

Artículo de investigación



Variación latitudinal del índice de tormenta (valor k) en las regiones Metropolitana, Maule, Ñuble y Biobío, Chile

Latitudinal variation of the storm index (k value) in the Metropolitan regions, Maule, Ñuble and Biobío, Chile

Roberto Pizarro Tapia^{1,2,3}, Juan Pino Fuentes⁴, Carlos Vallejos Carrera¹, Romina Mendoza Mendoza¹, Claudia Sangüesa Pool^{1,2}, Cristóbal Toledo Acevedo¹, Alfredo Ibáñez Córdova^{1,2,*}

*Autor de correspondencia

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recibido 12 Enero 2024
Revisado 5 Febrero 2024
Aceptado 12 Noviembre 2024
Publicado 29 Julio 2025

PALABRAS CLAVE

Índice de tormenta; curvas IDF
Intensidad de precipitación

KEYWORDS

Storm index; IDF curves,
Rainfall intensity

Resumen

El diseño hidrológico de obras de conservación de aguas y suelos, hidrotecnias, es fundamental para abordar planes de restauración hidrológico forestal. Un insumo básico para ello son las curvas intensidad duración frecuencia, IDF, pero no es usual contar con sus expresiones matemáticas para su aplicación en diversos territorios. En este marco, el índice de tormenta (valor k) se define como un cociente entre la intensidad de precipitación para una duración i y un periodo de retorno j, y la intensidad en 24 horas y el mismo periodo de retorno. Esto permite extrapolar curvas IDF hacia estaciones pluviométricas. El presente estudio tiene por objetivo caracterizar el comportamiento latitudinal y altitudinal del valor k para diversas duraciones y periodos de retorno entre las latitudes 33°26' S y 38°54' S y las longitudes 70°39' O y 72°40' O, zona de aptitud forestal del país, utilizando un total de 40 estaciones. En primera instancia, se analizaron los datos de las estaciones a nivel regional. Posteriormente, se agruparon las estaciones utilizando criterios geográficos (latitud y altitud). Una vez agrupadas las estaciones, se analizó el comportamiento del valor k. Finalmente, el valor k no muestra una variabilidad latitudinal notoria, excepto en estaciones con influencia costera, lo cual hace incrementar su valor con respecto a las estaciones ubicadas en la zona mediterránea del país. Esto permitiría el uso del valor k para extrapolar las curvas IDF, pero cuidando en que la estación que se quiera extender con este método sea una estación ubicada en una zona de similares características.

Abstract

The hydrological design of water and soil conservation works, hydro-techniques, is essential to address forest hydrological restoration plans. A basic input for this are the intensity duration frequency curves, IDF, but it is not usual to have their mathematical expressions for their application in different territories. In this framework, the storm index (k value) is defined as a quotient between the precipitation intensity for a duration i and a return period j, and the intensity in 24 hours and the same return period. This allows the extrapolation of IDF curves to pluviometric stations. The present study aims to characterize the latitudinal and altitudinal behavior of the k value for different durations and return periods between latitudes 33°26' S and 38°54' S and longitudes 70°39' W and 72°40' W, the forest capability zone of the country, using a total of 40 stations. First, the data from the stations were analyzed at the regional level. Subsequently, the stations were grouped using geographical criteria (latitude and altitude). Once the stations were grouped, the behavior of the k-value was analyzed. Finally, the k-value does not show a notorious latitudinal variability, except in stations with coastal influence, which increases its value with respect to stations located in the Mediterranean zone of the country. This would allow the use of the k-value to extrapolate the IDF curves, but taking care that the station to be extended with this method is a station located in an area with similar characteristics.

- 1 UNESCO Chair Surface Hydrology, University of Talca, Talca 3467769, Chile. rpizarro@utalca.cl / cvallejoscarrera@gmail.com / rmendoza@utalca.cl / claudiasanguesa@gmail.com / cristobal.toledo@utalca.cl / alibanez@utalca.cl
- 2 Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera (CENAMAD) - ANID BASAL FB210015, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, Santiago 8320165, Chile.
- 3 Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile, La Pintana, Santiago 8820808, Chile.
- 4 Dirección de Transferencia Tecnológica, Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago 8330367, Chile. juan.pino@utem.cl

1. INTRODUCCIÓN

La degradación de territorios y específicamente de cuencas hidrográficas define la necesidad de abordar procesos de restauración de estas zonas con un criterio hidrológico forestal, que se define por el concepto de Restauración Hidrológico Forestal. Este se entiende como la planificación y la actuación técnica en el territorio, con el fin de restaurar situaciones de degradación de aguas, tierras y ecosistemas en general, por medio de ingeniería dura (hidrotecnias) e ingeniería blanda (biotecnias), en buen acuerdo con la población y en el marco de políticas públicas coherentes en tiempo y espacio.

Las hidrotecnias que precisan de un diseño de ingeniería hidrológica corresponden mayoritariamente a las zanjas de infiltración, las terrazas de infiltración, los canales de evacuación de aguas lluvias, los diques y las alcantarillas, entre otras. Pero todas estas obras precisan para su concreción en el diseño de insumos básicos; uno de ellos y quizás el de más difícil obtención, es la intensidad de precipitación de diseño, definida para un territorio determinado y un periodo de retorno dado. Y para ello es necesario recurrir a las curvas intensidad duración frecuencia, las que pueden solo ser obtenidas cuando existen registros continuos de precipitación que permiten estimar las intensidades en lapsos pequeños, incluso menores a una hora.

Por otra parte, Chile es un país que abarca grandes distancias longitudinales, lo que, sumado a una alta irregularidad geográfica, tanto de forma latitudinal como altitudinal, genera la existencia de una alta variabilidad en cuanto a la cantidad y distribución de las precipitaciones (Valdés-Pineda et al., 2014). En general, las precipitaciones son las que entregan la mayor parte del recurso agua a las cuencas de Chile, aportando el caudal a los cursos de agua y a la recarga de acuíferos, constituyéndose en el suministro natural de los ecosistemas (Ministerio de Obras Públicas, 2015). Bajo este contexto, el conocer el comportamiento temporal y espacial de las precipitaciones es un elemento de gran importancia, pues proporciona información útil a diferentes áreas como la edafología, la climatología, la biología, la antropología, entre otras, pero es en el área de la hidrología donde genera mayor utilidad e interés (Unesco, 2007).

Un elemento que permite caracterizar la cantidad de agua caída, es la intensidad de precipitación, que representa la cantidad de lluvia caída en una unidad de

tiempo (mm/h). Dicha cantidad es posible relacionarla con la frecuencia y duración de un evento de manera estadística, dando origen a las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) (García-Marín et al., 2015; Morbidelli et al., 2020). Para poder lograr dicha relación, se requiere contar con una cantidad de datos provenientes de series pluviográficas, lo que permite además deducir el patrón de comportamiento de una zona determinada y permitir un análisis y uso posterior. Pero, muchas veces no se dispone de registros continuos de precipitaciones o éstos carecen de información para realizar los análisis de frecuencia requeridos, o bien, solo cuentan con la información pluviométrica (24 horas), lo que dificulta el trabajo (Pizarro et al., 2015, 2018)

Unesco (2013) señala que a partir de las curvas IDF, es posible obtener intensidades de diseño fundamentales para el dimensionamiento de numerosos proyectos de control y evacuación de crecidas, proyectos de alcantarillado y colectores de aguas lluvias, así como sistemas de drenaje de caminos y aeropuertos.

En este sentido, son variados los métodos existentes para extender las curvas IDF hacia zonas en donde solo es posible contar con datos cada 24 horas, como es el caso de las estaciones pluviométricas. Una forma de extender los valores de las curvas IDF es mediante la regionalización de las curvas. Este método consiste en la interpolación espacial de los parámetros o intensidades de las estaciones con curvas IDF, para su extensión espacial (Acosta-Castellanos et al., 2023; Sangüesa et al., 2023). Así, por ejemplo, Hershfield, (1961) realizó mapas con isolíneas de intensidades para todo el territorio continental de los Estados Unidos; actualmente casi la totalidad de los estados cuentan con una plataforma que entrega los valores de las curvas para distintas duraciones y periodos de retorno.

Otro método utilizado es el Kriging ordinario. La aplicación de la geoestadística tiene una gran variedad de usos (Liu et al., 2016) y generalmente tiene dos pasos. Así, en primer lugar, es necesario determinar la estructura de la covarianza de los datos (variograma) y en segundo lugar, se hacen las predicciones en los lugares donde no se observan datos (Kriging). El término Kriging es un algoritmo de interpolación espacial, cuyo objetivo es estimar el valor de una variable en un área geográfica donde no hay datos (Yang et al., 2015). Se basa en un análisis estocástico que considera la distancia y el nivel de variación de los

datos observados y su validez puede reflejarse en un variograma (Chaplot et al., 2006).

Bell (1969), estudió las razones entre la lluvia de diferentes periodos de retorno e igual frecuencia, utilizando datos de un gran número de estaciones ubicadas en una extensa zona geográfica que incluyó Estados Unidos, Hawai, Australia, Rusia, Alaska, Puerto Rico y África. Los resultados que se obtuvieron son válidos para lluvias provenientes de tormentas del tipo convectivas, con duraciones que van desde los 10 minutos hasta las 2 horas. De este estudio se concluyó que las razones entre lluvias de distinta duración o distinto periodo de retorno, llamados coeficientes de duración y coeficientes de frecuencia respectivamente, son muy constantes para todos los puntos indicados por lo que cuyo autor recomendó su aplicación en otras zonas para tormentas convectivas. Para Cheng y AghaKouchak (2014), las curvas IDF son usadas en el diseño de obras que captan agua proveniente de las tormentas, así como en la construcción de reservorios de agua. Tales diseños están basados en la estimación de los peores casos de lluvias intensas en intervalos de tiempo dados. De esta forma es posible analizar varias tormentas de distintas duraciones, para encontrar los eventos más críticos, de manera de poder seleccionar las frecuencias en los diseños.

A partir de la metodología propuesta por Bell (1969), el (Ministerio de Obras Públicas, 2022), siguió una concepción similar. Para ello, se definió un coeficiente de duración que es la razón entre la lluvia caída en una duración cualquiera y la lluvia caída en 24 horas, ambas con un periodo de retorno de 10 años, en donde los coeficientes de duración para 1 hora varían entre 0,08 - 0,43 y estos coeficientes coinciden con los sugeridos por Bell, (1969). Un problema de la aproximación anterior, se presenta en el limitado número de estaciones pluviográficas disponibles en diversos territorios, como es el caso de Chile, y por lo mismo los valores de intensidad calculados, no necesariamente representan la intensidad de la zona. Bajo este contexto, Unesco (2007, 2013) y Pizarro et al. (2015) señalan que existe un método que permite la extrapolación de intensidades máximas horarias a zonas con registros pluviométricos. Este método es llamado Método K o Índice de tormenta, en donde se obtiene un parámetro llamado valor K. Este se define como $K = I_{dj} / I_{24j}$, donde K es el índice de tormenta, que responde al cociente entre la intensidad de precipitación para una duración i y un periodo de retorno j , y la intensidad en 24 horas y el mismo periodo de retorno. Con este parámetro se estiman los valores de intensidad de precipitación sub-diarias en

las estaciones que carecen de ellas a partir de estaciones que tienen un comportamiento hidrológico similar a la estación pluviométrica en estudio.

Para seleccionar la estación patrón, Pizarro et al. (2015) señalan que el criterio de selección de la estación patrón define que no puede existir una diferencia mayor a 2 mm/h entre las intensidades de 24 horas entre la estación a reconstruir y su estación patrón. Si bien el objetivo general del método K es permitir la extrapolación de datos, existen pocos estudios con respecto al valor del Índice de Tormenta como alternativa para determinar los comportamientos de las intensidades de precipitación a través del tiempo. De los métodos planteados para extrapolar curvas IDF hacia otras zonas, este es el método más simple, ya que solo hay que determinar las diferencias de intensidades en 24 horas. Es por ello que este estudio pretende caracterizar y analizar la variación latitudinal y altitudinal de las intensidades de precipitación, tomando como referencia el valor del Índice de Tormenta, establecido para una serie de estaciones pluviográficas. En el contexto descrito, el índice de tormenta o los valores K, deberían responder a ciertos comportamientos en determinadas zonas climáticas y esa es la hipótesis que se plantea este artículo. Es decir, el valor del índice de tormenta como corresponde a un cociente entre intensidades de precipitación de diversa duración con respecto a las de 24 horas, debería mantener cierta similitud en tiempo y espacio, porque las lluvias se mantienen con ciertas características componentes. Por tanto, el objetivo es determinar el nivel de variabilidad de los índices de tormenta en el territorio en estudio, definiendo si existen algunas características geográficas que pudiesen influir en los valores alcanzados.

2. METARIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio comprende parte de la zona central de Chile, que para este caso involucra a cuatro regiones administrativas (Metropolitana, Maule, Ñuble y Biobío) ubicadas entre las latitudes 33°26'S y 38°30'S. Al interior de la zona de estudio hay distribuidas 40 estaciones pluviográficas que cuentan con las curvas IDF para duraciones entre 0.25 a 24 horas (Unesco, 2013). La zona de estudio presenta diversos tipos de climas (Sarricolea et al., 2017), presentando una variación longitudinal y altitudinal (Figura 1), siendo el tipo Csb el clima predominante y que se caracteriza por concentrar las precipitaciones en el invierno, mientras que las temperaturas medias de al menos 4 meses superan los 10°C (Beck et al., 2018)

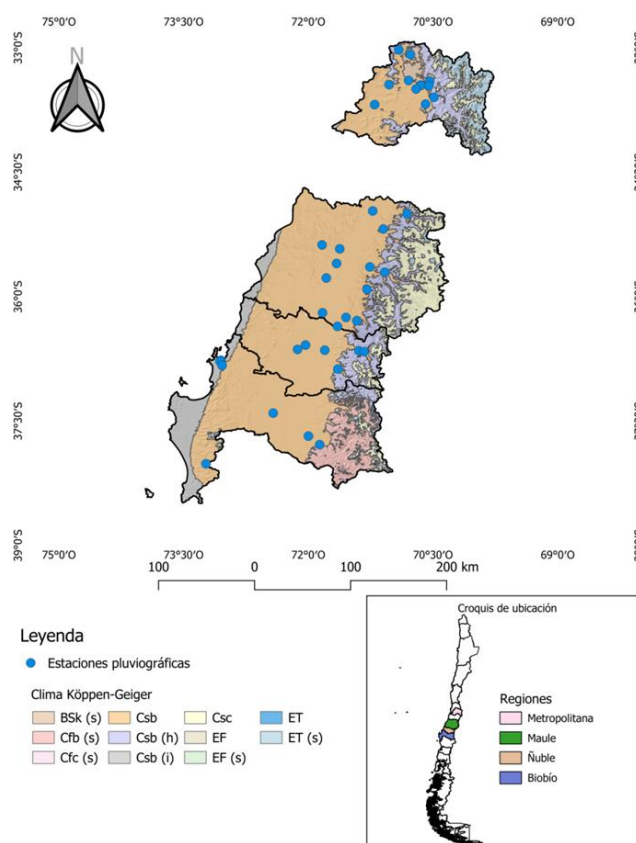


Figura 1: Distribución de las estaciones pluviográficas en la zona de estudio y los diferentes climas Köppen-Geiger, construcción propia con datos de Sarricolea et al., (2017).

2.1 Índice de Tormenta

El Índice de Tormenta (valor k) mide la relación entre las intensidades máximas de precipitación subdiarias y la intensidad de precipitación 24 horas (Pizarro et al., 2015). Esta relación tiene como objetivo generar

estimaciones de intensidades subdiarias a partir de estaciones pluviométricas que registran datos cada 24 horas. A continuación, se presenta la fórmula utilizada para su cálculo.

$$k = \frac{I_{t,d}}{I_{t,24}}$$

Donde

K	Índice de tormenta
$I_{t,d}$	Intensidad para un periodo de retorno (t) y duración (d) dadas
$I_{t,24}$	Intensidad para un periodo de retorno dado y duración de 24 horas

2.2 Análisis de valores k .

A partir del trabajo realizado por Unesco (2013) para el territorio en estudio, fue posible obtener valores del índice de tormenta definidos para las estaciones presentes. Esto permitió contar con información

validada a contar de la década de los 70 y hasta el año 2009.

En función de lo anterior, este estudio trata de evaluar los valores k en estas cuatro regiones administrativas, ya que son las únicas que poseen valores menores a

una hora de duración. Por tanto, se analiza la existencia de algún patrón de comportamiento en el índice de tormenta ligado con la latitud, longitud o

altitud de las estaciones. Finalmente, las duraciones analizadas son 0.25 y 24 horas y para los periodos de retorno de 5; 50 y 100 años.

Tabla 1. Estaciones pluviográficas por zona estudiada.

Región	Estación pluviográfica	UTM Norte	UTM Este	Altitud m.s.n.m	Región	Estación pluviográfica	UTM Norte	UTM Este	Altitud m.s.n.m.
		WGS 84 Uso 19S					WGS 84 Uso 19S		
Metropolitana	Embalse Rungue	6344563	321575	700	Maule	Armerillo	6046881	311869	450
	Huechún Andina	6338538	334706	590		Melozal	6037495	248348	110
	Pudahuel	6303827	333113	480		Embalse Ancoa	6023539	293064	430
	Cerro Calán	6303490	356880	848		Parral	5990920	245623	175
	Los Panguiles	6297875	311499	190		Embalse Digua	5985373	271197	390
	MOP-DGA	6297712	347149	560		Embalse Bullileo	5981362	282975	600
	Edificio Central	6297607	346643	560		San Manuel	5973171	262274	270
	Quinta Normal	6297392	346948	527	Ñuble - Biobío	Chillán	5947136	228614	156
	Tobalaba	6297286	356147	652		Caracol	5941041	286123	620
	Cerrillos	6292542	341711	554		Chillán Viejo	5941028	220217	106
	La Obra	6281783	361970	796		Embalse Coihueco	5940945	249537	314
	Pirque	6272526	352676	659		Diguillín	5916108	264244	670
	Melipilla	6270745	295875	170		La Punilla	5940130	291735	840
Maule	Curicó	6128453	296813	220		Hualpencillo	5923356	138463	30
	Los Queñes	6125462	334570	668		Carriel Sur	5921921	137419	18
	Potrero Grande	6104610	308992	460		Bellavista	5916507	139955	30
	Pencahue	6081649	242462	55		Los Ángeles	5854949	197051	121
	Talca	6076996	261931	130		Quilaco	5825399	235537	225
	San Javier	6057345	259056	135		Cerro el Padre	5814336	247868	400
	Colorado	6053556	295409	420		Contulmo	5784133	128504	25

2.3 Análisis estadístico

Se utilizó la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney (Helsel et al., 2020) para verificar si existen diferencias significativas para la latitud. Esta prueba permite determinar si dos muestras independientes provienen de una misma población. Al ser una prueba

no paramétrica, no requiere comprobar los supuestos de normalidad e igualdad de varianzas (Mason & Lind, 1998). De esta forma se evaluó la influencia de la latitud sobre los valores k y para esto se correlacionaron los valores k de cada estación con sus valores de posición espacial, mediante la prueba

estadística U de Mann-Whitney. Adicionalmente, se determinaron las correlaciones por rango de Spearman, entre cada par de variables (precipitación media e intensidad para cada periodo de retorno). El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la asociación entre las

variables. En contraste con las correlaciones de Pearson más comunes, los coeficientes de Spearman, son robustos frente a valores atípicos (Helsel et al., 2020).

$$U_1 = n_1 n_2 \left(\frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1 \right); U_2 = n_1 n_2 \left(\frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - R_2 \right)$$

Donde

U _i	Estadístico de la prueba U de Mann-Whitney i
n _i	Tamaño de la muestra i
R _i	Suma de los rangos de la muestra i

Adicionalmente, se determinaron las correlaciones por rango de Spearman (ρ), entre cada par de variables (precipitación media e intensidad para cada periodo de retorno). El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la asociación entre las variables. En contraste con las correlaciones de

Pearson más comunes, los coeficientes de Spearman, son robustos frente a valores atípicos (Helsel et al., 2020). Para llevar a cabo estos análisis estadísticos, se utilizó el software estadístico R 4.3 (R Core Team, 2023)

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n \left(R x_i R y_i - n \left(\frac{n+1}{2} \right)^2 \right)}{\frac{n(n^2 - 1)}{12}}$$

Donde

ρ :	Estadístico de Spearrman
Rx y Ry:	Rangos de la variables x e y respectivamente
n:	tamaño de la muestra

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Valores del Índice de tormenta o valores k promedios

Los valores del índice de tormenta para las duraciones menores a una hora son los que presentaron los coeficientes de variación mayores y para todos los periodos de retorno analizados. Por otro lado, los valores del Índice de tormenta, para la duración de 15 minutos oscilaron entre 3.29, 3.54 y 3.60 veces para los periodos de retorno de 5, 50 y 100 años respectivamente. Lo anterior fue calculado con respecto al valor máximo y mínimo y para los periodos de retorno señalados.

En cuanto al análisis matemático de los valores k, se observa que entre las latitudes 36°42' a 38°54' (región de Biobío), se presenta una mayor dispersión en los valores en comparación con las otras regiones

analizadas. Por otro lado, las latitudes entre los paralelos 35°25' a 36°42' (regiones del Maule y Ñuble) son las que presentan los valores más bajos en términos del valor k. También se aprecia que a medida que se aumenta la duración, el valor k disminuye, lo cual era esperable (figura 2). Por otro lado, para todas las duraciones, los valores máximos del valor k se encuentran en la región ubicada entre las latitudes 36°42' a 38°54', que a la vez es la que se ubica más al sur de la zona de estudio. Lo anterior viene reflejado por el hecho de que, si bien los montos de precipitación aumentan a medida que aumenta la duración, con las intensidades ocurre lo inverso, es decir, disminuyen a medida que aumenta la duración (Pizarro et al. 2012). Por tanto y derivado que el valor k proviene de las intensidades, era esperable que los valores fueran disminuyendo a medida que se aumenta en duración horaria.

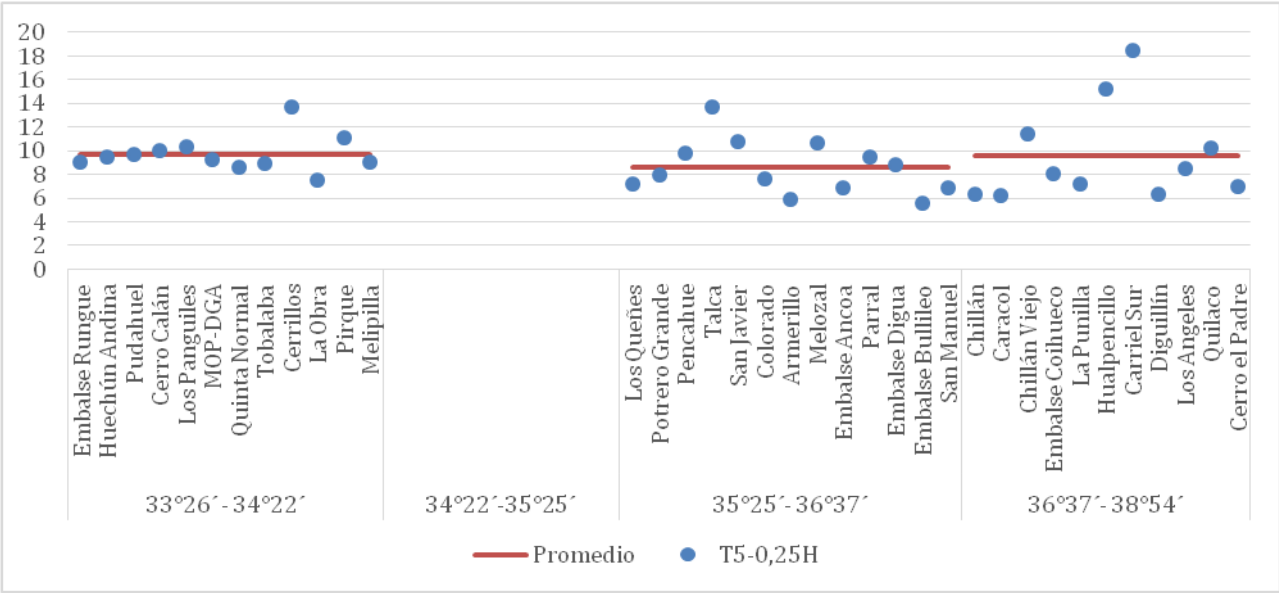


Figura 2. Valor *k* para duración de 15 minutos y periodo de retorno de 5 años.

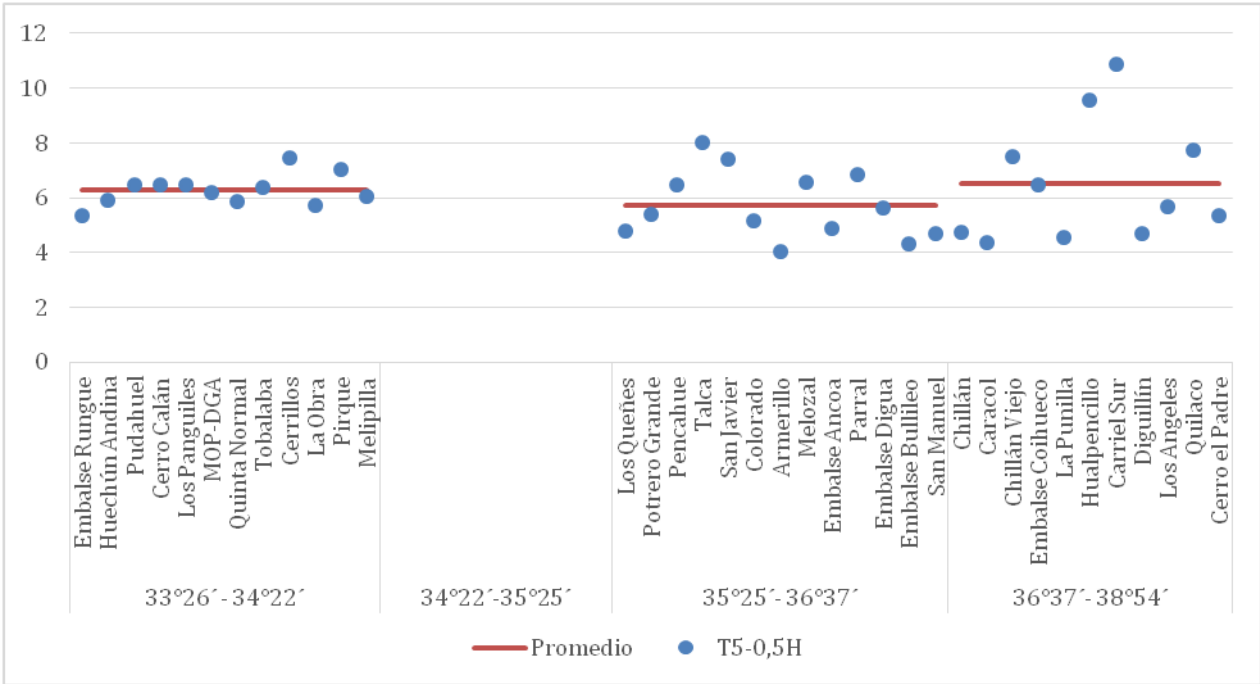


Figura 3. Valor *k* para duración de 30 minutos y periodo de retorno de 5 años

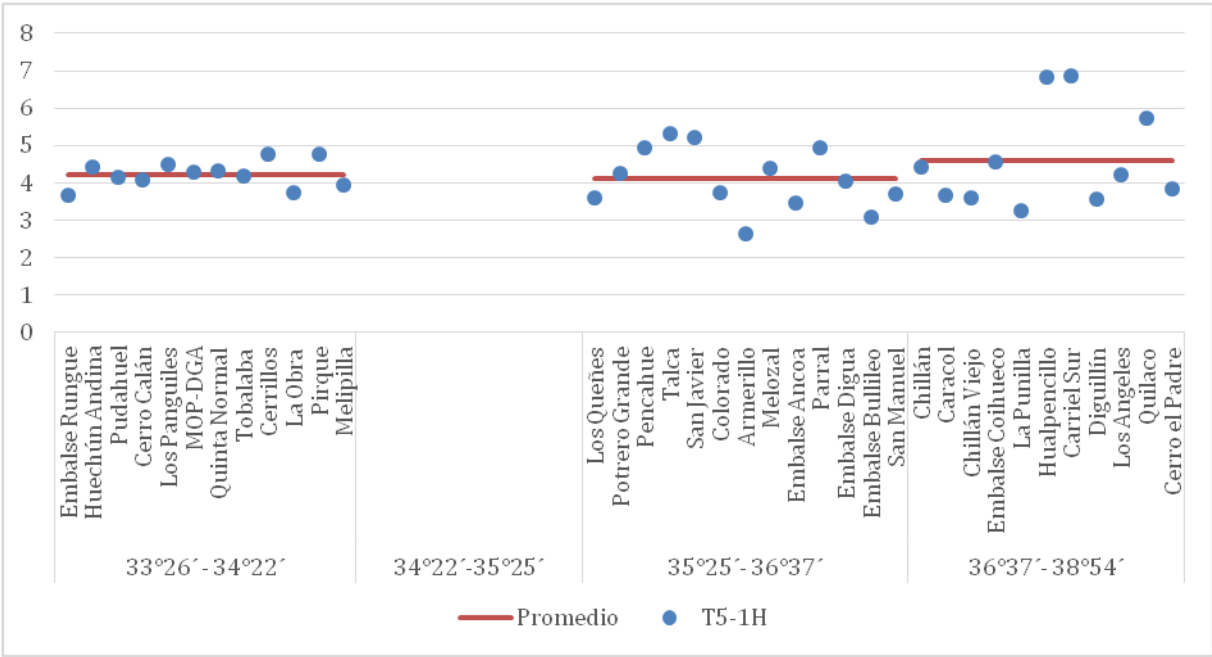


Figura 4. Valor k para duración de 1 hora y periodo de retorno 5 años

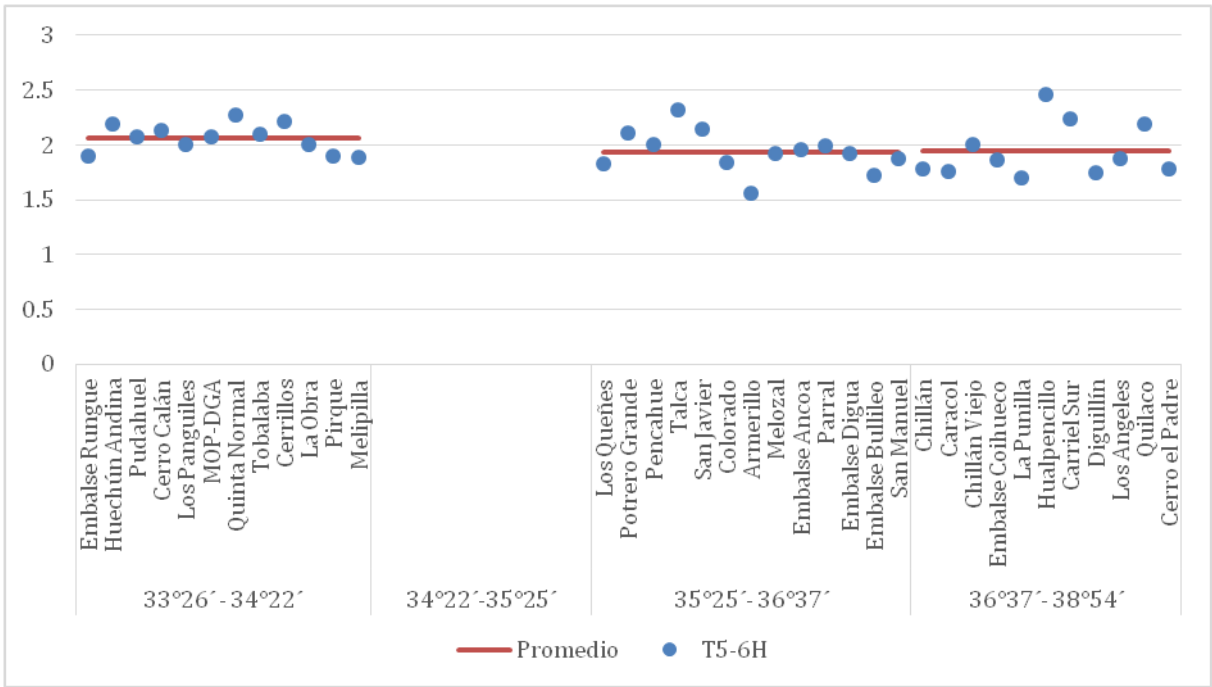


Figura 5. Valor k para duración de 6 horas y periodo de retorno de 5 años

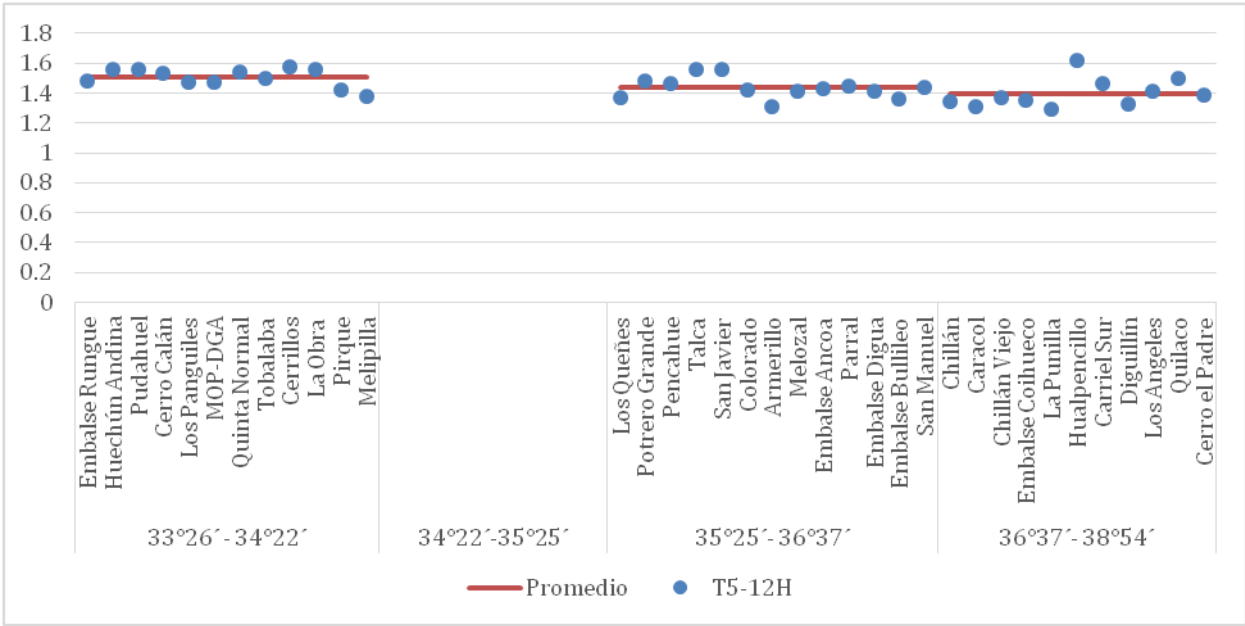


Figura 6. Valor k para duración de 12 horas y periodo de retorno 5 de años

En cuanto al coeficiente de variación porcentual (figuras 7, 8 y 9), los valores sugieren que son más variables para duraciones menores. Además, se observa que, para todas las duraciones, la región de Ñuble-Biobío (ubicada en las latitudes más australes de la zona de estudio), es la que presenta las mayores variaciones, lo que es válido para los tres periodos de retorno en análisis (5, 50 y 100 años). Asimismo, para todas las duraciones analizadas y para los tres periodos de retorno en análisis, la zona comprendida entre las latitudes 33°26' a los 34°22' (región Metropolitana), es

la que presenta la menor variabilidad. Lo anterior podría estar dado por lo que exponen Pizarro et al. (2015), quienes mostraron que los valores del índice de tormenta generalmente tienden a disminuir a medida que aumenta la precipitación anual, independientemente de la duración de la tormenta o el periodo de retorno (ver figura 10). Lo anterior es explicado porque en la región Metropolitana, todas las estaciones analizadas presentan valores de precipitación, que oscilan entre los 180 mm y los 556 mm por año.

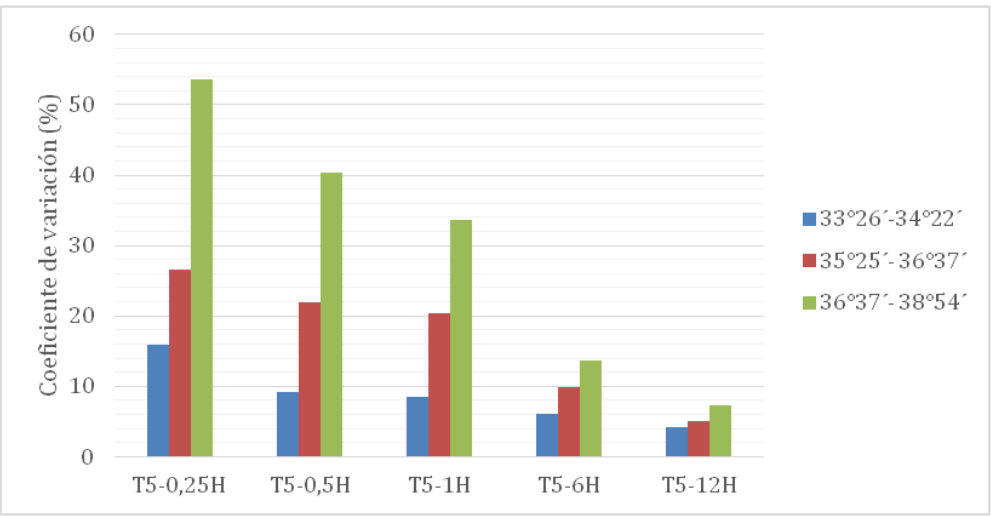


Figura 7. Valores porcentuales del coeficiente de variación para cada duración horaria analizada para el periodo de retorno de 5 años.

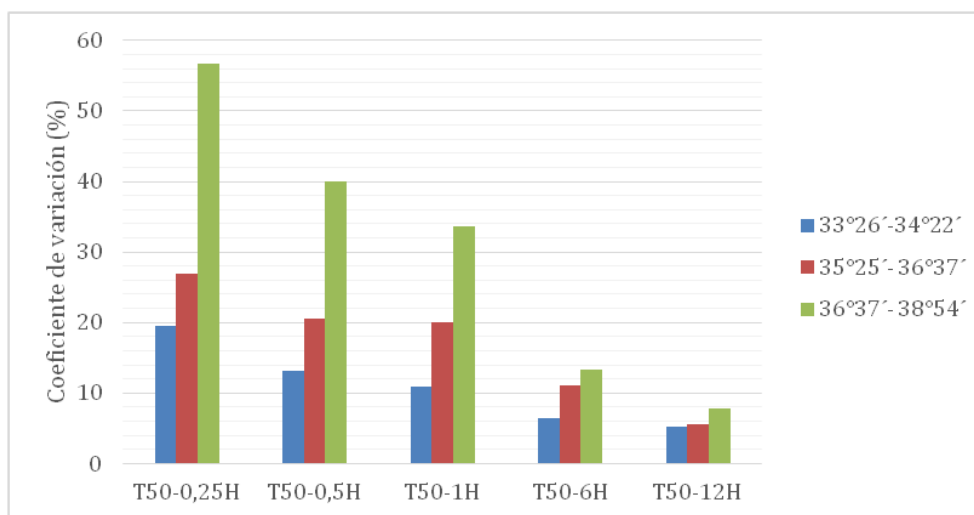


Figura 8. Valores porcentuales del coeficiente de variación para cada duración horaria analizada para el periodo de retorno de 50 años.

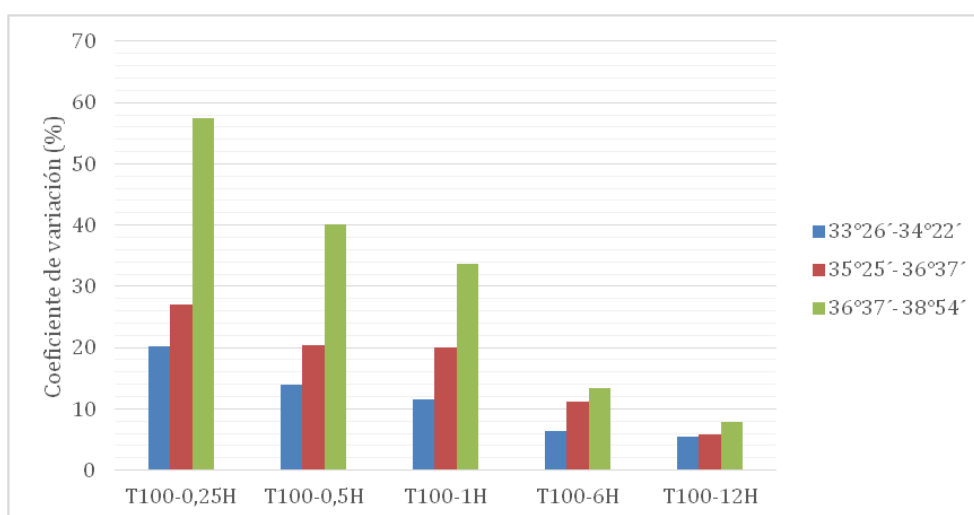


Figura 9. Valores porcentuales del coeficiente de variación para cada duración horaria analizada para el periodo de retorno de 100 años.

3.2 Comportamiento de la precipitación media y del valor k en función de la latitud

Por otro lado, también se realizó un análisis a partir de las Curvas IDF. Esto se hizo por medio de una comparación gráfica en sentido latitudinal para los

periodos de retorno de 5 y 100 años y para la duración de 15 minutos. A su vez, estos valores fueron comparados con la precipitación media anual, con el fin de establecer si existe algún comportamiento similar entre ambas variables.

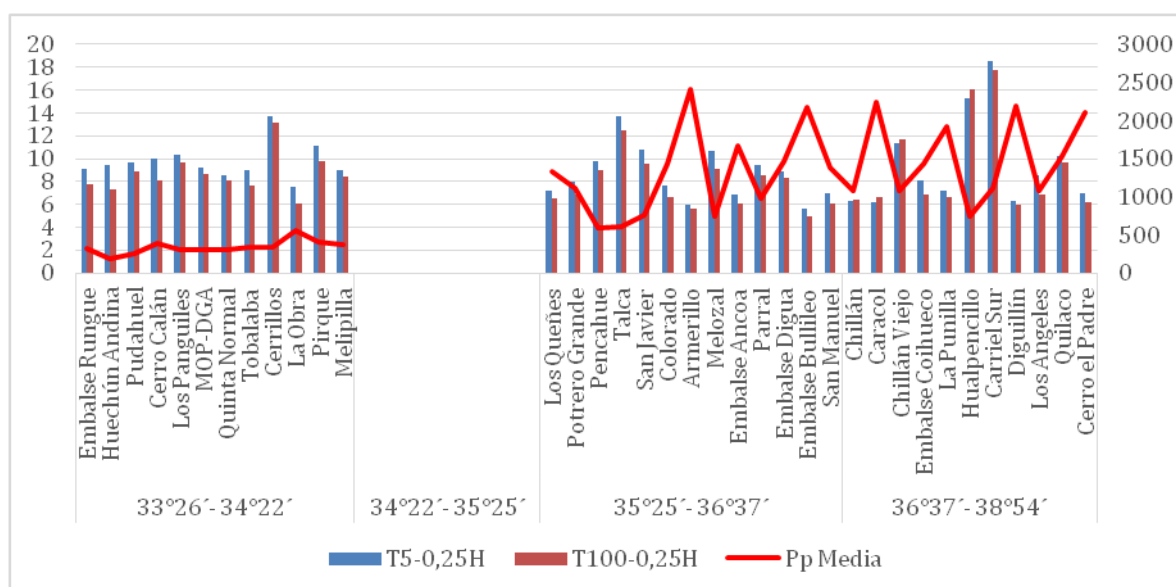


Figura 10. Valores k de cada las 4 regiones en estudio para la duración de 15 minutos, periodo de retorno de 5 y 100 años, y precipitación media anual.

De este gráfico destaca el comportamiento de las estaciones Carriel Sur y Hualpencillo. Esto ocurre porque estas dos estaciones están ubicadas en el clima mediterráneo de lluvia invernal e influencia costera, el que se presenta en la franja costera y en los sectores altos y laderas occidentales de la Cordillera de la Costa, con una humedad constante y con

precipitaciones que pueden llegar a los 2000 mm anuales. Como estas estaciones son las únicas ubicadas en esta zona, son las que presentan la menor distancia al mar, por ende, presentan al océano como un factor altitudinal-orográfico, presentando alzas en el comportamiento de montos e intensidades.

Tabla 2. Resultados prueba de Spearman.

Spearman Rho	Duración	Precipitación media		
		T=5	T=50	T=100
Correlación	0,25H	-0.59	-0.54	-0.53
Valor p		P<0.01	P<0.01	P<0.01
Correlación	0,5H	-0.51	-0.38	-0.35
Valor p		P<0.01	0.02	0.04
Correlación	1H	-0.43	-0.21	-0.14
Valor p		0.01	0.22	0.42
Correlación	6H	-0.63	-0.54	-0.52
Valor p		P<0.01	P<0.01	P<0.01
Correlación	12H	-0.69	-0.67	-0.65
Valor p		P<0.01	P<0.01	P<0.01

Los valores en rojo indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95% para la relación entre los valores k de los duraciones y periodo de retorno versus la precipitación media.

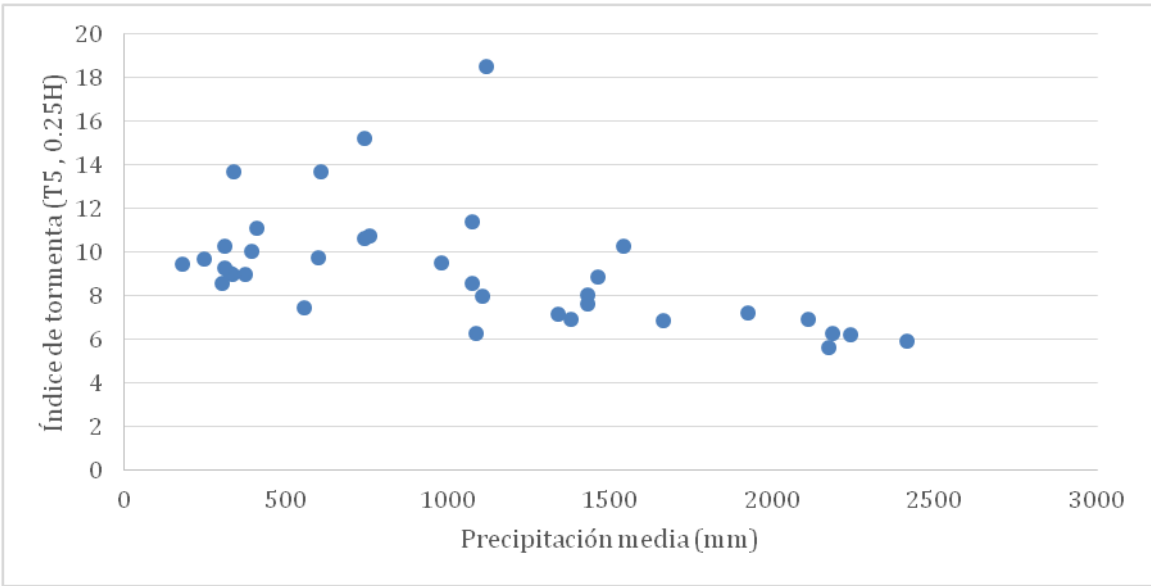


Figura 11. Precipitación media en función del valor k de cada una de las estaciones analizadas, para la duración de 15 minutos y periodo de retorno de 5 años.

De la figura 11 se puede observar que el patrón de comportamiento del valor k tiende a ser inverso en relación a la precipitación media anual. Lo anterior, se verifica en el resultado de las correlaciones de Spearman (Tabla 2). Por otro lado, del gráfico se desprende que el índice de tormenta aumenta a medida que hay una menor precipitación media anual. Sin embargo, del gráfico destaca el comportamiento de la estación Hualpencillo, presentando un valor k de 18.5 y una precipitación media anual de 1115.6 mm. Esta estación se encuentra ubicada en un clima Mediterráneo de lluvia invernal e influencia costera, razón que puede influir en el valor k tan elevado en comparación a las restantes estaciones.

Sin embargo, esto tampoco presenta un patrón de comportamiento, ya que no disminuye en una proporción definida, solo es posible definir que es una relación inversa. Por otro lado, en términos latitudinales, no se observa un patrón de comportamiento de los valores k a medida que se avanza de norte a sur. Esto para todas las duraciones y periodos de retorno analizados.

3.3 Análisis de prueba U de Mann-Whitney

Los resultados de la prueba U de Mann-Whitney para determinar cuáles son las duraciones que discrepan en la mediana de su población, se exponen a continuación:

Tabla 3. Valor-P de la prueba U de Mann-Whitney para el Índice de Tormenta para los diferentes periodos de retorno y duraciones analizadas

Periodo de retorno-Duración	Regiones Metropolitana v/s Maule)		regiones Metropolitana v/s Ñuble-Biobío)		regiones del Maule v/s Ñuble-Biobío)	
	w	Valor-p	w	Valor-p	w	Valor-p
T5-0.25H	-28	0.13	-20	0.23	5.5	0.77
T5-0.5H	-26	0.17	-8	0.64	10.5	0.56
T5-1H	-10	0.61	-2.5	0.90	11.5	0.52
T5-6H	-33.5	0.07	-29	0.08	-7	0.71
T5-12H	-43	0.02	-44.5	0.01	-25	0.16

T50-0.25H	-24	0.20	-15.5	0.36	11	0.54
T50-0.5H	-19	0.31	3.5	0.85	22.5	0.20
T50-1H	-0.5	1.00	25	0.13	24	0.17
T50-6H	-25	0.18	-20	0.23	-1.5	0.95
T50-12H	-39	0.04	-44.5	0.01	-29.5	0.09
T100-0.25H	-24	0.20	-15	0.37	13	0.47
T100-0.5H	-18	0.34	6	0.73	23.5	0.18
T100-1H	0	0.98	32	0.05	29	0.10
T100-6H	-25.5	0.17	-20	0.23	3	0.88
T100-12H	-38.5	0.04	-44	0.01	-31	0.08

Se puede observar que la gran mayoría de las comparaciones realizadas, cerca de un 82% no presenta diferencias significativas, por lo cual se tiende a cumplir la hipótesis planteada, en términos de que el índice de tormenta debiese mantener ciertos valores similares en tiempo y espacio, porque las lluvias se mantienen con ciertas características componentes. Solo un 17,7% del total de las comparaciones presenta diferencias significativas en los periodos de retorno de 5; 50 y 100 años.

En primera instancia, se observa que solo en dos de las tres zonas analizadas existen diferencias estadísticas significativas.

En relación a estas diferencias, se observa que se encuentran entre las regiones que abarcan las latitudes 33°26' - 34°22' y 35°25' - 36°37' (Metropolitana y Maule) y las regiones que comprenden las latitudes 33°26' - 34°22' y 36°37' - 38°54' (regiones Metropolitana y Ñuble-Biobío) y para las duraciones de 12 horas para los 3 periodos de retorno analizados. Adicionalmente, se encontró diferencias significativas en la duración de una hora pero solo para la comparación de las regiones Metropolitana con Ñuble-Biobío.

Estas diferencias pueden estar dadas por la ubicación de ciertas estaciones de la zona Ñuble-Biobío, localizadas en zona de climas mediterráneo con

influencia costera, lo que ha aumentado el valor del Índice k , provocando estas diferencias.

3.4 Análisis del valor k en función de la altitud

Al graficar los valores de k en función de la altitud de las estaciones seleccionadas, no se observó un patrón claro en la Región Metropolitana. En contraste, las regiones del Maule y Biobío muestran una tendencia negativa entre el valor de k y la altitud, siendo esta más pronunciada en duraciones inferiores a 1 hora (Figura 12).

Una limitación del estudio realizado radica en la distribución de las estaciones pluviográficas, dado que no existen estaciones en la parte alta de la cordillera de los Andes, por lo que la información de esa zona no puede ser considerada.

Asimismo, al concentrarse la mayoría de las estaciones en la zona central del área de estudio (Figura 1), no se observa una variación significativa en altitud, y por ende, la relación negativa encontrada no es concluyente y debe ser analizada con mayor profundidad, ampliando el rango altitudinal del área de estudio. A futuro, se recomienda extender este estudio utilizando datos de precipitación satelital u otras fuentes para obtener la información faltante.

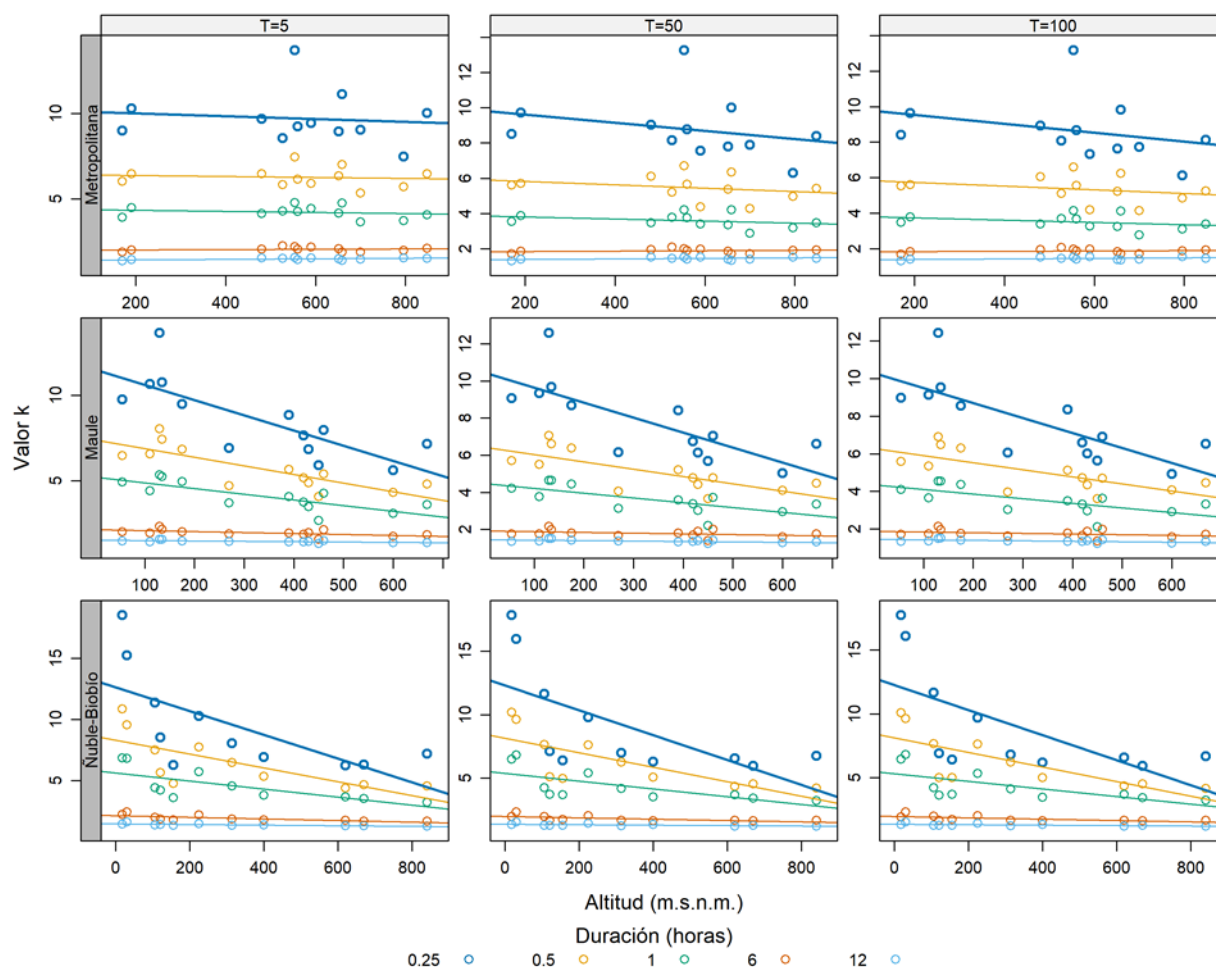


Figura 12. Variación del valor k, para los periodos 5, 50 y 100 años y las duraciones 0.25, 0.5, 1, 6 y 12 horas con respecto a la altitud.

4. CONCLUSIÓN

A nivel macro, se encontraron diferencias significativas en las duraciones de 12 horas pero solo entre las regiones Metropolitana con Maule y Metropolitana con Ñuble-Biobío. Adicionalmente, se encontró diferencias significativas en la duración de 1 hora y periodo de retorno de 100 años de entre las regiones Metropolitana y Ñuble-Biobío. Sin embargo, no se identificó un patrón espacial que explique el comportamiento del mismo. Lo anterior, es válido para la dimensión latitudinal, ya que altitudinal no se realizó por el escaso rango que presentan las estaciones analizadas. En cuanto a los valores del índice de tormenta por región administrativa analizada, si bien la región de Ñuble-Biobío es la que presenta los valores más altos, estos en su mayoría no

alcanzan a presentar diferencias significativas con los valores registrados en las otras dos regiones analizadas. Esto es válido para las duraciones de 15 y 30 minutos y para 1 y 6 horas. Finalmente, de estos resultados se desprende que el valor k no presenta diferencias significativas en su componente latitudinal en duraciones menores a seis horas. Este resultado permite extender las curvas IDF a estaciones pluviométricas y de esta forma poder diseñar obras de conservación de aguas y suelos o para aumentar la productividad de las cuencas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del centro ANID BASAL FB210015 (CENAMAD).

REFERENCIAS

- Acosta-Castellanos, P. M., Castro Ortégón, Y. A., & Perico Granados, N. R. (2023). Regionalization of IDF Curves by Interpolating the Intensity and Adjustment Parameters: Application to Boyacá, Colombia, South America. *Water*, 15(3), 561. <https://doi.org/10.3390/w15030561>
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5(1), 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Bell, F. C. (1969). Generalized Rainfall—Duration—Frequency Relationships. *Journal of the Hydraulics Division*, 95(1), 311–328. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001942>
- Chaplot, V., Darboux, F., Bourennane, H., Leguédois, S., Silvera, N., & Phachomphon, K. (2006). Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. *Geomorphology*, 77(1–2), 126–141. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.12.010>
- Cheng, L., & AghaKouchak, A. (2014). Nonstationary Precipitation Intensity-Duration-Frequency Curves for Infrastructure Design in a Changing Climate. *Scientific Reports*, 4(1), 7093. <https://doi.org/10.1038/srep07093>
- García-Marín, A. P., Estévez, J., Sangüesa-Pool, C., Pizarro-Tapia, R., Ayuso-Muñoz, J. L., & Jimenez-Hornero, F. J. (2015). The use of the exponent $K(q)$ function to delimit homogeneous regions in regional frequency analysis of extreme annual daily rainfall. *Hydrological Processes*, 29(1), 139–151. <https://doi.org/10.1002/hyp.10284>
- Helsel, D. R., Hirsch, R. M., Ryberg, K. R., Archfield, S. A., & Gilroy, E. J. (2020). Statistical methods in water resources (Report Nos. 4-A3; Techniques and Methods, p. 484). USGS Publications Warehouse. <https://doi.org/10.3133/tm4A3>
- Hershfield, D. (1961). Rainfall frequency atlas of the United States for durations from 30 minutes to 24 hour and return periods from 1 to 100 years. Department of Commerce.
- Liu, W., Du, P., Zhao, Z., & Zhang, L. (2016). An Adaptive Weighting Algorithm for Interpolating the Soil Potassium Content. *Scientific Reports*, 6(1), 23889. <https://doi.org/10.1038/srep23889>
- Mason, R. D., & Lind, D. A. (1998). Estadística para administración y economía (8a. ed). Alfaomega.
- Ministerio de Obras Públicas. (2015). Atlas del agua: Chile 2016. Ministerio de Obras Públicas.
- Ministerio de Obras Públicas. (2022). Manual de carreteras: Volumen N° 3 Instrucciones y criterios de diseño. <https://mc.mop.gob.cl/>
- Morbideilli, R., García-Marín, A. P., Mamun, A. A., Atiqur, R. M., Ayuso-Muñoz, J. L., Taouti, M. B., Baranowski, P., Bellocchi, G., Sangüesa-Pool, C., Bennett, B., Oyunmunkh, B., Bonaccorso, B., Brocca, L., Caloiero, T., Caporali, E., Caracciolo, D., Casas-Castillo, M. C., G.Catalini, C., Chettih, M., ... Saltalippi, C. (2020). The history of rainfall data time-resolution in a wide variety of geographical areas. *Journal of Hydrology*, 590, 125258. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125258>
- Pizarro, R., Ingram, B., Gonzalez-Leiva, F., Valdés-Pineda, R., Sangüesa, C., Delgado, N., García-Chevesich, P., & Valdés, J. (2018). WEBSEIDF: A Web-Based System for the Estimation of IDF Curves in Central Chile. *Hydrology*, 5(3), 40. <https://doi.org/10.3390/hydrology5030040>
- Pizarro, R., Valdés, R., Abarza, A., & Garcia-Chevesich, P. (2015). A simplified storm index method to extrapolate intensity-duration-frequency (IDF) curves for ungauged stations in central Chile: STORM INDEX METHOD TO EXTRAPOLATE IDF CURVES. *Hydrological Processes*, 29(5), 641–652. <https://doi.org/10.1002/hyp.10187>
- R Core Team. (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing (Versión 4.3.0) [Windows]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

- Sangüesa, C., Pizarro, R., Ingram, B., Ibáñez, A., Rivera, D., García-Chevesich, P., Pino, J., Pérez, F., Balocchi, F., & Peña, F. (2023). Comparing Methods for the Regionalization of Intensity–Duration–Frequency (IDF) Curve Parameters in Sparsely-Gauged and Ungauged Areas of Central Chile. *Hydrology*, 10(9), 179. <https://doi.org/10.3390/hydrology10090179>
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66–73. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>
- Unesco. (2007). Curvas intensidad—Duración—Frecuencia para la zona centro sur de Chile.
- Unesco. (2013). Curvas Intensidad Duración Frecuencia para las regiones Metropolitana, Maule y Biobío. Intensidades desde 15 minutos a 24 horas. PHI-LAC.
- Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J. B., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, F., Pérez, F., Vallejos, C., Fuentes, R., Abarza, A., & Helwig, B. (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology*, 519, 2538–2567. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.016>
- Yang, X., Xie, X., Liu, D. L., Ji, F., & Wang, L. (2015). Spatial Interpolation of Daily Rainfall Data for Local Climate Impact Assessment over Greater Sydney Region. *Advances in Meteorology*, 2015, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2015/563629>

Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figuran no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO, y no comprometen a la Organización.

The designations and material presented in this publication are not an expression of UNESCO's opinion on the legal status of any country, territory, city, or area, or on the delimitation of its frontiers or boundaries. The ideas and opinions expressed in this publication are those of the authors and do not necessarily represent the views of UNESCO. The Organization is not responsible for the opinions expressed by the authors.

Dans le cadre de cette publication, l'UNESCO a recours à des appellations et à une présentation des données qui n'impliquent aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant à leurs frontières ou limites. Les points de vue et les idées exprimés dans cette publication sont ceux des auteurs et ne reflètent pas nécessairement le point de vue de l'UNESCO, qui n'est pas engagée par ceux-ci.



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0
International
CC BY-NC-SA 4.0 license