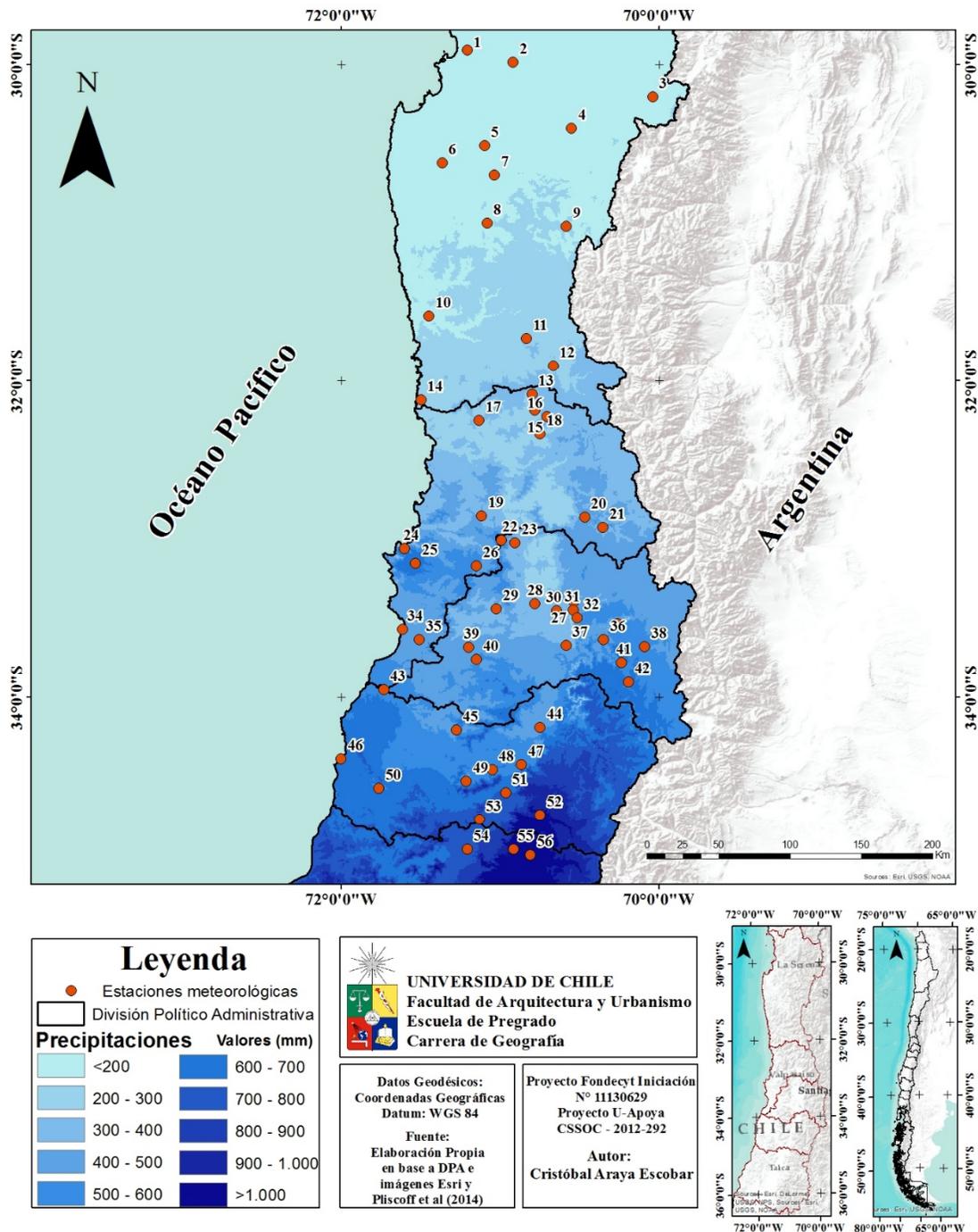


Figura 6: Distribución de las precipitaciones y los observatorios meteorológicos.

Métodos

3.1 Test de homogeneidad

Las series de variables meteorológicas son señales temporales representativas de fenómenos físicos (Rodríguez *et al.*, 1996), estas series de datos climatológicos, que son entregadas para su análisis muchas veces no incluyen anexos sobre la información de las variabilidades que puedan presentar, por factores como cambios en el instrumental, localización de la estación meteorológica o eventos extraordinarios que interrumpen el normal proceso de observación de datos (Martín-Vide, 2003).

En climatología se entiende que una serie de datos temporales es homogénea cuando sus variaciones provienen exclusivamente de la dinámica natural y no han sido originadas por la intervención humana (González *et al.*, 2002). En otras palabras, una serie homogénea es aquella en la que se puede garantizar que cada valor es sólo fruto del comportamiento de la atmósfera en un lugar y enclave determinado no sujeta pues, a variables artificiales de diversa índole (Martín-Vide, 2003).

Se ha de tener en cuenta que el clima es un hecho dinámico y, que a juzgar por las consideraciones sobre la acción de la actividad antrópica sobre el planeta en este último siglo es de esperar que sufra alteraciones significativas (Rodríguez *et al.*, 1996). El cambio de hora en la lectura de los datos, de los instrumentos de medida, de su localización, incluso de observadores, puede inducir alteraciones en los registros que reciben el nombre de inhomogeneidad (González *et al.*, 2002).

Existen diferentes test de homogeneidad con diferentes niveles de exigencia lo que no siempre los hace coincidentes en sus resultados, entre estos destacan dos grupos fundamentales: los de homogeneización absoluta y los de homogeneización relativa; los primeros sólo examinan mediante algún método estadístico la serie estudiada basándose en su aleatoriedad por el contrario, los segundos comparan la serie en cuestión con otra u otras series homogéneas vecinas o cercanas (Martín-Vide, 2003).

Lo más habitual es disponer de una serie climática cuyas incidencias y variaciones se desconozcan a través de estas incertidumbres, los métodos como el test de von Neumann, sirven para dilucidar la homogeneidad de datos (Rodríguez *et al.*, 1996). Los test homogeneidad absoluta como el von Neumann y el de Thom o de las rachas o alternancias que no requiere que la serie analizada proceda de una población normal, por otra parte, el test de von Neumann exige que la serie analizada pueda ser considerada una muestra de una población normal o gaussiana asumible, por ejemplo, en la mayoría de las series anuales de temperatura y precipitación (Martín-Vide, 2003). Su cálculo consiste en:

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

$$N = \frac{\sum(x_{i+1} - x_i)^2 / (n - 1)}{\sum(x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)}$$

Entonces, el promedio del cuadrado de las diferencias de cada valor de la serie menos el anterior. Luego se divide este valor entre la varianza de la serie:

$$N = \frac{\sum(x_{i+1} - x_i)^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2}$$

De la razón de von Neumann se obtiene un cociente que si es próximo a 2, se puede considerar aleatoria y por lo tanto homogénea. Para series pluviométricas anuales, un cociente comprendido entre 1,7 y 2,3 o incluso entre 1,6 y 2,4 indica homogeneidad (Martín-Vide, 2003).

En cambio, el test de Thom de las rachas o de las alternancias (reconocido por la Organización Meteorológica Mundial), consiste en contabilizar el número de rachas o tramos de la serie que quedan por encima y por debajo de la mediana por lo que, el número de rachas se simboliza mediante una R y se calcula entonces el cociente Z:

$$Z = \left(R - (n + 2) / 2 / \sqrt{n(n - 2) / 4(n - 1)} \right)$$

Por último, si $|Z|$ es menos que 2,58 la serie puede considerarse aleatoria y por tanto homogénea (Martín-Vide, 2003).

.

3.2 Índice de concentración de las precipitaciones

Los eventos de precipitación intensa suelen aportar un alto porcentaje al total anual de manera, que la ocurrencia o no de dos o tres jornadas con precipitaciones torrenciales llegan a modificar el carácter lluvioso o seco de un año entero (Martín-Vide, 2011). Aportando a una mayor comprensión relativa de los días lluviosos y su contribución a los regímenes mensuales, Martín-Vide (2004) propone un índice de concentración diaria de las precipitación (Concentration index, CI), similar al índice de Gini aplicado a las curvas de Lorenz (Martín-Vide, 2011).

El índice de Gini tiene por finalidad medir el grado de concentración que presenta una variable y su paralelo gráfico es la curva de Lorentz (Ruiz-Maya, 1978). Una aplicación tradicional de este indicador es su clasificación entre las medidas estadísticas para el análisis de la distribución del ingreso y, su construcción se deriva a partir de la curva de Lorenz y ésta a su vez toma valores entre 0 y 1, donde 0 indica que la muestra es equitativa y por lo tanto, reciben el mismo ingreso por el contrario, valores 1 indican que la muestra concentra todo el ingreso (Medina, 2001).

Para el cálculo del CI de los observatorios, se ha trabajado con series a resolución diaria (Sarricolea *et al.*, 2013). Las distribuciones de frecuencias de las cantidades diarias de precipitación son, en general, ajustables mediante distribuciones exponenciales negativas, esto ocurre porque al ordenar las cantidades diarias y distribuirlas en clases de la misma longitud sus frecuencias absolutas disminuyen exponencialmente a partir de la clase inferior (Martín-Vide, 2003).

Por medio de la tabla de distribución de frecuencias de las precipitaciones reflejado en una estructura temporal de la precipitación, se observa que en cualquier lugar el elevado porcentaje de los días lluviosos con cantidades pequeñas aportan un porcentaje relativamente pequeño del total pluviométrico mientras que, los escasos días con cantidades altas contribuyen en un estimable porcentaje al registro total (Martín-Vide, 2003).

La tabla 3 muestra el caso de la estación Almendral para el período 1972–2010. El detalle de éste tipo de tablas es descrito por Martín-Vide, (2003). En la primera columna se muestran las clases o intervalos de clases ordenadas de manera creciente, en la segunda columna las muestras o valores representativos de cada clase. La tercera columna n_i , presenta los días de precipitación correspondiente a cada clase o frecuencia absoluta. La cuarta columna $\sum n_i$, aparece la frecuencia absoluta acumulada, que se consiguen sumando las frecuencias absolutas de las clases inferiores, incluida la clase considerada. La quinta columna P_i , corresponde al aporte pluviométrico y se obtiene como producto clase a clase, de la segunda por la tercera. La sexta columna $\sum P_i$, se trata de la acumulación progresiva de los valores de la columna anterior cumpliendo así la última clase correspondiente, a la cantidad total de precipitación caída en el período de estudio 3487,5 mm.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Por último la comuna séptima y octava presentan los porcentajes correspondientes, obtenidos de las columnas cuarta y sexta. En otras palabras, la división de cada valor por el último de la columna y multiplicado por cien.

Tabla 3: Distribución de la frecuencia en clases de 1 mm, frecuencias porcentuales acumuladas de días (X) y porcentajes de precipitación (Y) correspondientes a Almendral (1972 – 2010).

Clases	Marca de Clase	n_i	$\sum n_i$	P_i	$\sum P_i$	$\sum n_i (\%) = X$	$\sum P_i (\%) = Y$
0,1 - 0,9	0,5	12	12	6	6	4	0
1 - 1,9	1,5	36	48	54	60	16	2
2 - 2,9	2,5	49	97	123	183	31	5
3 - 3,9	3,5	24	121	84	267	39	8
4 - 4,9	4,5	20	141	90	357	46	10
5 - 5,9	5,5	15	156	83	439	51	13
6,0 - 6,9	6,5	13	169	85	524	55	15
7,0 - 7,9	7,5	7	176	53	576	57	17
8,0 - 8,9	8,5	11	187	94	670	61	19
9,0 - 9,9	9,5	5	192	48	717	62	21
10,0 - 10,9	10,5	12	204	126	843	66	24
11,0 - 11,9	11,5	9	213	104	947	69	27
12,0 - 12,9	12,5	6	219	75	1022	71	29
13,0 - 13,9	13,5	6	225	81	1103	73	32
14,0 - 14,9	14,5	6	231	87	1190	75	34
15,0 - 15,9	15,5	2	233	31	1221	75	35
16,0 - 16,9	16,5	7	240	116	1336	78	38
17,0 - 17,9	17,5	4	244	70	1406	79	40
18,0 - 18,9	18,5	3	247	56	1462	80	42
19,0 - 19,9	19,5	5	252	98	1559	82	45
20,0 - 20,9	20,5	4	256	82	1641	83	47
21,0 - 21,9	21,5	4	260	86	1727	84	50
22,0 - 22,9	22,5	3	263	68	1795	85	52
23,0 - 23,9	23,5	4	267	94	1889	86	54
24,0 - 24,9	24,5	2	269	49	1938	87	56
25,0 - 25,9	25,5	3	272	77	2014	88	58
26,0 - 26,9	26,5	1	273	27	2041	88	59
27,0 - 27,9	27,5	2	275	55	2096	89	60
28,0 - 28,9	28,5	4	279	114	2210	90	63
30,0 - 30,9	30,5	2	281	61	2271	91	65

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

31,0 - 31,9	31,5	2	283	63	2334	92	67
32,0 - 32,9	32,5	2	285	65	2399	92	69
33,0 - 33,9	33,5	1	286	34	2432	93	70
34,0 - 34,9	34,5	2	288	69	2501	93	72
35,0 - 35,9	35,5	2	290	71	2572	94	74
36,0 - 36,0	36,5	2	292	73	2645	95	76
37,0 - 37,0	37,5	1	293	38	2683	95	77
38,0 - 38,9	38,5	2	295	77	2760	96	79
39,0 - 39,9	39,5	1	296	40	2799	96	80
41,0 - 41,9	41,5	1	297	42	2841	96	81
42,0 - 42,9	42,5	1	298	43	2883	96	83
43,0 - 43,9	43,5	1	299	44	2927	97	84
44,0 - 44,9	44,5	1	300	45	2971	97	85
48,0 - 48,9	48,5	2	302	97	3068	98	88
50,0 - 50,9	50,5	2	304	101	3169	98	91
52,0 - 52,9	52,5	2	306	105	3274	99	94
53,0 - 53,9	53,5	1	307	54	3328	99	95
64,0 - 64,9	64,5	1	308	65	3392	99	97
95,0 - 95,9	95,5	1	309	96	3488	100	100

Fuente: Elaboración Propia

Las cifras extraídas a partir de las dos últimas columnas, permiten aportar información para la representación gráfica de los números de días de precipitación acumulados en porcentaje $\sum n_i \%$ en el eje X, con respecto a la cantidad de precipitación acumulada en porcentaje $\sum P_i \%$ en el eje de la Y. Por último, en la figura 7 se presenta la curva de concentración de Lorenz, es decir, la curva poligonal de marcada tendencia exponencial y una recta supuesta que representa la equidistribución.

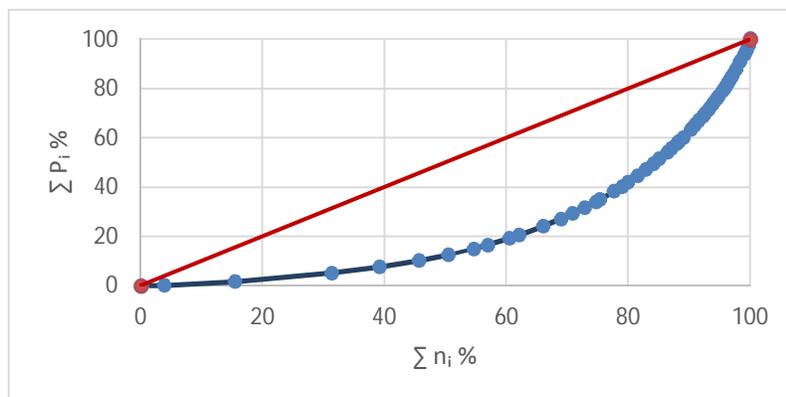


Figura 7: Número de días de precipitación acumulados (en %) frente a cantidad de precipitación acumulada (en %) para Almendral (1972 – 2010).

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Sean A y B dos estaciones ficticias en la figura 8 cuyos valores se han elegido para ilustrar el concepto de concentración, con la línea poligonal similar al caso de Almendral. La bisectriz del cuadrante es la línea de equidistribución (este es un caso ideal), donde la distribución de la precipitación diaria es perfecto (Martín-Vide, 2004).

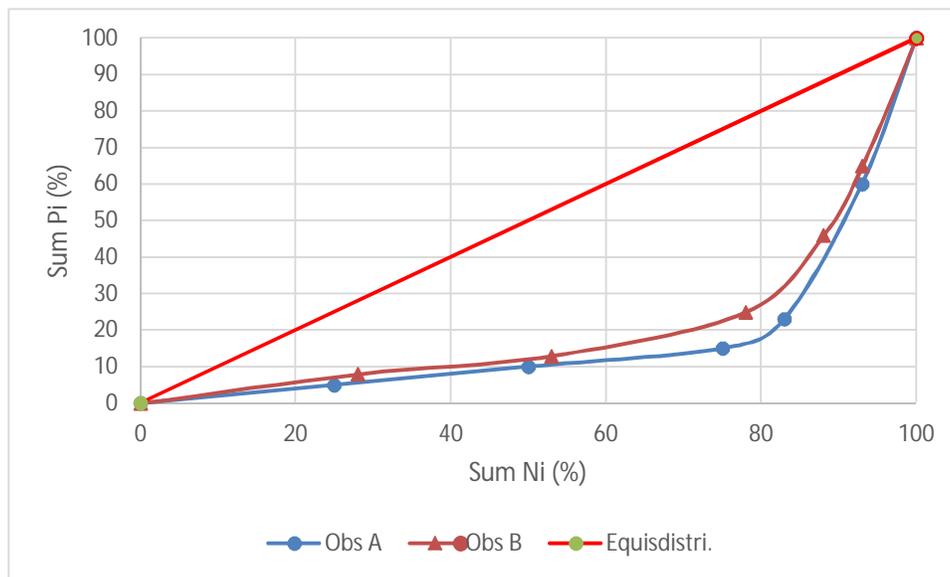


Figura 8: Concentración de la curva de Lorenz con dos estaciones ficticias.

Fuente: Elaboración propia

El área (S) encerrada por la bisectriz del cuadrante y la línea poligonal, proporciona una medida de la concentración, debido a que a mayor sea el área, mayor es la concentración. El índice de concentración de Gini se define por:

$$\text{Índice de Gini} : 2S/10.000$$

No obstante, la fórmula anterior puede perfeccionarse sustituyendo las poligonales por las curvas exponenciales que mejor las ajustan, que son del tipo:

$$y = A x e^{bx}$$

Siendo A y b dos constantes (Martín-Vide, 2003).

El cálculo de A y b es mediante el procedimiento de mínimos cuadrados, a través de las siguientes expresiones:

$$\ln a = \frac{\sum X_i^2 \sum \ln Y_i + \sum X_i \sum X_i \ln X_i - \sum X_i^2 \sum \ln X_i - \sum X_i \sum X_i \ln Y_i}{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}$$

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

$$b = \frac{N \sum X_i^2 \sum \ln Y_i + \sum X_i \sum \ln X_i - N \sum X_i \ln X_i - \sum X_i \sum \ln Y_i}{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}$$

Un vez calculadas las constantes, se define la integral de la curva exponencial entre 0 y 100, la cual expresa el área bajo la curva A

$$A' = \left[\frac{a}{b} e^{bx} \left(x - \frac{1}{b} \right) \right] 100$$

El área sobre la curva y bajo la recta de equidistribución S, se obtiene mediante las 5.000 unidades de área menos A, expresada en la siguiente ecuación:

$$S = 5.000 - A'$$

Por último el CI se define el índice de concentración de la precipitación diaria, similar al de Gini:

$$CI = 2S/10.000$$

O, mejor dicho:

$$CI = S/5.000$$

El CI es un valor entre 0 y 1 y se relaciona con el área entre la curva del ajuste exponencial y la diagonal del cuadrado de lado 100 o 10.000 unidades de área (Sarricolea & Martín-Vide, 2012). En concreto, el CI se calcula como la proporción de la citada área bajo la diagonal ($S' / 5.000$), y para obtenerla se debe conocer el área inferior a la curva exponencial (A'), dicho ajuste exponencial relaciona el porcentaje de días de lluvia y sus totales ambos acumulados (Sarricolea *et al.*, 2013).

3.3 Índice de concentración de las precipitaciones aplicadas a los períodos 1965 – 1988 y 1989 – 2010

Si bien el CI es un índice que abarca todo un período para una estación meteorológica, es posible evaluar las tendencias de éste índice, como puede ser a través de los años para así determinar sus tendencias. Una forma de poder evidenciar las tendencias del CI, es mediante períodos que permitan estimar sí el índice para una determinada cantidad de años con respecto a sus años sucesores aumentó o, dicho de mejor manera, concentró sus precipitaciones. También, se puede dar la situación opuesta que para el período siguiente el índice tienda a disminuir y por lo tanto sus precipitaciones demuestren ser menos concentradas.

Para esta situación, en la cual se busca a partir de la serie completa de precipitación agrupada en clases dividirla en dos períodos que comprendan los años 1965–1988 y 1989–2010 para ello, es necesario capturar la totalidad de la serie de datos y dividirla en dos períodos los cuales deben coincidir entre sí, de manera que sean comparables para igual cantidad de años en sus divisiones.

El proceso de cálculo del CI es simple, para el caso de los dos períodos dentro de una misma estación meteorológica se aplica una exclusión la cual permite capturar sólo las marcas de clases que se encuentren para el período seleccionado y, luego aplicar el cálculo del CI normalmente. Poseer dos períodos permite un mayor análisis del CI a nivel de estaciones meteorológicas, generando así un resultado que logre capturar las concentraciones del índice a través de los años con esto es posible estimar su comportamiento y tendencias.

La tabla 4, presenta la suma de marca de clases para la estación Almendral en sus dos períodos más el que comprende toda la serie. Ambos períodos presentan marcas de clases diferentes, pero el segundo período contiene similar marca de clases que serie completa, sin embargo, sus sumatorias son dispares, pues la primera serie es de menor cantidad de datos que la primera, no obstante, los resultados son similares a los presentados en la tabla 3.

Tabla 4: Distribución en períodos y serie completa de las marcas de clase para la estación meteorológica de Almendral

Período 1972 - 1987		Período 1988 -2010		Serie completa	
Marca de clases	Sumatoria (n _i)	Marca de clases	Sumatoria (n _i)	Marca de clases	Sumatoria (n _i)
0,5 – 64,5	145	0,5 – 95,5	164	0,5 – 95,5	309

Fuente: Elaboración Propia

3.4 Métodos de interpolación espacial de las precipitaciones

La temperatura y las precipitaciones son parámetros climatológicos importantes, y el conocimiento de sus patrones temporales y espaciales es útil para los investigadores que trabajan en muchas disciplinas geográficas (Irmak *et al.*, 2010). La interpolación espacial de los datos de precipitación es de gran importancia para la modelización hidrológica, los métodos geoestadísticos, como el kriging, se aplican ampliamente en la interpolación espacial sobre medición de puntos en superficies continuas (Ly *et al.*, 2011).

Si bien la literatura sugiere que no existe un único método preferido en la interpolación y la selección del método de interpolación suele basarse en los datos disponibles, el nivel de precisión deseado y los recursos disponibles (Irmak *et al.*, 2010). Los modelos de interpolación espacial según Ly *et al.* (2013), se divide en dos grupos: los modelos deterministas y los modelos geoestadísticos. De los métodos deterministas de interpolación existen dos ampliamente utilizados, uno son los polígonos de Thiessen (THI) y la ponderación del inverso a la distancia (IDW). El primero (THI) también conocido como el vecino más cercano, asume los valores observados de la estación más cercana. El método requiere la construcción de una red de polígonos de Thiessen, estos polígonos se forman por medio de los segmentos que unen las estaciones cercanas a otras estaciones relacionadas. La superficie de cada polígono se determina y se utiliza para equilibrar la cantidad de lluvia de la estación en el centro del polígono. El segundo (IDW) se basa en las funciones de las distancias inversas, en el que los pesos se definen por el opuesto de la distancia y normalizado de modo, que su suma es igual a uno. Existe la posibilidad de incluir en el IDW un método junto con la ponderación de la distancia y distancia inversa, la elevación ponderación (IDEW), de modo que se pueden interporlar los impactos de la precipitación en el relieve.

Por otra parte, los modelos de interpolación geoestadísticos constituyen una disciplina que conecta las matemáticas y la geografía datos (Ly *et al.*, 2013). El modelo kriging es un ejemplo de un grupo de técnicas geoestadísticas utilizadas para interpolar el valor de un campo aleatorio. El kriging se basa en modelos estadísticos que implican la autocorrelación, la autocorrelación se refiere a las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. En kriging, el valor de la variable de interés se calcula para un punto específico mediante una suma ponderada de las observaciones de punto disponibles. Los pesos de los datos se eligen de modo que la interpolación es imparcial y la varianza se reduce al mínimo, kriging es el primer método de interpolación para tener en cuenta la estructura de la dependencia espacial de los datos (Ly *et al.*, 2013).

De los múltiples métodos de interpolación espacial está el inverso a la distancia ponderada (IDW) y *Spline* (ver Mitas & Mitasova (1999)), el cual ofrece un resultado más continuo, suave y adaptable, si se ajustan adecuadamente sus parámetros, se suele llegar a una

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

interpolación de mayor precisión, pero debe controlar que no genere salidas de rango excesivas, causadas habitualmente por datos muy distintos en relación a su proximidad (Pesquer et al., 2007).

Existen dos métodos de *Spline*: regularizado y de tensión. El método regularizado crea una superficie suave que cambia gradualmente con los valores que pueden estar afuera del rango de datos de muestra. El método de tensión controla la rigidez de la superficie de acuerdo al carácter del fenómeno modelado, además crea una superficie menos suave con valores que están más restringidos por el rango de datos de la muestra (ArcGis Resources, 2013).

La opción utilizada para interpolar es *Spline* de tensión, su función se basa en que modifica el criterio de minimización para que los términos de la derivada primera se incorporen a los criterios de minimización. El parámetro de peso especifica el peso adjunto a los términos de la derivada primera durante la minimización, que se denomina Φ (phi) en la ecuación. Un peso de cero resulta en la interpolación por *Spline* por lámina delgada básica. Al utilizar un valor de peso más grande, se reduce la rigidez de la lámina y, a medida que phi se acerca al infinito en el límite, la superficie se aproxima a la forma de una membrana, u hoja de goma, que pasa por los puntos. La superficie interpolada es suave. Las derivadas primeras son continuas pero no suaves (ArcGis Resources, 2013).

La ecuación de *Spline* de tensión es la siguiente:

$$R(r) = -\frac{1}{2\pi\phi^2} \left[\ln\left(\frac{r\phi}{2}\right) + c + K_0(r\phi) \right]$$

Donde:

R: Es la distancia entre el punto y la muestra.

ϕ^2 : Es el parámetro de Peso.

Ko: Es la función de Bessel modificada.

C: Es una constante igual a 0,577215.

3.5 Distribución interanual de la precipitación y parámetros estadísticos de dispersión

Para evaluar las diferentes escalas de la variabilidad temporal de las precipitaciones, por ejemplo, a nivel mensual, estacional u anual, se utiliza el Índice de Concentración de las precipitaciones mensuales PCI (Xu *et al.*, 2010), propuesto por Oliver (1980), el cual menciona su aplicabilidad a diversas regiones del mundo. El propósito de este índice es caracterizar la distribución de la lluvia en un año cualquiera y está enfocado principalmente a si las precipitaciones en la época lluviosa se encuentran concentradas sobre un período corto o más largo del año (Schultz *et al.*, 1997). Modificando una simple ecuación utilizada en geografía económica, es posible identificar un índice para expresar la distribución relativa de las precipitaciones a lo largo de un año (Oliver, 1980).

La fórmula para el cálculo del PCI propuesta por Oliver (1980) es la siguiente:

$$PCI = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{(P_j)^2}$$

Donde:

PCI = Es el índice del concentración de las precipitaciones para el año seleccionado

P_i = La precipitación para el mes i

P_j = La precipitación anual para el año j

Los valores del PCI oscilan entre de 8,3 a 100, donde 8,3 indica que la distribución de las precipitaciones se reparte de forma homogénea durante los doce meses y 100 que las precipitaciones se concentraron en un solo mes.

Se utilizaron las siguientes clasificaciones del PCI, modificadas a partir de Oliver (1980):

Clasificación	Valor
Estacional	< 30
Altamente estacional	30 - 40
Repartición irregular	> 40

Valores cercanos o inferiores a 30 indican estacionalidad o uniformidad y repartición regular de las precipitaciones durante el año, valores entre 30 y 40 comienzan a mostrar una estacionalidad marcada en los meses lluviosos y sobre 40 la precipitación se aleja de la estacionalidad y se concentraría con intensidad en tan sólo unos pocos meses a lo largo del año.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

El análisis de la variabilidad temporal de los elementos climáticos es uno de los temas al que se presta mayor atención en la investigación climatológica actual, ya que dicho interés deriva de la necesidad de distinguir entre la variabilidad natural del clima y la inducida por la acción antrópica (Martín-Vide *et al.*, 2001).

Una serie climática la constituyen las medidas de tendencia central (media, mediana y moda) y medidas de dispersión (desviación típica, variancia, coeficiente de variación), éstas sirven para explicar una sucesión temporal larga de datos meteorológicos relativos a un lugar que incluya diferentes situaciones meteorológicas, su análisis frecuencial permitirá definir el clima del lugar en cuestión y su análisis temporal, esto se conoce como la evolución climática (Martín-Vide, 2003).

El coeficiente de variación CV en climatología y en particular en la pluviometría se opta por esta medida de dispersión relativa a la hora de comparar la variabilidad de diferentes observatorios para ello, el mejor parámetro es el coeficiente de variación y se define como:

$$CV = \left(\frac{S}{\bar{x}} \right) \cdot 100 (\%)$$

El CV también puede calcularse como simple cociente entre la desviación típica y la mediana sin expresarlo en porcentaje (Martín-Vide, 2003).

$$CV = \left(\frac{\sigma}{\bar{x}} \right)$$

Donde:

CV = Corresponde a coeficiente de variación

σ = Corresponde a la desviación típica de una muestra

\bar{x} = Corresponde a la media de la muestra

En el análisis de la variabilidad temporal de los elementos climáticos hay que hacer uso, en un principio, de los parámetros estadísticos de dispersión, en especial el coeficiente de variación, una de sus desventajas es que no contempla el orden de los valores en la serie, de modo que se logre un orden cronológico de la base de datos para entender el comportamiento temporal de los elementos considerados, es por ello que el coeficiente de variación correlacionado con otros índices de irregularidad temporal de las precipitaciones, así aportan información relevante sobre el contraste o irregularidad entre los valores de las secuencias temporales, para entender los comportamientos de los totales anuales (Martín-Vide *et al.*, 2001).

3.6 Patrones de baja frecuencia asociado a precipitaciones y teleconexión ENSO

La variabilidad climática de las precipitaciones en Chile central se asocia a eventos de gran pluviosidad con el fenómeno ENSO entendido como fenómenos de precipitación intensa (Espinoza, 2006), lo que a su vez trae consigo severas inundaciones en la zona central de Chile (Maturana *et al.*, 2004).

Las anomalías de precipitación en Chile central son detalladas por Aceituno (1992), en la cual se presentan situaciones durante la fase negativa de la IOS, con valores anormalmente altos de presión en Darwin y extensas áreas en el pacífico central extendiéndose hasta la costa subtropical de América del Sur, presentando una mayor nubosidad y actividad convectiva durante los meses lluviosos. Con esto se sugiere que la variabilidad interanual del régimen de las precipitaciones se asocia en parte a la SOI Aceituno , 1992).

Para determinar la relación presente entre los excesos pluviométricos anuales de las 56 estaciones meteorológicas y el fenómeno de El Niño mediante el índice de Oscilación del Sur, se procederán a calcular todos los totales anuales de cada estación meteorológica según la cantidad de años que abarque cada serie meteorológica.

Primero se realiza una suma simple de todos días con precipitación (P_1) del mes:

$$Pp \text{ mensual} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots$$

Con esto se obtiene la precipitación mensual (P_N) correspondiente a cada mes y de la suma de estos resultara la precipitación total anual:

$$Pp \text{ anual} = P_E + P_F + P_M + \dots$$

Los procesos de sumatorias simples a partir de las precipitaciones diarias correspondientes a cada mes y a su vez la suma de estos doce meses arroja como resultado el monto anual de precipitación para cada año en particular.

En síntesis, la tabla 5 muestra cómo se configura la precipitación mensual y el total precipitado anual, que nace a partir de la suma de los montos mensuales de precipitación en la estación Cerro Calán para el período comprendido entre los años 1974-2010.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Tabla 5: Distribución de las precipitaciones (mm) anuales en la estación Cerro Calán (1974-2010)

Años	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANUAL
1974	0	0	0	0	162	387	17	9	57	0	33	0	666
1975	0	0	0	30	69	125	245	52	1	0	18	0	539
1976	0	0	6	0	63	61	15	74	79	90	65	0	454
1977	0	0	0	10	27	237	576	119	0	52	8	0	1028
1978	0	0	0	0	21	147	511	16	133	0	66	3	897
1979	2	0	1	47	39	0	315	36	65	0	55	13	571
1980	0	0	0	224	201	163	317	23	117	0	0	0	1045
1981	0	0	2	12	488	48	36	24	22	0	0	0	631
1982	0	0	31	0	245	467	276	118	45	44	0	0	1224
1983	3	0	0	2	75	208	169	142	18	5	0	0	620
1984	1	0	9	6	214	66	786	174	90	21	2	0	1366
1985	0	0	8	0	49	74	193	0	67	13	0	0	402
1986	0	0	0	181	189	129	9	195	2	0	82	0	784
1987	0	0	0	20	95	43	634	362	47	107	0	0	1305
1988	0	0	12	0	2	42	138	186	23	0	11	0	412
1989	0	0	0	2	23	52	187	136	0	0	0	0	400
1990	0	0	32	0	20	10	102	46	45	21	0	0	276
1991	0	0	0	27	152	343	107	16	148	21	0	17	830
1992	0	2	24	24	402	317	6	275	45	1	3	0	1098
1993	0	0	0	120	96	168	102	29	0	0	2	2	518
1994	0	0	0	44	207	103	86	33	40	9	0	5	526
1995	0	0	0	46	0	126	125	130	7	13	2	0	448
1996	0	0	0	12	21	78	262	128	4	4	0	8	516
1997	0	0	0	7	222	402	123	245	196	105	5	0	1304
1998	0	1	1	34	19	73	0	0	11	0	0	0	138
1999	0	0	41	4	66	75	60	142	217	4	0	0	607
2000	0	8	0	13	16	634	7	7	251	6	0	0	943
2001	0	0	0	19	144	5	541	129	31	0	0	0	868
2002	0	0	9	3	349	334	256	203	25	8	0	0	1186
2003	0	0	0	0	176	183	84	23	30	4	12	0	510
2004	0	0	12	51	56	95	241	159	46	2	35	0	696
2005	0	0	19	1	182	123	112	212	57	23	32	0	760
2006	0	0	0	3	43	190	397	55	11	66	0	0	764
2007	0	23	0	0	20	135	50	48	0	0	1	0	276
2008	0	0	18	23	231	129	138	209	5	0	0	0	752
2009	0	0	0	0	0	223	24	243	12	1	3	0	505
2010	0	0	0	0	59	185	69	3	29	0	1	0	346

Fuente: Elaboración propia en base a DGA.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

En suma, el SOI se calcula desde el siglo XIX y es la diferencia entre la presión atmosférica estandarizada, medida al nivel del mar, entre Tahití y Darwin, su ecuación de cálculo es la siguiente:

$$SOI = 10 \frac{[(P_T - P_D) - Med(P_T - P_D)]}{SD(P_T - P_D)}$$

Donde:

P_T = Presión media mensual en Tahití.

P_D = Presión media mensual en Darwin.

Med = Media

SD = Desviación tipo

El SOI se multiplica por 10 por conversión, así es posible calcularlo en números enteros.

Entonces, el SOI es un valor que indica la diferencia de presión para dos lugares en específico situados en el océano pacífico, con frecuencia la magnitud de esta oscilación está relacionada con el desarrollo e intensidad de los eventos de El Niño y La Niña (Jiménez, 2013).

La figura 9, exhibe una gráfica del Índice de Oscilación del Sur, con valores positivos (negativos) corresponde a fenómeno La Niña y con valores negativos (positivos) corresponde al fenómeno de El Niño.

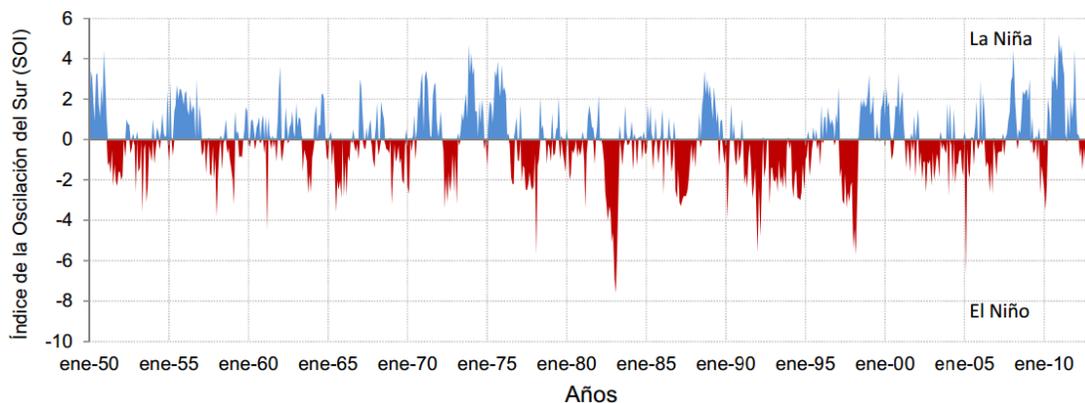


Figura 9: Índice de Oscilación del Sur período 1950-2010.

Fuente: Jiménez (2013)

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

3.7 Precipitaciones máximas asociadas a tipos de tiempo y clasificación automática

La lluvia a partir de una mirada común equivale a precipitación líquida sea lluvia, llovizna o chubasco por otra parte, desde el punto de vista meteorológico las precipitaciones son la caída de partículas de agua, en estados sólido o líquido al suelo donde, llegan con una velocidad apreciable por consiguiente, los productos de la precipitación caen a través del aire (Martín-Vide, 1999).

Las partículas acuosas que caen de las nubes no siempre llegan al suelo, pues se pueden evaporar o sublimar, si la lluvia constituye una cortina que no llega al suelo tiene nombre de virga, por el contrario si alcanza el suelo se llama *praecipitatio*, es decir, la precipitación misma, además se suman otras situaciones como el caso de la niebla donde las gotas tocan el suelo el cual mojan o humedecen, pero a diferencia de la lluvia no tienen una velocidad de caída apreciable (Martín-Vide, 1999).

El registro de las precipitaciones caídas se expresa en el volumen total de las precipitaciones que llegan al suelo durante un período determinado, se muestra en función del nivel que alcanzarían sobre una proyección horizontal de la superficie terrestre una vez que se hayan fundido todas las precipitaciones caídas (OMM, 1994).

El objetivo principal de cualquier método de medición de las precipitaciones, es obtener muestras representativas de la precipitación en la zona a que se quiera capturar o medir la lluvia, para la climatología y la hidrología es fundamental medir el valor exacto de las precipitaciones, en consecuencia, es muy importante que se tenga en cuenta la elección del emplazamiento, la forma y exposición del pluviómetro, de igual forma, deben tomarse medidas para impedir las pérdidas por evaporación, efectos del viento y salpicaduras (OMM, 1994).

La precipitación según Martín-Vide (1999), se divide según su estado en líquida o sólida, además la precipitación líquida puede ser en forma de lluvia, llovizna o chubasco, las características se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 6: características generales de las precipitaciones

	Diámetro gotas	Nº gotas	Velocidad de caída	Intensidad (cantidad /tiempo)	Nube generadora
Lluvia	> 0,5 mm	Grande	Moderada	Media y uniforme	Ns, As
Llovizna	< 0,5 mm	Enorme	Muy pequeña	Muy pequeña y uniforme	St
Chubasco	Grande	Moderado	Grande	Grande e irregular	Cb, Cu

Fuente: Martín-Vide (1999)

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

A partir de la tabla 6 con las características generales de la precipitación, es posible se gesten situaciones de combinación entre comportamientos de la lluvia, por ejemplo, si las gotas de la precipitación tienen un tamaño inferior al medio milímetro pero caen muy dispersas, no se trata de una llovizna sino de una lluvia débil, además unos pocos goterones desprendidos desde un Cumulo-nimbus, constituyen ya a un chubasco (Martín-Vide, 1999).

Los extremos climáticos suponen un interés especial para la sociedad, ya que determinan el nivel de riesgo al que se ve sometida, si se quiere estudiar el comportamiento de la lluvia en el tiempo, se debe fijar como se distribuye la intensidad entendida como una cierta precipitación registrada en un tiempo determinado: horas, minutos o balancín de un pluviómetro (Monjo, 2009).

La precipitación intensa o torrencial según la Agencia Estatal de Meteorología Española, se produce cuando una precipitación supera los 60 mm en una hora, mientras que una lluvia fuerte se presenta entre los umbrales de 30,1 mm hasta 60 mm registrado en una hora (Monjo, 2009).

El comportamiento de la precipitación se enfoca en su intensidad y concentración, si se acumula de forma constante o de forma rápida en sólo unos minutos, por lo que la intensidad de la precipitación no es la misma y por ende es necesario contabilizar su frecuencia diaria (24 horas), por ejemplo, la cantidad de días al año en que llueve con cierta intensidad, superando un determinado umbral (Monjo, 2009).

La intensidad máxima de la lluvia según la OMM (1994), se produce por un promedio P_i y para cada tormenta puede determinarse un cierto número de duraciones T . Por lo tanto, los requisitos fundamentales para estudiar este tipo de tormentas es necesario contar con una cantidad de observaciones considerables y un pluviómetro capaz de registrar intensidades en intervalos de minutos a horas.

La clasificación automática de Jenkinson & Collison 1977 ha sido utilizada para Chile central por Sarricolea *et al.* (2014). Ésta clasificación sinóptica es un método automático que permite conocer el tipo de circulación atmosférica a partir de la presión atmosférica reducida al nivel del mar en un mínimo de 9 puntos (detallados en la figura 10) y aplicarlo a determinados días frontales bajo la clasificación de Lamb (1972). Este tipo de clasificación es detallada por Martín-Vide (2005) para la Península Ibérica y Sarricolea *et al.* (2014) para Chile central, permite relacionar patrones sinópticos con eventos pluviométricos.

La clasificación de J&C es la siguiente y consta de 27 tipos sinópticos: 8 advectionales puros (N, NE, E, SE, S, SW, W y NW), 1 ciclónico (C), 1 anticiclónico (A), 8 híbridos advectiono-ciclónicos (CN, CNE, CE, CSE, CS, CSW, CW y CNW), 8 híbridos advectiono-anticiclónicos (AN, ANE, AE, ASE, AS, ASW, AW y ANW) y 1 indeterminado (U).

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

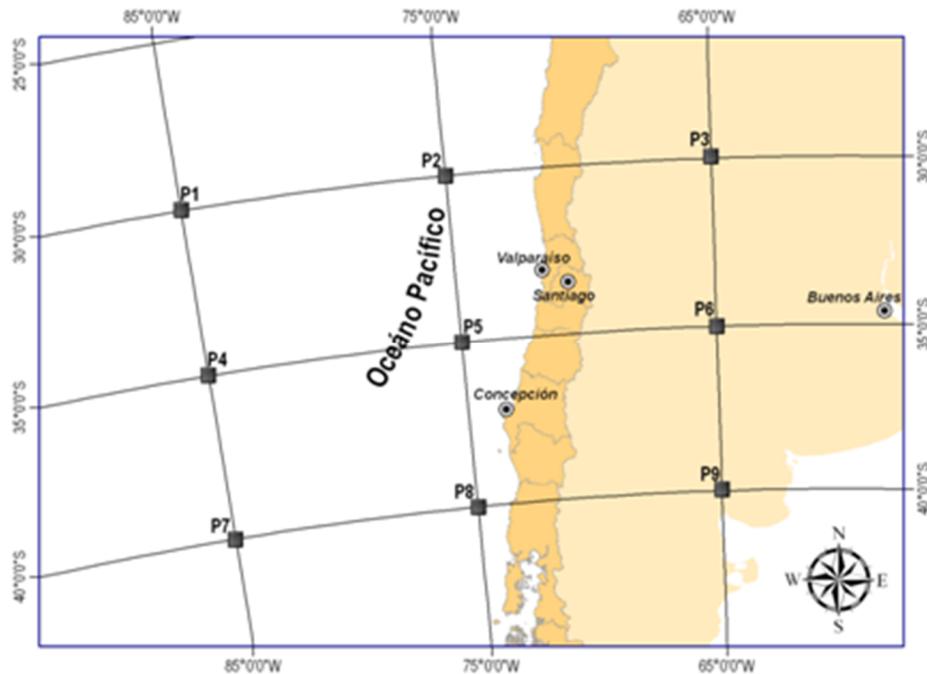


Figura 10: Rejilla de 9 puntos para obtención de la presión reducida a nivel del mar.

Fuente Sarricolea *et al.* (2014).

Las variables a calcular para la aplicación del método de J&C son:

- La presión media reducida a nivel del mar (P).
- La componente zonal del viento geostrófico (W) (caso Chileno entre los 30° y 40°S).
- La componente meridiana del viento geostrófico (S) (caso Chileno entre los 85° y 65°W).
- La dirección del viento (D).
- La velocidad del viento en m/s (F).
- La componente zonal de la vorticidad (ZW).
- La componente meridiana de la vorticidad (ZS).
- La vorticidad total (Z).

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Las expresiones analíticas ajustadas para Chile central son las siguientes:

$$P= 0,0625 [(P1+P3+P7+P9)+2(P2+P4+P6+P8)+4P5]$$

$$W= 0,25 [(P1+2P2+P3)-(P7+2P8+P9)]$$

$$S= 0,610[1/4 (P1+2P4+P7)-1/4 (P3+2P6+P9)]$$

$$D= \tan^{-1}(W/S)$$

$$F= \sqrt{(W^2+S^2)}$$

$$Z_w= 1,068[(P1+2P2+P3)-(P4+2P5+P6)]-0,942 \times [(P4+2P5+P6)-(P7+2P8+P9)]$$

$$Z_s= 1,221[1/4 (P1+2P4+P7)-1/4 (P2+2P5+P8)-1/4 (P2+2P5+P8) +1/4(P3+2P6+P9)]$$

$$Z= Z_w+Z_s$$

Por último, a partir de los valores de las expresiones analíticas anteriores y siguiendo el método de J&C se aplican las siguientes 5 reglas:

- 1) La dirección del flujo viene dada por D (se usan 8 direcciones del viento, teniendo en cuenta el signo de W y S)
- 2) Si $|Z| < F$, existe un tipo advectivo o direccional puro, definido según la regla 1 (N, NE, E, SE, S, SW, W y NW)
- 3) Si $|Z| > 2F$, existe un tipo ciclónico (C) si $Z > 0$, o anticiclónico (A) si $Z < 0$
- 4) Si $F < |Z| < 2F$, existe un tipo híbrido, según el signo de Z (regla 3) y la dirección del flujo obtenido de la regla 1 (CN, CNE, CE, CSE, CS, CSW, CW, CNW, AN, ANE, AE, ASE, AS, ASW, AW y ANW)
- 5) Si $F < 6$ o $|Z| < 6$, existe un tipo indeterminado (U)

Finalmente existe un catálogo diario de los tipos de J&C disponibles desde 1950 a 2010, para Chile central y se encuentra disponible en el portal web del Grupo de Climatología de la Universidad de Barcelona (Sarricolea, 2012).

CAPÍTULO 4: Resultados

4.1 Homogenización

Von Neumann es uno de los matemáticos que más aportó al desarrollo de la ciencia en la segunda mitad del siglo XX (Bromberg & Saavedra, 2004). El test de homogeneidad de von Neumann, compara el cuadrado medio de las diferencias sucesivas con la varianza de la muestra, para una secuencia homogénea de valores no correlacionados del cuadrado medio se espera que las diferencias sucesivas deben ser aproximadamente el doble de la varianza de la muestra y, por lo tanto, N tiende a ser de aproximadamente 2 (Leander & Buishand, 2004). Para una corrección y discusión del test de Von Neumann entre las sumas acumuladas y su relación se encuentra en Buishand (1981).

Si la muestra contiene un cambio brusco (break), entonces el valor de N tiende a ser menor que el valor esperado (Buishand, 1981). Si la muestra tiene variaciones rápidas de la media, entonces, los valores de N pueden elevarse por sobre 2 (Bingham & Nelson, 1981). No obstante, este test no da información sobre la fecha en que se produce el cambio en la serie analizada (Sahin & Kerem, 2010)

El Test de von Neumann (1941) fue aceptado por la Organización meteorológica mundial en el año 1966 (WMO, 1966) y se utiliza para verificar la homogeneidad en series climáticas, para este caso en particular, de sumatorias de montos de precipitación anual, sus resultados son presentados en la tabla 7.

Por otro lado, el test de Thom de rachas o alternancias (ver Thom (1966)), consiste en contabilizar el número de rachas o secuencias que quedan por encima o por debajo de la mediana (Pérez *et al.*, 2009). Thom en el año 1969, utiliza el test de rachas para determinar si una serie particular es homogénea o alternativamente, si existe una tendencia de oscilación periódica de la media; a partir de esto, una racha se define como el número de secuencias anteriores o por debajo de un valor central, si se presentan demasiadas rachas serían una indicación de la oscilación mientras que, muy pocas rachas serían una indicación de una tendencia o un cambio en la media durante el registro de la muestra (WMO, 1983).

Para el test de Thom, las 56 series analizadas están por debajo de $|Z| < 2,58$, por lo que todos los registros pluviométricos son homogéneos para dicho test.

Por el contrario, en el test de von Neumann de las 56 series analizadas, con un rango de tolerancia aceptable entre los valores 1,6 y 2,4. Se cumple que 15 estaciones no están dentro del umbral de tolerancia aceptado por von Neumann con esto, las estaciones que superan dicho rango de tolerancia están entre los 2,41 y 2,71 y por lo tanto no estarían siendo desde el punto de vista de este test aceptadas como homogéneas.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Tabla 7: Homogeneización de la serie de datos pluviométricos

N°	Estación	Latitud S	Longitud W	Von Neumann	Thom
1	La Serena	-29,91	-71,21	1,73	0,29
2	Almendral	-29,99	-70,92	2,09	2,43
3	La Laguna Embalse	-30,20	-70,04	2,14	0,89
4	Pabellón	-30,40	-70,55	2,33	0,62
5	Recoleta Embalse	-30,51	-71,10	1,81	0,93
6	La Torre	-30,62	-71,37	2,43	0,17
7	Paloma Embalse	-30,70	-71,04	1,92	2,08
8	Cogotí Embalse	-31,00	-71,09	2,24	0,29
9	Las Ramadas	-31,02	-70,59	2,17	0,29
10	Mincha Norte	-31,59	-71,45	2,41	0,50
11	San Agustín	-31,73	-70,84	2,18	0,29
12	La Tranquilla	-31,90	-70,67	2,38	0,15
13	Pedernal Hacienda	-32,09	-70,80	2,34	1,04
14	Quilimarí	-32,12	-71,50	2,46	0,54
15	Chalaco Hacienda	-32,19	-70,79	2,12	0,29
16	El Trapiche	-32,23	-70,71	2,35	0,33
17	Palquico	-32,25	-71,14	2,48	0
18	Alicahue Hacienda	-32,34	-70,75	2,32	0,29
19	Estero Rabuco	-32,85	-71,12	2,42	0,29
20	Vilcuya	-32,86	-70,47	2,40	0,29
21	Riencillos	-32,93	-70,35	2,17	0,29
22	Caleu	-33,01	-70,99	2,10	0,29
23	Rungue Embalse	-33,02	-70,91	2,09	0,29
24	Valparaíso	-33,06	-71,61	2,11	0,47
25	Lago Peñuelas	-33,15	-71,54	2,32	0,16
26	Colliguay	-33,17	-71,15	2,37	0,89
27	Cerro Calán	-33,40	-70,54	2,53	0,51
28	Santiago	-33,41	-70,79	2,44	0,89
29	Los Panguiles	-33,44	-71,03	2,53	0,74
30	Terraza Oficina Central DGA	-33,45	-70,65	2,29	0,29
31	Tobalaba	-33,45	-70,54	2,67	0,62
32	Antupirén	-33,50	-70,52	2,71	0,18
33	Bocatoma Maitenes	-33,53	-70,26	1,91	1,06
34	San Antonio	-33,57	-71,62	2,26	0,32
35	Cerrillos de Leyda	-33,63	-71,51	1,99	1,49
36	San José de Maipo	-33,64	-70,35	2,26	0,48
37	Pirque	-33,67	-70,59	2,70	0,48
38	El Yeso Embalse	-33,68	-70,09	1,89	1,49

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

39	Melipilla	-33,68	-71,20	2,49	0,17
40	Carmen de las Rosas	-33,76	-71,15	2,28	0,29
41	San Gabriel	-33,78	-70,24	2,68	1,95
42	Las Melosas	-33,90	-70,20	2,12	0,16
43	Rapel	-33,95	-71,74	2,18	0,29
44	Rancagua	-34,19	-70,75	2,66	0
45	Cocalán	-34,21	-71,28	2,38	0
46	Pichilemu	-34,39	-72,01	2,01	0,74
47	Rengo	-34,42	-70,87	2,36	0,96
48	Viña Vieja	-34,45	-71,05	2,60	1,02
49	Millahue	-34,53	-71,22	2,12	0,48
50	Ñilhue Barahona	-34,57	-71,77	2,20	1,24
51	San Fernando	-34,60	-70,97	2,27	0,16
52	La Rufina	-34,74	-70,75	2,11	0,29
53	Convento Viejo	-34,77	-71,13	2,24	0,16
54	Curicó	-34,96	-71,21	1,91	0,89
55	El Manzano	-34,96	-70,92	2,32	0,17
56	Los Queñes	-35,00	-70,81	2,27	0,29

Fuente: Elaboración Propia

De las series inhomogéneas (Destacadas en tabla 7) para el test de von Neumann, se presentan estaciones cercanas al rango de tolerancia como Mincha Norte con $N= 2,41$ y Estero Rabuco con $N = 2,42$ y en contraparte, existen valores muy por sobre el rango de tolerancia dispuesto por von Neumann, por ejemplo las estaciones Antupirén $N= 2,71$ y Pirque con $N= 2,70$

Los procedimientos estadísticos de ambos test de homogeneidad, con distintos niveles de exigencia, no siempre los hace coincidir con los resultados, es decir, una serie puede ser homogénea para un test y no ser homogénea para otro, en consecuencia se producen dudas sobre la homogeneidad de la serie en cuestión, esto tiene que ver en cierta medida con la propia variabilidad climática y los propios *peaks* que posea toda serie climática (Martín-Vide, 2003).

Las estaciones inhomogéneas para el test de von Neumann e homogéneas para el test Thom demuestran que, las faltas de homogeneidad pueden sospecharse por varias razones, entre ellas, el historial que posea la estación meteorológica esto se soluciona en parte con el conocimiento de la historia del observatorio donde proceda pueda dar indicios tales como, si se produjeron circunstancias que ocasionaron la inhomogeneidad en aquella serie, esto conlleva a la descripción de la estación, donde se realizan las observaciones, el entorno, los tipos de instrumentos, los horarios y procedimientos de observación por parte de quien o quienes capturan los datos climatológicos y sus posibles preferencias (Martín-Vide, 2003).

4.2 Índice de concentración de las precipitaciones

Los resultados son presentados en la Tabla 8 la cual corresponde a toda la serie completa, donde las dos primeras columnas representan la totalidad de las estaciones meteorológicas, luego los valores de las constantes de a y b de las curvas del CI para cada estación, para terminar con el cálculo del CI a toda serie y finalmente la última columna P, que corresponde al porcentaje de los días de lluvia mayores a 1 mm en el período estimado.

Los valores más elevados del CI en el período 1965-2010 son las estaciones costeras de La Serena CI= 0,75 y Rapel CI= 0,67 convirtiéndose en las zonas de mayor concentración diaria de las precipitaciones. Luego los valores medios altos se encuentran en las zona de depresión intermedia, por ejemplo, las estaciones de Santiago CI= 0,64 y Rancagua CI= 0,64. Hacia el sur y de forma latitudinal el CI tiende a disminuir logrando valores en las estaciones de San Fernando CI=0,62 y Curicó con CI=0,60. En suma, los valores más bajos del CI se consiguen en las estaciones de Carmen de las Rosas CI=0,47 y la Rufina con similar CI que la estación anterior.

La columna del porcentaje de días de lluvia que cuenta cada estación meteorológica se presentan mayores a 1 mm, éstas manifiestan un notorio aumento latitudinal con esto, a medida que se avanza hacia el sur los días con precipitación tienden a aumentar, pero dependerá mayoritariamente de cada estación meteorológica y su respectiva ubicación. A pesar de esta tendencia hacia el aumento en los días precipitados en sentido norte sur se producen situaciones dispares por ejemplo, en estación La Serena que es la más concentrada sus precipitaciones mayores a 1mm reflejan sólo el 2% de los días, lo que significa que en poco más de 7 días promedio se concentra la precipitación mayor a 1 mm, la estación que sigue en concentración es Rapel, presenta casi un 10% de días precipitados al año, lo que resulta en alrededor de 37 días con lluvia al año. Por el contrario la estación que presenta mayor monto de precipitación Los Queñes tiene un moderado CI= 0,60 y un porcentaje de días precipitados en la serie de aproximadamente un 15%, de la transformación se obtiene que en dicha estación al menos llueven 55 días sobre 1 mm, lo que demuestra una mayor distribución de las precipitación pero por poseer un CI moderado las precipitaciones tienen a concentrarse ligeramente.

Ahora bien, el CI se configura de la siguiente manera las estaciones meteorológicas costeras y depresión intermedia concentran el mayor CI, que van desde lo moderado hacia lo alto. De estos valores altos son las estaciones costeras de La Serena y Rapel, las cuales concentran su precipitación diaria. En menor medida, las estaciones situadas en la depresión intermedia, presentan CI medios, medio altos, como Santiago CI= 0,64 y Rancagua CI=0,64. Los CI bajos se logran a medida que se asciende, es por esto que las estaciones de San José de Maipo CI= 0,52 y San Gabriel CI=0,52 tiene precipitación diaria más regular.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Tabla 8: Índice de Concentración de las Precipitaciones

N°	Estación	a	b	CI	P (%)
1	La Serena	0,0022	0,0599	0,75	1,94
2	Almendral	0,0585	0,0278	0,55	2,10
3	La Laguna Embalse	0,0929	0,0228	0,51	4,14
4	Pabellón	0,0619	0,0271	0,55	3,03
5	Recoleta Embalse	0,0519	0,0290	0,56	2,41
6	La Torre	0,0727	0,0255	0,53	2,45
7	Paloma Embalse	0,0170	0,0400	0,65	2,65
8	Cogotí Embalse	0,0334	0,0333	0,60	3,31
9	Las Ramadas	0,0664	0,0268	0,52	4,51
10	Mincha Norte	0,0915	0,0239	0,48	3,26
11	San Agustín	0,0674	0,0267	0,52	4,47
12	La Tranquilla	0,0457	0,0304	0,56	4,71
13	Pedernal Hacienda	0,0308	0,0342	0,60	5,14
14	Quilimarí	0,0643	0,0275	0,51	3,94
15	Chalaco Hacienda	0,0638	0,0271	0,53	5,16
16	El Trapiche	0,0554	0,0288	0,54	5,32
17	Palquico	0,0503	0,0293	0,56	5,78
18	Alicahue Hacienda	0,0616	0,0277	0,52	5,39
19	Esterero Rabuco	0,0572	0,0286	0,53	5,80
20	Vilcuya	0,0436	0,0309	0,57	7,76
21	Riencillos	0,0493	0,0296	0,56	8,21
22	Caleu	0,0483	0,0301	0,56	6,31
23	Rungue Embalse	0,0352	0,0326	0,60	6,45
24	Valparaíso	0,0172	0,0400	0,64	7,13
25	Lago Peñuelas	0,0221	0,0375	0,62	8,18
26	Colliguay	0,0462	0,0304	0,56	6,96
27	Cerro Calán	0,0310	0,0342	0,60	9,04
28	Santiago	0,0169	0,0403	0,64	7,29
29	Los Panguiles	0,0307	0,0342	0,61	7,42
30	Terraza Oficina Central DGA	0,0246	0,0367	0,61	7,20
31	Tobalaba	0,0314	0,0344	0,59	7,47
32	Antupirén	0,0687	0,0265	0,52	8,94
33	Bocatoma Maitenes	0,0572	0,0284	0,54	8,74
34	San Antonio	0,0331	0,0337	0,59	7,92
35	Cerrillos de Leyda	0,0497	0,0297	0,55	8,72
36	San José de Maipo	0,0676	0,0267	0,52	8,96
37	Pirque	0,0381	0,0323	0,58	9,05
38	El Yeso Embalse	0,0488	0,0291	0,58	10,69

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

39	Melipilla	0,0387	0,0321	0,58	7,79
40	Carmen de las Rosas	0,0919	0,0241	0,47	6,28
41	San Gabriel	0,0593	0,0283	0,52	9,19
42	Las Melosas	0,0585	0,0278	0,55	11,01
43	Rapel	0,0115	0,0441	0,67	9,79
44	Rancagua	0,0176	0,0398	0,64	9,83
45	Cocalán	0,0590	0,0284	0,52	9,39
46	Pichilemu	0,0177	0,0399	0,63	10,96
47	Rengo	0,0231	0,0372	0,62	11,41
48	Viña Vieja	0,0366	0,0328	0,58	9,87
49	Millahue	0,0438	0,0314	0,55	9,06
50	Nilahue Barahona	0,0733	0,0260	0,51	10,61
51	San Fernando	0,0249	0,0363	0,62	12,18
52	La Rufina	0,0879	0,0245	0,47	10,47
53	Convento Viejo	0,0395	0,0320	0,58	12,60
54	Curicó	0,0285	0,0352	0,60	12,22
55	El Manzano	0,0528	0,0295	0,54	12,95
56	Los Queñes	0,0256	0,0368	0,60	14,80

Fuente: Elaboración Propia

La figura 11, muestra la distribución espacial del índice de concentración de las precipitaciones (CI) para toda la serie calcula, comprendida entre los años 1965 y 2010.

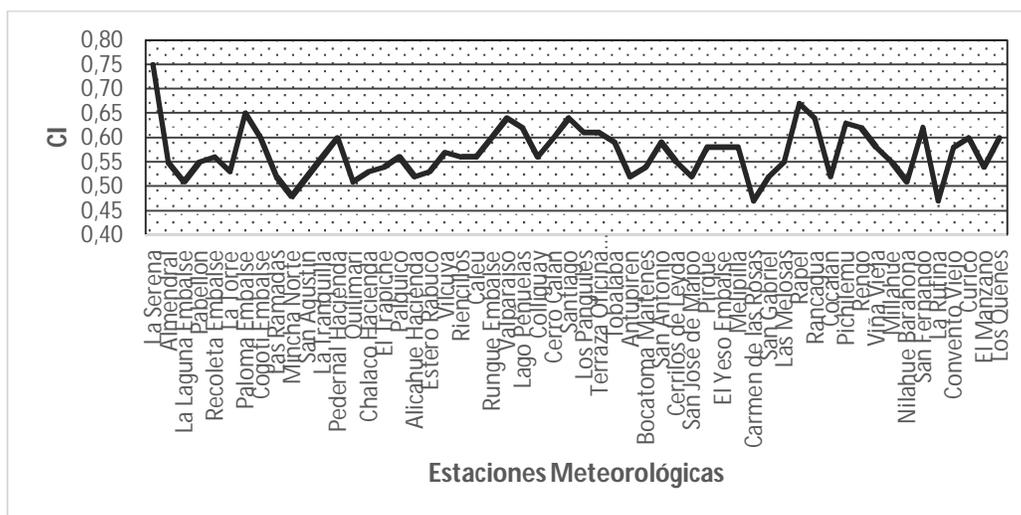


Figura 11: Distribución Espacial del CI entre 1965 y 1988.

La figura 12 presenta las curvas de concentración para tres estaciones, mediante las tablas de frecuencia de distribución de las precipitaciones, así se obtiene que la estación La Serena muestra un CI irregular al ser la estación meteorológica más alejada de la línea de

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

equidistribución, por el contrario la estación de Carmen de Las Rosas es la menos irregular en la distribución de sus precipitaciones y además la que menos área bajo la línea de equidistribución posee en la muestra.

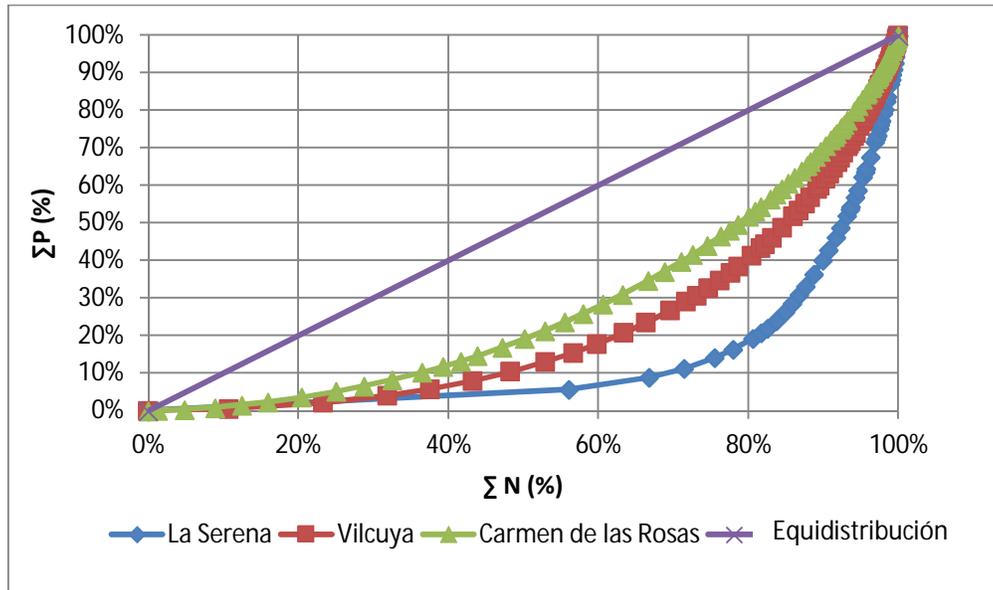


Figura 12: Valores Empíricos (curvas de concentración) y equidistribución (exponencial) para La Serena, Vilcuya y Carmen de las Rosas.

4.3 Períodos del índice de concentración

Los resultados son presentados en la tabla 9 y tabla 10, la primera tabla corresponde al primer período comprendido entre los años 1965 y 1988 donde las dos primeras columnas representan las 56 estaciones, luego los valores de las constantes de a y b de las curvas del CI para cada estación, a continuación el cálculo del CI al período estimado y por último columna P que corresponde al porcentaje de los días de lluvia mayores a 1 mm, para el período estimado. La segunda tabla se presenta con igual contenido que su predecesora y a diferencia de la anterior, comprende el período 1989–2010.

La concentración diaria de la precipitación mediante el CI para el primer período evidencia que, las estaciones ubicadas primeramente en la zona costera y luego al interior en los valles centrales alcanzan valores altos del índice de concentración. Cercanos al mar se encuentran las estaciones Pichilemu y La Serena con $CI= 0,74$ y $0,69$ respectivamente, cabe destacar que la estación Pichilemu concentra sus precipitaciones en el primer período, su serie se desarrolla entre los años 1981-1988, abarcando siete años en total, en cambio la estación La Serena, posee la serie completa de 23 años. En menor medida, pero no así despreciable, las estaciones costeras de Valparaíso con un $CI=0,62$ y Rapel con $CI= 0,62$, manifiestan claros signos de una tendencia hacia la concentración de sus precipitaciones.

Hacia el interior en la zona de valles nuevamente se producen alzas en el CI ellas son las estaciones de Santiago con un $CI= 0,64$, luego la estación Rancagua con un $CI= 0,66$, siendo el más alto en esa zona para una serie comprendida entre los años 1972 y 1988. Un poco más al sur aparece la estación de Rengo con un $CI= 0,63$. Con esto, se configura que las zonas litorales y de depresión intermedia siendo la primera con una mayor tendencia que la segunda.

Para el segundo período, se aprecia una clara tendencia en el aumento del CI produciendo una intensificación en la concentración de las precipitaciones en la zona central del país. En la región de Coquimbo las estaciones con excepción de La Serena (que aumenta considerablemente su CI llegando a un $CI=0,80$), se mantienen neutras en su CI o evidencian una leve baja en sus concentraciones, no obstante, ocurren casos en los cuales el CI con respecto al período anterior baja 1 punto como es el caso de la estación de La Laguna Embalse con un $CI=0,46$. Hacia las regiones de Valparaíso y Metropolitana, el CI anota sus mayores tendencias a la concentración ya que el aumento si bien no es rotundo la mayoría de sus CI exhiben un crecimiento, si se toma como base el período anterior. Lo más relevante de estas dos regiones es que en al menos una de las estaciones posicionadas longitudinalmente, desde la estación costera de Valparaíso $CI= 0,67$ hasta la estación cordillerana de El Yeso embalse con un $CI= 0,60$, presentan concentración.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Tabla 9: Índice de Concentración Período 1965 - 2010

Nº	Estación	a	b	CI 1965 - 1988	P1 (%)
1	La Serena	0,0105	0,0443	0,69	1,94
2	Almendral	0,0491	0,0293	0,56	2,24
3	La Laguna Embalse	0,0742	0,0246	0,56	4,44
4	Pabellón	0,0633	0,0265	0,56	2,96
5	Recoleta Embalse	0,0433	0,0307	0,58	2,34
6	La Torre	0,0653	0,0259	0,57	2,59
7	Paloma Embalse	0,0130	0,0423	0,68	2,64
8	Cogotí Embalse	0,0410	0,0312	0,59	3,48
9	Las Ramadas	0,0725	0,0257	0,53	4,42
10	Mincha Norte	0,0846	0,0248	0,49	3,30
11	San Agustín	0,0670	0,0269	0,52	4,09
12	La Tranquilla	0,0425	0,0312	0,57	4,59
13	Pedernal Hacienda	0,0351	0,0333	0,58	5,44
14	Quilimarí	0,0684	0,0272	0,50	4,41
15	Chalaco Hacienda	0,0618	0,0272	0,55	5,41
16	El Trapiche	0,0561	0,0286	0,54	5,57
17	Palquico	0,0433	0,0309	0,58	5,82
18	Alicahue Hacienda	0,0632	0,0274	0,53	5,37
19	Estero Rabuco	0,0519	0,0296	0,54	6,02
20	Vilcuya	0,0412	0,0315	0,58	7,40
21	Riencillos	0,0515	0,0292	0,56	8,21
22	Caleu	0,0521	0,0291	0,56	6,69
23	Rungue Embalse	0,0432	0,0304	0,59	6,96
24	Valparaíso	0,0227	0,0373	0,62	7,53
25	Lago Peñuelas	0,0375	0,0324	0,58	8,80
26	Colliguay	0,0505	0,0294	0,56	7,30
27	Cerro Calán	0,0433	0,0307	0,58	10,36
28	Santiago	0,0192	0,0389	0,64	7,59
29	Los Panguiles	0,0460	0,0302	0,57	8,18
30	Terraza Oficina Central DGA	0,0318	0,0341	0,59	6,94
31	Tobalaba	0,0476	0,0302	0,56	7,70
32	Antupirén	0,0681	0,0268	0,52	9,64
33	Bocatoma Maitenes	0,0456	0,0332	0,46	7,38
34	San Antonio	0,0791	0,0250	0,51	8,95
35	Cerrillos de Leyda	0,0576	0,0283	0,54	9,03
36	San José de Maipo	0,0718	0,0261	0,52	9,46
37	Pirque	0,0434	0,0310	0,57	9,59
38	El Yeso Embalse	0,0623	0,0267	0,56	10,38

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

39	Melipilla	0,0386	0,0322	0,58	8,32
40	Carmen de las Rosas	0,0830	0,0253	0,48	6,69
41	San Gabriel	0,0631	0,0275	0,53	10,64
42	Las Melosas	0,0616	0,0271	0,55	12,09
43	Rapel	0,0228	0,0375	0,62	9,85
44	Rancagua	0,0148	0,0413	0,66	10,49
45	Cocalán	0,0667	0,0275	0,50	9,88
46	Pichilemu	0,0026	0,0586	0,74	12,63
47	Rengo	0,0220	0,0376	0,63	12,70
48	Viña Vieja	0,0463	0,0305	0,56	10,90
49	Millahue	0,0311	0,0348	0,58	9,27
50	Nilahue Barahona	0,0715	0,0264	0,51	10,96
51	San Fernando	0,0438	0,0305	0,58	13,86
52	La Rufina	0,1067	0,0223	0,47	11,34
53	Convento Viejo	0,0408	0,0318	0,57	13,41
54	Curicó	0,0438	0,0308	0,57	12,90
55	El Manzano	0,0567	0,0290	0,52	14,20
56	Los Queñes	0,0483	0,0306	0,54	15,37

Fuente: Elaboración Propia

La figura 13, muestra la distribución espacial del índice de concentración de las precipitaciones para el período comprendido entre los años 1965 y 1988.

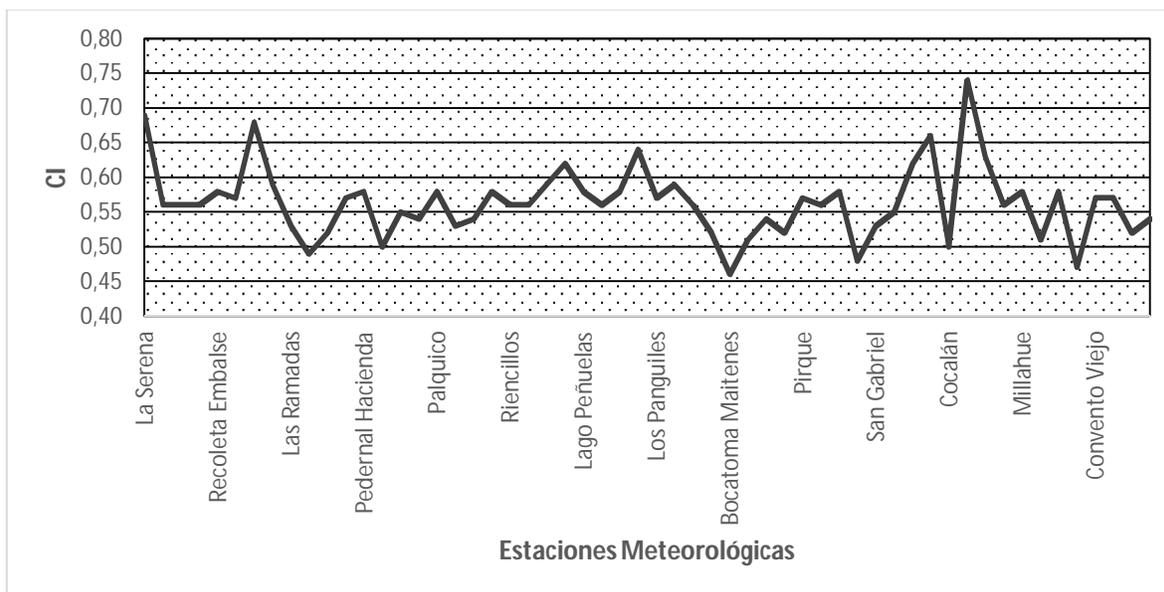


Figura 13: Distribución Espacial del CI entre 1965 y 1988.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Tabla 10: Índice de Concentración Período 1989 - 2010

N°	Estación	a	b	CI 1989 - 2010	P2 (%)
1	La Serena	0,0006	0,0720	0,80	1,94
2	Almendral	0,0694	0,0262	0,53	1,99
3	La Laguna Embalse	0,1247	0,0205	0,46	3,82
4	Pabellón	0,0622	0,0273	0,54	3,10
5	Recoleta Embalse	0,0618	0,0273	0,55	2,49
6	La Torre	0,0767	0,0254	0,51	2,39
7	Paloma Embalse	0,0238	0,0369	0,62	2,68
8	Cogotí Embalse	0,0287	0,0353	0,60	3,12
9	Las Ramadas	0,0609	0,0280	0,53	4,62
10	Mincha Norte	0,0955	0,0236	0,47	3,22
11	San Agustín	0,0693	0,0262	0,53	4,89
12	La Tranquilla	0,0492	0,0296	0,57	4,83
13	Pedernal Hacienda	0,0291	0,0346	0,62	4,97
14	Quilimarí	0,0617	0,0279	0,52	3,76
15	Chalaco Hacienda	0,0689	0,0265	0,52	4,88
16	El Trapiche	0,0548	0,0290	0,54	5,16
17	Palquico	0,0573	0,0279	0,56	5,75
18	Alicahue Hacienda	0,0597	0,0281	0,53	5,40
19	Estero Rabuco	0,0747	0,0263	0,49	5,55
20	Vilcuya	0,0465	0,0302	0,57	8,16
21	Riencillos	0,0472	0,0299	0,57	8,21
22	Caleu	0,0437	0,0316	0,55	5,94
23	Rungue Embalse	0,0283	0,0347	0,62	5,87
24	Valparaíso	0,0114	0,0439	0,67	6,57
25	Lago Peñuelas	0,0148	0,0412	0,66	7,76
26	Colliguay	0,0415	0,0315	0,57	6,57
27	Cerro Calán	0,0246	0,0366	0,62	8,23
28	Santiago	0,0149	0,0417	0,65	6,96
29	Los Panguiles	0,0265	0,0356	0,62	7,14
30	Terraza Oficina Central DGA	0,0190	0,0391	0,64	7,49
31	Tobalaba	0,0215	0,0381	0,62	7,28
32	Antupirén	0,0689	0,0264	0,53	8,65
33	Bocatoma Maitenes	0,0573	0,0284	0,54	8,79
34	San Antonio	0,0183	0,0394	0,64	7,19
35	Cerrilos de Leyda	0,0641	0,0267	0,55	8,41
36	San José de Maipo	0,0643	0,0272	0,53	8,58
37	Pirque	0,0334	0,0337	0,59	8,67
38	El Yeso Embalse	0,0397	0,0311	0,60	11,03

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

39	Melipilla	0,0399	0,0317	0,58	7,48
40	Carmen de las Rosas	0,1036	0,0228	0,46	5,82
41	San Gabriel	0,0569	0,0290	0,52	8,48
42	Las Melosas	0,0540	0,0290	0,55	9,39
43	Rapel	0,0064	0,0499	0,70	9,72
44	Rancagua	0,0207	0,0382	0,63	9,55
45	Cocalán	0,0554	0,0289	0,54	9,17
46	Pichilemu	0,0525	0,0291	0,55	10,35
47	Rengo	0,0250	0,0365	0,62	10,31
48	Viña Vieja	0,0301	0,0348	0,60	9,16
49	Millahue	0,0580	0,0285	0,53	8,90
50	Nilahue Barahona	0,0756	0,0256	0,51	10,32
51	San Fernando	0,0154	0,0410	0,66	10,88
52	La Rufina	0,0817	0,0254	0,48	9,52
53	Convento Viejo	0,0386	0,0321	0,58	11,96
54	Curicó	0,0179	0,0399	0,63	11,47
55	El Manzano	0,0497	0,0300	0,54	12,22
56	Los Queñes	0,0132	0,0432	0,64	14,20

Fuente: Elaboración Propia

La figura 14, muestra la distribución espacial del índice de concentración de las precipitaciones para el período comprendido entre los años 1989 y 2010.

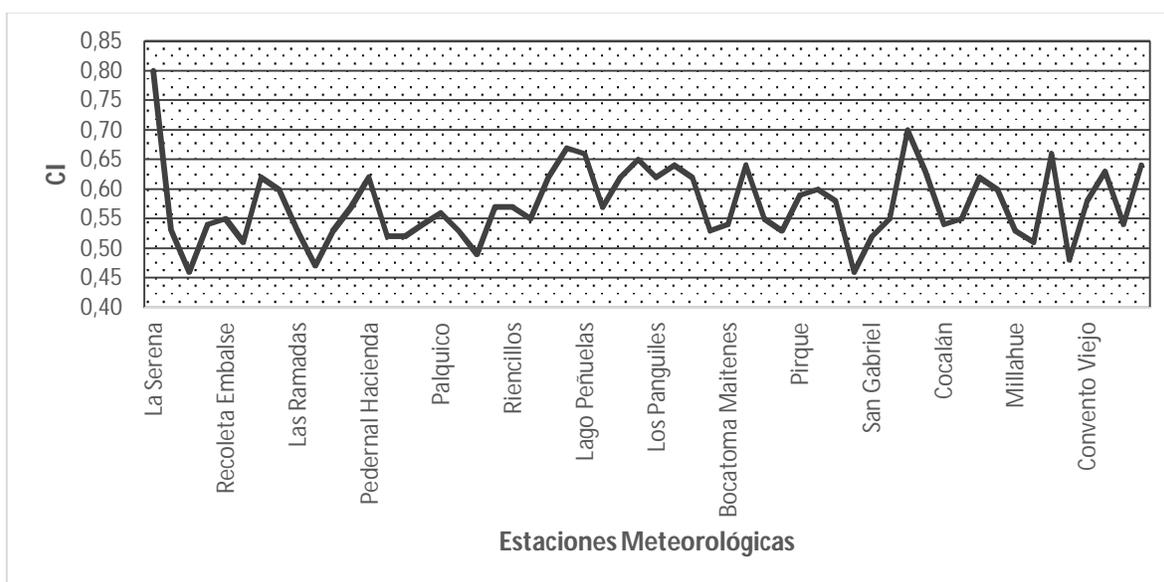


Figura 14: Distribución Espacial del CI entre 1989 y 2010.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Particularmente esta última estación (El Yeso) cuenta con un carácter distintivo, ya que sus precipitaciones en la mayoría de los casos se producen de forma sólida, por lo que un aumento del CI, manifestaría una tendencia que indicaría que la lluvia se está produciendo en forma más líquida que sólida y de forma concentrada.

Por último hacia las regiones de O'Higgins y el Maule, la tendencia va a un aumento moderado, ya que se producen situaciones dispares, por ejemplo las estaciones costeras de Rapel, con un CI=0,70, evidencia un aumento, por el contrario la estación Pichilemu una de las más concentradas en el primer período desciende drásticamente a un CI=0,55 en el segundo período. Hacia el interior de ambas regiones el aumento es sostenido, estaciones como San Fernando CI= 0,66, Curicó CI= 0,58 y Los Queñes CI=0,64 registran un aumento en la concentración de sus precipitaciones con respecto al período anterior.

La figura 16 se presenta a modo de resumen de las tres versiones calculadas del CI, la primera comprende toda la serie entre los años 1965 a 2010, la segunda incluye sólo el primer período de análisis del CI que consiste entre los años 1965 a 1988, para finalizar con el último período del cálculo del índice de concentración entre los años 1989 y 2010.

Se aprecia que el CI de la serie actúa como media natural entre ambos períodos, con ello es posible establecer las tendencias propias al alza o a la baja. Otro caso particular ocurre con los análisis entre períodos, pues si se toma como base el primero; el segundo período se le estima las posibles fluctuaciones que pueda tener el índice propio de la variabilidad climática de cada estación meteorológica por lo visto, una evidente tendencia al aumento en la concentración diaria de las precipitaciones.

Con los tres índices presentados en la figura 16 la variabilidad del CI muestra con respecto a su base en la serie en la cual son pocos los casos en los que el CI se mantiene, por ejemplo en estaciones de La Tranquilla con un CI= 0,57, El Trapiche que sustenta un CI= 0,54, más al sur la estación de Melipilla con un CI= 0,58 y para finalizar la estación Nilahue Barahona, con un índice CI=0,51, mantienen su CI a lo largo de su serie completa.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

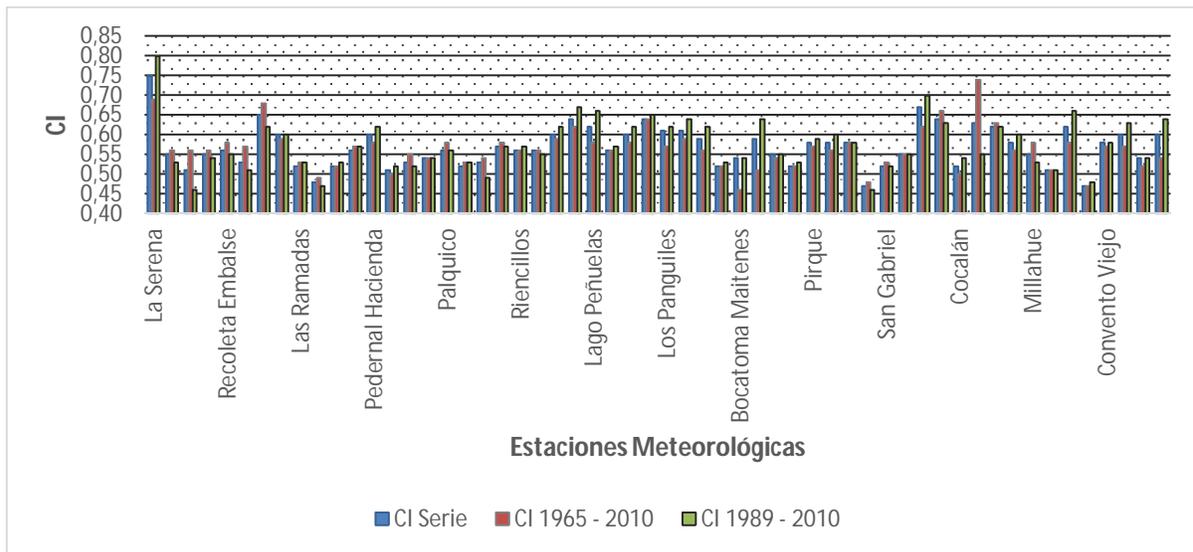


Figura 15: Distribución Espacial del CI y sus distintos subperíodos.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

4.4 Patrones espaciales del CI

Los resultados del CI fueron calculados en base a *Spline* de tensión, mediante el software Arcgis - ArcMap™ 10.2

La figura 17 muestra la interpolación del CI para toda la serie analizada y comprende los años 1965-2010. Se aprecia una disminución latitudinal, ya que los valores altos de CI se encuentran hacia la latitud 30°S y a continuación comienzan a disminuir al sur. Se presenta un comportamiento en todo el índice, el cual hace referencia al relieve presente en Chile central a partir de esa situación orográfica el CI se divide en tres zonas: la primera ubicada en el litoral, siendo la que concentra los valores más altos índice, luego la zona de valles centrales o depresión intermedia donde el CI es también alto, pero en menor medida que la zona costera y finalmente se presenta una zona donde la precipitación debido a forzamiento orográfico, su distribución tiene a ser más regular, ubicada en las vertientes occidentales de ambas cordilleras, acentuándose el cordón montañoso de Los Andes.

Se dividieron en dos períodos el CI, con el propósito de analizar mediante períodos la evolución del índice y sus tendencias, los períodos comprenden los años 1965–1988 y 1989–2010, resalta que en el primer período no todos los observatorios poseen sus series completas, por lo que el análisis es modesto, si se compara con el segundo período en el que sí todas las estaciones cuentan con sus años completos permitiendo un análisis más acabado del CI.

El primer período (figura 18) el CI se comporta con valores menores respecto al segundo período, ya que sus valores oscilan entre 0,47 y 0,70. Presenta la tendencia de las tres zonas, similares a la serie completa del CI, por lo que su comportamiento es muy alto en zona litoral, medio alto en zonas de valles y medio bajo en zona de cordillera.

El segundo período (figura 19) el CI sufre un aumento importante, las precipitaciones en los últimos 21 años analizados tienen a aumentar considerablemente y sus valores oscilan entre 0,46 y 0,80 con esto, son más estaciones las que aumentan su CI ubicadas en la depresión intermedia, al igual las zonas costeras aumentan anotando los mayores valores en la estación meteorológica de La Serena, también en menor medida se registran bajas en el CI en la zona interior de la región de Coquimbo y un número menor de estaciones distribuidas en Chile central, las cuales mantienen su CI.

Por último, la figura 20 muestra las tendencias del CI si se toman como base sus dos períodos se puede evidenciar la evolución del CI con los años en las diferentes estaciones meteorológicas distribuidas entre los 30° a 35°S. Los mayores aumentos los anotan tres estaciones costeras cercanas a la latitud 34°S y en la zona de valles centrales, mientras que los descensos que si bien se dan en toda el área de estudio la tendencia se da en zonas semiáridas de Chile central.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

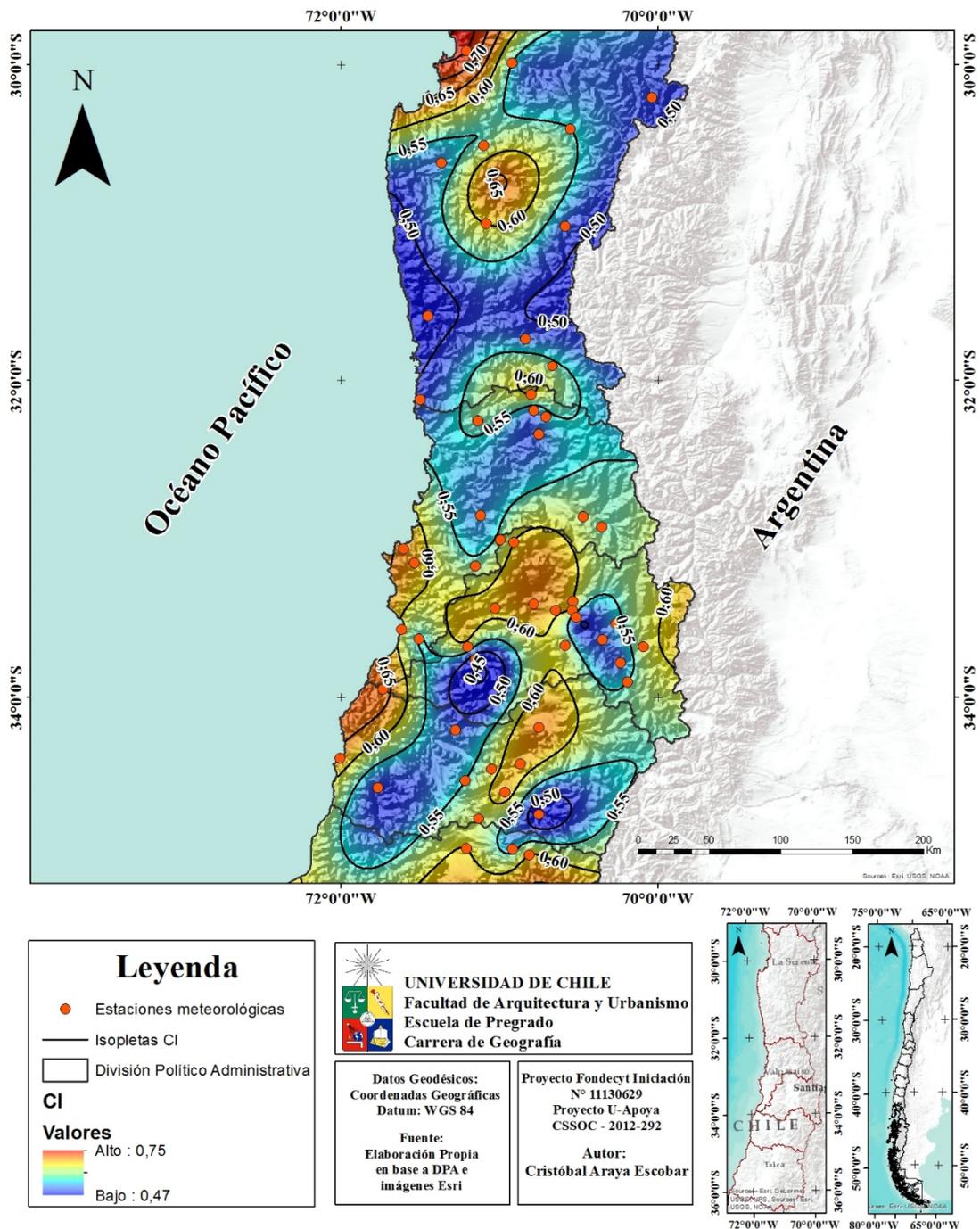


Figura 16: Mapa del Índice de Concentración (CI), período 1965 - 2010

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

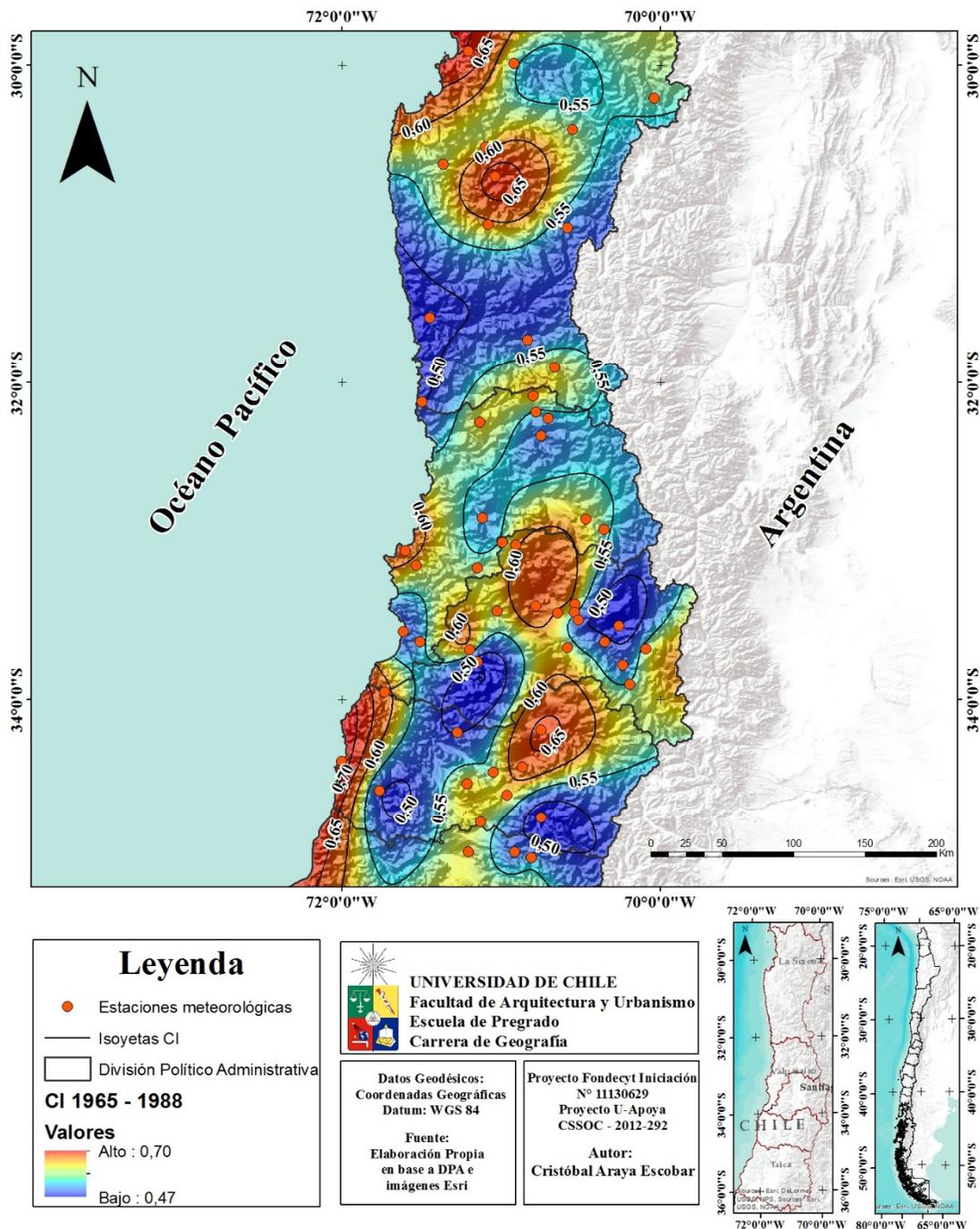


Figura 17: Mapa del Índice de Concentración (CI), sub período 1965 - 1988

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

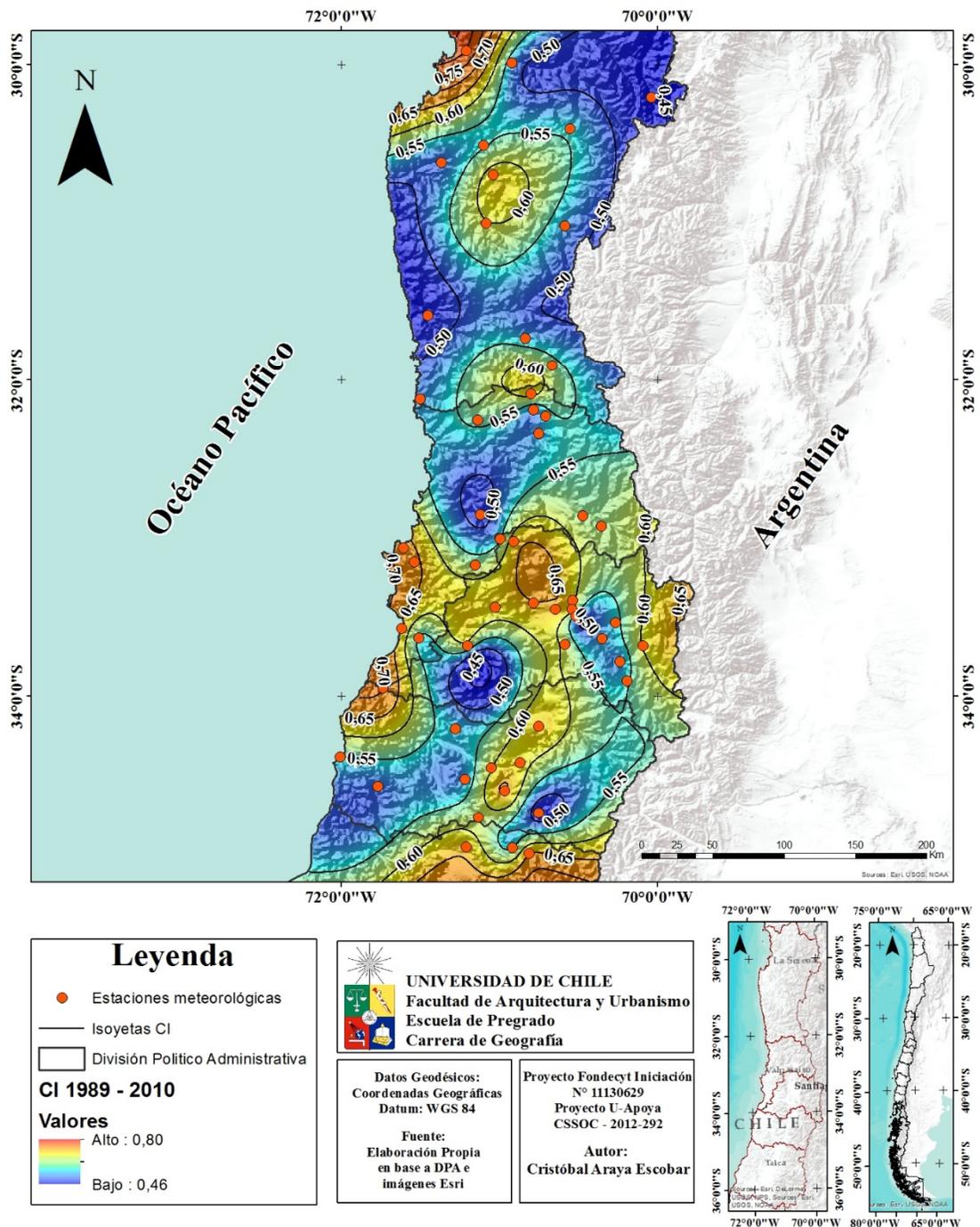


Figura 18: Mapa del Índice de Concentración (CI), sub período 1989 - 2010

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

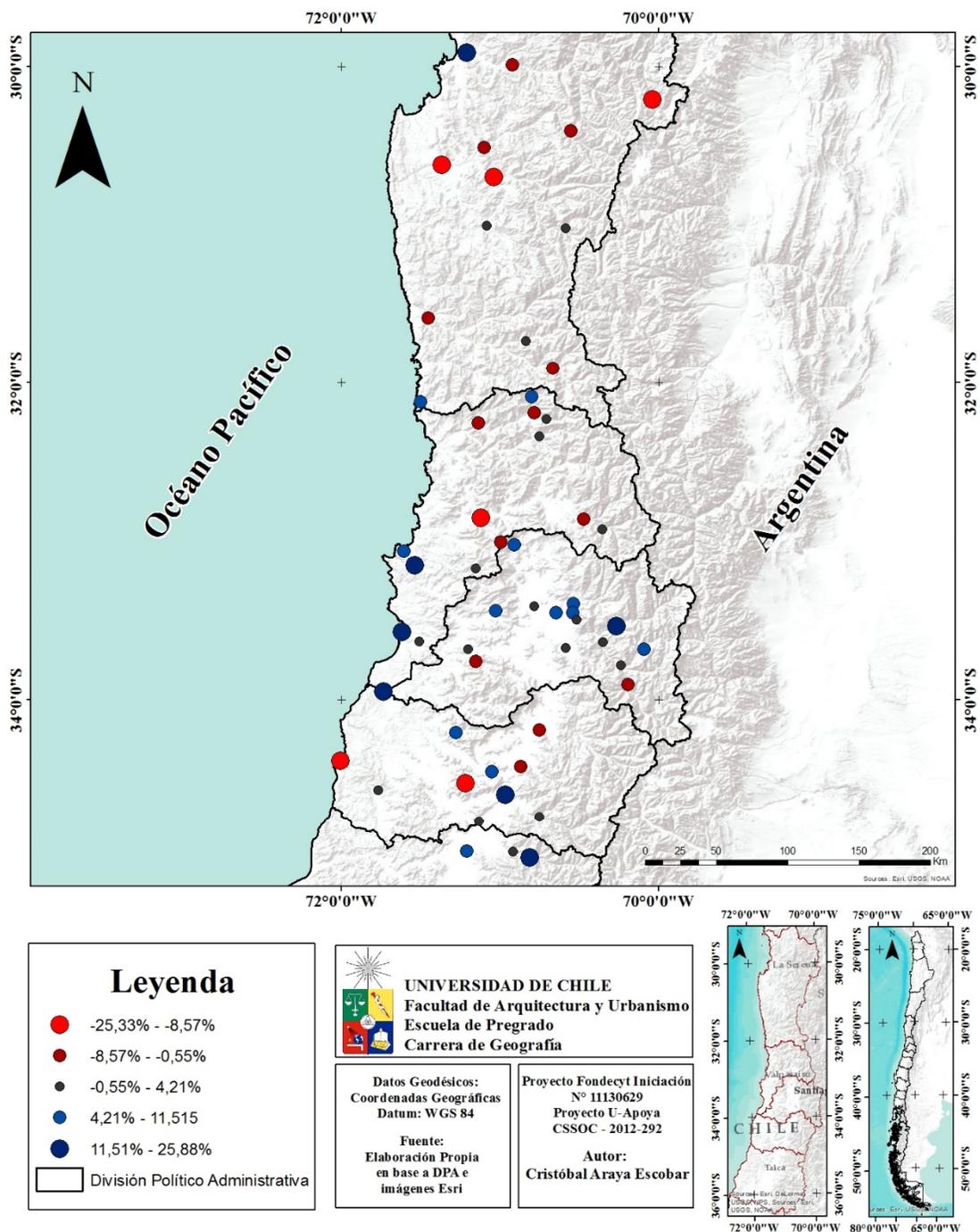


Figura 19: Mapa de las tendencias del CI período 1965-2010.

4.5 Índice de concentración anual PCI y coeficiente de variación CV

En la distribución espacial del Índice de Concentración Mensual (PCI) se aprecia un gradiente latitudinal (figura 21). Se presentan tres grandes regiones según este índice: repartición irregular (> 40), altamente estacional (30-40) y estacional (< 30). Los resultados indican que en las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona norte del área de estudio (gran parte de la región de Coquimbo), las precipitaciones se presentan prácticamente en un sólo mes durante el año normal, mientras que en la transición de la región de Coquimbo por sobre la latitud 31°S y Valparaíso latitud 33°S , la precipitación se distribuye en el trimestre invernal. Más al sur, a partir de la región Metropolitana hasta el Maule, en las cercanías de Curicó, las precipitaciones se extienden entre los meses de mayo a septiembre, es decir, se presentaron aproximadamente en cinco meses del año. Un asunto que aparece menos claro que el gradiente zonal, pero sin ser menos importante, es que hacia el oriente (donde se sitúa la cordillera de Los Andes, el PCI disminuye, lo cual sugiere mejor repartición de las precipitaciones y por donde la estacional del PCI gana influencia hacia el norte.

La fórmula que explica la interpolación del PCI (figura 21) es la siguiente:

$$PCI = \text{Latitud}_{\text{grados}} \cdot 5,478337 + \text{Altitud}_{\text{metros}} \cdot -0,003192 + Pp_{mm} \cdot 0,005323$$

El coeficiente de variación se comporta como buen estimador de la distribución estacional de las precipitaciones. En la figura 22, se distinguen cuatro zonas correspondientes al área de estudio la primera de mayor a menor, se presenta en la zona norte con un CV extremo que va entre los 66 a 76%, lo que indica, una alta concentración de la precipitación en un mes, con montos modestos, luego al sur de la región de Coquimbo y el norte de la de Valparaíso, presenta un CV muy alto (56-66%), con una situación casi similar a la anterior, pero más leve. En las regiones de Valparaíso y Metropolitana el CV disminuye y se considera alto (CV entre 46%-56%), porque se concentra en los meses de invierno austral. Por último en las regiones de O'Higgins y Maule la condición del CV oscila entre los 36 a 46%, introduciéndose por los valles centrales hacia la latitud 33°S , con esto la precipitación se comporta regular durante el año y no sólo se presenta en los meses de invierno ya que su precipitación puede ir desde mayo a octubre.

La fórmula que explica la interpolación del CV (figura 22) es la siguiente:

$$CV = \text{Latitud}_{\text{grados}} \cdot 0,202656 + \text{Altitud}_{\text{metros}} \cdot -0,000103 + Pp_{mm} \cdot 0,000193$$

La tabla 11 muestra los resultados de PCI y CV según cada estación meteorológica ordenadas de forma latitudinal. Se aprecia que en ambos casos PCI y CV descienden latitudinalmente de norte a sur ubicando sus valores máximos en la parte norte del área de estudio.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Tabla 11: Cálculos del PCI y CV según estación meteorológica

N°	Estación	CPI	CV
1	La Serena	49,5	0,70
2	Almendral	50,6	0,77
3	La Laguna Embalse	33,0	0,70
4	Pabellón	41,6	0,66
5	Recoleta Embalse	47,4	0,73
6	La Torre	44,2	0,77
7	Paloma Embalse	44,2	0,70
8	Cogotí Embalse	39,0	0,72
9	Las Ramadas	35,6	0,68
10	Mincha Norte	37,6	0,63
11	San Agustín	34,4	0,61
12	La Tranquilla	34,1	0,63
13	Pedernal Hacienda	33,3	0,65
14	Quilimarí	31,5	0,57
15	Chalaco Hacienda	31,5	0,59
16	El Trapiche	29,0	0,57
17	Palquico	32,6	0,58
18	Alicahue Hacienda	29,6	0,52
19	Estero Rabuco	32,7	0,54
20	Vilcuya	26,6	0,53
21	Riencillos	27,9	0,53
22	Caleu	31,6	0,62
23	Rungue Embalse	34,5	0,66
24	Valparaíso	31,0	0,46
25	Lago Peñuelas	30,7	0,44
26	Colliguay	30,5	0,49
27	Cerro Calán	24,8	0,46
28	Santiago	26,4	0,46
29	Los Panguiles	28,2	0,49
30	Ter. Off. Cent. Dga	26,8	0,49
31	Tobalaba	27,3	0,46
32	Antupirén	24,2	0,43
33	Bocatoma Maitenes	26,7	0,66
34	San Antonio	28,0	0,48
35	Cerrilos de Leyda	27,0	0,49
36	San José de Maipo	27,2	0,46

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

37	Pirque	27,7	0,43
38	El Yeso Embalse	25,9	0,56
39	Melipilla	28,8	0,47
40	Carmen de las Rosas	29,1	0,45
41	San Gabriel	26,3	0,49
42	Las Melosas	29,2	0,54
43	Rapel	28,3	0,45
44	Rancagua	23,7	0,39
45	Cocalán	24,9	0,40
46	Pichilemu	23,5	0,38
47	Rengo	26,2	0,40
48	Viña Vieja	26,6	0,43
49	Millahue	31,0	0,47
50	Nilahue Barahona	25,6	0,37
51	San Fernando	25,1	0,41
52	La Rufina	23,5	0,36
53	Convento Viejo	23,8	0,37
54	Curicó	23,4	0,37
55	El Manzano	23,3	0,37
56	Los Queñes	21,8	0,38

Fuente: Elaboración Propia

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

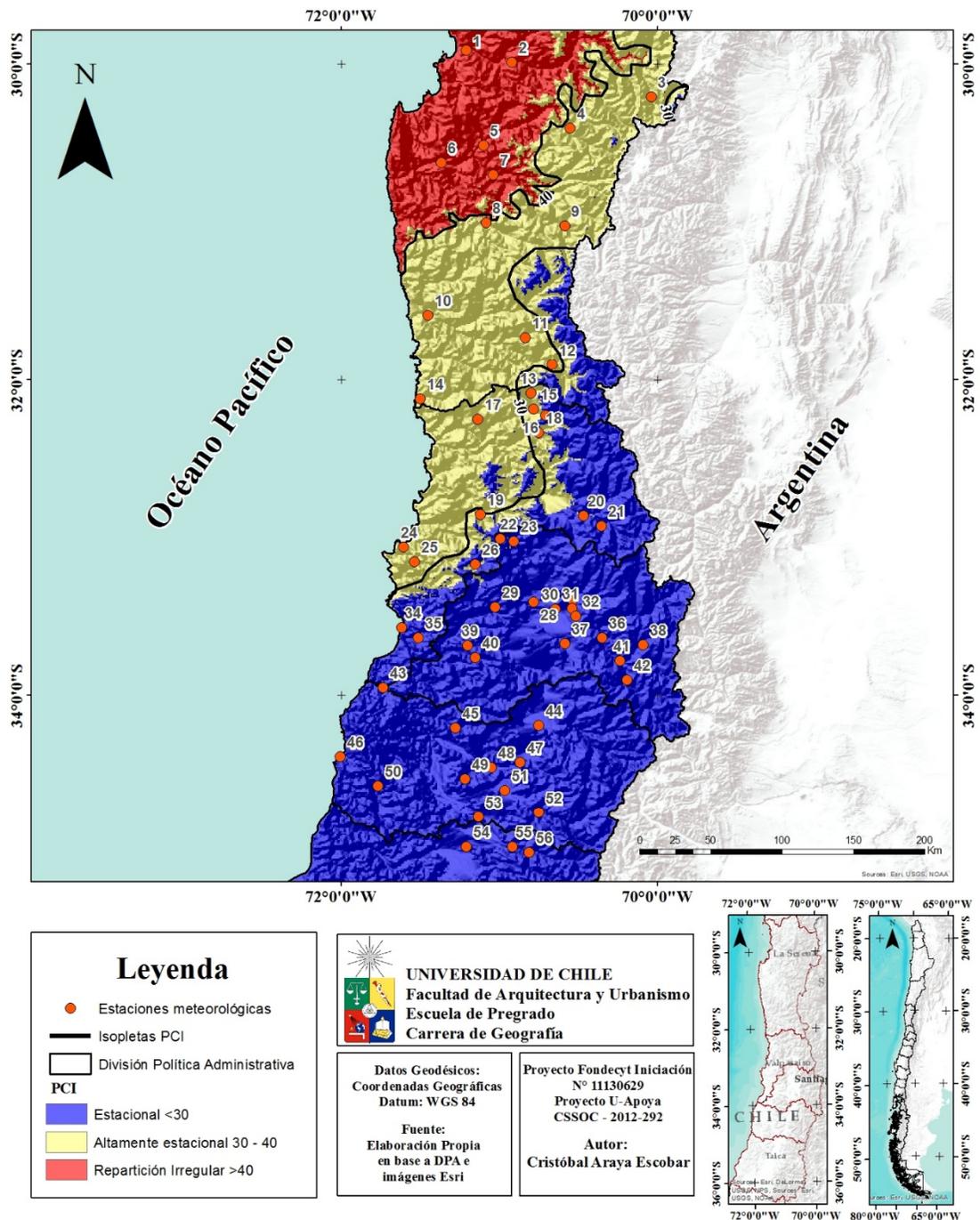


Figura 20: Mapa de distribución del PCI

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

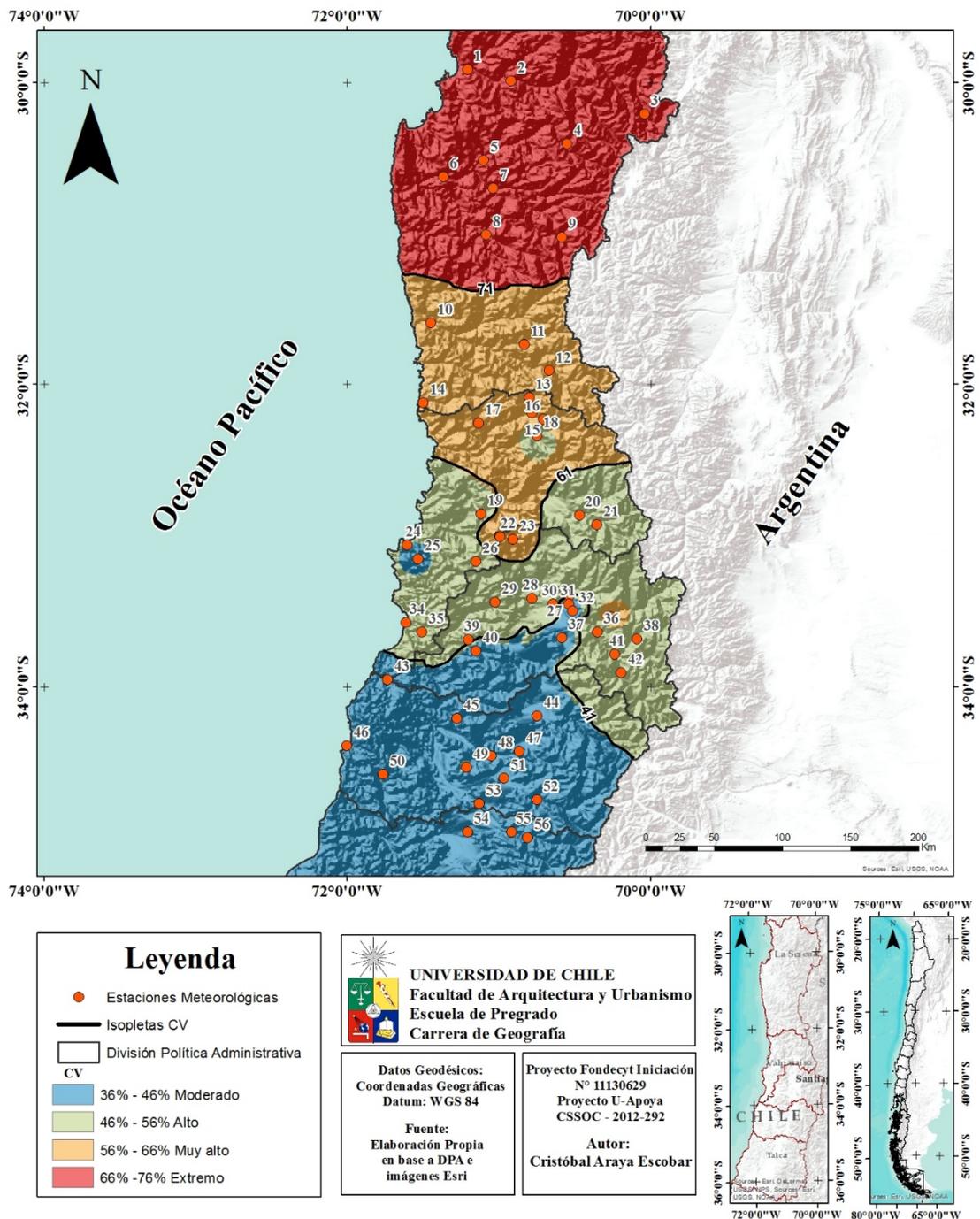


Figura 21: Mapa de distribución del CV

4.6 Patrones de variabilidad de Baja frecuencia y precipitaciones

El componente atmosférico ligado a El Niño se denomina la Oscilación del Sur, así los científicos llaman a menudo el fenómeno en el que la atmósfera y el océano interactúan juntos conocido como ENSO (Trenberth, 1997) por las siglas conjuntas de El Niño-Oscilación del Sur. Entonces, El Niño corresponde a la fase cálida del ENOS, por el contrario el fenómeno de La Niña, consiste en una fase de un enfriamiento de toda la cuenca del Pacífico tropical y por lo tanto, la fase fría de ENSO, si bien existe una amplia literatura sobre el tema para el público, el término para todo el fenómeno en su conjunto es El Niño (Trenberth, 1997).

Los datos de las tres teleconexiones a trabajar fueron obtenidos desde la página del Climatic Research Unit, dependiente de la University of East Anglia. El SOI se define como la presión normalizada entre Tahití y Darwin, además existen variaciones en el cálculo del SOI, en este caso se utiliza el método de Ropelewski & Jones (1987). Los datos de la PDO se obtiene a partir de la TSM mensual en el Océano Pacífico norte hacia 20°N y la AAO se construye mediante la proyección diaria a los 700 mb hacia los polos en dirección a los 20°S.

La figura 23 muestra las tres teleconexiones y su comportamiento anual entre los años 1965 a 2010. Se aprecia la variabilidad de los patrones baja frecuencia pues no siempre los tres coinciden ya que no actúan de forma sincrónica, sino que responden a patrones propios de comportamiento interanual o decadal según la periodicidad que posea cada teleconexión.

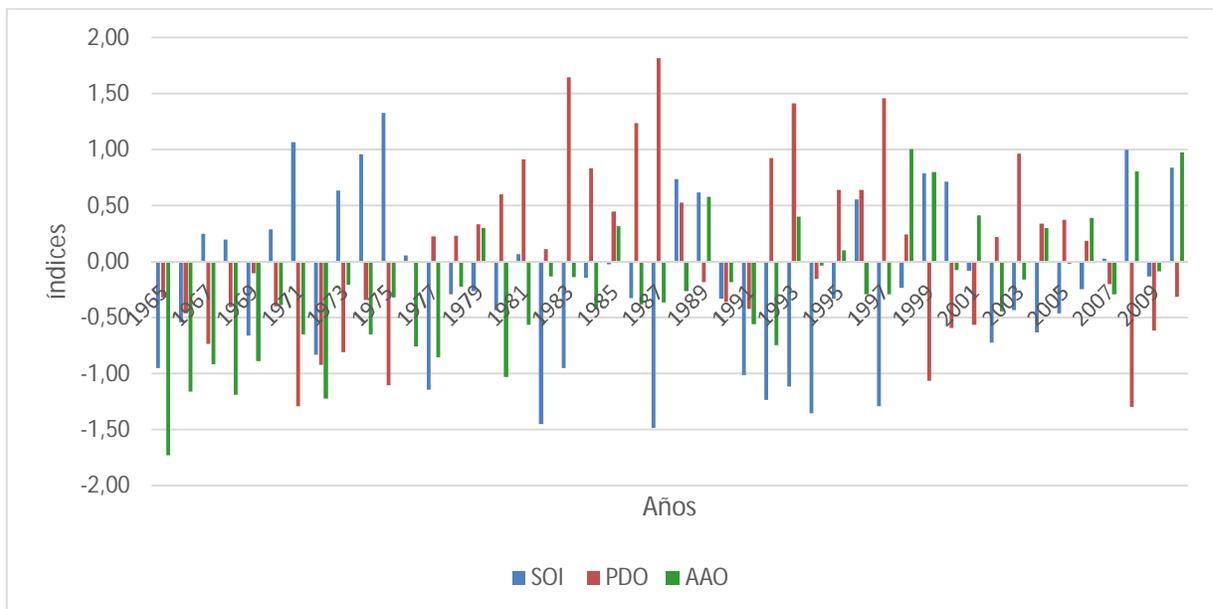


Figura 22: Índices anuales de teleconexiones.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

La relación existente entre las tres teleconexiones y los montos anuales de precipitación para cada estación meteorológica son realizados mediante el coeficiente de correlación, el cual se utiliza para determinar la relación que existe entre dos rangos, por lo tanto el coeficiente de correlación lineal es el cociente entre la covarianza y el producto de las desviaciones típicas de ambas variables, se expresa de la siguiente forma:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

El signo del coeficiente de correlación es el mismo que el de la covarianza, con esto si el coeficiente de correlación, que son valores ente -1 y 1, si toma valores negativos y se acercan a -1 sus valores tendrán una correlación fuerte e inversa, por el contrario, si toman valores cercanos a 1, la correlación será fuerte y directa, por último si la correlación tiene valores cercanos 0 será de tipo débil y revelara el grado de relación (Martín-Vide, 2003).

La tabla 12 presenta las correlaciones, como se aprecia la correlación entre la PDO y las estaciones es prácticamente nula por ser todas positivas y actuar de forma independiente con respecto a las otras dos teleconexiones. Por otra parte, las correlaciones del SOI y la AAO actúan de buena forma en relación con las precipitaciones en la zona central de Chile. Las correlaciones más fuertes mediante una relación inversa se manifiestan entre la teleconexión SOI y las precipitaciones anuales son en las estaciones de Las Melosas -0,58, San Antonio -0,57, Caleu y Rengo con -0,56 respectivamente, en resumen el coeficiente de correlación y el SOI se da entre -0,33 y -0,58. La excepción se da en la estación Bocatoma Maitenes, quien posee la serie menos extensa (1988–2010) y sus datos tienden a distorsionar la muestra.

Estos resultados dan indicios de la relación que se produce entre los montos anuales de precipitación y el ENSO ya que las situaciones anormalmente cálidas propician eventos El Niño y producen precipitaciones excepcionalmente altas, en cambio, la situación opuesta La Niña, las precipitaciones anuales tiene un comportamiento más bien modesto.

Junto con el SOI, la AAO es otra teleconexión que tiene una correlación moderada con las precipitaciones anuales según la estación meteorológica, las correlaciones de relación inversa al igual que el SOI son menores que éste último, con valores que van entre 0,04 y -0,48, los valores positivos corresponden a situaciones particulares producidas en estaciones Bocatoma Maitenes y la cordillera de El Yeso. Aspectos relevantes se producen al momento de relacionar las teleconexiones del SOI y la AAO concordantemente estas relaciones se producen a partir de la latitud 33°S al sur, la mayor correlación de la AAO se da en la estación de Nilahue Barahona con -0,48, seguido por Lago Peñuelas y Cocalán -0,45, para finalizar entre los más altos como San Antonio con una correlación de -0,43.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

En síntesis, existe una alta correlación entre estas dos teleconexiones en Chile central (SOI-AAO), su periodicidad y alternancia varía según el comportamiento que cada patrón tenga.

Tabla 12: Correlación entre precipitación anual y teleconexiones.

N°	Estación	PP promedio	SOI	PDO	AAO
1	La Serena	77	-0,34	0,06	-0,34
2	Almendral	88	-0,33	0,28	-0,24
3	La Laguna Embalse	162	-0,43	0,33	-0,25
4	Pabellón	147	-0,42	0,20	-0,22
5	Recoleta Embalse	101	-0,41	0,25	-0,31
6	La Torre	122	-0,37	0,29	-0,36
7	Paloma Embalse	133	-0,44	0,23	-0,35
8	Cogotí Embalse	171	-0,49	0,28	-0,33
9	Las Ramadas	297	-0,52	0,31	-0,24
10	Mincha Norte	173	-0,46	0,35	-0,31
11	San Agustín	233	-0,51	0,37	-0,23
12	La Tranquilla	251	-0,52	0,33	-0,21
13	Pedernal Hacienda	281	-0,47	0,36	-0,40
14	Quilimarí	284	-0,48	0,35	-0,37
15	Chalaco Hacienda	216	-0,51	0,40	-0,21
16	El Trapiche	250	-0,46	0,29	-0,28
17	Palquico	261	-0,46	0,38	-0,31
18	Alicahue Hacienda	275	-0,54	0,37	-0,23
19	Estero Rabuco	385	-0,43	0,24	-0,24
20	Vilcuya	354	-0,51	0,30	-0,09
21	Riencillos	504	-0,43	0,11	-0,10
22	Caleu	539	-0,56	0,41	-0,15
23	Rungue Embalse	356	-0,54	0,39	-0,28
24	Valparaíso	412	-0,49	0,14	-0,38
25	Lago Peñuelas	708	-0,46	0,29	-0,45
26	Colliguay	622	-0,45	0,24	-0,29
27	Cerro Calán	419	-0,43	0,18	-0,18
28	Santiago	324	-0,50	0,27	-0,15
29	Los Panguiles	350	-0,46	0,23	-0,40
30	Terraza Oficina Central DGA	323	-0,45	0,28	-0,11
31	Tobalaba	352	-0,45	0,13	-0,15
32	Antupirén	456	-0,42	0,10	-0,23
33	Bocatoma Maitenes	361	0,03	0,06	0,04
34	San Antonio	397	-0,57	0,38	-0,43
35	Cerrilos de Leyda	440	-0,47	0,32	-0,15

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

36	San José de Maipo	536	-0,55	0,13	-0,28
37	Pirque	450	-0,47	0,24	-0,15
38	El Yeso Embalse	563	-0,47	0,24	0,04
39	Melipilla	380	-0,51	0,25	-0,34
40	Carmen de las Rosas	427	-0,50	0,23	-0,30
41	San Gabriel	645	-0,43	0,09	-0,22
42	Las Melosas	743	-0,58	0,19	-0,18
43	Rapel	544	-0,45	0,19	-0,30
44	Rancagua	445	-0,50	0,19	-0,39
45	Cocalán	530	-0,48	0,31	-0,45
46	Pichilemu	503	-0,34	0,28	-0,43
47	Rengo	529	-0,56	0,22	-0,43
48	Viña Vieja	619	-0,49	0,09	-0,41
49	Millahue	695	-0,43	0,33	-0,13
50	Nilahue Barahona	567	-0,44	0,12	-0,48
51	San Fernando	749	-0,44	0,04	-0,45
52	La Rufina	1133	-0,55	0,19	-0,30
53	Convento Viejo	709	-0,42	0,05	-0,43
54	Curicó	704	-0,43	0,26	-0,32
55	El Manzano	1292	-0,43	0,13	-0,41
56	Los Queñes	1339	-0,55	0,15	-0,30

Fuente Elaboración propia

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

La estación meteorológica de San Antonio presenta una alta correlación entre sus montos precipitados anuales y la teleconexión SOI (ver figura 25), sin embargo, no se muestra tan concentrada como otras estaciones costeras (La Serena y Pichilemu) y la estación vecina de Rapel. Se establece que para la figura 25, la tendencia hacia una correlación inversa fuerte se produce sobre los 400 mm promedio anuales y por el contrario bajo dicha cantidad los efectos del SOI tienen a ser menores.

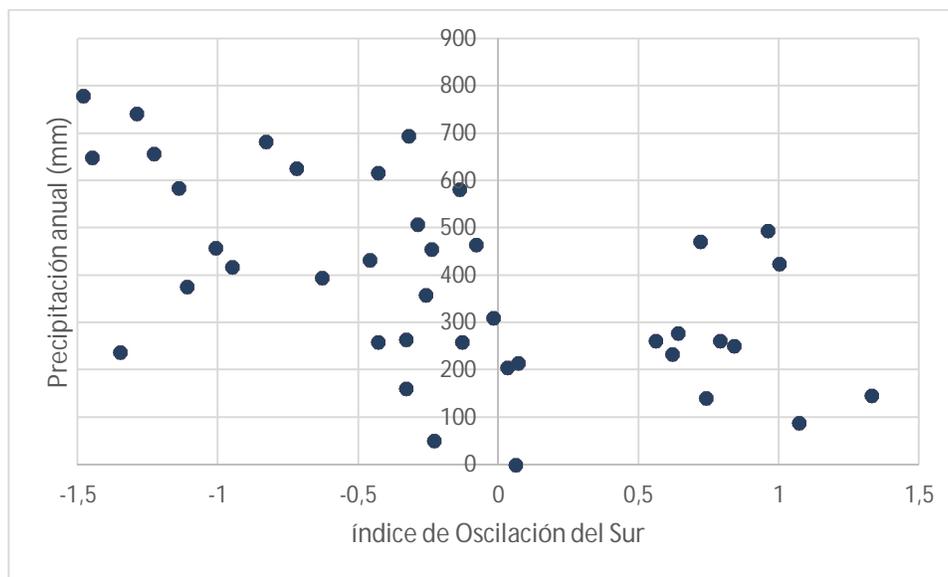


Figura 23: Correlación gráfica entre SOI y PP anuales.

La figura 26, muestra la distribución de la correlación que poseen las precipitaciones con la influencia del índice de oscilación del sur. El SOI se presenta en las cinco regiones, no obstante, su actuar es diferenciado, ya que en las regiones de Coquimbo y Valparaíso los valores altos de van de Este a Oeste, a diferencia de la estación de San Antonio con la mayor correlación, la región Metropolitana pierde influencia y vuelve a ser retomada su dominio desde los valles a cordillera en las regiones de O'Higgins y Maule.

La figura 27 muestra la correlación entre las estaciones meteorológicas y la oscilación decadal del pacífico. Las altas correlaciones de la PDO se logran cuando el índice se comporta de forma positiva alcanzando altos valores al sur de la región de Coquimbo y parte norte de la región de Valparaíso.

La figura 28 presenta la correlación entre los observatorios y el índice de oscilación antártico. La influencia de la AAO en los regímenes de lluvia juntos con un SOI negativo y una PDO positiva afectan considerablemente los montos precipitados anuales. El actuar que ejerce la AAO va desde la depresión intermedia hacia la cordillera de los Andes, en algunos casos, como en las regiones de Valparaíso y Metropolitana se une la cordillera de la Costa, en síntesis, la influencia de la AAO se da más en el interior del continente que en la costa.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

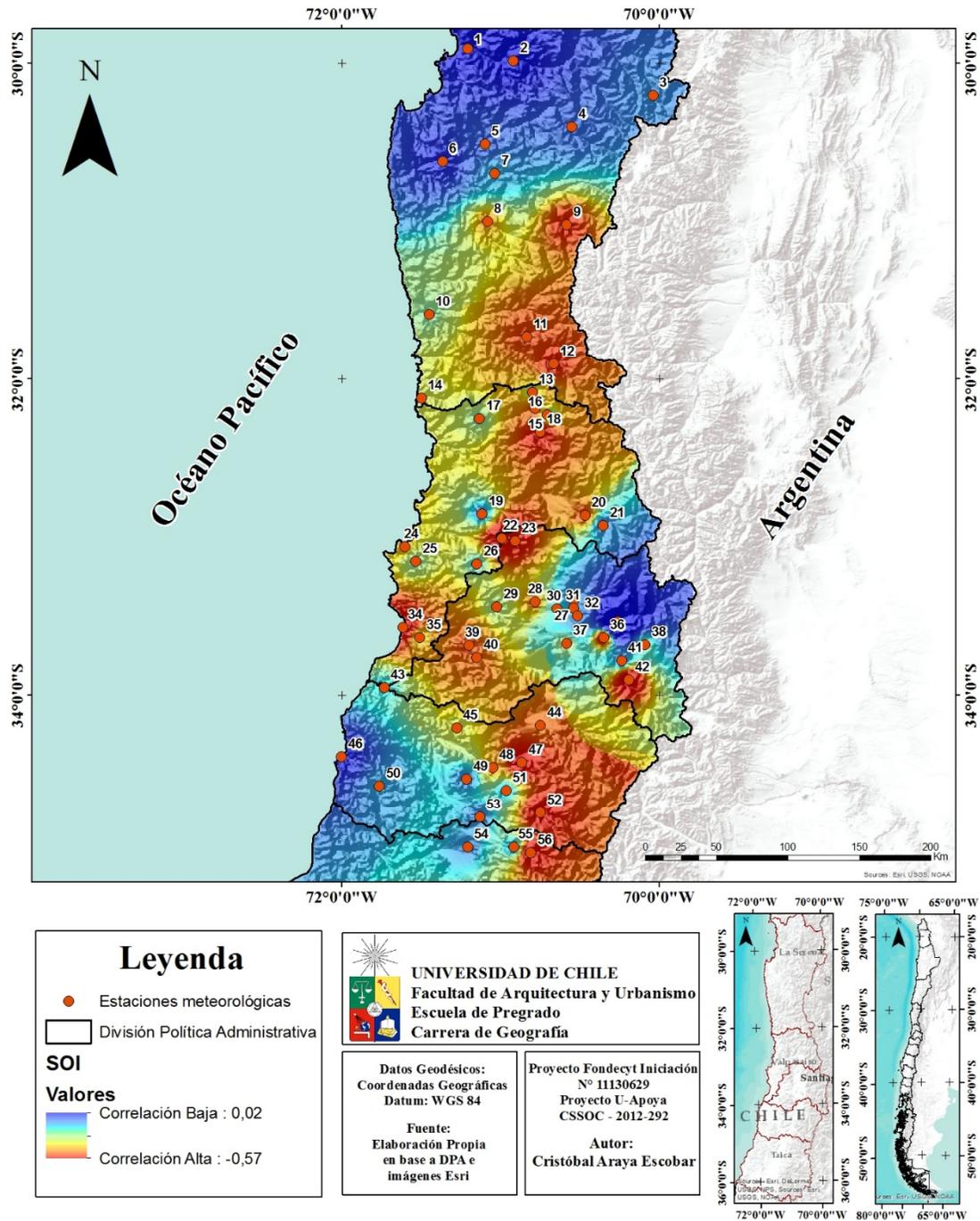


Figura 24: Mapas de correlación entre el SOI y las precipitaciones anuales.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

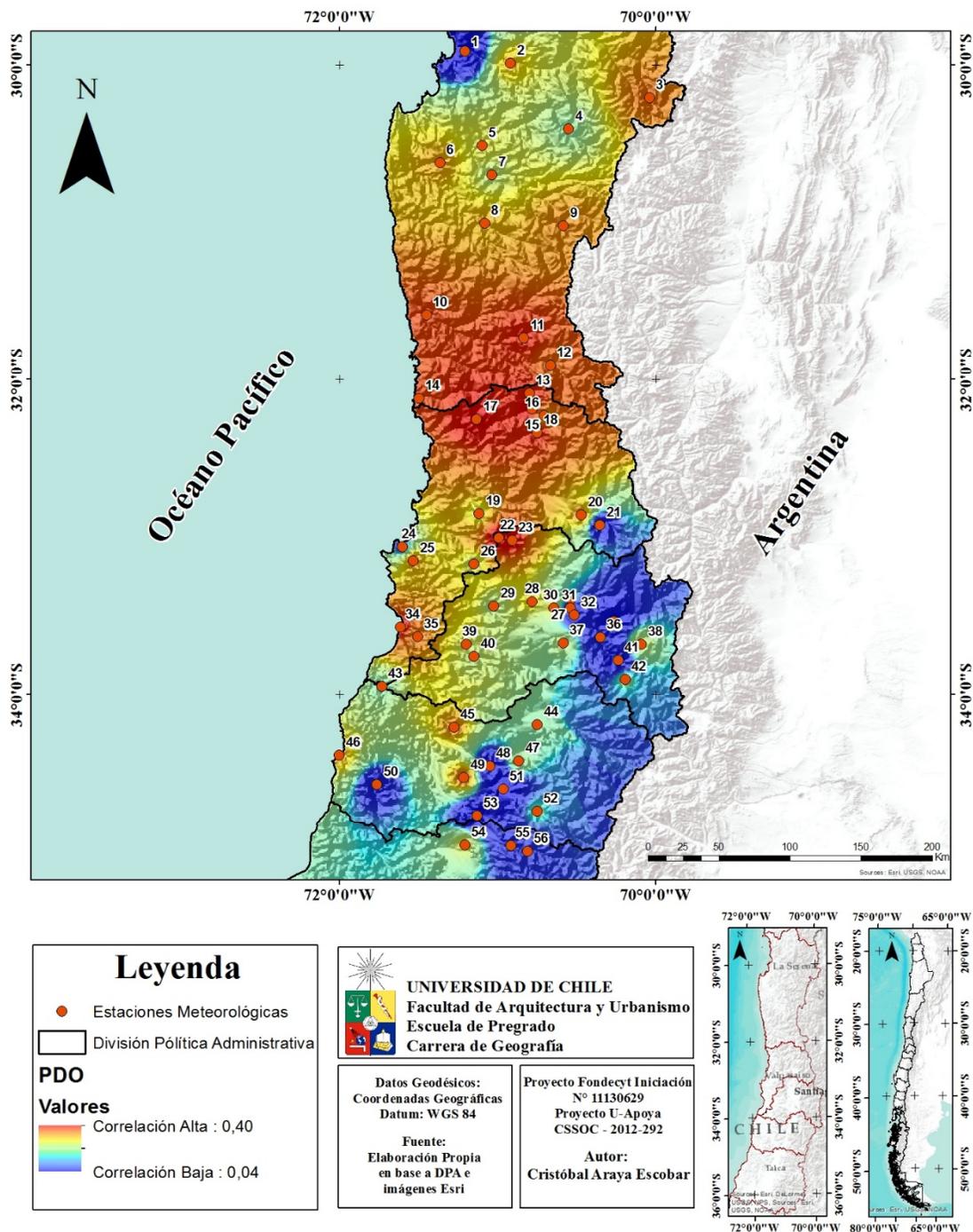


Figura 25: Mapas de correlación entre la PDO y las precipitaciones anuales.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

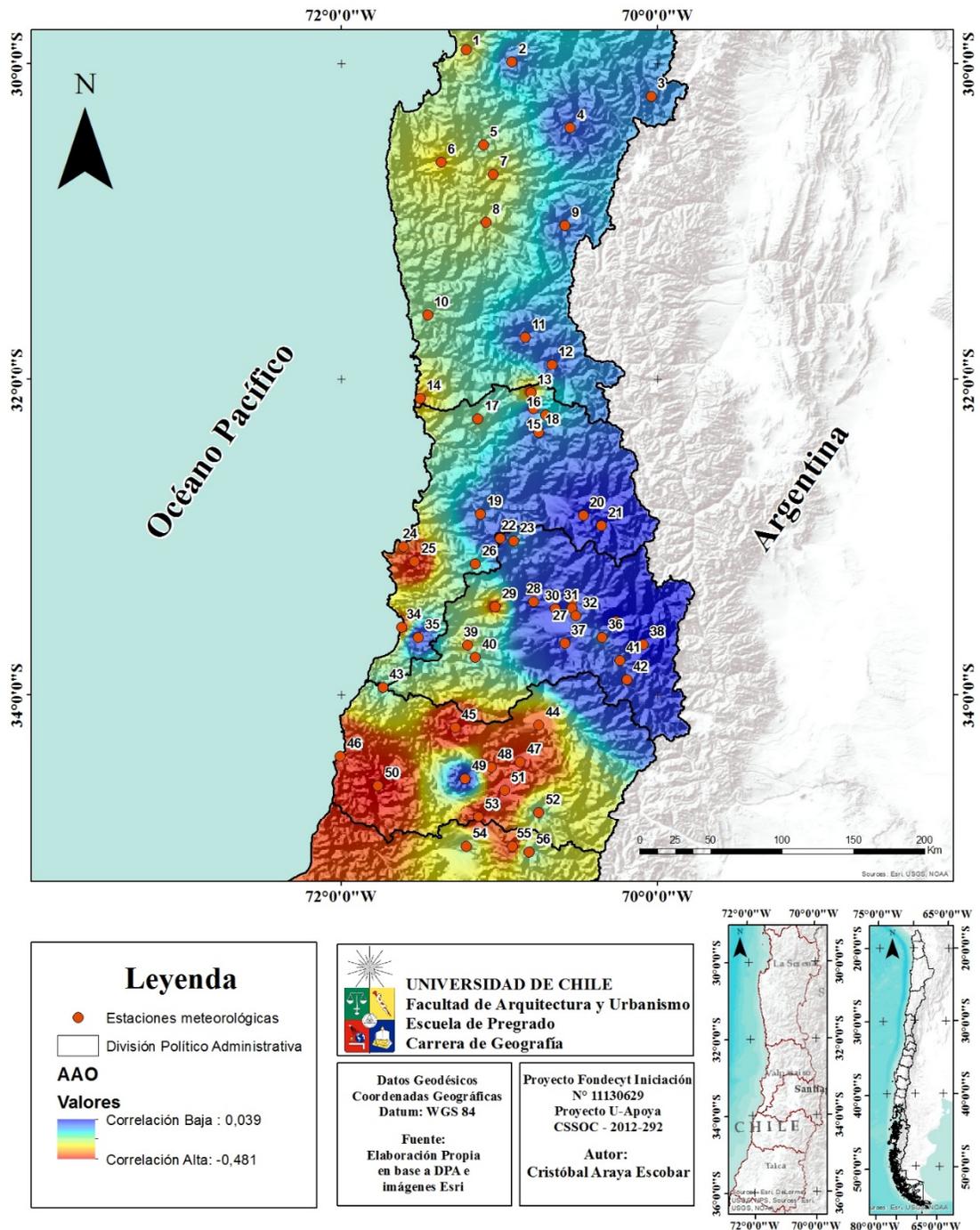


Figura 26: Mapas de correlación entre la AAO y las precipitaciones anuales.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

4.7 Tipos de tiempo y precipitaciones máximas.

A partir de la clasificación de J&C aplicada a los 100 días más lluviosos en el período 1965-2010 se obtuvieron como resultado: 7 días anticiclónicos (A), 22 días ciclónicos (C), 44 días advectivos puros (ADV), 14 días híbridos advectivos anticiclónicos y 10 días híbridos advectivos ciclónicos. No se aprecian días clasificados como indeterminados (U), La tabla 13 muestra el detalle de los 100 días más lluviosos en el período 1965-2010 empleando la clasificación de Lamb (1972).

La relación entre días precipitados y la clasificación de J&C manifiestan que el 75% de los casos está asociado a configuraciones sinópticas frontales. Si se analiza a nivel de estaciones meteorológicas, el 78% de las precipitaciones se registran en invierno, el 17% en otoño y el 5% en primavera. Como es de esperarse, no se aprecian grandes montos precipitados en época estival y responden netamente a situaciones frontales en los meses fríos.

Tabla 13: Clasificaciones de Lamb a los 100 días más lluviosos.

Tipo	Días	Tipo	Días	Tipo	Días
Anticiclónico	7	Advectivos Puros		Ciclónico	25
ANE	0	NE	1	CNE	0
AE	0	E	2	CE	0
ASE	0	SE	0	CSE	0
AS	2	S	1	CS	0
ASW	5	SW	5	CSW	2
AW	4	W	22	CW	4
ANW	3	NW	12	CNW	3
AN	0	N	1	CN	1

Fuente: Elaboración Propia

Se correlacionaron las tres teleconexiones presentes SOI, PDO y AAO, mediante sus índices a nivel trimestral con el día que registra mayor precipitación en la serie y con los 100 días de mayor precipitación entre los años 1965-2010. En cuanto a los posibles resultados, en base a los días lluviosos, se generaron ocho combinatorias entre las tres teleconexiones y son las siguientes: SOI negativo, PDO positiva, AAO negativa; SOI negativo, PDO negativa, AAO negativa; SOI positivo, PDO negativo, AAO negativa; SOI negativo, PDO positiva, AAO positiva; SOI negativo, PDO negativa, AAO positiva; SOI positiva, PDO positiva, AAO negativa; SOI positiva, PDO positiva, AAO positiva y SOI positiva, PDO negativa y AAO positiva.

La tabla 14 contiene la cantidad de números de días correlacionados con las teleconexiones y sus combinatorias según la fase de cada patrón de variabilidad de baja frecuencia.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Tabla 14: Correlación entre las teleconexiones y los 100 días más lluviosos

Teleconexión	SOI	Suma							
	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	
	PDO	POI	PDO	PDO	PDO	PDO	PDO	PDO	
	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	
AAO	AAO	AAO	AAO	AAO	AAO	AAO	AAO	AAO	
(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	
Número días	26	25	5	17	8	14	3	2	100
Porcentaje días	26%	25%	5%	17%	8%	14%	3%	2%	100%

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de las correlaciones, demuestran que la PDO es la teleconexión que menos correlaciona con las precipitaciones en Chile central, debido a que la mayoría de las veces se presenta en una fase cálida, la cual trae consigo precipitaciones en la zona. Por el contrario, la teleconexión atmosférica que influye de manera notable en la zona central del país es el SOI, mediante la fase fría de El Niño, con un valor máximo de SOI= -2,34, lo que demuestra correlaciones altas entre los grandes montos precipitados en varias estaciones y el fenómeno ENSO.

Si bien en los 100 casos estudiados la mayor presencia se da en la condición ideal de una PDO (-), AAO (-) y PDO (+), en el sumario contando por separado, la presencia del índice SOI negativo, responde ser el más influye en la zona con una presencia del 76%, a continuación se sigue la AAO negativa con un 70% en los días más lluviosos, finalmente la teleconexión con menor presencia en la zona es la PDO positiva con un 60% en los con registros pluviométricos elevados.

Las 10 estaciones meteorológicas que presentan precipitaciones por sobre los 160 mm diarios, son expuestas en la tabla 15. Donde el mayor monto caído en 24 horas ocurre en la estación el Yeso Embalse con 256,5 mm, en la fecha 13 de junio de 2000, asociado a la clasificación híbrida advectiva-anticiclónica del oeste de J&C con un Niño moderado, ya que el SOI marca -0,59. Las estaciones que superan los 200 milímetros diarios son cuatro y se ubican en torno a la latitud 33°S, poseen un promedio SOI: -1,24, indicando un Niño con intensidad fuerte, lo que estaría correlacionado con la gran cantidad de precipitación presenten en dichas estaciones, pero en días y condiciones diferentes. Bajo los 200 milímetros en 24 horas se encuentra el resto de las estaciones meteorológicas, en las cuales se presenta una predominancia de los sistemas frontales provenientes del oeste (W) según la clasificación de J&C. En cuanto a las teleconexiones, se repite la tendencia con una predominancia del SOI seguido por la AAO y finalmente la PDO.

En resumen, la tabla 15 contiene las estaciones meteorológicas ordenadas latitudinalmente, el monto precipitado diario, la fecha registrada, la clasificación de J&C y el patrón de

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

teleconexión que lo afecta. La figura 29 muestra las cartas sinópticas de presión en superficie para dos clasificaciones sinópticas de J&C ciclónico y anticiclónico W

Tabla 15: Diez estaciones más lluviosas sobre 160mm en 24 hrs.

Nº	Estación	PP (mm)	Fecha	Tipo Lamb	Trimestre SOI	Trimestre PDO	Trimestre AAO
1	Riecillos	163,6	26-06-1982	AW	-2,34	0,06	-0,26
2	Caleu	188	14-07-1987	C	-2,06	1,86	-0,50
3	Valparaíso	190,6	29-07-2001	CW	-0,49	-0,85	0,23
4	Lago Peñuelas	252,2	11-05-1981	C	-0,59	1,40	-1,14
5	Colliguay	221	14-07-1987	C	-2,06	1,86	-0,50
6	El Yeso Embalse	256,5	13-06-2000	AW	-0,24	-0,76	-0,11
7	Las Melosas	201	19-06-1997	A	-2,08	2,63	0,04
8	La Rufina	179	20-07-1994	W	-1,73	-0,09	-0,26
9	El Manzano	186	11-07-2006	W	-1,21	0,25	0,02
10	Los Queñes	178	05-05-1992	C	-1,61	0,99	-1,28

Fuente: Elaboración Propia

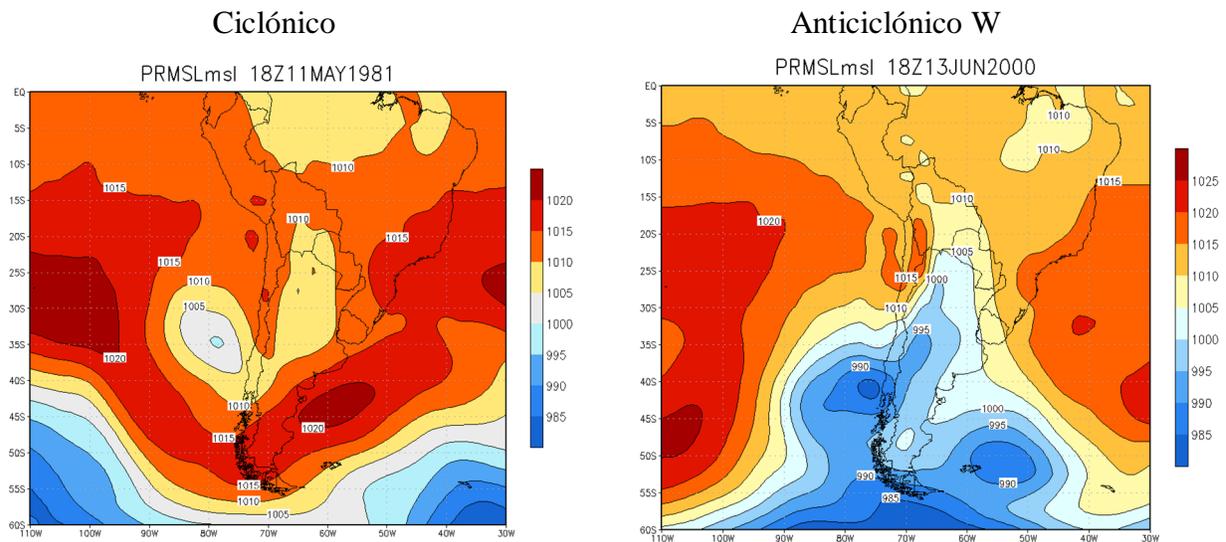


Figura 27: Catalogo tipo de tiempo según J&C.

Fuente: CDAS-NCEP/NCAR (2014)

CAPÍTULO 5: Discusión y Conclusiones

Discusión

Los test de homogeneidad sirven para comprobar la consistencia climática de la serie procedente de una estación meteorológica. Si ésta presenta una variabilidad que no es natural, sus resultados arrojarán conclusiones erróneas producto de algún elemento que originó alguna alteración significativa en la serie. Una forma de comprobar la fiabilidad de las series climáticas es aplicar los test de homogeneidad, y como detalla Martín-Vide (2003) se aplicaron dos test el Von Neumann y de rachas o alternancias de Thom, ambos test no son concordantes entre sí, pues emplean distintos métodos de cálculos, por lo tanto poseen diferentes rangos de tolerancia para considerar si las series presentan homogeneidad u inhomogeneidad.

Los resultados aplicando ambos test son dispares entre sí, ya por el lado del test de Von Neumann se cumplió que el 73% está por debajo del rango de tolerancia aceptado y el 27% restante se considera inhomogéneo. Mientras que para el test de Thom la totalidad de las estaciones, o sea el 100% son consideradas aleatoria y por lo tanto homogéneas.

Por varias razones se pueden presentar inhomogeneidades, ya que la disidencia entre ambos test produce una sensibilidad con las cifras y tal como advierte Martín-Vide (2003), sus resultados no siempre son coincidentes entre sí, este autor menciona como factores que producen inhomogeneidad para unos test y homogeneidad para otros, cambios en los instrumentos, movilidad de la estación meteorológica, cambios en el ambiente aledaño a las estaciones o tal vez las preferencias de cada observador. Que una serie climática sea homogénea para un test y para otra no, puede generar alguna desconfianza, pero es la propia variabilidad climática la encargada de explicar las tendencias y variaciones en cada estación meteorológica analizada (Martín-Vide, 2003).

La variabilidad pluviométrica en Chile central disminuye de norte a sur, ya que pasa de climas semiáridos y mediterráneos a templados más lluviosos, por lo que, la precipitación tiene a ser más concentrada en la zona centro norte, que en la centro sur. Con esto, las rachas de sequías también disminuyen de norte a sur. Estos patrones son propios de los climas mediterráneos en el mundo y aparte de Chile central, son característicos de California, el extremo meridional de Suráfrica y dos sectores en el sur de Australia, estas regiones se enmarcan entre los 30° y 40° de latitud S, dependiendo del hemisferio en que se sitúe (Martín-Vide, 2013). Otro factor relevante que presenta la zona mediterránea es la componente orográfica, debido a su posición meridional, produce a barlovento precipitaciones por el efecto Föhn, por lo tanto las lluvias tienden a comportarse de forma más regular a medida que se asciende. Este tipo de precipitación se produce en las laderas occidentales de las cordilleras de la Costa y de Los Andes en la zona central del país (Sarricolea *et al.*, 2013).

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Los climas subtropicales, según Martín-Vide (2004) deberán arrojar CI altos que sobre climas templados lluviosos, debido al gradiente latitudinal que posee el área de estudio, fue oportuno comprobar dicha teoría, ya que el CI disminuye latitudinalmente, por presentarse un clima semiárido costero que concentra las precipitaciones, a uno mediterráneo donde las concentraciones son altas, porque las precipitaciones se reúnen en los meses de invierno austral y luego al sur se vuelve más templado y la lluvia tiende a ser uniforme a lo largo del año y no concentrada en meses invernales, como ocurre en los valles centrales de Chile.

Los resultados del cálculo de la concentración de las precipitaciones a partir de Olascoaga (1950) y Martín-Vide (2004) a nivel de toda la serie como de los dos períodos, demuestran consistencia con lo expuesto anteriormente por Sarricolea & Martín-Vide (2012), así el CI alcanza sus valores máximos en estación La Serena (0,75), al mismo tiempo se puede decir que los mayores CI se logran en Chile central, donde el clima es de tipo mediterráneo y gran parte de las lluvias se concentran en pocos días, ya que según Sarricolea *et al.* (2013) las precipitaciones de la región por su situación zonal están sometidas a lluvias frontales de carácter invernal.

Los valores de CI encontrados en Chile central van desde los 0,75 a 0,47, de los cuales el 36%, alrededor de 20 estaciones posee un CI igual o superior a 0,59 y el restante 64% se encuentra por debajo de un CI 0,59, encontrándose una situación similar a la Península Ibérica. En síntesis, los mayores CI se logran en la zona litoral y depresión intermedia, y por el contrario CI menores se logran hacia las cordillera de los Andes y de la Costa.

La metodología aplicada para el cálculo del CI de Martín-Vide (2004), se ha utilizado en diferentes países y regiones del mundo, primero a partir de toda la Península Ibérica (Sánchez-Lorenzo & Martín-Vide, 2006) luego en toda Europa, con CI que oscilan entre 0,51 y 0,72 (Cortesi *et al.*, 2012). Al interior de Europa y fuera de la PI, se han realizado estudios del CI, más específicamente en Italia, hacia región costera de Veneto y sus valores de CI en la costa este del Mediterráneo se sitúan entre 0,61 y 0,70. De igual forma, en el sur de Italia en la región de Calabria en pleno mar Mediterráneo central, los CI son más bien modestos y se encuentran entre los 0,45 y 0,63 (Coscarelli & Caloiero, 2012).

Fuera de Europa el CI ha sido calculado en Irán (Alijani *et al.*, 2008), donde el CI va desde valores medios de 0,58 en los cordones de Zagros y valores altos de 0,73, cercanos al Golfo Pérsico, similar a la situación orográfica presente en Chile central. Otro país donde el CI ha sido ampliamente calculado es en China, en las cuencas de Lancang River CI= 0,50 a 0,73 (Shi *et al.*, 2013), cuenca del río Pearl (Zhang *et al.*, 2009), con CI muy altos desde 0,74 a 0,80, ubicadas en zonas de montaña y grandes confluencias. Otra zona en China es Xinjian (Li *et al.*, 2011), donde al igual que el Chile Central se comprueban la disminución de CI hacia las montañas, situación similar se da en la zona del río Huai en China (Shi *et al.*,

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

2014), donde los CI bajo 0,63 se dan en zonas de montañas y altos en fondo de valle CI= 0,72.

En sudamérica (Zubieta & Saavedra, 2009), analizó el CI en los Andes Peruanos, logrando resultados similares a los obtenidos en los Andes Chilenos con CI medios a bajo, debido a la regularidad de las precipitaciones presentes en la zona. Por último, en México (Rascón, 2012) el CI arrojó resultados que van desde 0,59 a 0,64 en estaciones meteorológicas ubicadas tanto en la parte del océano Pacífico como del Atlántico, logrando una menor concentración hacia las estaciones que presentan grandes montos precipitados anuales.

Así pues, como propone Oliver (1980), el PCI puede ser aplicado a diferentes regiones del mundo y su estacionalidad va a depender del comportamiento de las precipitaciones que posea cada en región en un determinado lugar. El PCI ha sido utilizado en la PI, con el fin de estudiar los cambios en la concentración de la precipitación, con respecto a Chile central comparten similar clasificación climática, por lo que sus resultados, en teoría debiesen ser parecidos, sin embargo, se producen resultados dispares ya que de Luis *et al.* (2011), analizo el PCI y los valores más bajos se detectaron en el norte de la Península Ibérica, mientras que los valores más altos se encuentran en el sur y en la costa mediterránea, además, se detectó un aumento general de los valores de PCI en el período más reciente, aunque se produce esta situación de aumento en el ultimo período (1976-2005) los valores de PCI se reparten entre 10 y 20. Por el contrario, en Chile central Pizarro *et al.* (2008), calculó el PCI y sus resultados arrojaron una alta estacionalidad en sus resultados con PCI sobre 20, los que son similares con los resultados presentes en las regiones Metropolitana, O'Higgins y Maule.

Las precipitaciones en Chile central analizadas con el PCI, resultan en una estacionalidad alta, además Pizarro *et al.* (2008), describe que el PCI disminuye latitudinalmente y sus estacionalidades fuertes e irregulares se dan antes de la latitud 33°S, lo que demuestra que el comportamiento de las precipitaciones a medida que se gana latitud, se reparte de forma uniforme durante todo el año.

El coeficiente de variación, refleja la variabilidad de las precipitaciones, la región de Coquimbo presenta los más altos CV de toda el área de estudio, por exhibir precipitaciones modestas y concentradas en uno o más meses, por lo que su CV va a ser más alto y se explica por la distribución de las precipitaciones ya que a mayor cantidad de precipitación el CV va a ser bajo. Esto se cumple en Chile central, porque se pasa de zonas semiáridas, a una transición mediterránea y finalmente una templada húmeda, entonces el CV va a explicar el gradiente latitudinal que genera el aumento de precipitaciones al sur del área de estudio, con esto, los registros pluviométricos son mayores y la variabilidad de la precipitación es menor durante el año. Los análisis realizados por Pizarro *et al.* (2008),

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

demuestran que si se utiliza la precipitación y el CV se logra una relación inversa, esto es, a mayor precipitación registrada, menor CV adquiere el observatorio.

Las precipitaciones en Chile central, son casi exclusivamente invernales, producto del desplazamiento hacia el ecuador del anticiclón subtropical y del cinturón de los oestes, además el origen extra tropical de las perturbaciones frontales asociadas con las lluvias de invierno y su refuerzo orográfico a barlovento de la cordillera de los Andes, explican la disminución anual media de sur a norte y de cordillera a mar, por último las fluctuaciones interanuales en la precipitación de la zona central de Chile están asociadas al ciclo ENOS, tal como los eventos de tormentas presentados en los años 1972, 1982, 1987, 1997 (Rutllant, 2004), es decir, el régimen de precipitaciones en Chile central, se produce por un debilitamiento del anticiclón subtropical que favorece la entrada de los sistemas frontales a latitudes medias que caracterizan el régimen de lluvias durante el invierno austral (Aceituno, 1988). Además del debilitamiento del anticiclón subtropical (Rutllant & Fuenzalida, 1991), se atribuye un aumento en la precipitación invernal en Chile central a un desarrollo de la fase cálida del ciclo ENOS (Rutllant, 2004).

La evolución del ciclo del ENSO, puede ser utilizado, mediante diferentes índices, en esta investigación se utiliza el SOI (Turner, 2004), los resultados demostraron que la presión atmosférica superficial en el sector oriental del océano pacífico, se presentó negativa y corresponde a etapa El Niño, mientras que si el índice SOI se presentó positivo, la presión superficial aumenta y con esto se tiene el fenómeno de La Niña (Maturana *et al.*, 2004).

El ENSO, tienen un impacto en la variabilidad interanual de las lluvias en Chile central, como detalla Montecinos & Aceituno (2003) y lo demilita hacia la región A entre los 30° y 35° latitud sur, además lo asocia a una fase negativa del SOI, en el trimestre de invierno (JJA). Las correlación entre el SOI y los montos de precipitaciones anuales, se asemejan a los expuestos por Aceituno (1988), donde las correlaciones en Chile central son negativas y alcanzan -0,45, con esto, la máxima incidencia el ciclo ENOS se alcanza en Chile central y se produce entre los meses de Julio-Agosto (Grimm *et al.*, 2000). Las condiciones húmedas que trae el ENSO son aplicada a la estación Meteorológica de Santiago, donde son altamente significantes y ocurridas en el trimestre JJA (Kiladis & Diaz, 1989). Además, sus efectos, en el litoral central de Chile son: Incremento en la precipitación, aumento de tormentas y mayor entrada de sistemas frontales (Marcos V., 1999).

Las correlaciones son altas con el SOI y en menor medida con la AAO, investigaciones muestran la relación entre estas dos teleconexiones, por medio de sus fases y dependencia en la variabilidad decadal, según Fogt & Bromwich (2006), las correlaciones altas ocurren cuando se da un ENSO fuerte y mayoritariamente en los meses de primavera y verano austral. Las correlaciones en Chile central, durante los meses de lluvia son mencionados

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

por Quintana & Aceituno (2012), donde una negativa AAO y SOI son correlacionados con la precipitación en la región comprendida entre los 30-42° latitud sur.

Existen correlaciones estadísticas significativas entre los tipos de climas y ciertos elementos del clima, no obstante, estos varían según la estación astronómica y la locación de la estación meteorológica. Respecto a la localización, la topografía juega un papel trascendental, en la determinación de la distribución geográfica de las condiciones climática de acuerdo al grado de exposición o refugio que la estación meteorológica posea, al igual que en la PI (Spellman, 2000), la influencia del relieve en el comportamiento de las precipitaciones en Chile central resulta ser considerable.

La aplicación de la clasificación sinóptica automática de J&C, se obtuvo en base al trabajo realizado por Sarricolea *et al.* (2014), a los 100 días más lluviosos, determinados a partir de una suma diaria de las 56 estaciones analizadas, los resultados indican que las circulaciones de mal tiempo: Suroeste, Oeste y Noroeste, se presentan en 37 días y son los más predominantes, pues acontecen en los meses invernales, otra circulación que se presenta con fuerza es la de tipo ciclónica, con 25 días en los meses invernales, asociados a frentes fríos. Las circulaciones atmosféricas ligadas a sistemas frontales más representativas en Chile central son: A, C, AS, AW, SE y S (Sarricolea *et al.*, 2011), los resultados analizados para los meses en que se presentan las precipitaciones en la zona (mayo-septiembre) fueron los advectivos puros (NW, W y SW), seguido por los ciclónicos C y finalmente los anticiclónicos A, los que son similares a los presentados por Sarricolea *et al.* (2014).

Los resultados realizados por Spellman (2000), a la PI, indican que en zonas como Gijón y San Sebastian, la presencia del relieve y la precipitación se presenta con clasificaciones NW y W, los cuales atribuyen más precipitación que los tipo C, ya que los primeros suelen estar acompañados de frentes fríos, asociados a mayores aumentos en los montos precipitados. En la zona central de Chile ocurre similar situación, ya que los días de mayor precipitación se presentan bajo la componente W.

La relación entre los tipos de J&C y las teleconexiones SOI, PDO y AAO, fueron correspondidas, pues se dio la situación prevista, en la que conjugaron un SOI negativo, PDO positiva y AAO negativa, sumado a eso una clasificación tipo Lamb AW, en un trimestre JJA. A partir de este análisis dentro de las 10 estaciones meteorológicas que presentaron un día de lluvia máximo por sobre los 160 mm, la teleconexión que más correlacionó fue el SOI negativo, seguido por una AAO negativa y termina con una PDO positiva, a su vez, la clasificación predominante fue la ciclónica (C), que se presentó entre los meses de mayo a junio. Los resultados de las correlaciones entre los tipos de Lamb y las teleconexiones, son coherentes con Sarricolea *et al.* (2014), pues las correlaciones, por ejemplo, son altas entre tipos ciclónicos y la teleconexión AAO, durante los meses fríos que posibilitan la entrada al continente de los sistemas frontales.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Conclusiones

Los test de homogeneidad, se aplicaron con el propósito de validar las series climáticas de cada estación meteorológica. En consecuencia, se determinó la fiabilidad de las series, para así, poder trabajarlas con la seguridad que sus cifras reflejan las tendencias climáticas propias del lugar donde están localizadas. Si bien, los resultados no fueron coincidentes entre las series que entrega cada estación meteorológica, pues algunas estaciones eran homogéneas en el test de Thom e inhomogéneas en el test de von Neumann que comprobó que, es la propia variabilidad climática la que determina el comportamiento de las estaciones meteorológicas sumado a algún otro factor humano que produce un cambio en la consistencia de los datos que cada estación posea en sus registros pluviométricos.

El régimen de las precipitaciones diarias en Chile central obtenidas a partir del cálculo del CI, ratifican que la zona posee una configuración similar a la de la PI, expuesta por Martín-Vide (2004), donde se producen CI altos en climas mediterráneos y valores moderados a bajos en climas templado lluviosos.

Producto de las configuraciones sinópticas y la latitud, que afectan las condiciones frontales que permiten las precipitaciones en la zona central del país, la distribución de los montos pluviométricos y su concentración queda controlada por distintos factores que actúan de modo multiescalar (Sarricolea *et al.*, 2013). Entre ellos se encuentran los factores geográficos que modifican regional y localmente las precipitaciones, de ellos se destaca la acción del relieve, pues genera un forzamiento orográfico. Con esto se establece que en Chile central presenta tres regiones climáticas generadas a partir del análisis de la precipitación diaria. Una de altas concentraciones ubicadas en la zonas litorales del país (CI= 0,69), otra de tipo intermedio preferentemente localizada en la depresión intermedia (CI = 0,59), zona de valles centrales y una de baja concentración emplazada en las vertientes occidentales de la cordillera de la Costa y de Los Andes (CI = 0,55).

El CI calculado a nivel de períodos, permite diferenciar las variaciones que pueda tener el índice, si se toman en cuenta dos períodos representativos, los cuales permiten dilucidar el comportamiento del CI a través de los años. Los resultados fueron consistentes, ya que el 55% de las estaciones meteorológicas aumentaron su CI, en cambio, se presentaron situaciones en las cuales el CI disminuyó y son el 34% , por último, el 11% de las estaciones meteorológicas mantuvieron su CI y no anotaron alzas considerables en sus valores.

Los aumentos considerables del CI, se logran en casi toda la latitud 33°S y sólo son interrumpidas por las estaciones Carmen de las Rosas, donde su CI desciende y Melipilla, la cual su CI se mantiene. La disminución del CI se da hacia la latitud 30°S, aunque se

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

presenta en toda el área del estudio, esto último al igual que el CI se mantiene en 6 estaciones distribuidas de forma latitudinal.

A partir de los análisis del PCI, se definieron tres patrones que se presentan en Chile central, los cuales reflejan la concentración anual de las precipitaciones en las distintas estaciones meteorológicas. Los tres gradientes que presenta el PCI, explican una parte relevante de los cambios espaciales de la precipitación, estos se pueden interpretar en términos de cambios en la circulación atmosférica y la trayectoria con la que cuentan los sistemas frontales provenientes del oeste o NW, causales de las precipitaciones en la zona central de Chile.

El coeficiente de variación, demostró ser un buen estimador de la variabilidad climática que poseen los observatorios, con esto se sostiene que las precipitaciones aumentan de norte a sur, además, el CV se comporta muy alto en zonas donde las precipitaciones son bajas y concentradas, como ocurre en las cercanías de La Serena y luego al sur el aumento de las precipitaciones hace disminuir los valores del CV.

Tanto el PCI como el CV disminuyen al sur, lo que refleja la irregularidad y alta estacionalidad de las precipitaciones en la parte norte de Chile central y una zona más húmeda con mayores precipitaciones en la zona centro sur.

Los análisis realizados indican una alta correlación del SOI con las precipitaciones en Chile central, durante los meses de mayo a septiembre, en los cuales se producen los mayores aportes de precipitaciones en la zona. Las correlaciones indicaron que cuando las teleconexiones reúnen la condición de SOI negativo, PDO positiva y AAO negativa, se generan los mayores montos precipitados, registrados en las estaciones ubicadas en torno a la latitud 33°S.

Cuando se presentan los eventos fuertes del ENSO, calculados por un SOI negativo, tiene una incidencia mayor en las precipitaciones, pues si se manifiesta esta teleconexión con un SOI por sobre -1,5 se considera fuerte y las precipitaciones tienden a aumentar sus montos en los meses donde los sistemas frontales tienen su entrada en el continente afectando la zona central del país dejando eventos de tormenta severos, que aportan montos que superan considerablemente las precipitaciones en un año normal.

La relación entre la clasificación de J&C y las precipitaciones máximas, fueron analizadas y arrojaron los resultados según lo considerado por Sarricolea *et al.* (2014), así se estableció en primera instancia, que aquellas circulaciones de componente oeste se dan más entre los meses analizados, que van desde mayo a octubre, es decir, estas situaciones ocurren en mayor medida en los días que presentan lluvia, para los observatorios analizados, ya que las grandes precipitaciones quedan catalogadas bajo una clasificación para el área comprendida

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

entre los 30-35° latitud sur, lo que resulta de un análisis de las presiones atmosféricas a nivel de superficie.

El tipo sinóptico que más se frecuenta entre las estaciones lluviosas, es el ciclónico (C), se presenta entre los meses de marzo a octubre, con énfasis en los invernales y se produce gracias al avance del CBPP a costa del APSO. El APSO afecta a la zona comprendida entre los 30° y 40° de latitud, y el CBPP se localiza entre los 45° y 55° de latitud, este último se desplaza a latitudes más tropicales en invierno y favorece el desarrollo de sistemas frontales que provocan precipitaciones en Chile central (Sarricolea *et al.*, 2014).

Las componentes oestes se dan en los meses que se presentan los sistemas frontales en Chile central, aquellas circulaciones, junto con el avance del CBPP a latitudes medias, se relacionan directa y significativamente con la AAO y con el SOI, acentuado la presencia de las precipitaciones que aportan grandes montos diarios a la zona central del país.

El gradiente altitudinal comprueba la hipótesis sobre la disminución de las concentraciones de precipitaciones, lo cual se debe a que por el forzamiento orográfico la distribución de las precipitaciones es más regular en zonas andinas, por sobre las irregulares ubicadas en valles y costa (Sarricolea *et al.*, 2013).

Por otro lado, se comprueba que a medida que se aleja de las latitudes medias, la irregularidad de las precipitaciones descende, ya que si se avanza hacia el sur, la precipitación pasa de un clima mediterráneo a uno templado húmedo con precipitaciones que se pueden encontrar a lo largo del año, es decir, se reportan más eventos de lluvia a mayor latitud, que en latitudes medias y bajas.

En síntesis, los resultados muestran valores del CI entre 0,47 a 0,75, los cuales disminuyen latitudinalmente de norte a sur. Se aprecia además, una disminución del CI hacia las cordilleras de la Costa y de los Andes, debido a que la precipitación es menos irregular que en el litoral y los valles centrales de Chile donde sí alcanza valores de CI más elevados. Por otro lado, se han calculado las correlaciones entre el CI, CV, PCI, siendo ellas altas y estadísticamente significativas.

Finalmente, el ENSO es el patrón de variabilidad de baja frecuencia que mejor explica los montos de precipitación y la concentración de las precipitaciones en Chile central, dando resultado de mayores precipitaciones en fase cálida (SOI negativo) y mayor irregularidad en fases frías del ENSO.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Bibliografía

- Aceituno, P. (1992). Anomalías de precipitación en Chile Central relacionadas con la Oscilación del Sur: Mecanismos asociados. 1-6.
- Aceituno, P. (1980). Relación entre la posición del anticiclón subtropical y la precipitación en Chile. *Terra Aridae* (2), 1-14.
- Aceituno, P. (1988). On the functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector, I: Surface Climate. *Mon. Weather Rev.*(116), 505-524.
- Alijani, B., O'Brien, J., & Yarnal, B. (2008). Spatial analysis of precipitation intensity and concentration in Iran. *Theoretical and Applied Climatology* (94), 107-124.
- Amador, j., & Alfaro, E. (2009). Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. *Red Iberoamericana de Economía Ecológica*, 11, 39-52.
- Amigo, J., & Ramírez, C. (1998). A bioclimatic classification of Chile: woodland communities in the temperate zone. *Plant Ecology* (136), 9-26.
- ArcGis Resources. (2013). *Ayuda de ArcGis 10.1*. Recuperado el 28 de julio de 2014, disponible en: <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#//009z00000078000000>
- Barry, R., & Chorley, R. (1999). *Atmósfera, tiempo y clima* (Séptima ed.). Barcelona: Omega S.A.
- Benhamrouche, A., & Martín-Vide, J. (2012). Avances Metodológicos en el análisis de la concentración diaraí en la España Peninsular. *Anales de Geografía*, 1 (32), 11-27.
- Bingham , C., & Nelson, L. (1981). An approximation for the distribution of the Von Neumann ratio. *Technometrics* (23), 285-288.
- Bridgman, H., & Oliver, J. (2006). *The global climate system: Patterns, Processes and Teleconnections*. (primera ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Bromberg, S., & Saavedra, P. (2004). Recordando a John von Neumann. *Miscelánea Matemática* (40), 95-114.
- Buishand, T. (1981). *The analysis of homogeneity of long-term rainfall records in the Netherlands*. Scientific Report 81-7, KNMI, De Bilt.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

CDAS-NCEP/NCAR, R. (2014). *Nomad3 at NCEP's Environmental Modeling Center*. Recuperado el 10 de julio de 2014, disponible en: http://nomad3.ncep.noaa.gov/cgi-bin/pdisp_6p_r1.sh?ctlfile=pgb.ctl&varlist=on&new_window=on&ptype=map&dir=

Climate Prediction Center, i. t. (2014). *National Weather Service. Climatic Prediction Center*. Recuperado el 19 de Mayo de 2014, disponible en: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensofaq.shtml#NINO

Cortesi, N., Gonzales-Hidalgo, J., Brunetti, M., & Martín-Vide, J. (2012). Daily precipitation concentration across Europe 1971-2010. *Natural Hazards and Earth System Sciences*(12), 2799-2810.

Coscarelli, R., & Caloiero, T. (2012). Analysis of daily and monthly rainfall concentration in Southern Italy (Catabria region). *Journal of Hydrology*(416-417), 145-156.

de Luis, M., González-Hidalgo, J., Brunetti, M., & Longares, L. (2011). Precipitation concentration changes in Spain 1946-2005. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*(11), 1259-2011.

Di Castri, F., & Hajek, E. (1976). *Bioclimatología de Chile*. Santiago: Vicerrectoría Académica, Universidad Católica de Chile.

Escobar, F., & Aceituno, P. (1998). Influencia del Fenómeno ENSO sobre la precipitación nival en el sector andino de Chile central durante el invierno. *Bull. Inst. Fr. études andines*, 753-759.

Espinoza, F. (Junio de 2006). *Centro de Información Sobre Desastres Y Salud*. Recuperado el 2014 de junio de 13, disponible en: <http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/Junio2006/CD2/pdf/spa/doc14418/doc14418-contenido.pdf>

Falvey, M., & Garreaud, R. (2007). Wintertime precipitation episodes in Central Chile: Associated meteorological conditions and orographic influences. *Journal of Hydrometeorology*, 8, 171-193.

Fernández García, A., Martín-Vide, J., Díaz Pérez, Y., & Mestre Barceló, A. (2003). Aplicación de los procesos sinópticos objetivos a la Península Ibérica en otoño. *Investigaciones Geográficas* (31), 37-65.

Fogt, R., & Bromwich, D. (2006). Decadal Variability of the ENSO Teleconnection to the High-Latitude South Pacific Governed by Coupling with the Southern Annular Mode. *Journal of Climate*, 19 (15), 979-997.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Fuenzalida. (1971). *Climatología de Chile*. Santiago: Publicación Interna de la Sección Meteorología Depto de Geofísica y Geodesia Universidad de Chile.

Fuenzalida, H., Aceituno, P., Garreaud, R., Rojas, M., & Falvey, M. (2006). *Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Informe final diciembre 2006*. Santiago: Departamento de Geofísica. Facultad de Ciencias. Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

García, E. (2003). Distribución de la precipitación en la República Mexicana. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. UNAM* (50), 67-76.

Garreaud, R. (1995). Configuraciones atmosféricas regionales durante grandes tormentas pluviales en Chile Central. *Meteorologica* (19), 73-81.

Garreaud, R. (2011). Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. *Tierra Adentro - INIA*(93).

Garreaud, R., & Rutllant, J. (1996). Análisis meteorológico de los aluviones de Antofagasta y Santiago de Chile en el periodo 1991-1993. *Atmósfera*(9), 251-271.

Garreaud, R., & Rutllant, J. (1997). Precipitación estival en los Andes de Chile Central: Aspectos climatológicos. *Atmósfera* (10), 191-211.

Gil Olcina, A. (2007). Mediteeraneidad y Subtropicalidad Climáticas. *Boletín de la A.G.E.* (44), 53-68.

Glantz, M. (1996). *Corrientes de Cambio: El impacto de "El Niño" sobre el clima y la sociedad* (Primera ed.). Valparaíso: Cambridge University Press.

González, J. C., De Luis, M., Stepánek, P., Raventós, J., & Cuadrat, J. M. (2002). Reconstrucción, estabilidad y proceso de homogenizado de series de precipitación en ambientes de elevada varibilidad pluvial. Albarracín: VII Reunión Nacional de Climatología.

Grimalt, M., Tomás, M., Alomar, G., Martín-Vide, J., & Moreno-García, M. (2013). Determination of the Jenkinson and Collison's weather types for the western mediterranean basin over the 1948-2009 period. Temporal analysis. *Atmósfera*, 1 (26), 75-94.

Grimm, A., Barros, V., & Doyle, M. (2000). Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climatw*, 13 (1), 35-58.

Guevara, J. M. (2008). El abc de los índices usados en la identificación y definición cuantitativa de El Niño - Oscilación del Sur (ENSO). *Terra*, 24 (35), 85-140.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Inzunza, J. (02 de enero de 2007). *Docencia Juan Inzunza*. Recuperado el 29 de mayo 2014, disponible en: <http://old.dgeo.udec.cl/~juaninzunza/docencia/biofisica/unidad5.pdf>

Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2013). *Resumen para responsables de políticas. En: Cambio climático 2013: Bases Físicas. Contribución del grupo de trabajo I al Quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Irmak, A., Ranade, P., Marx, D., Irmak, S., Hubbard, K., Meyer, G., & Martin, D. (2010). Spatial Interpolation of Climate Variables in Nebraska. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 53 (6), 1759-1771.

Jaksic, F. (1998). Las múltiples facetas del fenómeno El niño/Oscilación del Sur. *Ambiente y Desarrollo*, XIV (2), 53-61.

Jenkinson, A., & Collison, P. (1977). *An initial climatology of gales over the North Sea*. Meteorological Office, London.: Climatology Branch Memorandum, 62,.

Jianga, N., Haya, J., & Fisherb, G. (2006). Classification of New Zealand Synoptic Weather Types and Relation to the Southern Oscillation Index. *Weather and Climate* (52), 43-70.

Jiménez, M. (2013). *Instituto Nacional de Pesca*. Recuperado el 13 de junio de 2014, disponible en: <http://www.inapesca.gob.mx/portal/documentos/publicaciones/BOLETINES/hidroclimatico/INDICES-CLIMATICOS.pdf>

Kiladis, G., & Diaz, H. (1989). Global climatic anomalies associated with extreme in the southern Oscilation. *Journal Of Climate*, 2, 1069-1090.

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorologische Zeitschrift*, 3 (15), 259-263.

Lamb, H. (1972). *British Isles weather types and a register of daily sequence of circulation patterns 1861 - 1971*. London: Geophysical Memoir, 116, HMSO.

Leander, R., & Buishand, T. (2004). *Rainfall generator for the Meuse Basin*. Lelystad: KNMI-publication.

Li, X., Jiang, F., Li, L., & Wang, G. (2011). Spatial and temporal variability of precipitation concentration index, concentration degree and concentration period in Xinjiang, China. *International Journal of Climatology* (31), 1679-1693.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

- Llop Garau, J., & Alomar Garau, G. (2012). Clasificación sinóptica automática de Jenkinson y Collison para los días de precipitación mayor o igual a 200 mm en la isla de Mallorca. *Territoris* (8), 143-125.
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2006). Los límites del clima mediterráneo en Chile. *Chagual* (4), 64-69.
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2006). *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile* (Primera ed.). Santiago: Universitaria.
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2012). Variabilidad climática y bioclimas de la Región de Valparaíso. *Investigaciones Geográficas*, 1 (44), 41-56.
- Ly, S., Charles, C., & Degré, A. (2013). Different methods for spatial interpolation of rainfall data for operational hydrology and hydrological modeling at watershed scale. A review. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 12 (2), 92-406.
- Ly, S., Charles, C., & Degré, A. (2011). Geostatistical interpolation of daily rainfall at catchment scale: the use of several variogram models in the Ourthe and Ambleve catchments, Belgium. *Hydrology and Earth System sciences* (15), 2259-2274.
- Marcos V., Ó. (1999). Evolución en el estudio del fenómeno ENSO (El Niño-Oscilación del Sur): De anomalía <<local>>a la predicción de variaciones climáticas globales. *Investigaciones Geográficas* (21), 5-20.
- Martín-Vide, J. (1999). *Fundamentos de climatología analítica* (Primera reimpresión ed.). Madrid: Síntesis.
- Martín-Vide, J. (2003). *El Tiempo y El Clima* (primera ed.). Barcelona: Rubes.
- Martín-Vide, J. (2004). Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in Peninsular Spain. *International Journal of Climatology* (24), 959-971.
- Martín-Vide, J. (2005). *Los Mapas del Tiempo* (primera ed.). Barcelona: Davinci.
- Martín-Vide, J. (2011). *Estructura temporal fina y patrones espaciales de la precipitación en la España Peninsular* (primera ed.). Barcelona: Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona.
- Martín-Vide, J. (2013). Concentración diaria de la precipitación en la España Peninsular. Un mapa de riesgo de precipitaciones torrenciales. En C. García-Legaz, & F. Valero (Edits.), *Feómenos Meteorológicos Adversos en España* (pág. 373). Madrid: A. Madrid Vicente.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

- Martín-Vide, J., Prohom, M., Bohigas, M., & Peña, J. C. (2001). Índices de irregularidad temporal y dimensión fractal de la precipitación anual en España. *Publicaciones de la asociación Española de climatología (AEC)* (Serie N°2), 157-166.
- Mason, S., & Goddard, L. (2001). Probabilistic Precipitation Anomalies Associated with Enso. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82 (4), 619-638.
- Maturana, J., Bello, M., & Manley, M. (2004). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. *El Niño-La Niña 1997-2000. Sus efectos en Chile, Cona*, 13-27.
- Mauro, Á. (2002). *El sistema climático* (primera ed.). Valparaíso: Universidad de Valparaíso.
- Medina, F. (2001). *Consideraciones sobre el índice de Gini para medir la concentración del ingreso*. Santiago, Chile: Publicaciones de las Naciones Unidas.
- Mitas, L., & Mitasova, H. (1999). Spatial interpolation. *Geographical information system*, 481-492.
- Monjo, R. (2009). El índice n de la precipitación intensa. *Tethys* (6), 1-13.
- Montealegre, J. E., & Pabon, J. D. (2000). La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña-Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología Colombiana* (2), 7-21.
- Montecinos, A., & Aceituno, P. (2003). Seasonality of the ENSO related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies. *Journal of Climate*, 16 (15), 281-296.
- Montecinos, A., Díaz, A., & Aceituno, P. (2000). Seasonal Diagnostic and Predictability of Rainfall in Subtropical South America based on tropical Pacific SST. *Journal of Climate* (13), 746-758.
- Olascoaga, M. (1950). Some aspects of Argentine rainfall. *Tellus*, 2 (4), 312-318.
- Oliver, J. (1980). Monthly precipitation distribution: A comparative index. *Professional Geographer*, 32 (3), 300-309.
- OMM, O. (1994). *Guía de las prácticas hidrológicas* (quinta ed.). OMM-N° 168.
- Pérez, S., Sierra, E., Massobrio, M., & Momo, F. (2009). Análisis fractal de la precipitación anuañ en el este de la provincia de La Pampa, Argentina. *Revista de Climatología*, 9, 25-31.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

- Pesquer, L., Masó, J., & Ponds, X. (2007). Integración SIG de regresión multivariante, interpolación de residuos y validación para la generación de rásters continuos de variables meteorológicas. *Revista de Teledetección* (28), 69-76.
- Pizarro, R., Cornejo, F., González, C., & Macaya, K. (2008). Análisis del comportamiento y agresividad de las precipitaciones, en la zona central de Chile. *Ingeniería hidráulica en México*, 23 (2), 91-109.
- Quintana, J., & Aceituno, P. (2012). Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43° S. *Atmósfera*, 25 (1), 1-22.
- Quintanilla, V. (1974). La carta bioclimática de Chile Central. *Revista Geográfica de Valparaíso* (5), 33-58.
- Ramos, M., & Martínez-Casnovas, J. (2006). Trends in precipitation concentration and extremes in the mediterranean Penedés-Anoia region, NE Spain. *Climatic Change*, 457-474.
- Rascón, O. (2012). *Pluviometría comparativa de seis localidades de la república Mexicana* (Fac. de Instrumentación Electrónica y Ciencias Atmosféricas ed.). Veracruz: Universidad Veracruzana.
- Rivas-Martínez, S. (1993). Clasificación Bioclimática de la tierra. *Folia Botánica Matritensis* (10), 1-23.
- Rivas-Martínez, S. (2004). *Global bioclimatics*. Madrid: Phytosociological Research Center.
- Rodríguez, R., Llasat, M., & Martín-Vide, J. (1996). Revision de los criterios de homogeneidad aplicados a variables meteorológicas. *Modelos y Sistemas de Información en Geografía*, 98-112.
- Romero, H. (1985). *Geografía de Chile: Geografía de los Climas*. Santiago: Instituto Geográfico Militar.
- Romero, H., & Mendonça, M. (2011). Ondas de frío registradas en invierno de 2010: Necesidad de una perspectiva regional integrada para la climatología Latinoamericana. *Revista Geográfica de América Central* (Número Especial), 1-13.
- Ropelewski, C., & Jones, P. (1987). An extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index. *Monthly weather Review* (115), 2161-2165.
- Ropelewski, C., & Halpert, M. (1989). Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 2, 268-284.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

- Ruiz-Maya, L. (1978). *Sobre la metodología del Índice de Gini* (primera ed.). Barcelona: Centro de Estudios Económicos y Sociales; Universidad de Barcelona. Departamento de Teoría Económica.
- Rutllant, J. (2004). Aspectos de la circulación atmosférica de gran escala asociada al ciclo ENOS 1997-1999 y sus consecuencias en el régimen de precipitación en Chile central. *El Niño-La Niña 1997 - 2000 Sus efectos en Chile*, 61-76.
- Rutllant, J., & Fuenzalida, H. (1991). Synoptic aspect of the Central Chile Rainfall variability associated with the Southern Oscillation. *Int. J. Climatol.*(11), 63-76.
- Sahin, S., & Kerem, H. (2010). Homogeneity analysis of Turkish meteorological data set. *Hydrological processes*, 1-12.
- Sánchez-Lorenzo, A., & Martín-Vide, J. (2006). Distribución Espacial de la concentración pluviométrica diaria en la Península Ibérica.
- Sanz Donaire, J. (2012). Las series anuales de precipitación más largas de Chile: Estios y enseñanzas. *Estudios Geográficos*, 625-656.
- Sarachik, E., & Cane, M. (2010). *The El Niño-Southern Oscillation Phenomenon*. New York: Cambridge University Press.
- Sarricolea, E. P., Meseguer-Ruiz, Ó., & Martín-Vide, J. (2014). Variabilidad y tendencias climáticas en Chile central en el período 1950-2010 mediante la determinación de los tipos sinópticos de Jenkinson y Collison . *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* (64), 227-247.
- Sarricolea, P. M.-R.-V. (2012). *Tipos sinópticos de Jenkinson y Collison (J&C) en Chile central (1950-2010)*. Recuperado el 02 de Junio de 2014, disponible en: http://www.ub.edu/gc/English/JC_Chile.htm
- Sarricolea, P., & Martín-Vide, J. (2012). Distribución Espacial de las precipitaciones diarias en Chile mediante el índice de concentración a resolución de 1 mm entre 1965-2005. (págs. 631-639). Salamanca: Asociación Española de Climatología .
- Sarricolea, P., Herrera, M., & Araya, C. (2013). Análisis de la concentración diaria de las precipitaciones en Chile central y su relación con la componente zonal (subtropical) y meridiana (orográfica). *Investigaciones Geográficas* (45), 37-50.
- Sarricolea, P., Meseguer-Ruiz, O., & Martín-Vide, J. (2011). Aplicación de la clasificación automática de Jenkinson y Collison a Chile Central. (p.10). Santiago: Conferencia Geográfica Regional de la Unión Geográfica Internacional (UGI) .

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Schultz, R., Maharaj, R., Lynch, S., Howe, B., & Melvil-Thomsam, B. (1997). *South African atlas of agrohydrology and climatology. Section 4 precipitation*. Recuperado el 26 de 07 de 2014, disponible en: <http://amanzi.beeh.unp.ac.za/ageng/users/lynch/atlas/htm>

Shi, P., Qiao, X., Chen, X., Zhou, M., Qu, S., Ma, X., & Zhang, Z. (2014). Spatial distribution and temporal trends in daily and monthly precipitation concentration indices in the upper reaches of the Huai River, China. *Stoch Environ Res Risk Asses* (28), 201-212.

Shi, W., Yu, X., Liao, W., Wang, Y., & Jia, B. (2013). Spatial an temporal variability of daily precipitation concentration in the Lancang River basin, China. *Journal of Hidrology* (495), 197-207.

Spellman, G. (2000). The application of an objective weather-typing system to the Iberian Peninsula. *Weather*, 55, 375-385.

Strahler, A., & Strahler, A. (1997). *Geografía Física*. Barcelona: Ediciones Omega.

Thom, H. (1966). *Some methods of climatological analysis* (Technical Note N°81 ed.). World Meteorological Organization.

Trenberth, K. (1997). The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78 (12), 2771-2777 .

Turner, J. (2004). Revier The El Niño-Southern Oscillation and Antartica. *International Journal of Climatology* (24), 1-31.

Uribe, J., Cabrera, R., De la Fuente, A., & Paneque, M. (2012). *Atlas bioclimático de Chile* (primera ed.). Santiago, Chile.

Vargas, G., Ortlieb, L., & Rutllant, J. (2000). Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Osliación del Sur. *Revista Geológica de Chile*, 1-28.

Viale, M., & Garreaud, R. (2014). Summer precipitation events over the western slope of the subtropical Andes. *Monthly Weather Review*, 142, 1074-1092.

Von Neumann, J. (1941). Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance. *Annals of Mathematical Statistics* (13), 367-395.

World Meteorological Organization (WMO). (1966). *Climatic Change* (Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization (WMO) ed.). WMO Technical Note, No. 79.

World Meteorological Organization (WMO). (1983). *Guido to Climatological Practices* (segunda ed.). Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization.

Configuración espacial, variabilidad y tendencias del índice de concentración de las precipitaciones (CI) en Chile central

Xu, L., Zhou, H., Liang, C., DU, L., & Li, H. (2010). Spatial and temporal variability of annual and seasonal precipitation over the desert region of China during 1951-2005. *Hydrological Processes* (24), 2947-2959.

Zhang, Q., Xu, C.-y., Gemmer, M., Chen, Y., & Liu, C. (2009). Changing properties of precipitation concentration in the Pearl River basin, China. *Stoch Environ Res Risk Assess* (23), 377-385.

Zubieta, R., & Saavedra, M. (2009). Distribución espacial del índice de concentración de precipitación diaria en los Andes centrales Peruanos: Valle del río Mantaro. *Tecnia* (19), 13-22.