

ARTÍCULO 1

Metodología para la estimación de parámetros de cálculo de tormentas de diseño con datos pluviométricos en Bolivia

Gamarra Mendoza Mario Carmelo^{a*}

^a Centro de Investigación del Agua (CIAGUA), Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

* Correspondencia del autor: mcgamarramendoza@hotmail.com, dirección.

Resumen

En Bolivia se requiere el diseño de infraestructura hidráulica para diversidad de aplicaciones, para lo cual se debe calcular el caudal de crecida, que requiere realizar el cálculo de una tormenta de diseño adecuada a las condiciones locales. En los últimos años se han publicado diversos estudios de las precipitaciones máximas registradas en el territorio nacional con registros pluviográficos, con un alcance regional claramente diferenciado. El presente trabajo de investigación realiza una evaluación sintética de la información disponible hasta la fecha sobre tales estudios, enfocándose en los métodos del factor Kd de distribución de la precipitación en función a la duración de la tormenta, y obteniendo factores comparables con tal método de los coeficientes del método de Bernard (1932) de las curvas IDF obtenidas a nivel nacional y que se encuentran en la bibliografía consultada. De esta manera, se ha obtenido un parámetro simple de regionalización con alcance nacional para calcular tormentas de diseño, mediante un método de regionalización propuesto que tiene la ventaja de ser actualizable sistemáticamente de manera versátil con nuevos estudios locales de registros pluviográficos. La metodología permite calcular hietogramas de precipitación máxima, útiles para la determinación de caudales de crecida en estudios hidrológicos.

Palabras Claves: Tormenta de diseño, registro pluviográfico, caudal de crecida, regionalización, factor Kd, curva IDF.

Abstract

In Bolivia, the design of hydraulic infrastructure is required for a variety of applications, for which the flood flow must be calculated, which requires the calculation of a storm design appropriate to local conditions. In recent years, various studies have been published of the maximum rainfall recorded in the national territory with pluviographic records, with a clearly differentiated regional scope. This research work carries out a synthetic evaluation of the information available to date on such studies, focusing on the methods of the Kd distribution factor of precipitation as a function of the duration of the storm, and obtaining comparable factors with such method from the coefficients of the Bernard method (1932) of the IDF curves obtained at the national level and found in the consulted bibliography. In this way, a simple regionalization parameter with national scope has been obtained to calculate design storms, by means of a proposed regionalization method that has the advantage of being systematically updateable in a versatile way with new local studies of rainfall records. The methodology allows the calculation of maximum precipitation hietograms, useful for determining flood flows in hydrological studies.

Keywords: Design storm, pluviographic record, flood flow, regionalization, Kd factor, IDF curve.

1. Introducción

El análisis de la precipitación máxima para la obtención de caudales de crecida, mediante algún método de transformación lluvia-caudal, es una parte importante de los estudios hidrológicos. Actualmente se recurre a un software especializado que tienen una diversidad de métodos de transformación lluvia-caudal, para lo cual se requiere introducir información conveniente y confiable de la precipitación máxima en un formato de tormenta de diseño.

En Bolivia la mayor cantidad de información disponible de precipitación máxima es de registros pluviométricos, mientras que la información pluviográfica es escasa y la existente no se dispone abierta al público, por lo que únicamente se tienen referencia de tal información a través de estudios hidrológicos de registro pluviográficos principalmente a través de tesis de estudiantes de pregrado y posgrado.

En la literatura se han propuesto diversas fórmulas para definir las curvas IDF que pretenden tener validez universal, entre las que destaca la denominada fórmula de Grunsky la cual es de la forma (Administradora Boliviana de Carreteras, 2007):

Entre la normativa boliviana referida a la determinación de tormentas de diseño se encuentra en 2 referencias técnicas de una manera categórica, en el Manual de Hidrología y Drenaje (Administradora Boliviana de Carreteras, 2007), que es un referente especial al exponer una metodología para calcular tormentas de diseño empleando información pluviométrica mediante 2 técnicas: 1) Fórmula de Grunsky y 2) Relación de Bell. Sus expresiones se presentan a continuación:

Fórmula de Grunsky

$$i_t = i_{24} \cdot \sqrt{\frac{24}{t}} \quad \text{Ecuación [1]}$$

Donde:

i_t = es la intensidad en una duración cualquiera t

i_{24} = es la intensidad media en 24 horas

t = duración en horas

Relación de Bell:

$$P_t^T = (0.21 \cdot i + 0.52) \cdot (0.54 \cdot t^{0.25} - 0.5) \cdot P_{60}^{10}$$

Ecuación [2]

Donde:

P_t^T = Lluvia en mm de duración t minutos y T años de período de retorno

T = Período de retorno en años

t = Duración de la lluvia en minutos

P_{60}^{10} = Lluvia en mm de duración 60 minutos y 10 años de periodo de retorno

Cuando se cuentan con registros pluviográficos, se tienen las siguientes expresiones que permiten determinar las curvas IDF (Iturry Urquiza, 2013):

Modelo de Sherman (1931)

$$I = \frac{K \cdot T^m}{(D + b)^n} \quad \text{Ecuación [3]}$$

Modelo de Bernard (1932)

$$I = \frac{K \cdot T^m}{D^n} \quad \text{Ecuación [4]}$$

Modelo de Chow (1994)

$$I = \frac{K \cdot T^m}{D^n + b} \quad \text{Ecuación [5]}$$

Donde:

I = Intensidad de precipitación

D = Duración de la precipitación

T = Periodo de retorno

b, K, m, n = Constantes que se calculan mediante el análisis de regresión no lineal

Sin embargo, no siempre es posible contar con la información de las ecuaciones anteriores, y es posible observar ello en la bibliografía que contiene información relacionada con el análisis de registros pluviográficos realizados en Bolivia, la cuales se referencia a continuación y se detalla en la bibliografía del presente artículo de investigación. Este hecho es por la alta fragmentación de la información y en diversas ocasiones el enfoque diferenciado de análisis, por ejemplo, un autor analiza 11 estaciones meteorológicas del altiplano en el Departamento de Oruro (Maldonado Navia, 2015), otros analizan registros pluviográficos del eje Central de Bolivia La Paz, El Alto, Cochabamba y Santa Cruz (Amaya Martínez, López Condori, & Seoane Salazar, 2009), otro autor se enfoca en las ciudades de Potosí, Sucre y Tarija (Iturry Urquiza, 2013), otro autor realizó su aporte en la estación Viacha de La Paz (Quispe Mamani, 2018), y por último en la zona oriental de Bolivia se tienen autores que contribuyeron con el análisis de las estaciones de Guayaramerín, Magdalena y Mairana (Carrillo Nacho, Marca Castillo, & Villarroel Quevedo, 2011).

El Reglamento Técnico de Diseño de Sistemas de Drenaje Pluvial Urbano, presenta en su Anexo E curvas IDF de diferentes estaciones con registros pluviográficos en Bolivia, mediante reportes del SENAMHI. (Ministerio de Medio Ambiente y Agua - Bolivia, 2010)

La expresión de la curva IDF presentada en el reglamento de referencia, se presenta a continuación:

$$\text{Curva IDF} \quad I = \frac{c \cdot f^m}{t^n} \quad \text{Ecuación [6]}$$

Donde los valores de c , m y n corresponden a las características regionales de la precipitación. Básicamente la anterior expresión es la del Modelo de Bernard, con la única variación de las denominaciones de los coeficientes y las variables.

En el reglamento de referencia también se presentan las expresiones de las curvas IDF de las siguientes estaciones con registros pluviográficos:

San Calixto, Laikacota, El Alto - Aeropuerto Internacional, SENAMHI Central Santa Cruz, Aeropuerto Cochabamba y Aeropuerto Trinidad.

Las metodologías que se enfocan en la relación que existe entre la precipitación registrada por pluviógrafos y la registrada por pluviómetros son importantes en nuestro país, dado que la mayor cantidad de información es de registros pluviométricos. Es así que se destaca la metodología del factor K_d , que es adimensional y se obtiene dividiendo las precipitaciones máximas para cada duración entre la precipitación máxima de 24 horas. Ambas precipitaciones pertenecen a un mismo periodo de retorno y son obtenidas luego de realizar el análisis frecuencial de tormentas registradas en la estación pluviográfica. La ecuación siguiente, nos muestra la forma de cálculo (Iturry Urquiza, 2013):

$$\text{Factor } K_d \quad K_d = \frac{P_d^T}{P_{24}^T} \quad \text{Ecuación [7]}$$

Donde:

P_d^T = Precipitación en [mm] para cada d [min] y cada T [años]

P_{24}^T = Precipitación en [mm] para 1440 [min] y cada T [años], estimadas a partir del análisis frecuencial

Si bien la metodología no es expuesta en normativa alguna, es relevante y reiteradamente empleada en los diversos estudios de registros pluviográficos mencionados anteriormente.

Si bien la normativa nacional actualmente contiene algunas referencias técnicas sobre el cálculo de la tormenta de diseño, es necesario también considerar las referencias en el contexto internacional, por ejemplo, una metodología alternativa es la de Dick-Peschke, que relaciona la duración de la tormenta con la precipitación máxima en 24 horas. La expresión es la siguiente (MTC - Perú, 2008) :

Fórmula de Dick-Peschke

$$P_d = P_{24} \left(\frac{d}{1440} \right)^{0.25} \quad \text{Ecuación [8]}$$

Donde:

Pd = precipitación total (mm)

d = duración en minutos

P24 = precipitación máxima en 24 horas (mm)

La intensidad se halla dividiendo la precipitación Pd entre la duración.

Una metodología enfocada en la regionalización de los regímenes de precipitación máxima es tratada en el Manual de Drenaje para Carreteras (Instituto Nacional de Vías - Colombia, 2009), es del cálculo de curvas IDF por método simplificado, la cual recomienda su aplicación cuando no se disponga de datos históricos de precipitación de corta duración (datos pluviográficos). La metodología se desarrolla en base a la siguiente expresión:

Curva IDF INVIAS

$$i = \frac{a \cdot T^b \cdot M^d}{\left(\frac{t}{60} \right)^c} \quad \text{Ecuación [9]}$$

Donde:

i: Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).

T: Periodo de retorno, en años.

M: Precipitación máxima promedio anual en 24 h a nivel multianual

t: Duración de la lluvia, en minutos (min)

a, b, c, d: Parámetros de ajuste de la regresión. Estos parámetros fueron regionalizados para la República de Colombia, donde se presenta un mapa de 5 regiones, sin embargo, se presentan los valores para únicamente 4 regiones.

En la República del Paraguay la normativa de carreteras emplea una expresión ajustada para 3 estaciones representativas de la región oriental (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2011). La expresión es la siguiente:

Curva IDF MOPC

$$i = \frac{C \cdot T_r^n}{(t + d)^m} \quad \text{Ecuación [10]}$$

Donde:

i = Intensidad, mm/hr.

T_r = Tiempo de retorno, minutos.

d = Duración, minutos.

t = 180 minutos

Los valores de C, n y m son dispuestos para las 3 estaciones representativas de la zona oriental.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes de la República de México considera de suma importancia que se continúe la labor de recopilación de información de la ocurrencia de lluvia respecto al tiempo, registrada en pluviógrafos, así como de alturas máximas de lluvia de las estaciones pluviométricas del país, cubriendo aquellas regiones donde la información es muy escasa, con el fin de que los estudios hidrológicos tengan mayor precisión y, por consiguiente, se proyecten y construyan obras hidráulicas más seguras (Secretaría de Comunicaciones y Transportes de la República de México, 2021). Ha desarrollado una regionalización de las isoyetas en función a la intensidad, duración y periodo de retorno para toda la República Mexicana.

Como se observa cada país ha desarrollado sus propias iniciativas para brindar atención a la necesidad de mejorar los métodos para la determinación de tormentas de diseño para la estimación de caudales de crecida, que a su vez permitan diseñar infraestructura más segura.

Como se puede advertir en las líneas precedentes, actualmente la normativa nacional en Bolivia, en relación a esta temática se encuentra dispersa y es necesario realizar algunas actualizaciones que permitan cumplir con el objetivo de diseñar infraestructura hidráulica resiliente, con recursos metodológicos adecuados para el análisis hidrológico.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo de plantear una propuesta metodológica para calcular tormentas de diseño empleando registros pluviométricos considerando las referencias recientes de los estudios de registros pluviográficos realizados en Bolivia.

2. Materiales y métodos

La presente investigación es por sus características, en la cual se requiere demostrar exponer una metodología de parámetros de registro pluviográficos, regionalizados según zonas geomorfológicas de Bolivia, se ha optado por un enfoque mixto cualitativo-cuantitativo, debido a que la metodología es válida como una secuencia de procedimientos que permitan determinar el valor de un parámetro de disgregación de tormentas con duración menor a 24 horas. Se ha recurrido a realizar un diseño explicativo secuencial (DEX-PLIS) (Hernández Sampieri, Roberto; Fernández Collado, Carlos; Baptista Lucio, María del Pilar, 2010).

Se ha realizado la recopilación de los estudios de registros pluviográficos realizados por diversos autores, y se ha realizado la revisión de la metodología de análisis empleada en cada uno de ellos, encontrándose diversas similitudes. Entre las similitudes se encuentran la aplicación del método del Factor K_d y la expresión de Bernard para la

determinación de las curvas IDF, este hecho particular es relevante al establecer el mejor método para que se puedan determinar tormentas de diseño en el ámbito nacional.

También se ha realizado la revisión de la ubicación de las estaciones analizadas en los diversos estudios y que poseen registros pluviográficos, para observar la distribución espacial de las mismas en la extensión del territorio boliviano. Para tal propósito primeramente se han enlistado las estaciones que se encuentran en los estudios de referencia, de los cuales también se han rescatado las coordenadas de las estaciones. Al adquirir un protagonismo de relativa importancia la ubicación de las estaciones, se ha observado que tal información en los informes es únicamente el registro brindado por el SENAMHI en el momento de realización del mismo, y no ha sido objeto de una verificación, pues para el análisis de los estudios de referencia no era de una importancia significativa tal tarea. Es por ello que se ha dispuesto realizar una revisión de la ubicación de las estaciones, para lo cual existe una referencia importante que brinda el SENAMHI a través del portal del Sistema Integrado de Gestión de Estaciones (SIGE) <http://senamhi.gob.bo/index.php/sige>, desarrollado en el marco de la Cooperación española y que permite obtener información verificada de 721 estaciones tanto de ubicación como de otros datos de la misma, contando inclusive varias de ellas con un Reporte Técnico de la Estación a modo de monografía de la misma.

Una vez realizada tal tarea, se ha verificado la ubicación de las estaciones en las cuales se han realizado los estudios de registros pluviográficos. Las coordenadas de las estaciones se presentan a continuación:

Provincia	Estación	Departamento	Latitud	Longitud	Altura
Cercado	El Tejar Tarija	Tarija	21° 32' 35.16"	64° 43' 15.96"	1859
Tomas Frias	Potosí Los Pinos	Potosí	19° 33' 47.16"	65° 45' 38.16"	3950
Oropeza	Sucre Aeropuerto	Chuquisaca	19° 0' 59.04"	65° 17' 38.04"	2907
Sud Carangas	Andamarca	Oruro	18° 46' 0.12"	67° 31' 0.12"	3676
Atahualpa	Coipasa	Oruro	19° 16' 60"	68° 16' 0"	3680
Avaroa	Cruce Cultra (Ventilla)	Oruro	19° 4' 27.12"	66° 14' 40.92"	4157
Cercado	Chillca	Oruro	17° 50' 12.84"	66° 48' 50.04"	4025
Saucari	Chuquiña	Oruro	17° 47' 12.84"	67° 27' 50.04"	3726
Murillo	El Alto SENAMHI	La Paz	16° 31' 0"	68° 13' 0"	4071
Avaroa	Quillacas	Oruro	19° 14' 0.96"	66° 57' 42.12"	3719
Carangas	Salinas G. De Mendoza	Oruro	19° 39' 1.08"	67° 40' 9.12"	3722
Atahualpa	Todo Santos	Oruro	19° 1' 4.08"	68° 43' 4.08"	4013
Sajama	Turco	Oruro	18° 11' 4.92"	68° 10' 23.16"	3851
Antonio Quijarro	Uyuni	Potosí	20° 28' 19.92"	66° 49' 53.04"	3680
Vaca Diez	Guayaramerin Aeropuerto	Beni	10° 49' 0.12"	65° 20' 56.04"	130
Iténez	Magdalena	Beni	13° 15' 39.96"	64° 3' 34.92"	141
Florida	Mairana	Santa Cruz	18° 6' 0"	63° 57' 0"	1350
Murillo	Laykacota	La Paz	16° 30' 15.84"	68° 7' 23.16"	3635
Murillo	El Alto Aeropuerto	La Paz	16° 30' 37.08"	68° 11' 54.96"	4034
Andres Ibañez	Santa Cruz SENAMHI	Santa Cruz	17° 46' 59.88"	63° 10' 0.12"	410
Cercado	Cochabamba Aeropuerto	Cochabamba	17° 24' 57.96"	66° 10' 27.84"	2548
Ingavi	Viacha	La Paz	16° 39' 29.88"	68° 16' 54.84"	3850

Tabla 1

Coordenadas de las estaciones con registro pluviográfico (SENAMHI)

Las únicas estaciones que poseen las coordenadas de los estudios de referencia y no así de la verificación en el SIGE son El Alto SENAMHI, Coipasa y Mairana, sin embargo, su ubicación fue verificada y establecida como razonable en función a referencias poblacionales.

Luego de realizada tal operación se ha elaborado el mapa de ubicación de las estaciones empleando el software ArcGIS como se muestra a continuación:

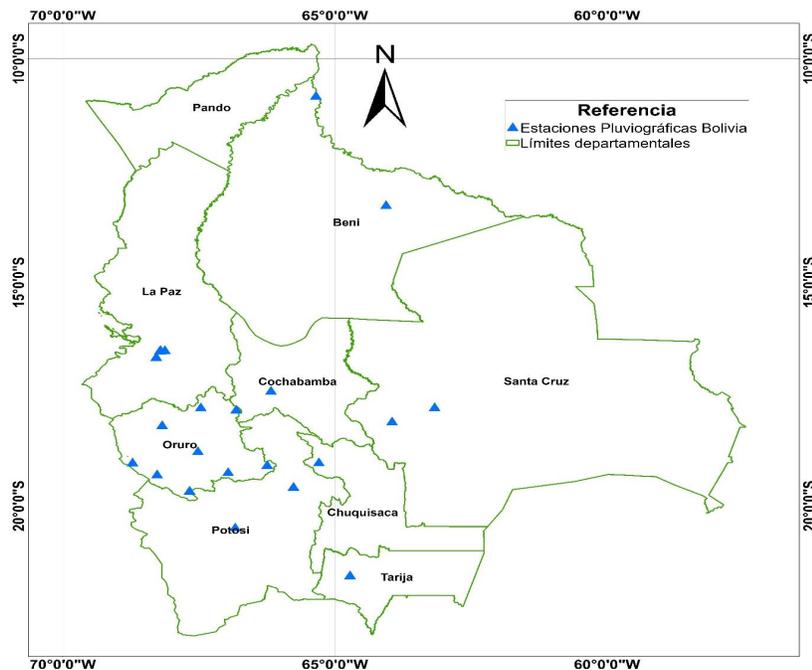


Figura 1

Mapa estaciones de Bolivia con registro pluviográfico

Se observa en el anterior mapa que los estudios de registros pluviográficos están principalmente desarrollados en la zona occidental del territorio boliviano, este hecho puede ser debido a los esfuerzos institucionales desarrollados principalmente en esta zona y otros relacionados a la accesibilidad a los sitios de observación, u otras de diversa naturaleza. Lo destacable de este hecho es que a pesar de contar con estudios de registro pluviográficos, los mismos cubren escasamente el territorio nacional y es por ello que la metodología a desarrollar debería hacer el mejor uso de la información actual, y procurar políticas que aseguren la recolección, sistematización, análisis y tratamiento, y desarrollo de una base de datos sobre registro pluviográficos.

Lo anteriormente expuesto, establece que se pue-

de desechar el desarrollo de una metodología que considere la construcción de isoyetas, pues la escasa densidad de registros pluviográficos y su distribución espacial no lo permiten, por tanto, es mejor desarrollar una metodología que considere la regionalización de parámetros que se puedan obtener de manera ágil y que a su vez pueda ser aplicable en la extensión del territorio boliviano.

Se observa que las expresiones disponibles en las diversas referencias técnicas consultadas son claramente diferentes, algunas más que otras, sin embargo, se ha planteado el propósito de observar la equivalencia o relación que existe entre algunas de las metodologías respecto de otras. A continuación, se presenta una tabla que sistematiza el grado de dificultad de unas en relación a otras:

Método	Dificultad	Observación
Grunsky	Moderadamente baja	La expresión está en función de la intensidad para periodos de duración comparables a una duración equivalente a una intensidad de precipitación de 24 horas, lo que es simplemente la división entre la precipitación registrada en pluviómetros para una duración de 24 horas
Bell	Moderadamente alta	La expresión está en función de la precipitación de registro pluviográfico para una duración de 60 minutos y un periodo de retorno de 10 años, lo que requiere de diversos registros pluviográficos y una metodología de tratamiento de tal información con tales características
Modelo de Bernard	Moderadamente alta	La expresión está en función de la precipitación de registro pluviográfico con un tratamiento adecuado para obtener curvas IDF. Si bien algunos estudios han realizado los esfuerzos en obtener los valores de los coeficientes para tal modelo, su tratamiento a objetos de regionalizar requiere una densificación de las estaciones con registros pluviográficos.
Dick-Peschke	Moderadamente baja	La expresión está en función de la precipitación para periodos de duración comparables a una duración equivalente a una precipitación de 24 horas
Factor K_d	Moderadamente baja	Existen diversos estudios a nivel nacional que ha obtenido los valores de tales factores K_d , y se pueden obtener fácilmente al conocer valores de otros registros pluviográficos.

Tabla 2

Dificultad relativa para la aplicación de un método en relación a otro

Las demás expresiones citadas anteriormente del contexto internacional, no son de aplicación para el análisis de la presente investigación, pues no serían comparables, pues requieren diversos parámetros que en Bolivia no se ha verificado que se hayan obtenido en los estudios de registro pluviográficos. La única expresión del contexto internacional que tiene una aplicabilidad es la de Dick-Peschke, al relacionarse con el Factor Kd, por la relación entre la precipitación registrada en pluviómetro en 24 horas y comparada con la precipitación para una duración menor.

También para analizar la conveniente aplicación de un método en relación a otro, se ha realizado una evaluación de las expresiones matemáticas de los diferentes métodos analizados, y que se presenta en la siguiente tabla:

Grunsky	Bernard
$i_t = i_{24} \cdot \sqrt{\frac{24}{t}} \quad (1)$	$I = \frac{c \cdot f^m}{t^n} \quad (1)$
Si $i = \frac{P}{t}$ entonces $\frac{P_t}{t} = \frac{P_{24}}{24} \cdot \sqrt{\frac{24}{t}} \quad (2)$	Si $I = i_t^T = \frac{P_t^T}{t}$ entonces $\frac{P_t^T}{t} = \frac{c \cdot f^m}{t^n} \quad (2)$
$P_t = P_{24} \cdot \frac{t}{24} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{t}{24}}} \quad (3)$	$P_t^T = \frac{c \cdot f^m}{t^n} \cdot t \quad (3)$
$P_t = P_{24} \cdot \left(\frac{t}{24}\right) \cdot \left(\frac{t}{24}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$	Si $i_{24}^T = \frac{P_{24}^T}{1440}$ entonces $\frac{P_{24}^T}{1440} = \frac{c \cdot f^m}{1440^n} \quad (4)$
$P_t = P_{24} \cdot \left(\frac{t}{24}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$	$P_{24}^T = \frac{c \cdot f^m}{1440^n} \cdot 1440 \quad (5)$
$P_t = P_{24} \cdot \left(\frac{t}{24}\right)^{0.5} \quad (6)$	Dividiendo (3) entre (5)
Si 24 h = 1440 min $P_t = P_{24} \cdot \left(\frac{t}{1440}\right)^{0.5} \quad (7)$	$\frac{P_t^T}{P_{24}^T} = \frac{\frac{c \cdot f^m}{t^n} \cdot t}{\frac{c \cdot f^m}{1440^n} \cdot 1440} \quad (6)$
	$\frac{P_t^T}{P_{24}^T} = \frac{1}{\left(\frac{t}{1440}\right)^n} \cdot \left(\frac{t}{1440}\right) \quad (7)$
	$P_t^T = P_{24}^T \cdot \left(\frac{t}{1440}\right)^{1-n} \quad (8)$

Tabla 3

Análisis matemático de los métodos para la evaluación de la precipitación de duraciones diferentes a 24 horas

Como se observa en la anterior tabla, el tratamiento matemático de las 2 expresiones conduce a expresiones que están relacionadas con el factor Kd de una manera sencilla que únicamente relaciona el tiempo de duración de la lluvia con la duración igual a 24 horas o su equivalente igual a 1440 minutos, elevado a un exponente. Ahora bien, según la metodología a emplearse el exponente puede ser 0.5 para el caso de Grunsky, 0.25 para Dick-Peschke y “1-n” para el caso de Bernard.

En términos generales el anterior análisis permite establecer que la precipitación para un periodo de lluvia menor a 24 horas de duración, puede ser obtenido mediante una expresión que se plantea de manera genérica de la siguiente manera:

Método de regionalización

$$P_t^T = P_{24}^T \cdot \left(\frac{t}{1440}\right)^g \quad \text{Ecuación [11]}$$

Lo destacable de tal expresión es que se puede obtener fácilmente el coeficiente “g”, simplemente encontrando la relación entre la precipitación de registro pluviométrico para un periodo de retorno determinado y una duración menor a 24 horas, respecto de una precipitación de un registro pluviográfico para el mismo periodo de retorno. Si obtenemos los valores de los coeficientes “g” para las estaciones con registro pluviográfico disponibles y analizamos su relación con otras variables de carácter regional, es posible establecer un método de aplicación en diversas zonas, simplemente conociendo o determinado el parámetro regional “g”.

Para tal propósito se han obtenido y analizado los valores promedio representativos del factor Kd de las estaciones con registro pluviográfico en el territorio nacional de Bolivia, consultados en la bibliografía de referencia del presente trabajo de investigación.

Estación	Duración (min)										
	5	10	15	30	45	60	120	180	360	720	1440
Estación El Tejar (Tarija)	0.168	0.254	0.31	0.461	0.57	0.656	0.833	0.867	0.893	0.963	1
Estación Los Pinos (Potosí)	0.156	0.246	0.283	0.35	0.413	0.493	0.63	0.733	0.816	0.893	1
Estación Sucre-Aeropuerto (Chuquisaca)	0.215	0.331	0.441	0.665	0.743	0.779	0.853	0.88	0.92	0.976	1
Estación Andamarca (Oruro)	0.139	0.208	0.248	0.335		0.422	0.568	0.737	0.9	0.925	1
Estación Coipasa (Oruro)	0.080	0.141	0.187	0.283		0.440	0.627	0.740	0.810	0.891	1
Estación Cruce Cultra (Oruro)	0.080	0.124	0.157	0.235		0.361	0.530	0.640	0.752	0.880	1
Estación Chillca (Oruro)	0.133	0.207	0.264	0.391		0.469	0.603	0.658	0.773	0.849	1
Estación Chuquiña (Oruro)	0.102	0.144	0.172	0.221		0.320	0.417	0.509	0.649	0.752	1
Estación El Alto (La Paz)	0.086	0.128	0.163	0.250		0.381	0.559	0.670	0.808	0.927	1
Estación Quillacas (Oruro)	0.131	0.179	0.210	0.298		0.421	0.597	0.764	0.932	0.999	1
Estación Salinas (Oruro)	0.132	0.212	0.253	0.338		0.390	0.519	0.634	0.813	0.940	1
Estación Todo Santos (Oruro)	0.096	0.146	0.196	0.326		0.487	0.715	0.812	0.933	0.974	1
Estación Turco (Oruro)	0.199	0.299	0.346	0.385		0.463	0.546	0.657	0.801	0.884	1
Estación Uyuni (Oruro)	0.202	0.271	0.318	0.394		0.470	0.544	0.632	0.757	0.886	1
Estación Viacha (La Paz)			0.069	0.197	0.313	0.409	0.587	0.702	0.808	0.844	1
Estación Guayaramerín (Beni)	0.157	0.224	0.283	0.400		0.555	0.692	0.766	0.875	0.925	1
Estación Magdalena (Beni)	0.117	0.176	0.225	0.350		0.525	0.643	0.716	0.760	0.837	1
Estación Mairana (Santa Cruz)	0.133	0.195	0.243	0.340		0.459	0.565	0.658	0.797	0.953	1
Estación Laikakota (La Paz)	0.182	0.273	0.332	0.448		0.550	0.633	0.715	0.800	0.854	1
Estación El Alto AASANA (La Paz)	0.139	0.192	0.225	0.322		0.452	0.598	0.685	0.781	0.872	1
Estación Central Santa Cruz (Santa Cruz)	0.133	0.198	0.260	0.353		0.550	0.685	0.714	0.873	0.982	1
Estación Central Cochabamba (Cochabamba)	0.132	0.209	0.277	0.398		0.496	0.577	0.648	0.778	0.845	1

Tabla 4

Valores del factor Kd estimados en estaciones con registro pluviográfico en Bolivia

Los anteriores valores han sido obtenidos de diferentes periodos de registro pluviográfico, como se detalla en la siguiente tabla:

Estación	Periodo de Registro
Estación El Tejar (Tarija)	1987 - 1998
Estación Los Pinos (Potosí)	1981 - 2010
Estación Sucre-Aeropuerto (Chuquisaca)	1979 - 2001
Estación Viacha (La Paz)	2005 - 2014
Estación Guayaramerín (Beni)	1988 - 2009
Estación Magdalena (Beni)	1989 - 2007
Estación Mairana (Santa Cruz)	1978 - 1998
Estación Laikakota (La Paz)	1991 - 2007
Estación El Alto AASANA (La Paz)	1974 - 2008
Estación Central Santa Cruz (Santa Cruz)	1980 - 2006
Estación Central Cochabamba (Cochabamba)	1990 - 2008

Tabla 5

Periodos de registros pluviográficos de estaciones de Bolivia

En la anterior tabla únicamente se han podido establecer la referencia del periodo de registro de algunas de las estaciones empleadas en la presente investigación, siendo que no se encuentran referenciados para un periodo de registro las 11 estaciones del Altiplano, en el Departamento de Oruro. Los estadísticos de las estaciones con registros pluviográficos son diversos, según el enfoque de abor-daje y se puede observar los mismos en las referencias bibliográficas.

Con el objeto de comparar los valores del factor Kd presentados en la anterior tabla, se han obtenido también los valores del factor Kd que corresponden con los métodos de Grunsky y Dick-Peschke, y que se resumen en la siguiente tabla:

Estación	Duración (min)										
	5	10	15	30	45	60	120	180	360	720	1440
Kd Dick-Peschke	0.243	0.289	0.319	0.380	0.420	0.452	0.537	0.595	0.707	0.841	1
Kd Grunsky	0.059	0.083	0.102	0.144	0.177	0.204	0.289	0.354	0.500	0.707	1.000

Tabla 6
Valores del factor Kd para las metodologías de Grunsky y Dick-Peschke

Tales valores han sido obtenidos aplicando las siguientes expresiones:

Método de Grunsky

$$K_d = \frac{P_t^T}{P_{24}^T} = \left(\frac{t}{1440}\right)^{0.5} \quad \text{Ecuación [12]}$$

Método de Dick-Peschke

$$K_d = \frac{P_t^T}{P_{24}^T} = \left(\frac{t}{1440}\right)^{0.25} \quad \text{Ecuación [13]}$$

En el siguiente gráfico se representan los valores de Kd para diferentes duraciones, en comparación con los valores estimados por los métodos de Grunsky y Dick-Peschke:

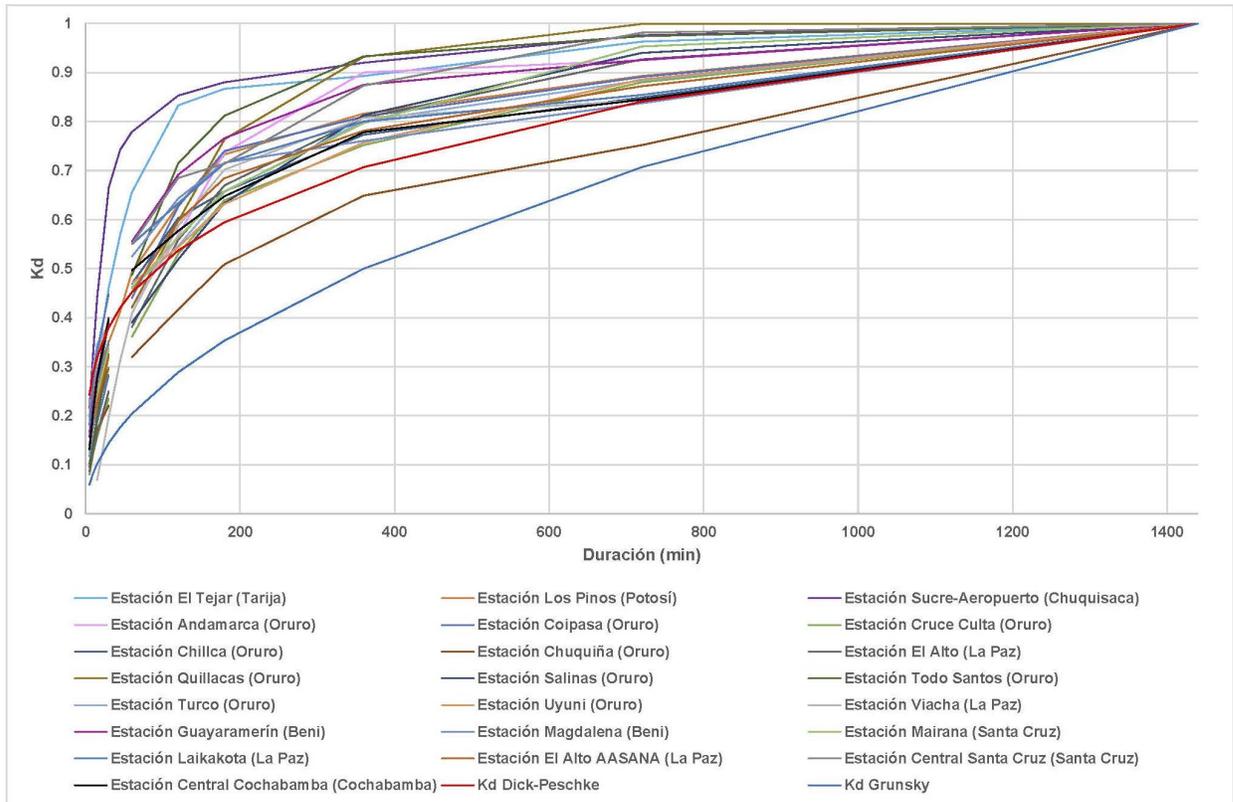


Figura 2

Factor Kd diferentes estaciones con registro pluviográficos en Bolivia

En el anterior gráfico se puede observar que la Estación Central Cochabamba es la que más se ajusta a la fórmula de Dick-Peschke, siendo sus envolventes la estación de Chuquiña (Oruro) y Sucre Aeropuerto (Chuquisaca).

Se observa que los valores de la metodología de Dick-Peschke brinda resultados más cercanos a los valores medidos que los que permite estimar la metodología de Grunsky. Si bien esta situa-

ción cómodamente nos puede inducir a aplicar el método de Dick-Peschke, se observa que es importante también observar su variación de los valores, que obedece a consideraciones locales o regionales de la precipitación, pues como se observó en la Figura 1, las estaciones están dispersas en el territorio boliviano por diversas zonas. Es por ello que es necesario regionalizar el exponente “g”.

Secuencia de procedimiento matemático para obtener el parámetro “g”
$K_d = \left(\frac{d}{1440}\right)^g \quad (1)$
$\ln(K_d) = \ln\left(\frac{d}{1440}\right)^g \quad (2)$
$\ln(K_d) = g \cdot \ln\left(\frac{d}{1440}\right) \quad (3)$
$\ln(K_d) = g \cdot \ln\left(\frac{d}{1440}\right) \quad (4)$
$\ln(K_d) = g \cdot (\ln(d) - \ln(1440)) \quad (5)$
$\sum \ln(K_d) = \sum g \cdot (\ln(d) - \ln(1440)) \quad (6)$
$\sum \ln(K_d) = g \sum (\ln(d) - \ln(1440)) \quad (7)$
$\sum \ln(K_d) = g \cdot (\sum \ln(d) - \sum \ln(1440)) \quad (8)$
$g = \frac{\sum \ln(K_d)}{\sum \ln(d) - n \cdot \ln(1440)} \quad (9)$

Tabla 7

Procedimiento matemático para obtener el exponente “g” de las estaciones con registro pluviográfico

Se ha realizado la estimación de los valores del parámetro “g” de la expresión genérica del método de regionalización propuesto en este trabajo de investigación, para cada una de las estaciones analizadas y con el procedimiento descrito anteriormente, obteniéndose la siguiente tabla sintética:

Estación	Parámetro g	Coficiente R ²
Estación Andamarca (Oruro)	0.275	0.862
Estación Coipasa (Oruro)	0.323	0.954
Estación Cruce Cultra (Oruro)	0.361	0.808
Estación Chillca (Oruro)	0.276	0.936
Estación Chuquiña (Oruro)	0.377	0.911
Estación El Alto (La Paz)	0.344	0.950
Estación Quillacas (Oruro)	0.285	0.962
Estación Salinas (Oruro)	0.289	0.992
Estación Todo Santos (Oruro)	0.290	0.937
Estación Turco (Oruro)	0.242	0.915
Estación Uyuni (Oruro)	0.249	0.970
Estación Guayaramerín (Beni)	0.241	0.874
Estación Magdalena (Beni)	0.287	0.985
Estación Mairana (Santa Cruz)	0.283	0.993
Estación Laikakota (La Paz)	0.231	0.925
Estación El Alto AASANA (La Paz)	0.288	0.921
Estación Central Santa Cruz (Santa Cruz)	0.259	0.966
Estación Central Cochabamba (Cochabamba)	0.274	0.957
Estación Viacha (La Paz)	0.351	0.957

Tabla 8

Exponente “g” de las estaciones con registro pluviográfico

De los anteriores valores estimados para el parámetro “g” se observa que los mismos exponen un ajuste bastante bueno, como se puede verificar en la anterior tabla los valores del coeficiente de correlación.

También para objetos de comparación se han estimado los valores del coeficiente o parámetro “g”, considerando los valores de los coeficientes c, m y n de las curvas IDF informadas por el SENAMHI. La siguiente tabla muestra un resumen de los valores obtenidos:

Estación	Coeficientes curvas IDF			Coeficiente
	c	m	n	g
San Calixto	101.261	0.338	0.629	0.371
Laikacota (d<30 min)	92.28	0.2399	0.4682	0.5318
Laikacota (d≥30 min)	293.68	0.2415	0.8002	0.1998
El Alto - Aeropuerto Internacional (d<120 min)	85.43	0.207	0.529	0.471
El Alto - Aeropuerto Internacional (d≥120 min)	327.32	0.198	0.802	0.198
SENAMHI Central Santa Cruz (d<60 min)	175.3	0.279	0.394	0.606
SENAMHI Central Santa Cruz (d≥60 min)	831.8028	0.2944	0.76277	0.23723
Aeropuerto Cochabamba (d<60 min)	108.288	0.2345	0.5357	0.4643
Aeropuerto Cochabamba (d≥60 min)	293.439	0.188	0.7573	0.2427
Aeropuerto Trinidad	358.53	0.236	0.592	0.408

Tabla 9

Exponente “g” determinado a través de las curvas IDF del Anexo E del Reglamento Técnico de Diseño de Sistemas de Drenaje Pluvial Urbano

Los valores obtenidos del parámetro “g” para duraciones menores a 60 y 120 minutos son sensiblemente mayores a los que corresponden a las duraciones mayores. Sin embargo, debido a que no se cuenta con el informe que exponga la forma de obtención de la información de referencia, no se puede hacer una valoración conclusiva con la misma. Es por ello que no se ha incluido su tratamiento en esta investigación, y solo adquiere un carácter referencial.

Se intentará realizar un análisis de la correlación existente entre este parámetro con las variables existentes en las estaciones analizadas, que son latitud, longitud y altitud.

La variable predictiva inmediata es la altitud, pero existe un amplio conjunto de parámetros fisiográficos ligados a la lluvia como la pendiente y velocidad de entrada de las masas de aire húmedo, la posición relativa del mar, la orientación de las laderas, el relieve y el efecto pantalla que ejerce la disposición montañosa en varias cadenas, etc. En cada modelo y región se validan las relaciones estadísticas, pero tienen carácter local, lo que hace variable la influencia de cada factor y razonable comprobar su utilidad reformulando el modelo de acuerdo a las características de cada caso. La escala es un segundo aspecto inherente a la definición de los parámetros que traslada incertidumbre a la definición de los modelos (Álvarez Rodríguez, 2011).

Primeramente, con la finalidad de realizar una regionalización del parámetro “g”, se ha realizado un análisis de la relación de tales valores con las coordenadas de las estaciones de registro pluviográfico. Con la información de las coordenadas y los exponentes obtenidos, se ha realizado el análisis de correlación entre el valor del exponente “g” y las coordenadas de latitud, longitud y altitud de las estaciones pluviográficas. El gráfico y expresiones resultantes del análisis realizado se presentan a continuación:

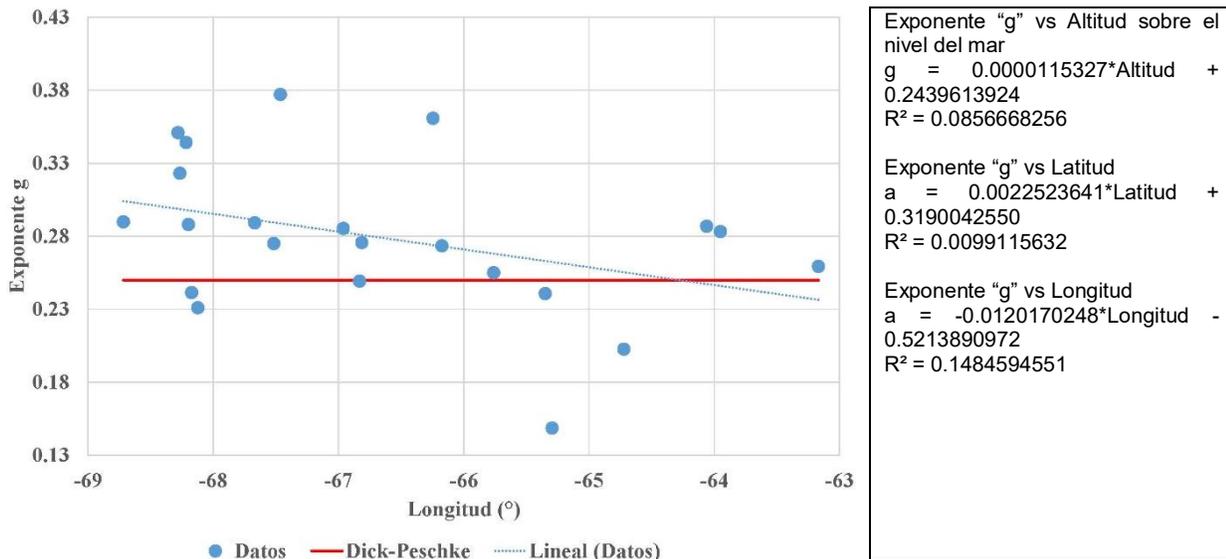


Figura 3

Exponente a en función a la longitud para diferentes estaciones de Bolivia y ecuaciones de regresión del parámetro "g" en función a la altitud, latitud y longitud

Se observa que la mejor correlación del exponente "g" se obtiene con la longitud, este aspecto es interesante, pues permite inferir que los exponentes de las estaciones tienen una relativa influencia de su posición en relación a la cordillera que tiene un desarrollo en dirección Norte-Sur. Sin embargo, este ajuste no es significativo y por tanto determinante, pues los coeficientes de correlación respecto de la varianza son muy bajos, es por ello que se observa que existen aspectos regionales que son importantes al analizar la precipitación.

Para considerar la influencia orográfica se ha realizado una recopilación de información disponible en el portal de datos espaciales de Bolivia <http://geo.gob.bo/portal/>. Se ha empleado la información producida del Mapa Fisiográfico de Bolivia, elaborado por la Dirección de Ordenamiento Territorial en una escala 1:1,000,000 (Dirección General de Ordenamiento Territorial - Bolivia, 2002).

La información ha sido procesada con el software ArcGis, a qué provincia fisiográfica y gran paisaje pertenecen las estaciones con registros pluviográficos analizadas. El siguiente mapa ilustra la ubicación de las estaciones en las diferentes provincias fisiográficas:

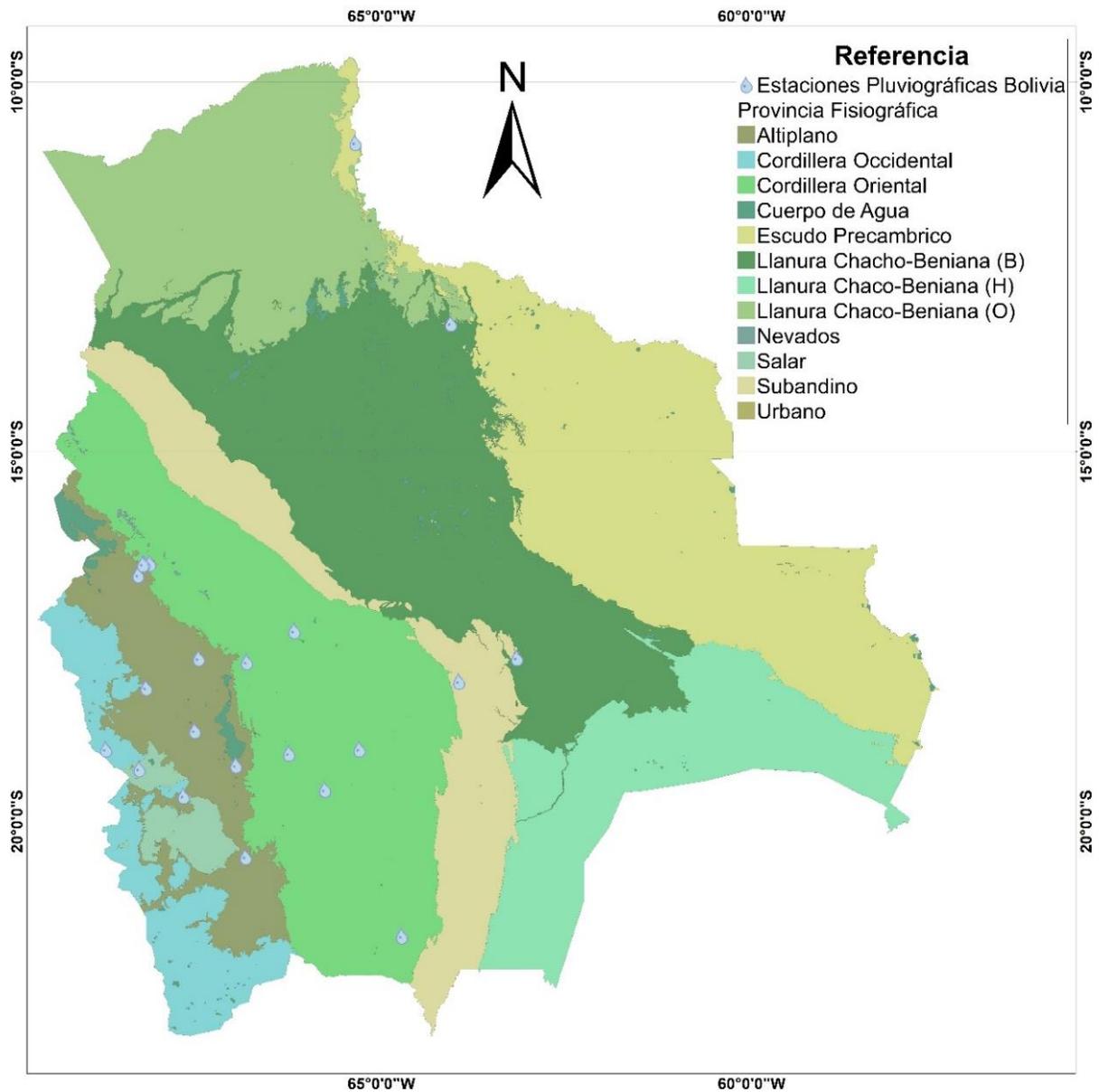


Figura 4

Mapa de provincias fisiográficas de Bolivia

Se observa que la mayoría de las estaciones se encuentran en la zona del altiplano y la cordillera oriental. Esta situación limita la regionalización, pues es deseable contar con una densidad mayor de estaciones con registros pluviográficos que permita determinar la correlación de variables con una adecuada representatividad.

Considerando la importancia de la orografía también se ha analizado las estaciones según su ubicación respecto del siguiente mapa de las provincias fisiográficas y el gran paisaje de Bolivia:

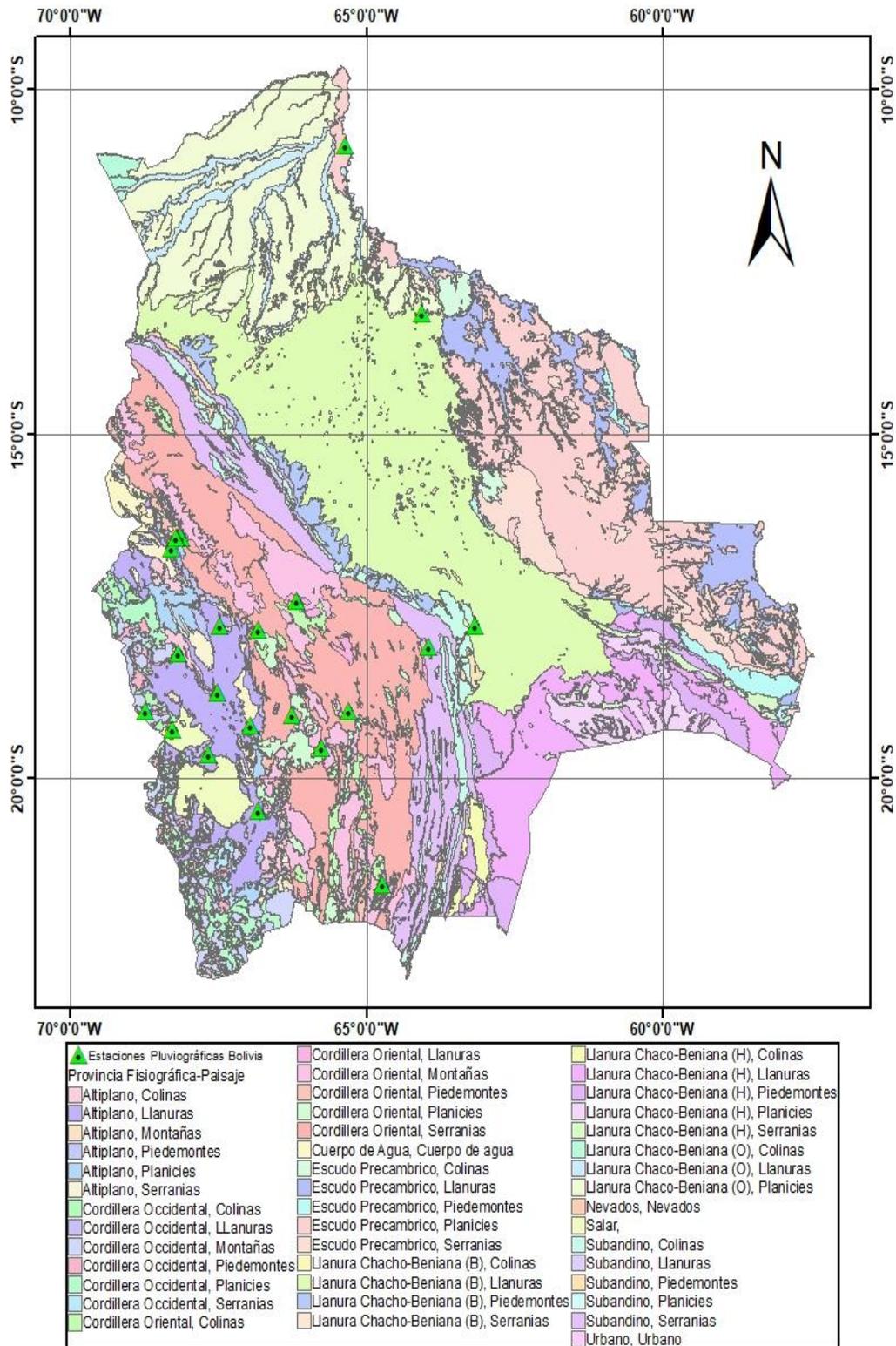


Figura 5

Mapa de gran paisaje de Bolivia

A continuación, se presenta la tabla que muestra cómo las estaciones con registro pluviográfico se ubican en relación a la distribución espacial de las provincias fisiográficas y el gran paisaje en Bolivia. Es una tabla interesante, pues expone una representatividad razonable de estaciones en las unidades que representan de alguna manera la orografía del territorio boliviano, observándose que existen al menos 4 estaciones en cada unidad de provincia fisiográfica y al menos 3 estaciones en cada unidad de gran paisaje. La representatividad es mayor en lo que respecta a provincia fisiográfica respecto de gran paisaje, al ser el gran paisaje una subclasificación de la provincia fisiográfica.

Estación	Provincia Fisiográfica	Estación	Gran Paisaje
Andamarca - C A	Altiplano	Andamarca - C A	Colinas
Chuquiña	Altiplano	Chuquiña	Colinas
Quillacas C A	Altiplano	Viacha	Piedemontes
Salinas de Garci-Mendoza C SAT	Altiplano	Coipasa	Montañas
Turco - SAT	Altiplano	Todos Santos	Montañas
Uyuni	Altiplano	Quillacas C A	Llanuras
Viacha	Altiplano	Salinas de Garci-Mendoza C SAT	Llanuras
Coipasa	Cordillera Occidental	Turco - SAT	Llanuras
Todos Santos	Cordillera Occidental	Uyuni	Llanuras
El Alto Senamhi	Cordillera Oriental	Laycacota - C A SAT	Urbano
Chillca	Cordillera Oriental	El Alto Senamhi	Piedemontes
Cochabamba - Aeropuerto	Cordillera Oriental	Chillca	Planicies
Cruce Culta (Ventilla) - GPRS	Cordillera Oriental	Cruce Culta (Ventilla) - GPRS	Serranias
El Alto - Aeropuerto	Cordillera Oriental	El Alto - Aeropuerto	Piedemontes
El Tejar - Tarija	Cordillera Oriental	Potosi - Los Pinos	Serranias
Potosi - Los Pinos	Cordillera Oriental	Cochabamba - Aeropuerto	Llanuras
Sucre	Cordillera Oriental	El Tejar - Tarija	Llanuras
Laycacota - C A SAT	Urbano	Sucre	Planicies
Guayaramerin - Aeropuerto	Escudo Precambrico	Mairana	Serranias
Magdalena - Aeropuerto	Escudo Precambrico	Guayaramerin - Aeropuerto	Planicies
Mairana	Subandino	Magdalena - Aeropuerto	Planicies
Santa Cruz - C SAT	Urbano	Santa Cruz - C SAT	Urbano

Tabla 10

Ubicación de las estaciones con registro pluviográfico respecto de las provincias fisiográficas y gran paisaje de Bolivia

En base a la anterior tabla, se ha correlacionado las coordenadas latitud, longitud y altitud con los valores estimados del parámetro “g” de las estaciones con registro pluviográfico según su pertenencia a las provincias fisiográficas y gran paisaje. Los resultados se presentan en la siguiente sección.

3. Resultados

Aplicando la metodología planteada del parámetro “g” correlacionado con la latitud, longitud y altitud de las estaciones con registro pluviográfico, según su pertenencia a las provincias fisiográficas y gran paisaje de Bolivia, se han obtenido las mejores correlaciones que se presentan en las siguientes tablas:

Correlación	Zona	Expresión	R ²
g - Latitud	Altiplano-Cordillera Occidental	$g = 0.024268301 \cdot \text{Latitud} + 0.753874606$	0.365
g - Altitud	Cordillera Oriental	$g = 0.000051111 \cdot \text{Altitud} + 0.087356945$	0.411
g - Longitud	Subandino-Precámbrico	$g = 0.011832535 \cdot \text{Longitud} + 1.026481973$	0.244

Tabla 11

Mejores correlaciones del parámetro “g” respecto de la latitud, longitud y altitud de las estaciones con registro pluviográfico en Bolivia – Análisis provincias fisiográficas

Correlación	Zona	Expresión	R ²
g - Latitud	Cordillera Occidental - Altiplano (Colinas, Piedemontes, Montañas)	$g = 0.025705571 \cdot \text{Latitud} + 0.793802772$	0.433
g - Latitud	Altiplano (Llanuras)	$g = -0.010241343 \cdot \text{Latitud} + 0.066716392$	0.352
g - Altitud	Coordillera Oriental (Piedemontes, Serranías, Planicies)	$g = 0.000562720 \cdot \text{Altitud} - 1.972737062$	0.868
g - Altitud	Coordillera Oriental - Subandino (Planicies, Llanuras, Serranías)	$g = 0.000054112 \cdot \text{Altitud} + 0.344270642$	0.353
g - Longitud	Escudo Precámbrico - Subandino (Planicies)	$g = 0.010476710 \cdot \text{Longitud} + 0.934949420$	0.245

Tabla 12

Mejores correlaciones del parámetro “g” respecto de la latitud, longitud y altitud de las estaciones con registro pluviográfico en Bolivia – Análisis gran paisaje

Las anteriores tablas sintetizan las expresiones del parámetro “g” regionalizado.

4. Discusión

Con la aplicación de la metodología propuesta y desarrollada amerita exponer lo siguiente:

- ⊙ La metodología permite encontrar tormentas hipotéticas o de diseño, conociendo únicamente las coordenadas latitud, longitud, altitud de las estaciones con registros pluviométricos con mediciones de precipitación cada 24 horas y su respectivo periodo de retorno asociado.
- ⊙ El parámetro “g” resulta una variable versátil que permite correlacionar la precipitación máxima de los registros pluviométricos con los registros pluviográficos, y permite establecer la relación entre la precipitación y su duración.
- ⊙ La zonificación del parámetro “g” en función de coordenadas (latitud, longitud y altitud) resulta una sencilla manera de calcular y explorar los diferentes valores del parámetro

“g” en la extensión del territorio nacional de Bolivia, considerando la importancia de la orografía presente en cada zona, expresada a través de las diferentes unidades de provincia fisiográfica y gran paisaje identificadas.

- ⊙ Los resultados referidos a la correlación entre la precipitación y la latitud en la zona del altiplano son razonables, y coinciden con exploraciones de tal comportamiento como se explica en el artículo intitulado “Aspectos generales del clima en el altiplano sudamericano” (Aceituno, 1993).
- ⊙ La correlación en zona de montaña de la precipitación y la altitud es analizada de manera muy amplia la tesis doctoral “Estimación de la distribución espacial de la precipitación en zonas montañosas mediante métodos geoestadísticos” (Álvarez Rodríguez, 2011) y también explorada en diversos estudios regionales (Espinoza Villar & et.al., 2010).
- ⊙ La correlación en la zona de llanuras es analizada en diversos estudios regionales (Espinoza Villar & et.al., 2010) (Investigación para el Desarrollo, 2017) y locales (Castel Diez & Molina Carpio, 2014), exponiendo un comportamiento en la zona relacionada con la longitud, dada la influencia de la cordillera de Los Andes.
- ⊙ El método propuesto del Parámetro “g” Regionalizado permite calcular los hietogramas de tormentas de diseño, conociendo únicamente los valores de la precipitación máxima registrada en pluviómetros y para los cuales se realice el tratamiento estadístico de sus valores, que permita analizar un periodo de retorno determinado.
- ⊙ El método propuesto para la determinación del parámetro “g” es consistente desde una concepción matemática, como lo fue demostrado en las líneas precedentes, y es conforme con los métodos ampliamente empleados para el análisis de la distribución de la precipitación según su duración.
- ⊙ Los mejores estimativos y/o ajustes del método del parámetro “g” regionalizado son fácilmente actualizables, considerando el análisis de registro pluviográficos empleando el método del factor Kd únicamente.
- ⊙ Evidentemente que podrán estudiarse de manera más amplia las cuestiones climatológicas de manera local que permitan realizar ajustar los valores del parámetro “g” y la delimitación de las zonas de aplicación del mismo. Esto requiere una densificación de las estaciones que permitan realizar un registro pluviográfico.
- ⊙ No es conveniente el empleo del método de Grunsky para el cálculo de la distribución de la precipitación en periodos menores a 24 horas, pues sus valores no se ajustan convenientemente a los que se analizaron en el territorio boliviano. Si bien el método de Dick-Peschke permite obtener valores más cercanos a algunos de los observados, del análisis del mismo, se observa la necesidad de regionalizar y/o generalizar el exponente, como es posible a través de la Ecuación [11] del presente artículo de investigación.

5. Bibliografía

- ◻ Aceituno, P. (1993). ASPECTOS GENERALES DEL CLIMA EN EL ALTIPLANO SUDAMERICANO. Actas del II Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos, EL ALTIPLANO Ciencia y conciencia en los Andes (págs. 63-69). Arica, Chile: Universidad de Chile, Inscripción N° 100.491, ISBN 956-272-693-2.
- ◻ Administradora Boliviana de Carreteras. (2007). Manual de hidrología y de drenaje. Administradora Boliviana de Carreteras.
- ◻ Álvarez Rodríguez, J. (2011). Estimación de la distribución espacial de la precipitación en zonas montañosas mediante métodos geoestadísticos. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de caminos, canales y puertos .
- ◻ Amaya Martinez, R. G., López Condori, M., & Seoane Salazar, M. E. (2009). Curvas IDF para diferentes categorías de análisis de eventos extremos de las ciudades del Eje Central de Bolivia (La Paz, El Alto, Cochabamba y Santa Cruz). Obtenido de <https://www.yumpu.com/es/document/view/62666857/proyecto-de-grado-curvas-idf-en-el-eje-de-bolivialapazelaltostacruzcochabamba>
- ◻ Carrillo Nacho, N., Marca Castillo, R. V., & Villarroel Quevedo, M. A. (2011). Construcción de relaciones IDF mediante la caracterización temporal de eventos extremos con criterios adimensionales para las estaciones de Guayaramerín, Magdalena y Mairana. La Paz: UMSA.
- ◻ Castel Diez, A. P., & Molina Carpio, J. (2014). ANÁLISIS DE TENDENCIAS CLIMÁTICAS PARA LA LLANURA AMAZÓNICA BOLIVIANA. La Paz, Bolivia: Universidad Mayor de san Andrés.
- ◻ Dirección General de Ordenamiento Territorial - Bolivia. (2002). Memoria del Mapa Fisiográfico de Bolivia. La Paz: Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación.
- ◻ Espinoza Villar, J. C., & et.al. (2010). Variabilidad espacio-temporal de las lluvias en la cuenca amazónica y su relación con la variabilidad hidrológica regional. Un enfoque particular sobre la región andina. REVISTA PERUANA GEO-ATMOSFÉRICA RPGA, 99-130.
- ◻ Hernández Sampieri, Roberto; Fernández Collado, Carlos; Baptista Lucio, María del Pilar. (2010). Metodología de la investigación - Quinta Edición. México: Educación McGraw Hill.
- ◻ Instituto Nacional de Vías - Colombia. (2009). Manual de Drenaje de Carreteras. Bogotá.
- ◻ Investigación para el Desarrollo. (2017). Evaluación de vulnerabilidad e impacto del cambio climático en el Gran Chaco. Asunción, Paraguay: Centro de Conocimiento para el Gran Chaco Americano y Cono Sur.
- ◻ Iturry Urquizo, F. S. (2013). Relaciones IDF mediante la caracterización temporal de eventos extremos máximos de precipitación - Aplicación en las ciudades de Potosí, Sucre y Tarija. Obtenido de <http://sicyt.umsa.bo/tesis/informacion-Tesis/36>

- ❑ Maldonado Navia, R. A. (2015). Determinación de relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de 11 estaciones meteorológicas del Altiplano, mediante el análisis de eventos extremos de precipitación. Obtenido de Tesis de Maestría - UMSA: <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/6780/TM-2216.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ❑ Ministerio de Medio Ambiente y Agua - Bolivia. (2010). Reglamento Técnico de Diseño de Sistemas de Drenaje Pluvial Urbano. La Paz: Arteria Producciones.
- ❑ Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (2011). Manual de Carreteras del Paraguay, Normas para Obras de Drenaje Vial, Tomo 3, Volumen 1. Asunción.
- ❑ MTC - Perú. (2008). Manual de hidrología, hidráulica y drenaje. Obtenido de Ministerio de Transportes y Comunicaciones - Perú: http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_2950.pdf
- ❑ Quispe Mamani, J. C. (Junio de 2018). Curvas IDF para la estación meteorológica de Viacha, Departamento de La Paz. Obtenido de Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales, La Paz, vol.5, n°1, pág. 99-105. ISSN: 2518-6868: http://www.scielo.org.bo/pdf/riiarn/v5n1/v5n1_a12.pdf <https://www.studocu.com/bo/document/universidad-mayor-de-san-andres/hidrologia/curvas-idf-para-la-paz/8970240>
- ❑ Secretaría de Comunicaciones y Transportes de la República de México. (15 de Enero de 2021). Isoyetas de Intensidad - Duración - Periodo de Retorno para la República Mexicana. Obtenido de <https://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/isoyetas/>