

Análisis estadístico de los eventos extremos de precipitación en la zona centro y sur de Chile continental

KARLA ÁVILA PARRA¹ ✉ | JAVIER MARTÍN VIDE²

Recibido: 29/09/2012 | Aceptado: 23/05/2013

Resumen

En este artículo se estudia la distribución espacial del riesgo de precipitaciones extremas entre las regiones Quinta y Undécima del territorio continental chileno. Para ello se calculan los valores máximos probables de precipitación diaria para diferentes períodos de retorno, analizando las cantidades máximas de precipitación en 24 horas en 46 estaciones pluviométricas con registros entre 1980 y 2010. Se ha empleado el procedimiento objetivo de análisis estadístico basado en el ajuste de los datos a diferentes leyes de probabilidad, en particular Gumbel Max y Weibull, y el posterior cálculo de valores máximos y períodos de retorno. Los resultados indican una gran variabilidad espacial de las precipitaciones máximas, localizándose las más altas en la precordillera Andina, disminuyendo progresivamente al pasar por la depresión Intermedia y volviendo a aumentar en la cordillera de la Costa. Los resultados muestran que las áreas donde se pueden esperar las precipitaciones diarias más elevadas se ubican en las regiones de Valparaíso, del Maule y del Bío-Bío, con valores que llegan a alcanzar y rebasar los 200 mm en 50 años.

Palabras clave: Precipitación, evento extremo, período de retorno, Chile.

Abstract

Statistical Analysis of Extreme Events of Precipitation in Central and South Continental Chile.

In this paper the spatial distribution of extreme precipitation risk between the fifth and eleventh regions of the Chilean mainland is studied. In order to achieve that, probable maximum values of daily precipitation for different return periods are calculated, analyzing the maximum amounts of rainfall in 24 hours in 46 rainfall stations with records between 1980 and 2010. The methodological approach has been the adjustment of the data by means of different probability laws, especially Gumbel Max and Weibull, and the calculation of maximum values and returns periods. The results show a large spatial variability of maximum precipitations, the highest ones being located in the Andean foothills, decreasing gradually to pass the Intermediate depression and increasing again in the Costa range. The highest estimated daily precipitation occur at Valparaíso, Maule and Bío-Bío regions, with values equal to or greater than 200 mm in 50 years.

Keywords: Rainfall, extreme event, Return period, Chile.

1. Grupo de Climatología, Universidad de Barcelona. kavila.p@gmail.com

2. Grupo de Climatología, Universidad de Barcelona. jmartinvide@ub.edu

Resumé

Estatistique des evenements extremes de precipitations dans le centre et le sud du chili continental

Dans cet article, nous étudions la distribution spatiale du risque des précipitations extrêmes entre les régions cinquième et onzième de la partie continentale du Chili. Il est calculé les valeurs maximales des précipitations quotidiennes probables pour différentes périodes de retour, analysant et évaluant les quantités maximales de pluie en 24 heures à 46 stations pluviométriques avec des enregistrements entre 1980 et 2010. La procédure méthodologique a été l'analyse statistique basée sur l'ajustement des données aux différentes lois de probabilité, y compris Max et Weibull Gumbel, et le calcul ultérieur des précipitations maximales et périodes de retour. Les résultats indiquent une grande variabilité spatiale des précipitations maximales, le plus haut étant situé dans les contreforts des Andes, ce qui diminue progressivement pour passer la dépression Intermédiaire et d'augmenter de nouveau dans les montagnes de la Costa. Les résultats montrent que les domaines dans lesquels vous pouvez vous attendre précipitations journalières plus élevées se trouvent dans les régions de Valparaíso, Maule et de Bío-Bío, avec des valeurs qui atteignent et dépassent les 200 mm en 50 ans.

Mots-clés: Précipitations, événement extrême, période de retour, Chili.

Sobre los Autores

KARLA ÁVILA PARRA

Ingeniera en Prevención de Riesgos y Medio Ambiente, es licenciada en Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica Metropolitana de Chile y Máster en Agua. Análisis Interdisciplinario y Gestión Sostenible de la Universidad de Barcelona de España. Ha trabajado desarrollando e implementando el Sistema de Gestión de Seguridad y Medio Ambiente en Empresa Nacional de Minería de Chile como también en empresas privada del mismo sector económico. Con un premio otorgado por la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile (CONICYT) realizo postgrado de Gestión Medio Ambiental en la Empresa en España. Asimismo participo en el laboratorio de climatología de la universidad de Barcelona bajo la tutela del Dr. Javier Martín Vide, Catedrático de Geografía Física realizando actividad investigadora en análisis probabilísticos de la precipitación, riesgos climáticos, variabilidad y sistemas de análisis geoespaciales, entre otros. Su tesina, titulada "Análisis del comportamiento de eventos extremos de precipitación en la zona centro y sur de Chile continental", fue presentada en 2012 ante la comisión evaluadora. En la actualidad colabora al departamento de proyectos de la Dirección General de Aguas de Chile en distintas temáticas relacionadas, y asesora en materia de seguridad y gestión a reconocidas empresa del área de telecomunicaciones.

JAVIER MARTÍN-VIDE

Catedrático de Geografía Física de la Universidad de Barcelona, es licenciado en Ciencias Matemáticas y doctor en Geografía e Historia, con Premio extraordinario. Académico de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona. Experto en análisis probabilísticos de la precipitación, riesgos climáticos, análisis sinóptico, clima urbano, y variabilidad y cambio climático. Ha publicado 25 libros y unos 300 artículos y capítulos de libro. Fue el primer presidente de la Asociación Española de Climatología (1998-2004) y del Consejo Asesor del Servei Meteorològic de Catalunya (2003-2011). Es miembro de los consejos editoriales del *International Journal of Climatology* y de otras 13 revistas, y miembro del Consejo de Dirección del Instituto del Agua (UB). En la actualidad es el presidente de la Asociación de Geógrafos Españoles y del Comité Español del World Climate Research Programme, así como coordinador del Grupo de Expertos sobre el Cambio Climático de Cataluña. Recientemente ha ingresado como académico correspondiente en la Académie de Sciences d'Outre-Mer (Bélgica). Participó como revisor experto en el Cuarto Informe IPCC. Premio ATLAS-2004 a la trayectoria profesional ejemplar, Premio Crítica Serra d'Or-2004 y Premio del ACAA-2008.

1. Introducción

Uno de los rasgos climáticos más importantes que caracterizan un lugar es, sin duda, su régimen pluviométrico. Para conocer la periodicidad con que ciertas cantidades de lluvia pueden registrarse en una determinada región, suele recurrirse al análisis estadístico de las series de datos pluviométricos disponibles en las estaciones meteorológicas ubicadas en las distintas zonas y realizar ajustes mediante funciones de distribución apropiadas. Este análisis debe realizarse con prudencia, dada la variabilidad asociada a la propia naturaleza de los fenómenos meteorológicos que originan la lluvia, como también por la recurrencia temporal de los casos extremos registrados en los observatorios. Precisamente, los eventos extremos, con intensidades de precipitaciones muy altas y baja frecuencia, son los de estudio más interesante, dado que pueden provocar desastres tales como inundaciones, generadas principalmente por colapsos en los sistemas de drenaje urbano y desbordamientos de ríos, deslizamientos de laderas, destrucción de infraestructuras e, incluso, en los casos más severos, pérdida de vidas humanas.

El régimen pluviométrico en el área de estudio, las regiones Quinta a Undécima de Chile, está caracterizado por episodios de precipitación que ocurren principalmente entre los meses de mayo y septiembre, como resultado de la migración estacional hacia el norte del anticiclón subtropical del Pacífico suroriental y de los sistemas de bajas presiones circumpolares y frentes asociados.

El presente estudio pretende contribuir al conocimiento de las precipitaciones en las zonas centro y sur de Chile continental, siendo su finalidad aportar una base de datos pluviométricos estimados probabilísticamente sobre el territorio de estudio, mediante el uso de una herramienta integrada (Sistema de Información Geográfica y técnicas estadísticas), la cual en el futuro servirá para la evaluación de los riesgos y la vulnerabilidad de las poblaciones ante los desastres hídricos. En el mismo sentido, se busca interrelacionar los comportamientos pluviométricos con patrones geográficos, tal que permita la realización de cartografías de precipitaciones extremas de detalle y así resolver problemas de planificación y gestión geográfica.

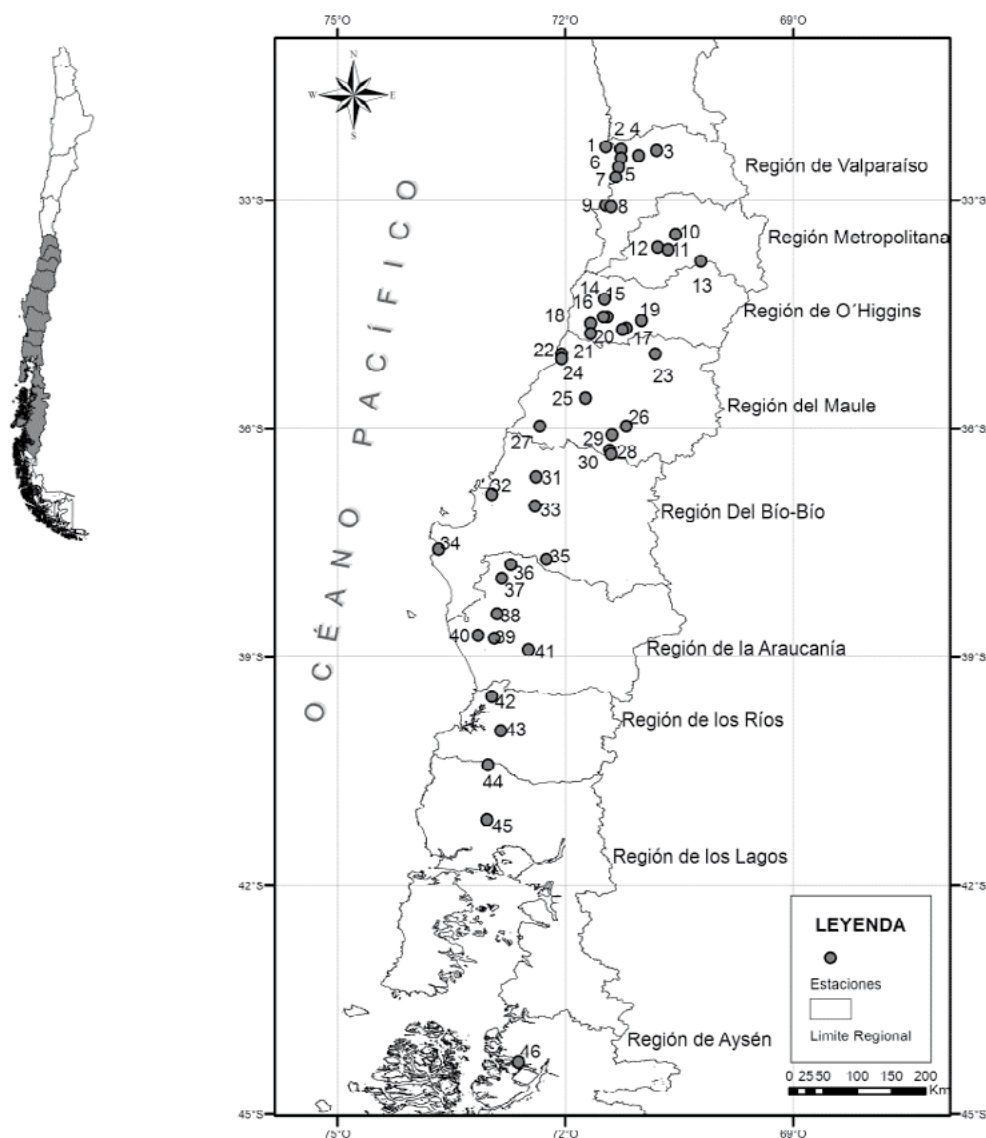
2. Área de estudio

El área de estudio, como consecuencia de su extensión territorial y del contraste altitudinal, presenta una gran variedad de climas, lo que se manifiesta en marcadas diferencias en la humedad, las precipitaciones, la temperatura y los vientos. Un aspecto importante de la caracterización de dicha área lo constituye el relieve. Al respecto, presenta una topografía muy particular conformada por cuatro unidades bien definidas: Las planicies litorales, que se localizan entre el Océano Pacífico por el oeste y la cordillera de la Costa por el este; la cordillera de la Costa, que se inicia al norte del país formando una cadena montañosa alta que declina a medida que avanza hacia el sur, y que constituye una importante barrera contra las influencias oceánicas o masas de aire marítimas; la depresión intermedia, también llamada valle central, que corresponde a una faja de terreno que se extiende latitudinalmente entre ambas cordilleras, y por último, la elevada cordillera de los Andes, que se presenta a lo largo de todo Chile. Estas unidades de relieve determinan, en gran medida, las características climáticas del área de estudio.

3. Datos y metodología

Se consideró la información recopilada en 46 estaciones pluviométricas pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA) de Chile, la cual mantiene una red de cobertura nacional que aporta la información al Banco Nacional de Aguas. En este organismo se puede obtener información sobre los datos históricos registrados, así como sobre la ubicación de las estaciones. Asimismo, la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) controla otra red de cobertura nacional, cuyos datos pueden conseguirse en los Boletines Meteorológicos de Chile. De este modo, la información obtenida comprende nueve regiones de Chile continental distribuidas entre los 32°18' y 44°19' de latitud sur; que corresponden al territorio de las regiones de Valparaíso, Metropolitana, Libertador General Bernardo O'Higgins, Maule, Bío-Bío, La Araucanía, Los Ríos, Los Lagos y Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo (Mapa 1 y Cuadro 1). La procedencia oficial de los datos y los controles realizados garantizan la calidad de las series analizadas.

Mapa 1. Mapa de ubicación de las estaciones pluviométricas seleccionadas (puntos en gris) para el período 1980 – 2010.



Fuente: Dirección General de aguas y Dirección meteorologica de Chile (2012). Elaboración propia.

Cuadro 1. Ubicación geográfica de las estaciones pluviométricas, con indicación de la numeración de estación, latitud, longitud y elevación.

Región	N°	Estación	Latitud	Longitud	Elevación
			Sur	Oeste	mts
Valparaíso (V)	1	Huaquén Hacienda	32°18'	71°28'	200
	2	Trapiche Longotoma	32°20'	71°16'	600
	3	Las Casas de Alicahue	32°21'	70°48'	1000
	4	La Vega Fundo	32°25'	71°02'	370
	5	La Ligua	32°27'	71°16'	58
	6	Catapiilco	32°34'	71°18'	95
	7	La Canela	32°42'	71°20'	450
	8	Quilpué	33°04'	71°28'	101
	9	Marga-Marga	33°05'	71°24'	160
Metropolitana (XIII)	10	Tobalaba	33°27'	70°33'	650
	11	Calera de Tango	33°37'	70°47'	500
	12	Central los Morros	33°39'	70°39'	605
	13	Central Queltehue	33°48'	70°13'	1290
Lib. Gral. Bernardo O'Higgins (VI)	14	San José de Marchigüe	34°18'	71°29'	113
	15	Lihueimo Fundo	34°32'	71°27'	150
	16	San Diego de Puquillay	34°32'	71°30'	330
	17	San Fernando	34°35'	71°00'	350
	18	Pumanque Hacienda	34°37'	71°40'	112
	19	Nancagua	34°41'	71°12'	370
	20	Las Arañas	34°42'	71°15'	334
	21	Lolol Hacienda	34°45'	71°40'	170

Región	N°	Estación	Latitud	Longitud	Elevación
			Sur	Oeste	mts
Maule (VII)	22	Licantén	35°01'	72°03'	464
	23	Los Queñes	35°01'	70°49'	671
	24	Curepto	35°05'	72°03'	60
	25	San Javier	35°36'	71°44'	80
	26	Longaví	35°58'	71°12'	145
	27	Cauquenes	35°58'	72°20'	142
	28	Achibueno	36°05'	71°23'	585
	29	Bullileo Embalse	36°17'	71°25'	600
	30	Digua Embalse	36°20'	71°24'	300
Bío-Bío (VIII)	31	San Ignacio de Palomares	36°38'	72°23'	15
	32	Nonquen	36°52'	72°58'	145
	33	Cabrero	37°01'	72°24'	130
	34	Lebu	37°35'	73°40'	50
	35	Mulchen	37°43'	72°15'	125
La Araucanía (IX)	36	La Araucanía	37°47'	72°43'	70
	37	Los Sauces	37°58'	72°50'	107
	38	Curacautín	38°26'	72°54'	571
	39	Carahue	38°43'	73°09'	10
	40	Nueva Imperial	38°45'	72°56'	26
	41	La Torcaza	38°54'	72°29'	120
Los Ríos (XIV)	42	San José de la Mariquina	39°31'	72°58'	40
	43	Reumen	39°58'	72°51'	70
	44	San Pablo	40°25'	73°01'	60
Los Lagos (X)	45	Frutillar Centro Experimental	41°08'	73°02'	80
Aysén (XI)	46	Puyuhuapi	44°19'	72°37'	5

Fuente: Dirección General de aguas y Dirección meteorológica de Chile (2012). Elaboración propia.

En Climatología, Hidrología y otras ciencias los riesgos suelen establecerse a partir de los llamados períodos de retorno o intervalos de recurrencia, que no son sino la inversa de la probabilidad de ocurrencia de los mismos. A un evento con una probabilidad de ocurrencia de, por ejemplo, un año en 100, o 1/100 (0,01) de probabilidad, le corresponde un período de retorno de 100 años. A otro con una probabilidad de 0,2 le corresponde un período de retorno de 5 años. Esta aproximación se considera estadístico-frecuencial, porque a partir de los registros de precipitación existentes se hacen las estimaciones de los períodos de retorno. Normalmente en pluviometría se utiliza la máxima precipitación en 24 horas de cada año, lo cual asegura la independencia de los sucesos, ajustándose la serie resultante mediante una distribución de probabilidad de valores máximos: log-Logistic, log-Pearson 3, Gumbel, Weibull, Gamma, etc. (Chow et al.,1994); (Llamas, 1993); (Jones, 1997); (Aparicio, 1997); (Custodio y Llamas, 2001).

En el presente trabajo se ha realizado un análisis probabilístico de las lluvias diarias extremas a partir de las series de máximos anuales de precipitación en 24 horas registradas en las estaciones pluviométricas. Se ensayaron diferentes métodos de ajuste a funciones teóricas de distribución mediante el programa EasyFit v.5.3.

En concreto, se realizaron ajustes mediante las funciones de distribución estadística de Gumbel Max, Weibull (las dos ampliamente utilizadas para cuantificar el riesgo asociado a valores extremos de precipitación) y también mediante una tercera función, aquella que el programa indicó como la de mejor ajuste estadístico, que puede coincidir con alguna de las anteriores. Las ecuaciones de las funciones de distribución Gumbel Max y Weibull se expresan a continuación.

La distribución de valores extremos tipo 1 de Fisher y Tippett, también conocida como distribución Gumbel Max, es una distribución de asimetría constante e igual a 1,139547, con función de distribución de probabilidad:

$$P = (X \leq x) = e^{-e^{-\frac{(x-b)}{a}}}$$

Está definida para $-\infty < x < \infty$, donde la constante a es un parámetros de escala y b es la moda de la distribución. La estimación de los parámetros por el método de los momentos resulta de las siguientes expresiones:

$$a = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sigma \quad b = \mu - k \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sigma$$

donde:

μ : media de la población.

σ : desviación estándar de la población, y

k : constante de Euler.

En cuanto a la función de distribución Weibull, que es la mayormente elegida para la estimación de probabilidades en los casos estudiados, se caracteriza por ser insesgada, es decir, que el sesgo tiende a cero, lo cual le proporciona una propiedad deseable como estimador. Su función de distribución de probabilidad es:

$$F(X) = 1 - \exp [-(x / \beta)^\alpha]$$

donde:

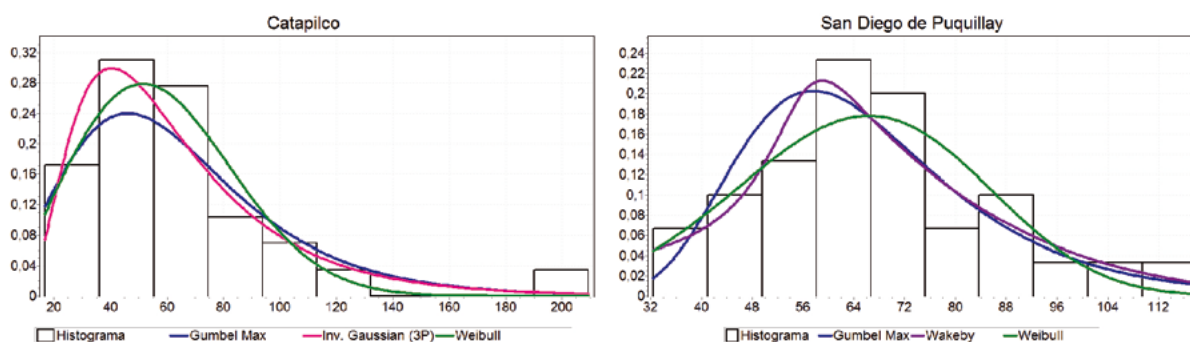
α : es un parámetro de forma continua mayor de cero, y

β : un parámetro de escala continua mayor de cero.

En el Gráfico 1 se muestran dos ejemplos de histogramas de frecuencias de las cantidades máximas en 24 horas y las tres distribuciones de ajuste, las cuales tienen sesgo positivo (cola a la derecha), tal como corresponde a valores de extremos máximos.

Se evidenció que las distribuciones propuesta por el software con mejor ajuste a los datos fueron Gumbel Max y Weibull; la primera se ajusta satisfactoriamente, resultando consistente con lo señalado por (Garrido,1992).

Gráfico 1. Histograma y las tres funciones de distribución de probabilidad de mejor ajuste de las cantidades diarias máximas anuales de precipitación de dos casos analizados. Período 1980-2010.



Fuente: Dirección General de aguas y Dirección meteorológica de Chile (2012). Elaboración propia.

A partir de los datos de cada una de las estaciones seleccionadas, y teniendo en cuenta algunas características hidrológicas de las regiones investigadas, se realiza el cálculo de las cantidades diarias máximas esperadas en 24 horas para períodos de retorno de 5, 10, 50, 100, 200 y 500 años mediante la siguiente relación:

$$T(X) = \frac{1}{1 - F(X)}$$

siendo:

T(x): tiempo de retorno de una precipitación de x mm, en años;

F(x): probabilidad de ocurrencia anual de un evento inferior a x mm.

Los valores estimados para períodos de retorno largos, como 100, 200 o 500 años, no pueden contrastarse con los empíricos, que cubren un treintenio, por lo que son solo indicativos.

Finalmente, se ha optado, como mejor estimación, para cada período de retorno y estación meteorológica, el promedio de los tres valores estimados, los que proveen las distribuciones Gumbel Max, Weibull y la de mejor ajuste. Con todo ello se dispone de un horizonte probabilístico, útil para la planificación, dentro del cual no debería, teóricamente, presentarse un evento con precipitaciones superiores a la calculada.

Mediante el software ArcGis v.10, se procedió a realizar un análisis geoestadístico, a través del método de Inverse Distance Weighted (IDW), que permite crear una superficie interpolada a partir de los datos de precipitaciones y obtener un modelo espacial de distribución de las precipitaciones máximas diarias, a partir de los datos del período 1980-2010.

Hay que advertir, por último, que todas las técnicas de inferencia estadística (estimación de los parámetros de una población a partir de una muestra) son sensibles a la información de partida, más aun en el caso de los datos extremos de una muestra, como sucede con las precipitaciones máximas. La ocurrencia o no, en el período de análisis, de un valor muy extremado, condiciona notablemente las estimaciones.

4. Resultados

Como es sabido, la precipitación es una de las variables meteorológicas que presenta mayor oscilación o variabilidad en el transcurso del tiempo (a veces se presenta en forma de chubascos cortos pero intensos y otras veces se extiende en una racha de varios días), por lo que el análisis de su variabilidad temporal es de gran importancia en la caracterización del fenómeno. En particular, los valores más elevados en un determinado intervalo temporal, sea minutil, horario, diario, etc., resultan decisivos para la planificación territorial y el diseño adecuado de infraestructuras. En el Cuadro 2 se presentan las precipitaciones máximas en 24 horas calculadas para diferentes períodos de retorno. Se observa que en la mayoría de los casos los eventos estimados se sitúan entre 50 mm y 140 mm para 5 años de recurrencia; entre 60 mm y 150 mm para 10 años; entre 90 y 200 mm para 50 años; entre 100 mm y 240 mm para 100 años, entre 110 mm y 250 mm para 200 años, y entre 120 mm y 280 mm para 500 años de recurrencia. El valor estimado para el período de retorno de 100 años tiene un valor especial, dado que puede interpretarse como un estimador del riesgo de precipitaciones extremas en un lugar, considerándose, además, un importante umbral para la activación de procesos de envergadura en los cauces fluviales (García, 2003).

En general, puede apreciarse que en el área de estudio las precipitaciones intensas ocurren con cierta frecuencia, ya que en el corto período de 5 años encontramos que 14 estaciones superan los 100 mm, lo que equivale al 30% de las analizadas. Para el mismo período de retorno, Quilpué, ubicada en la región de Valparaíso; Los Queñes, Achibueno y Bullileo embalse, en la región del Maule; San Ignacio de Palomares, en la región del Bío-Bío; y Reumen, en la región de Los Ríos presentan valores estimados máximos en 24 horas iguales o superiores a 130 mm. Para un período de retorno de 10 años un total de 28 estaciones, es decir, un 61%, supera los 10 mm. Si el período de retorno se eleva a 50 años, son 40, un 87%, las estaciones que rebasan el centenar de milímetros.

Para un período de retorno de 100 años, sólo 3 estaciones no alcanzan los 100 mm, correspondiendo los valores estimados máximo y mínimo a Quilpué, con 263,3 mm, y a Carahue (La Araucanía) y Frutillar (Los Lagos), con menos de 80 mm. Estos extremos tan contrastados evidencian la variedad pluviométrica del territorio estudiado.

Los valores estimados más extremos los ostenta la estación de Quilpué, con 263,3, 300,0 y 350,0 mm, para períodos de retorno de 100, 200 y 500 años, respectivamente.

Cuadro 2. Valores estimados de la cantidad máxima anual en 24 hrs, calculados a partir de las mejores distribuciones de probabilidad de ajuste de 46 estaciones pluviométricas (mm)

N° Región	Estación	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500
		P 0,8	P 0,9	P 0,98	P 0,99	P 0,995	P 0,998
V	Huaquén Hacienda	87,0	109,3	166,7	196,7	226,7	273,3
	Trapiche Longotoma	83,3	102,3	143,3	156,7	173,3	190,0
	Las Casas de Alicahue	60,0	72,3	95,3	105,7	113,3	126,7
	La Vega Fundo	74,7	90,3	120,0	130,0	140,0	153,3
	La Ligua	82,3	98,3	143,3	160,0	183,3	213,3
	Catapilco	86,0	104,7	146,7	163,3	183,3	203,3
	La Canela	100,0	120,0	150,0	160,0	176,7	193,3
	Quilpué	130,0	160,0	230,0	263,3	300,0	350,0
	Marga-Marga	98,7	116,7	150,0	160,0	170,0	183,3
XIII	Tobalaba	63,3	77,7	106,0	117,7	129,0	146,7
	Calera de Tango	81,7	97,3	133,3	153,3	173,3	203,3
	Central los Morros	73,3	85,0	105,0	113,3	123,3	133,3
	Central Queltehue	110,0	125,0	155,0	165,0	180,0	195,0

T = Período de retorno; P Probabilidad asociada a T definida por $F(X) = (1-1/T)$.

N° Región	Estación	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500
		P 0,8	P 0,9	P 0,98	P 0,99	P 0,995	P 0,998
VI	San José de Marchigüe	71,3	80,3	97,0	103,0	110,0	126,7
	Lihueimo Fundo	91,7	103,0	120,0	130,0	140,0	150,0
	San Diego de Puquillay	81,3	92,0	113,3	120,0	126,7	133,3
	San Fernando	110,0	130,0	166,7	176,7	190,0	210,0
	Pumanque Hacienda	85,7	96,7	120,0	130,0	140,0	153,3
	Nancagua	110,0	130,0	160,0	170,0	183,3	196,7
	Las Arañas	90,0	100,0	125,0	135,0	145,0	160,0
	Lolol Hacienda	83,5	95,0	120,0	130,0	140,0	150,0
VII	Licantén	98,0	116,7	153,3	173,3	193,3	233,3
	Los Queñes	130,0	150,0	190,0	200,0	215,0	230,0
	Curepto	106,7	120,0	150,0	156,7	170,0	183,3
	San Javier	82,7	94,0	116,7	133,3	140,0	156,7
	Longaví	86,3	97,0	120,0	130,0	143,3	153,3
	Cauquenes	93,0	110,0	160,0	175,0	195,0	225,0
	Achibueno	140,0	156,7	200,0	210,0	226,7	250,0
	Bullileo Embalse	166,7	186,7	216,7	230,0	243,3	256,7
	Digua Embalse	116,7	130,0	153,3	166,7	173,3	186,7
VIII	San Ignacio de Palomares	130,0	153,3	200,0	223,3	243,3	280,0
	Nonquen	120,0	136,7	173,3	190,0	210,0	230,0
	Cabrero	99,0	116,7	146,7	160,0	176,7	190,0
	Lebu	97,3	113,3	153,3	170,0	196,7	230,0
	Mulchen	96,3	113,3	150,0	170,0	190,0	226,7

T = Período de retorno; P Probabilidad asociada a T definida por $F(X) = (1-1/T)$.

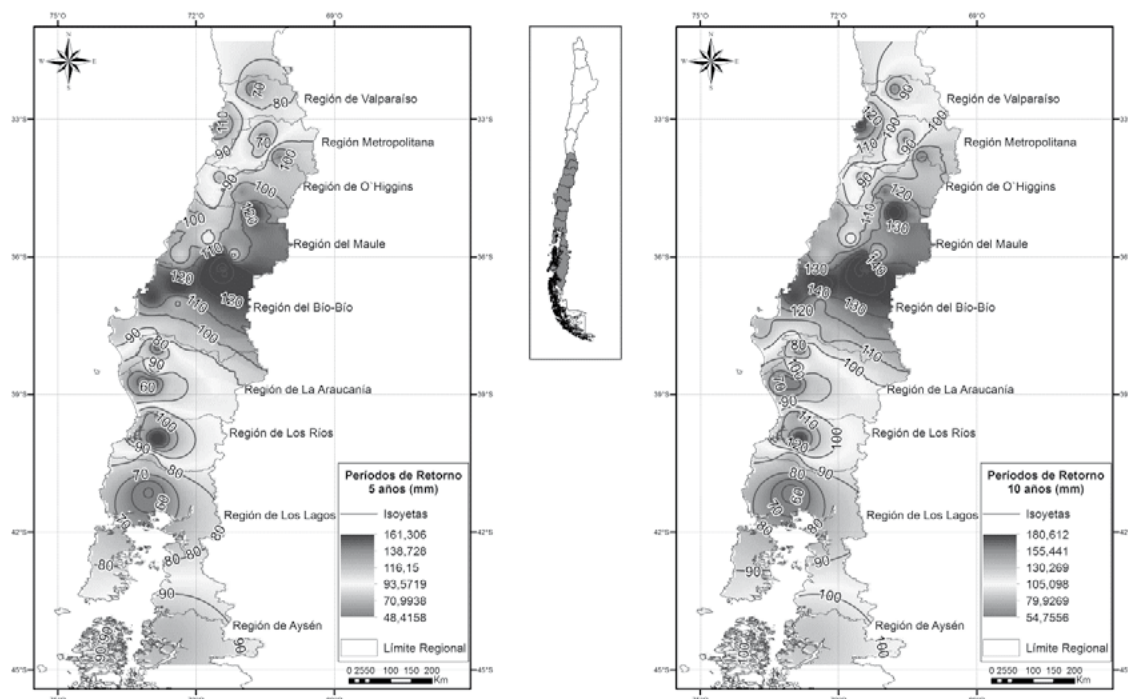
N° Región	Estación	T 5	T 10	T 50	T 100	T 200	T 500
		P 0,8	P 0,9	P 0,98	P 0,99	P 0,995	P 0,998
IX	La Araucanía	99,7	110,0	133,3	143,3	153,3	163,3
	Los Sauces	55,0	65,7	92,7	105,3	116,7	134,7
	Curacautín	98,7	110,0	120,0	123,3	130,0	136,7
	Carahue	54,3	60,3	72,3	77,0	81,3	86,7
	Nueva Imperial	53,0	62,3	84,0	92,7	104,7	119,3
	La Torcaza	78,3	87,0	105,0	109,7	116,7	126,7
XIV	San José de la Mariquina	103,3	116,7	140,0	153,3	160,0	173,3
	Reumen	130,0	140,0	160,0	170,0	176,7	183,3
	San Pablo	72,7	80,7	94,3	100,0	104,3	112,3
X	Frutillar Centro Experimental	48,3	54,7	70,3	77,7	83,7	97,7
XI	Puyuhuapi	99,7	110,0	123,3	133,3	136,7	143,3
T = Período de retorno; P Probabilidad asociada a T definida por $F(X) = (1-1/T)$.							

Fuente: Dirección General de aguas y Dirección meteorológica de Chile (2012). Elaboración propia.

En líneas generales, la distribución espacial de las precipitaciones máximas para el conjunto de los períodos de retorno evidencia que la zona con mayor probabilidad de alcanzar valores diarios extremos se localiza entre los 35°S y 37°S, donde es notorio cómo el campo de las isoyetas cambia su gradiente de dirección este-oeste en las áreas bajas de Chile central, por un fuerte gradiente norte-sur en la región del Bío-Bío, alcanzándose allí los mayores montos de precipitación estimada. En consecuencia, el factor latitud es influyente, como no podía ser de otra manera dada la extensión latitudinal del área de estudio. Por otra parte, es posible distinguir sitios localizados donde predominan valores anómalamente bajos, como al suroeste de la región de Los Lagos, y aún menores en un pequeño sector del noroeste de La Araucanía.

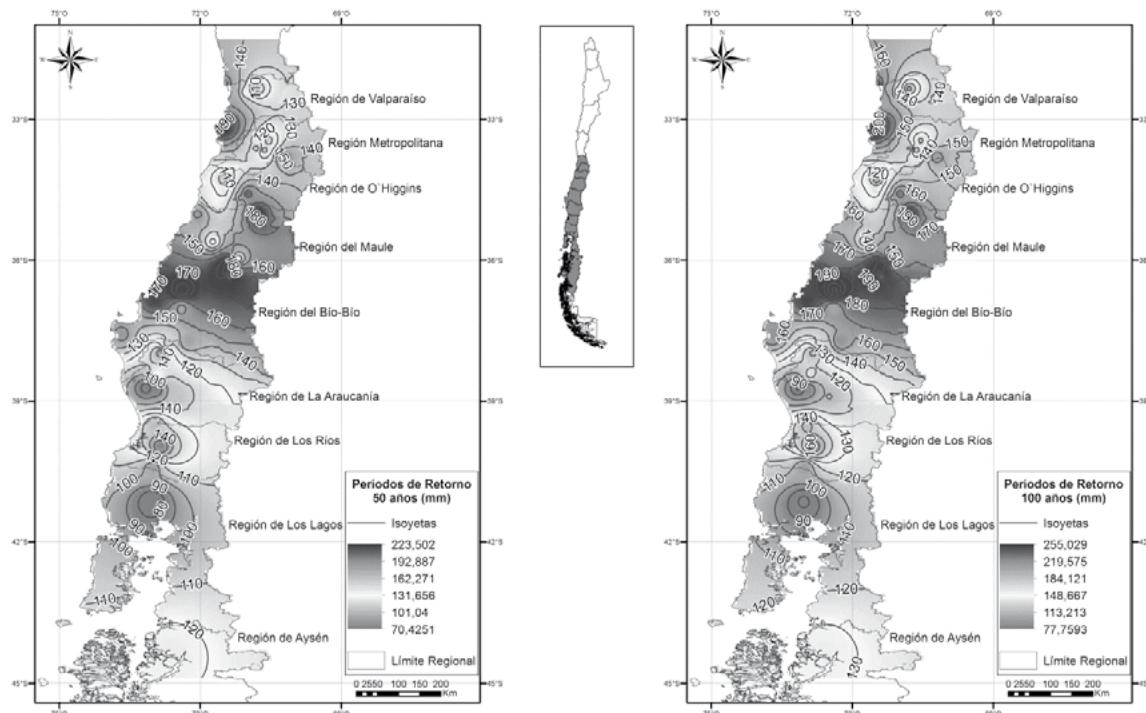
Cuando se comparan los mapas de los períodos de retorno que corresponden a 5 y 10 años no aparecen diferencias notorias en conjunto, sólo aparecen leves aumentos, en especial en la región de Valparaíso y en la de La Araucanía.

Mapa 2. Distribución espacial de las precipitaciones máximas estimadas en 24 horas para períodos de retorno de 5 y 10 años en las zonas centro y sur de Chile.



Cálculos de interpolación según el método Inverse Distance Weighted (IDW). Fuente: Dirección General de aguas y Dirección meteorologica de Chile (2012). Elaboración propia.

Mapa 3. Distribución espacial de precipitaciones máximas en 24 horas para períodos de retorno de 50 y 100 años en las zonas centro y sur de Chile.

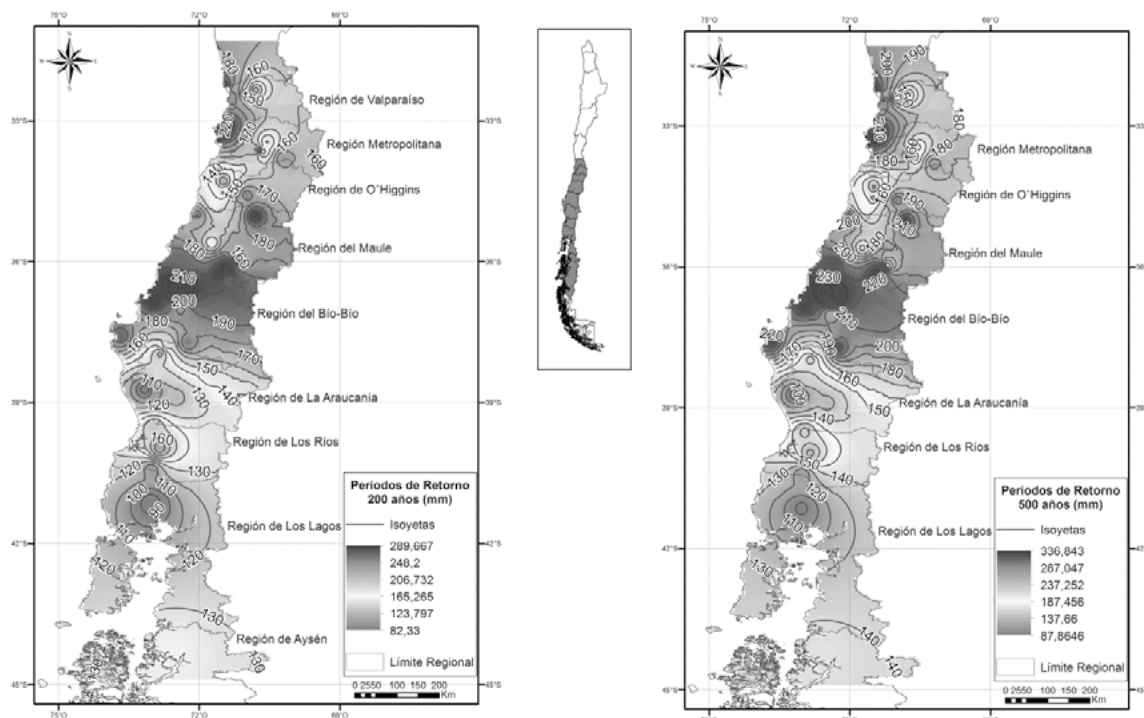


Cálculos de interpolación según el método Inverse Distance Weighted (IDW). Fuente: Dirección General de aguas y Dirección meteorologica de Chile (2012). Elaboración propia.

Para los períodos de retorno de 50 y de 100 años (Mapa 3) la distribución de las isoyetas tiende a ser más irregular, con valores también elevados en la zona cordillerana de las regiones de O'Higgins, Metropolitana y de Valparaíso. En comparación con el mapa del período de retorno de 5 años, en el de 50 años (Mapa 3) se aprecia una variación significativa en la zona norte de estudio con el aumento en las precipitaciones máximas en las regiones de Valparaíso y Metropolitana. En la zona centro-sur se sigue advirtiendo una disminución de las precipitaciones máximas desde la región de Los Lagos hacia la región de Aysén, que es también conocida en los valores medios de precipitación. En comparación a los precedentes, en el mapa del período de retorno de 100 años se observa una disminución relativa de las precipitaciones máximas en la región de Los Ríos, al igual que ocurre con la región de Los Lagos y Aysén. Por el contrario, se evidencia un incremento hacia la zona norte integrada por las regiones de Valparaíso y Metropolitana, y una ligera disminución relativa en intensidad en la latitud 37°sur.

Como era de esperar, donde se observa un mayor contraste espacial en los valores de las precipitaciones máximas calculadas es en los mapas correspondientes a los período de retorno de 200 y de 500 años (Mapa 4). En el del período de retorno de 500 años (Mapa 4) se distingue muy bien un apretado haz de isoyetas desde la cordillera de los Andes hacia el litoral en la región de la Araucanía, que marca una fuerte disminución de los valores hacia el sur. Por otra parte, algunos de los valores más elevados de la precipitación extrema aparecen en el norte (Quilpué).

Mapa 4. Distribución espacial de precipitaciones máximas en 24 horas para períodos de retorno de 200 y 500 años en las zonas centro y sur de Chile.



Cálculos de interpolación según el método Inverse Distance Weighted (IDW). Fuente: Dirección General de aguas y Dirección meteorológica de Chile (2012). Elaboración propia.

Los resultados para todos los períodos de retorno ponen de manifiesto las diferencias entre los valores máximos y mínimos estimados en el área de estudio, que son mayores cuanto mayor es el período de retorno, encontrándose diferencias en las precipitaciones extremas de hasta 200 mm para las recurrencias más largas.

Finalmente, hay que tener en consideración que las estaciones pluviométricas estudiadas, que son las mejores disponibles, no representan la enorme variedad del territorio chileno estudiado, en particular en lo que corresponde a su extrema gama de altitudes. En consecuencia, los resultados hallados constituyen una primera aproximación a la problemática, que en un futuro, con más series de precipitaciones máximas en 24 horas largas y de calidad, podrán ser mejorados.

5. Conclusiones

La presente investigación ha permitido conocer la ocurrencia y la distribución espacial de las precipitaciones máximas diarias en la zona centro y sur de Chile, los valores extremos de precipitación estimados para diferentes períodos de retorno y los lugares susceptibles de un mayor riesgo.

Del análisis de los períodos de retorno se ha encontrado que en el sector precordillerano de la región del Maule se dan eventos máximos de 160 mm en 24 horas para un período de retorno de tan solo 5 años. En las regiones de Valparaíso, Bío-Bío y Los Ríos se obtuvieron valores máximos de 130 mm en 24 horas para la misma recurrencia. El valor más elevado para un período de retorno de 10 años resultó ser 186 mm en 24 horas en la región del Maule. Se identificó que las áreas propensas a registrar un máximo de precipitación diaria extrema son: Valparaíso, con valores máximos de 230 mm, y la región de Maule, con 216 mm, en 24 horas para un período de retorno de 50 años. Las cantidades máximas de precipitación para los períodos de retorno de 100, 200 y 500 años, solo indicativas, se obtuvieron en Valparaíso, con valores de 263, 300 y 350 mm, respectivamente.

Con el presente trabajo se pretende aportar elementos objetivos para la planificación territorial y sectorial futura en las regiones que abarca este trabajo, de cara a lograr una mejor adaptación al comportamiento pluviométrico extremo, con la disminución consiguiente de los efectos negativos de ese riesgo.

6. Referencias bibliográficas

- Aparicio, Francisco Javier (1997). *Fundamentos de Hidrología de superficie.*, México D.F: Limusa-Noriega Editores.
- Chow, Ven Te; Maidment, David y Mays, Larry (1994). *Hidrología aplicada.* Santafé: McGraw-Hill.
- Custodio, Emilio y Llamas, Ramón (2001). *Hidrología Subterránea.* Barcelona: Tomo 1 (2ª Edición) Ediciones Omega.
- García, Enriqueta (2003). "Distribución de la precipitación en la República Mexicana Investigaciones Geográficas". *Instituto de Geografía*, Boletín 50.
- Garrido, Ramón (1992). "Limitaciones de la Distribución de Gumbel en la valoración del riesgo de lluvias fuertes: caso de un observatorio del litoral Mediterráneo". *Primer Congreso Iberoamericano Sobre Técnicas Aplicadas en la Gestión de Emergencias para la Reducción de Desastres Naturales.* Ponencias, Comunicaciones. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Gumbel, Emil (1941). "The return period of flood flows". *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 12, 2, 163-190.
- IPCC (2007). "Cambio climático 2007. Informe de síntesis". *Intergovernmental Panel on Climate Change.* Ginebra.
- Jones, James (1997). "Global Hydrology. Processes, resources and environmental management". Harlow: Longman, 399 p.
- Llamas, José (1993). "Hidrología general. Principios y aplicaciones". *Universidad del País Vasco.* Bilbao.