

Análisis de la concentración diaria de las precipitaciones en Chile central y su relación con la componente zonal (subtropicalidad) y meridiana (orográfica)¹

Pablo Sarricolea Espinoza² psarricolea@uchilefau.cl; **Mariajosé Herrera Ossandón³** y **Cristóbal Araya Escobar⁴**

RESUMEN

Este artículo analiza la distribución espacial y temporal de la irregularidad de las precipitaciones diarias en una franja zonal de la región central de Chile (32°50'S-34°12'S), mediante el índice de concentración (CI). En total se calculó el CI para un total de 16 estaciones meteorológicas, en el período 1965-2010. El propósito fue generar una regionalización climática basada en un índice diario que mide la irregularidad de las precipitaciones. Teóricamente, se han ensayado dos hipótesis: la primera propone que el CI disminuye de Norte-Sur, asociado a la componente Subtropicalidad; la segunda señala el efecto que tiene la orografía sobre el CI, provocando una reducción del índice desde la depresión intermedia a la Cordillera de los Andes, con un gradiente decreciente Oeste-Este. Los resultados alcanzados no dan cuenta de una reducción hacia el sur como era de esperar, pero sí confirma de manera clara la disminución del CI hacia la Cordillera de la Costa y los Andes.

Palabras clave: Clima Subtropical, Cordillera de los Andes, Índice de Concentración, precipitación diaria.

Analysis of the daily concentration precipitation in central Chile and its relation to zonal (sub-tropicality) and meridian (orographic) components

ABSTRACT

This paper analyzes the spatial and temporal distribution of irregularity of daily rainfall in central Chile (32° 50'S - 34°12 'S), using the concentration index (CI). The concentration index was calculated for a total of 16 meteorological stations, and for the period 1965 to 2010. The purpose was to generate a climate regionalization based on a daily rate which measures the erratic rainfall. Theoretically two hypotheses were tested: the first proposes that CI decreases from north to south associated with the subtropical component, the second hypothesis is that the effect of topography on CI, causing a reduction in the rate from the intermediate depression to the Andes and a west-east decreasing gradient. The results obtained do not account for a reduction to the south as expected, but they confirmed a significant CI decreased to the coastal range and the Andes.

Keywords: Andes mountain range, concentration index, daily precipitation, subtropical climate.

Recibido el 31 de mayo de 2013, aceptado el 12 de julio de 2013.

¹ Proyecto U-Apoya CSSOC-2012-292.

² Departamento de Geografía, Universidad de Chile, Chile. Portugal 084, Santiago, RM, Chile.

³ Departamento de Geología, Universidad de Chile.

⁴ Escuela de Geografía, Universidad de Chile.

INTRODUCCIÓN

Un asunto que ha acaparado gran atención en los estudios de Climatología analítica es la casi exclusiva orientación a establecer medias mensuales y anuales, dejando fuera la información diaria (e incluso horaria). En este sentido, la información diaria posee una gran potencialidad para caracterizar las precipitaciones, pues este meteoro es de carácter discreto y la distribución de frecuencia que poseen los montos diarios de precipitación son perfectamente ajustables a distribuciones exponenciales negativas (BROOKS & CARRUTHERS 1953), debido a que existen muchos días con precipitaciones inferiores a 1 mm y pocos días que presentan precipitaciones altas (MARTÍN-VIDE 2004), descendiendo la frecuencia de forma exponencial. No obstante, realizar análisis con series diarias (y de cualquier variable meteorológica), representa un desafío en términos de acceso a bases de datos y de magnitud de los procesamientos, y de capacidad de síntesis.

Basado en el coeficiente de Gini, y la función exponencial negativa que describen las precipitaciones, MARTÍN-VIDE (1984) formuló el Índice de Concentración (CI en adelante), específicamente, para el estudio de la irregularidad de las precipitaciones diarias del litoral mediterráneo español. El CI es un estimador del grado de agresividad o torrencialidad pluviométrica (MARTÍN-VIDE 2003), siendo explicativo también de procesos de inestabilidad de laderas (ZUBIETA & SAAVEDRA 2009), riesgos de inundación y sequía (MARTÍN-VIDE 2004). Se define como “regularidad diaria de las precipitaciones” o equidistribución, cuando los montos totales de precipitación acumulada coinciden con la distribución acumulada de días de lluvia (el CI es igual a cero), siendo la irregularidad, todas las combinaciones posibles en que la distribución se aleja de la equidistribución. El CI como indicador sintético, está

construido por todos los eventos de precipitación, y no analiza en detalle la meteorología que las originan, por lo que no se hará referencia a casos particulares.

Los resultados del índice de concentración obtenidos por MARTÍN-VIDE (1984) han sido ampliados a toda la Península Ibérica (MARTÍN-VIDE 2004; SÁNCHEZ-LORENZO & MARTÍN-VIDE 2006), revelando una alta concentración diaria de las precipitaciones en la vertiente oriental de la Península Ibérica (0,63 a 0,70), siendo las concentraciones moderadas (<0,58), en el resto del territorio, lo cual tiene como explicación dos componentes espaciales: la subtropicalidad y el Mar Mediterráneo como condicionantes del CI. Además, se ha analizado el índice de concentración a nivel de distintas clases, desde 1 mm, y recientemente en clases de 5 y 10 mm (BENHAMROUCHE & MARTÍN-VIDE 2012), obteniendo en todos los casos, resultados similares y mejores ajustes al usar clases de 1 mm.

En Europa el CI se ha calculado para una serie de 530 estaciones meteorológicas (CORTESE *et al.* 2012), mostrando valores del índice entre 0,51 y 0,72. El patrón espacial hallado indica que existe gradiente de aumento de la concentración desde el Noroeste al Sureste (excluida Grecia y Turquía) siendo el litoral Mediterráneo Francés y Catalán, los que poseen los mayores valores del CI, y, quedando el Reino Unido, con los valores más bajos. Este patrón se repite en todas las estaciones del año, exceptuando el trimestre estival, el cual exhibe un patrón Norte-Sur.

Para Chile, a partir de los resultados obtenidos para la Península Ibérica (MARTÍN-VIDE 2004) y Europa (CORTESE *et al.* 2012), es posible esperar que, en las regiones que poseen un clima de carácter mediterráneo las concentraciones han de alcanzar valores altos (CI>0,63), disminuyendo hacia el sur, donde

el CI deberá ser más bien modesto ($CI < 0,60$), tal como han establecido SARRICOLEA & MARTÍN-VIDE (2012) a partir de 17 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo de Chile.

A partir de SARRICOLEA & MARTÍN-VIDE (2012), en Chile centro-sur, las máximas concentraciones (e irregularidad) se alcanzan en La Serena ($CI = 0,76$), y las mínimas en Puerto Montt ($CI = 0,56$), dejando de manifiesto el gradiente Norte-Sur o Subtropical-Templado. Además, si se divide la serie en dos (1965-1984 y 1985-2005) se aprecia que efectivamente la concentración de las precipitaciones se ha incrementado en el último sub-período. En este sentido, y en el contexto de Cambio Climático Global, KARL *et al.* (2008) estiman que van a aumentar las lluvias intensas y se reducirán las precipitaciones suaves, con lo cual, se espera que la concentración de las precipitaciones se agudice.

Sin embargo, sólo considerando las estaciones principales de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y los resultados de la Península Ibérica, no se puede concluir y estimar sobre los posibles valores del Índice de Concentración hacia el interior de Chile central, pues la compleja orografía modifica los patrones de precipitación de manera significativa, aumentando bajo su influencia la cantidad registrada de lluvia, pues en la zona costera se puede registrar la mitad de los montos precordilleranos, tal como ocurrió en el evento acontecido entre el 25 y 28 de mayo de 2008 en Chile central (BARRETT *et al.* 2009), producto que la vaguada en altura y la Cordillera de los Andes, provocaron un bloqueo del flujo de la baja tropósfera. Así, con gradiente orográfico en sentido meridiano, de Oeste-Este, las características mediterráneas son reemplazadas por un clima de montaña, más frío, y que además, acentúa la convección de masas de aire por forzamiento orográfico, provocando,

en algunas laderas, mayores montos de precipitación. Investigaciones del CI en regiones montañosas de China (LI *et al.* 2011) demuestran para Xinjiang (que posee las mayores diferencias del mundo entre el lugar más bajo y el más elevado, de los -156 a los 8.058 m.s.n.m.), que los máximos IC se alcanzan con precipitaciones anuales modestas (menores a 81 mm), y altitudes entre 800 y 1.500 m. También en Perú, específicamente en el Valle del Mantaro (ZUBIETA & SAAVEDRA 2009), que se localiza entre los 3.186 y 4.510 m.s.n.m., se aprecia que el CI disminuye con la altura, lo cual se relaciona con precipitaciones menos convectivas, el flujo cálido y húmedo del Amazonas y la exposición de laderas.

Por lo tanto, se espera que mediante las 16 estaciones meteorológicas elegidas en Chile central, sea posible encontrar patrones que expliquen la distribución del CI, y estimar en qué medida sus valores se ajustan a las componentes subtropicalidad y orográfica. No es objeto de estudio las relaciones entre las precipitaciones y las teleconexiones, ni tampoco caracterizar días de precipitación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Esta parte de Chile central ($32^{\circ}50'S-34^{\circ}12'S$) que se presenta en la figura 1, se caracteriza por condiciones semiáridas, con precipitaciones anuales que en promedio no superan 350 mm (RUTLLANT & FUENZALIDA 1991), y de una marcada estacionalidad, pues gran parte de las precipitaciones se registran durante los meses de invierno (abril a septiembre). Según la clasificación de Köppen-Geiger (KOTTEK *et al.* 2006) se presentan tres regiones climáticas en el área de estudio, clima mediterráneo de verano seco de carácter cálido y suave (Csa y Csb), clima templado frío de precipitaciones invernales

(Csc) y Clima frío de altura (Eth). Además, es posible distinguir tres grandes unidades geomorfológicas (LUEBERT & PLISCOFF 2012): la Vertiente occidental de la Cordillera de la Costa (incluyendo las planicies litorales), la Depresión intermedia (que incluye la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa) y la Vertiente occidental de la Cordillera de los Andes. De este modo, la compleja fisiografía de esta región, modifica los montos y tipos de precipitación, destacando los tipos de génesis frontal y orográfica.

Materiales

Se trabajó con un total de 16 estaciones meteorológicas, distribuidas entre las regiones de Valparaíso, Metropolitana y del General Libertador Bernardo O'Higgins, y para un período máximo de 46 años (1965 a 2010) y a nivel diario (Fig. 1). 14 estaciones corresponden a la Dirección General de Aguas (DGA) y las 2 estaciones restantes son de la DMC, tal como se observa en la Tabla 1.

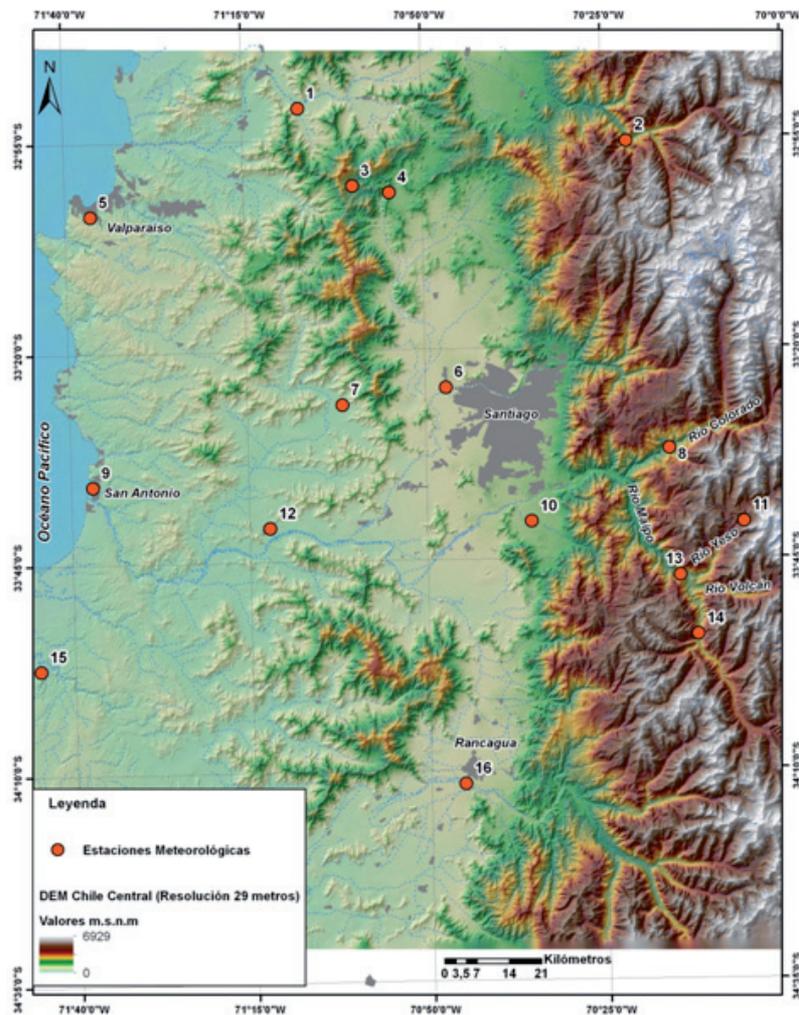


Fig. 1. Localización de las estaciones meteorológicas en el área de estudio. Los nombres de las estaciones aparecen en la Tabla 1 según el número.

Fig. 1. Location of meteorological stations in study area. The names of the meteorological stations are shown in Table 1 according to the number.

TABLA 1. ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONSIDERADAS, SEGÚN LOCALIZACIÓN, PRECIPITACIONES, LONGITUD DE LA SERIE DIARIA, AÑOS Y FUENTE. (+) FALTA AÑO 1976 (++) FALTAN AÑOS 1979 Y 1996 (*) FALTA AÑO 1984 (#) FALTA AÑO 1972.

TABLE 1. METEOROLOGICAL STATIONS CONSIDERED, BY LOCATION, PRECIPITATION, LENGTH OF THE DAILY SERIES, YEARS AND SOURCE. (+) 1976 MISSING (++) MISSING 1979 AND 1996 (*) 1984 MISSING) (#) MISSING 1972.

N°	Estaciones	Lat. S	Lon. W	Alt. (m)	P (mm)	Serie	Años	Fuente
1	Estero Rabuco	-32,9	-71,1	300	393	1965-2010++	44	DGA
2	Riecillos	-32,9	-70,4	1.290	504	1965-2010	46	DGA
3	Caleu	-33,0	-71,0	1.120	539	1965-2010+	45	DGA
4	Rungue Embalse	-33,0	-70,9	700	356	1965-2010	46	DGA
5	Valparaíso	-33,1	-71,6	41	412	1965-2005	41	DMC
6	Santiago	-33,4	-70,8	520	330	1965-2005	41	DMC
7	Los Panguiles	-33,4	-71,0	190	350	1981-2010	30	DGA
8	Bocatoma Maitenes	-33,5	-70,3	1.143	361	1988-2010	23	DGA
9	San Antonio	-33,6	-71,6	80	397	1971-2010+	39	DGA
10	Pirque	-33,7	-70,6	659	415	1972-2010	39	DGA
11	El Yeso Embalse	-33,7	-70,1	2.575	568	1965-2005#	40	DGA
12	Melipilla	-33,7	-71,2	170	380	1976-2010	37	DGA
13	San Gabriel	-33,8	-70,2	1.266	645	1978-2010	33	DGA
14	Las Melosas	-33,9	-70,2	1.527	726	1965-2003*	38	DGA
15	Rapel	-34,0	-71,7	16	544	1965-2010	46	DGA
16	Rancagua	-34,2	-70,8	515	433	1979-2010	32	DGA

En la Tabla 1 se aprecia que las estaciones consideradas. Se localizan entre los 16 a los 2.575 m.s.n.m. De ellas, la estación de Santiago (Quinta Normal) presenta los valores promedios más bajos de precipitación, y la estación Las Melosas el máximo pluviométrico.

Procedimientos metodológicos

Para la obtención del Índice de Concentración de las estaciones, se ha trabajado con series a resolución diaria. A partir de la base de datos, se han agrupado las precipitaciones en clases

de 1 mm, y se ha procedido a contar el número de días de lluvia de cada clase (Tabla 2). 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. En concreto, el CI se calcula como la proporción de la citada área bajo la diagonal ($S^2/5.000$), y para obtenerla se debe conocer el área inferior a la curva exponencial (A^2). Dicho ajuste exponencial relaciona el porcentaje de días de lluvia y sus totales, ambos acumulados. En la figura 2 se puede ver geoméricamente la expresión del CI.

TABLA 2. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS EN CLASES DE 1 MM, FRECUENCIAS PORCENTUALES ACUMULADAS DE DÍAS (X) Y PORCENTAJES DE PRECIPITACIÓN CORRESPONDIENTES (Y) PARA BOCATOMA LOS MAITENES (1988-2010).

TABLE 2. FREQUENCY DISTRIBUTION IN 1 MM CLASSES, RELATIVE CUMULATIVE FREQUENCIES X AND CORRESPONDING PERCENTAGES OF THE TOTAL PRECIPITATION Y IN BOCATOMA LOS MAITENES (1988-2010).

Clases	Marca de clase	ni	$\sum ni$	pi	$\sum pi$	$\sum ni (\%) = X$	$\sum pi (\%) = Y$
0,1 - 0,9	0,5	43	43	21,5	21,5	6,7	0,3
1,0 - 1,9	1,5	53	96	79,5	101,0	15,0	1,2
2,0 - 2,9	2,5	46	142	115,0	216,0	22,2	2,5
3,0 - 3,9	3,5	44	186	154,0	370,0	29,1	4,4
4,0 - 4,9	4,5	43	229	193,5	563,5	35,8	6,6
5,0 - 5,9	5,5	35	264	192,5	756,0	41,3	8,9
6,0 - 6,9	6,5	28	292	182,0	938,0	45,7	11,1
7,0 - 7,9	7,5	28	320	210,0	1.148,0	50,1	13,5
8,0 - 8,9	8,5	23	343	195,5	1.343,5	53,7	15,8
9,0 - 9,9	9,5	20	363	190,0	1.533,5	56,8	18,1
10,0 - 10,9	10,5	21	384	220,5	1.754,0	60,1	20,7
11,0 - 11,9	11,5	9	393	103,5	1.857,5	61,5	21,9
12,0 - 12,9	12,5	19	412	237,5	2.095,0	64,5	24,7
13,0 - 13,9	13,5	16	428	216,0	2.311,0	67,0	27,2
14,0 - 14,9	14,5	15	443	217,5	2.528,5	69,3	29,8
15,0 - 15,9	15,5	9	452	139,5	2.668,0	70,7	31,4
16,0 - 16,9	16,5	16	468	264,0	2.932,0	73,2	34,5
17,0 - 17,9	17,5	14	482	245,0	3.177,0	75,4	37,4
18,0 - 18,9	18,5	11	493	203,5	3.380,5	77,2	39,8
19,0 - 19,9	19,5	10	503	195,0	3.575,5	78,7	42,1
20,0 - 20,9	20,5	6	509	123,0	3.698,5	79,7	43,6
21,0 - 21,9	21,5	9	518	193,5	3.892,0	81,1	45,9
22,0 - 22,9	22,5	6	524	135,0	4.027,0	82,0	47,4
23,0 - 23,9	23,5	6	530	141,0	4.168,0	82,9	49,1
24,0 - 24,9	24,5	12	542	294,0	4.462,0	84,8	52,6
25,0 - 25,9	25,5	4	546	102,0	4.564,0	85,4	53,8
26,0 - 26,9	26,5	7	553	185,5	4.749,5	86,5	56,0
27,0 - 27,9	27,5	5	558	137,5	4.887,0	87,3	57,6
28,0 - 28,9	28,5	5	563	142,5	5.029,5	88,1	59,3
29,0 - 29,9	29,5	1	564	29,5	5.059,0	88,3	59,6
30,0 - 30,9	30,5	4	568	122,0	5.181,0	88,9	61,0
31,0 - 31,9	31,5	4	572	126,0	5.307,0	89,5	62,5
32,0 - 32,9	32,5	3	575	97,5	5.404,5	90,0	63,7
33,0 - 33,9	33,5	3	578	100,5	5.505,0	90,5	64,9
34,0 - 34,9	34,5	1	579	34,5	5.539,5	90,6	65,3
35,0 - 35,9	35,5	3	582	106,5	5.646,0	91,1	66,5
36,0 - 36,9	36,5	1	583	36,5	5.682,5	91,2	67,0
37,0 - 37,9	37,5	1	584	37,5	5.720,0	91,4	67,4
38,0 - 38,9	38,5	6	590	231,0	5.951,0	92,3	70,1
40,0 - 40,9	40,5	3	593	121,5	6.072,5	92,8	71,5
41,0 - 41,9	41,5	1	594	41,5	6.114,0	93,0	72,0
42,0 - 42,9	42,5	3	597	127,5	6.241,5	93,4	73,5
43,0 - 43,9	43,5	4	601	174,0	6.415,5	94,1	75,6

Clases	Marca de clase	ni	$\sum ni$	pi	$\sum pi$	$\sum ni (\%) = X$	$\sum pi (\%) = Y$
44,0 - 44,9	44,5	1	602	44,5	6.460,0	94,2	76,1
45,0 - 45,9	45,5	5	607	227,5	6.687,5	95,0	78,8
46,0 - 46,9	46,5	2	609	93,0	6.780,5	95,3	79,9
47,0 - 47,9	47,5	4	613	190,0	6.970,5	95,9	82,1
48,0 - 48,9	48,5	3	616	145,5	7.116,0	96,4	83,8
49,0 - 49,9	49,5	2	618	99,0	7.215,0	96,7	85,0
50,0 - 50,9	50,5	8	626	404,0	7.619,0	98,0	89,8
56,0 - 56,9	56,5	1	627	56,5	7.675,5	98,1	90,4
57,0 - 57,9	57,5	1	628	57,5	7.733,0	98,3	91,1
59,0 - 59,9	59,5	2	630	119,0	7.852,0	98,6	92,5
61,0 - 61,9	61,5	1	631	61,5	7.913,5	98,7	93,2
63,0 - 63,9	63,5	1	632	63,5	7.977,0	98,9	94,0
67,0 - 67,9	65,5	1	633	67,5	8.044,5	99,1	94,8
68,0 - 68,9	68,5	3	636	205,5	8.250,0	99,5	97,2
70,0 - 70,9	77,5	1	637	70,5	8.320,5	99,7	98,0
80,0 - 80,9	85,5	1	638	80,5	8.401,0	99,8	99,0
86,0 - 86,9	93,5	1	639	86,5	8.487,5	100,0	100,0

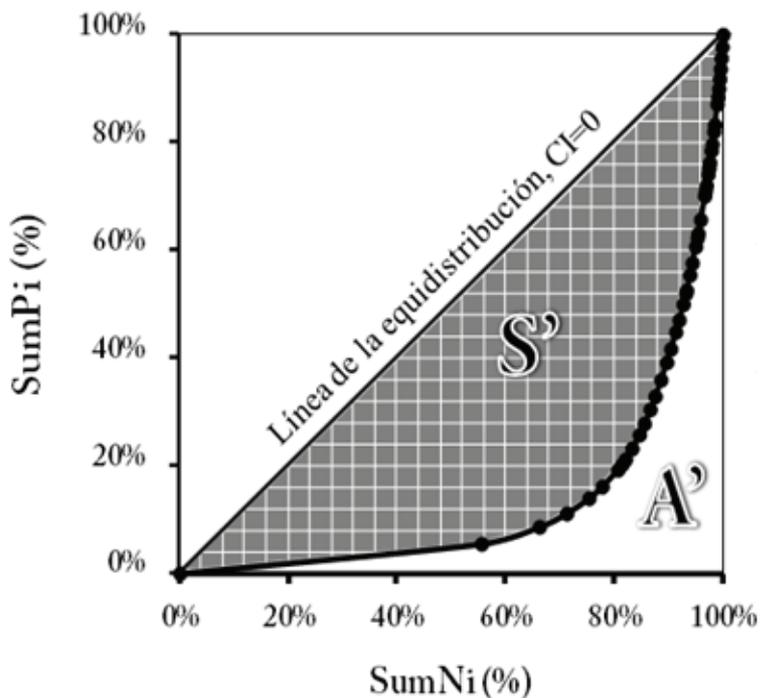


Fig. 2. Curva exponencial del número acumulado de días de precipitación (Sum Ni) versus la cantidad de precipitación acumulada (sum Pi). La línea de color negro representa la línea de equidistribución (es decir, el caso en que el porcentaje de precipitación total se acumula en porcentaje de días equivalentes).

Fig. 2. Exponential curve of accumulated number of precipitation days (Sum Ni) versus amount of accumulated precipitation (Sum Pi). The solid black line represents the equidistribution line (i.e. the case in which the total precipitation is accumulated in days with equal daily precipitation accumulations).

Matemáticamente, el CI corresponde a una exponencial de 2 parámetros constantes, cuya ecuación $Y = aX \exp^{(bx)}$, se resuelve

mediante el método de los mínimos cuadrados, según las siguientes expresiones:

$$\ln a = \frac{\sum x_i^2 \sum \ln Y_i + \sum x_i \sum x_i \ln x_i - \sum x_i^2 \sum \ln x_i - \sum x_i \sum x_i \ln Y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1)$$

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

Una 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')

$$A' = \left[\frac{a}{b} e^{bx} \left(x - \frac{1}{b} \right) \right]_0^{100} \quad (3)$$

El área sobre la curva y bajo la recta de equidistribución (S') se obtiene mediante las 5.000 unidades de área menos A' , tal como se expresa en la siguiente ecuación.

$$S' = 5.000 - A' \quad (4)$$

Como el CI es un valor entre 0 y 1, lo que se hace es proporcionarlo mediante un cociente de 5.000 unidades.

$$CI' = S' / 5.000 \quad (5)$$

Para graficar el CI se realizaron figuras de las curvas en Microsoft Excel, y mapas de la distribución espacial del CI con el *software* Arc-Gis 9.3.1. Cabe destacar que se ha considerado un Modelo Digital de Elevaciones (DEM) a resolución 30 metros en la interpolación espacial del CI ($r=0,7$), obtenido desde la siguiente expresión:

$$CI_{x,y} = -0,02 \times \ln DEM + 0,7065 \quad (6)$$

RESULTADOS

La concentración diaria de la precipitación estudiada mediante el CI refleja que las estaciones que se encuentran por sobre los 1.000 m.s.n.m, presentan valores menores o iguales que 0,58 (con la excepción de Estero Rabuco, Melipilla y Pirque, todas ellas, localizadas a sotavento, es decir, vertientes orientales). Mientras que las estaciones meteorológicas costeras y de la Depresión Intermedia poseen en general, valores altos.

El CI alcanza sus máximos valores en Rapel (0,67), seguido de Valparaíso y Rancagua con CI=0,64, y Santiago (0,63). En síntesis, se puede decir que el CI máximo se consigue muy cercano a la línea de costa o en la Depresión Intermedia, justamente donde el clima es de tipo mediterráneo, donde gran parte de las precipitaciones de cierta magnitud se concentran en unos pocos días. A partir de la ahí, el CI disminuye con la altura, siendo más evidente en la Cordillera de los Andes (Fig. 3).

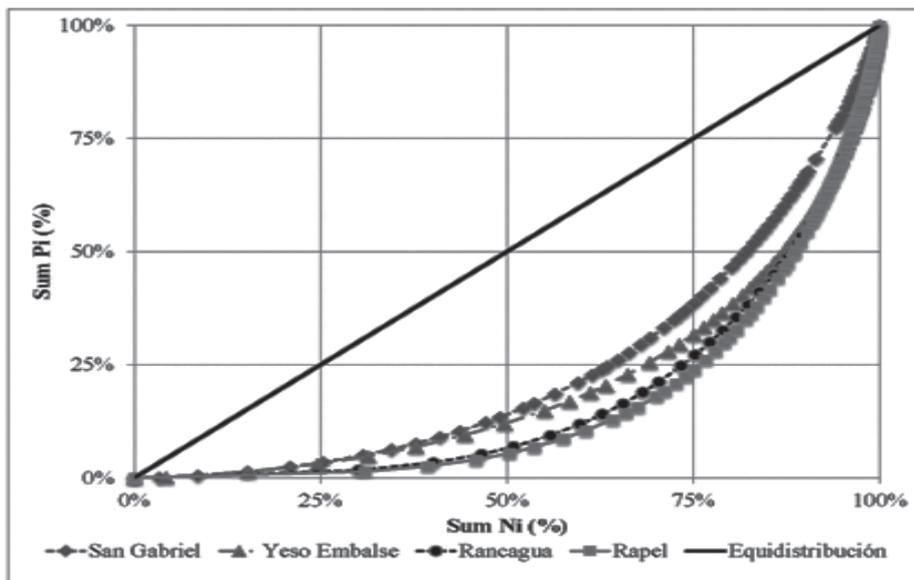


Fig. 3. Valores empíricos (curvas de concentración) de San Gabriel, Embalse El Yeso, Rancagua y Rapel.

Fig. 3. Empirical values (concentration curve) of San Gabriel, Embalse El Yeso, Rancagua and Rapel.

Considerando los resultados del CI y las constantes de la función exponencial, 6 de las estaciones meteorológicas superan el valor de 0,60, lo cual implica, que en sólo un 25% de los días lluviosos se registran en dichas estaciones más de un 70% de la precipitación total, lo que significa irregularidad en el reparto de las precipitaciones (Tabla 3).

En la Figura 4 se observa justamente que el CI desciende de oeste a este, lo cual fue planteado como hipótesis de trabajo. No obstante, zonalmente no se aprecia una

disminución del CI hacia el sur, lo cual se debe a que esta región es íntegramente mediterránea, es decir, las concentraciones no varían latitudinalmente en esta franja (32°50'S-34°12'). La regionalización climática resultante indica CI sobre 0,61 en gran parte de las planicies litorales y la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa, valores entre 0,58-0,59 en la Depresión Intermedia, y CI modestos (bajo 0,57) en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes y las cumbres y vertiente oriental de la Cordillera de la Costa.

TABLA 3. VALORES DE LOS CONSTANTES A Y B DE LAS CURVAS EXPONENCIALES DEL CI, Y EL PORCENTAJE CONTRIBUIDO POR EL 25% DE LOS DÍAS LLUVIOSOS DE LAS 16 ESTACIONES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS.

TABLE 3. VALUES FOR CONSTANTS A AND B OF EXPONENTIAL CURVES THE CI, AND PERCENTAGE OF PRECIPITATION CONTRIBUTED BY 25% OF THE RAINIEST DAYS FOR 16 METEOROLOGICAL STATIONS CONSIDERED.

N°	Estaciones	a	b	CI	P (%)
1	Esterio Rabuco	0,0572	0,0286	0,53	66,11
2	Riecillos	0,0493	0,0296	0,56	67,98
3	Caleu	0,0483	0,0301	0,56	67,64
4	Rungue Embalse	0,0352	0,0326	0,60	70,77
5	Valparaíso	0,0172	0,0400	0,64	74,26
6	Santiago	0,0172	0,0401	0,63	74,13
7	Los Panguiles	0,0307	0,0342	0,61	71,25
8	Bocatama Maitenes	0,0572	0,0284	0,54	66,39
9	San Antonio	0,0331	0,0337	0,59	70,44
10	Pirque	0,0381	0,0323	0,58	69,44
11	El Yeso Embalse	0,0513	0,0286	0,58	68,59
12	Melipilla	0,0387	0,0321	0,58	69,53
13	San Gabriel	0,0593	0,0283	0,52	65,62
14	Las Melosas	0,0585	0,0278	0,55	66,75
15	Rapel	0,0115	0,0441	0,67	75,94
16	Rancagua	0,0176	0,0398	0,64	74,17

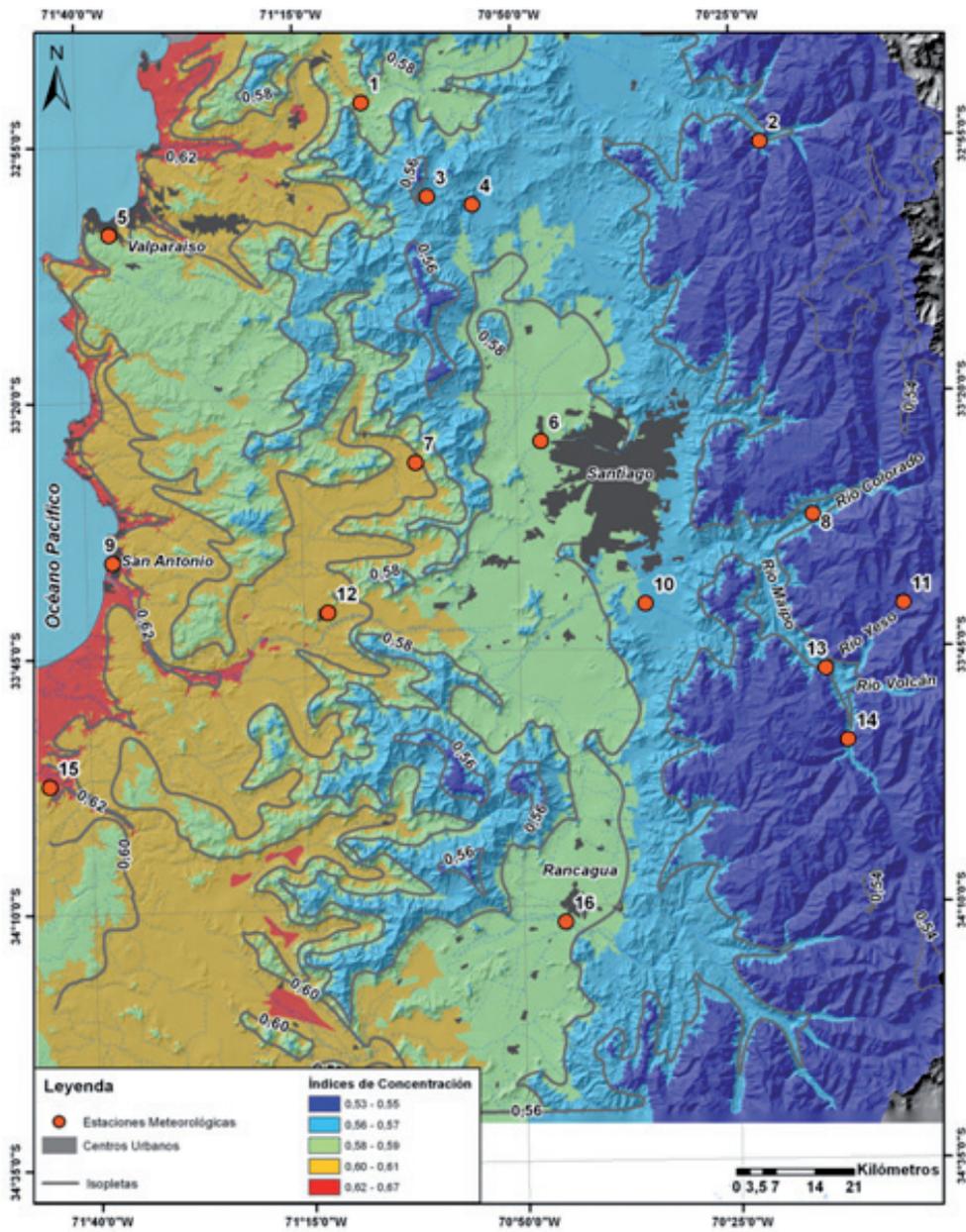


Fig. 3. Mapa de isopletas y coropletas del CI.

Fig. 3. Isoleth and choropleth Map of CI.

DISCUSIÓN

La teoría indica que los climas subtropicales poseen un CI mayor que climas templados lluviosos (MARTÍN-VIDE 2004), lo cual en esta investigación no ha sido posible establecer, debido, principalmente, por el escaso gradiente latitudinal considerado. No obstante, las altas concentraciones halladas en Chile central confirman que esta región posee una pluviometría bastante irregular, alcanzando su máxima expresión en la estación de Rapel. Además, los resultados son consistentes con los de SARRICOLEA & MARTÍN-VIDE (2012), es decir, se enmarcan en una región que por su situación zonal está sometida a precipitaciones frontales de carácter invernal.

En ambientes de montaña, los resultados del Índice de Concentración encontrados en estudios llevados a cabo en Perú (ZUBIETA & SAAVEDRA 2009) y en China (LI *et al.* 2011) son bastante similares a los de Chile central, pues las precipitaciones aumentan de modo general hacia la montaña respecto a los fondos de valle (BARRETT *et al.* 2009), y por lo tanto, los CI son menores en ambas cordilleras. Esta situación debe ser confirmada mediante una ampliación a otras latitudes de Chile central. No obstante, la interpolación del CI en función a una expresión logarítmica indica un gradiente meridiano O-E de -2 por cada 100 m.s.n.m transformados en logaritmo neperiano.

Se espera establecer espacial y estadísticamente, cómo influye la orientación de las vertientes en los valores del Índice de Concentración, los cuales debiesen ser modestos, pero algo más concentrados en las vertientes de exposición Sur y Oeste, y explicado por los corredores de tormenta invernales que afectan con mayor intensidad

a las vertientes opuestas. No obstante, un análisis estacional podría revelar situaciones inversas, pues las precipitaciones de verano obedecen a flujos del Este. Esto es consistente con VIALE (2010), quien señala que las precipitaciones en montaña cambian el típico gradiente de dirección norte-sur en las zonas bajas de Chile central, por un fuerte gradiente este-oeste en la cordillera, ocasionando precipitaciones menores a los 150 mm en los sectores a sotavento.

CONCLUSIONES

Los montos pluviométricos, su concentración y la configuración espacial que de ella resulta, está controlada por distintos factores que actúan de modo multiescalar. Por un lado, las configuraciones sinópticas y la latitud, que condicionan la estacionalidad de las precipitaciones, cuya génesis es preferentemente frontal en Chile central, y por otro lado, factores geográficos que modifican regional y localmente las precipitaciones, apareciendo el relieve como el factor más destacado, pues genera forzamiento orográfico de las masas de aire, y sombras pluviométricas.

Los resultados expuestos permiten concluir que Chile central presenta tres macro-regiones climáticas derivadas del análisis de la concentración de las precipitaciones. Una de alta concentración, con valores mayores o iguales a 0,60 en las planicies litorales y la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa, una región de concentración media (entre 0,58 y 0,59) en gran parte de la depresión intermedia de la región metropolitana y la VI región, la cual presenta como característica altitudes entre 330 y 550 m.s.n.m., y finalmente, bajas concentraciones (<0,58) en ambas cordilleras, pero más notoriamente en la Cordillera de los Andes.

El gradiente altitudinal comprueba la hipótesis sobre la disminución de las concentraciones de las precipitaciones, lo cual se debe a que por forzamiento orográfico la repartición de las precipitaciones es más regular.

Se espera, que al ampliar el área de estudio hacia regiones climáticas de tipo templado lluvioso, se constata efectivamente un gradiente Norte-Sur o Subtropical-Templado, tal como lo han observado SARRICOLEA & MARTÍN-VIDE (2012).

AGRADECIMIENTOS

Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo (VID) de la Universidad de Chile por financiar parte de esta investigación mediante el proyecto U-APOYA código CSSOC-2012-292, titulado "Regionalización de las precipitaciones diarias en Chile central mediante el Índice de Concentración (CI)". A la Dirección General de Aguas (DGA) por facilitar la información pluviométrica utilizada.

REFERENCIAS

- BARRETT, B., R. GARREAUD & M. FALVEY, 2009.** Impacts of the Andes cordillera on precipitation from a midlatitude cold front. *Monthly Weather Review*, 9: 3092-3109
- BENHAMROUCHE, A. & J. MARTÍN-VIDE, 2012.** Avances metodológicos en el análisis de la concentración diaria de la precipitación en la España peninsular. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 32: 11-27.
- BROOKS, C. & N. CARRUTHERS, 1953.** *Handbooks of statistical methods in meteorology*, Meteorological Office, London, 412 pp., Great Britain Meteorological Office, Publication official 538.
- CORTESI, N., J.C. GONZÁLEZ-HIDALGO, M. BRUNETTI & J. MARTÍN-VIDE, 2012.** Daily precipitation concentration across Europe 1971-2010. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12: 2799-2810.
- KARL, T., G. MEEHL, T. PETERSON, K. KUNKEL, W. GUTOWSKI JR. & D. EASTERLING, 2008.** Executive Summary in Weather and Climate Extremes in a Changing Climate. Regions of Focus: North America, Hawaii, Caribbean, and U.S. Pacific Islands. T.R. Karl, G.A. Meehl, C.D. Miller, S.J. Hassol, A.M. Waple, and W.L. Murray (eds.). A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Washington, DC.
- KOTTEK, M., J. GRIESER, C. BECK, B. RUDOLF & F. RUBEL, 2006.** World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 3:259-263
- LI, X., F. JIANG, L. LI & G. WANG, 2011.** Spatial and temporal variability of precipitation concentration index, concentration degree and concentration period in Xinjiang, China. *International Journal of Climatology*, 31: 1679-1693.
- LUEBERT, F & P. PLISCOFF, 2012.** Variabilidad climática y bioclimas de la Región de Valparaíso, Chile. *Invest. Geogr. Chile*, 44: 41-56.
- MARTÍN-VIDE, J., 1984.** Análisis de la irregularidad de la precipitación diaria en el litoral mediterráneo de la Península Ibérica. *Revista de Geofísica*, 40:101-106
- MARTÍN-VIDE, J., 2003.** El tiempo y el clima. Colección Cuadernos de Medio Ambiente. Rubes Editorial. Barcelona, España. 127 pp.

- MARTÍN-VIDE, J., 2004.** Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain. *International Journal of Climatology*, 24: 959-971.
- RUTLLANT, J & H. FUENZALIDA, 1991.** Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 11: 63-76.
- SANCHEZ-LORENZO, A & J. MARTÍN-VIDE, 2006.** Distribución espacial de la concentración pluviométrica diaria en la Península Ibérica. *Proceedings 5^a Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, sesión Climatología y Cambio Climático (CDROM).
- SARRICOLEA, P & J. MARTÍN-VIDE, 2012.** Distribución espacial de las precipitaciones diarias en Chile mediante el índice de concentración a resolución de 1 mm, entre 1965-2005. En: *Cambio climático, extremos e impactos*. (Ed. J.M. Cuadrat, P. Dorta, M. J. Estrela, F. González Rouco, J. A. López Díaz, J. C. García Codrón, F. Sánchez Rodrigo, J. Martín-Vide y R. García Herrera. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, Salamanca, España. pp.631-639. ISBN: 978-84-695-4331-3.
- VIALE, M., 2010.** Características de las Precipitaciones Orográficas de Invierno sobre los Andes Subtropicales Centrales. Tesis doctoral de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Universidad de Buenos Aires. 154 pp., Inédita.
- ZUBIETA, R. & M. SAAVEDRA, 2009.** Distribución espacial del índice de concentración de precipitación diaria en los Andes Centrales Peruanos: Valle del Río Mantaro. *Revista Tecnica*, 19: 13-22.