

## Estudio de Caso

# CURVAS IDF PARA LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE VIACHA, DEPARTAMENTO DE LA PAZ

## IDF curves for the Viacha weather station, La Paz city

Juan Carlos Quispe Mamani<sup>1</sup>

### RESUMEN

La mayoría de las estaciones meteorológicas en el país no cuentan con información de datos pluviómetros como tampoco de datos de pluviógrafos. El problema es recurrente al no contar con las intensidades de las precipitaciones, porque estos datos son esenciales para el diseño de diferentes tipos de obras hidráulicas, carreteras, sistemas de riego, etc. Por esta razón, el objetivo del presente trabajo de investigación es determinar las curvas IDF (intensidad, duración y frecuencia) a partir de datos de precipitación obtenidas de pluviómetros. El trabajo se desarrolló en la Estación Meteorológica de Viacha que se encuentra en el municipio de Viacha, provincia Ingavi, del departamento de La Paz, Bolivia. Para cumplir el objetivo, se utilizó el enfoque de la investigación cuantitativa, siendo el procedimiento el siguiente: recolección de los datos de precipitación, estimación de datos faltantes, análisis de precipitación anual y mensual, estimación de los parámetros del modelo y obtención de las curvas IDF. En base al análisis de las precipitaciones se obtuvieron los siguientes resultados: la precipitación promedio anual en la Estación fue de  $573.29 \pm 158.90$  mm, con un valor mínimo de 361.30 mm y un valor máximo de 1108.90 mm. El 52.67% de las lluvias ocurren en los meses de enero, febrero y marzo. Mediante el análisis estadístico se pudo comprobar que la precipitación mensual de la Estación está altamente correlacionado con la de Choquenaira; con la discretización de las lluvias se obtuvieron las constantes de las curvas IDF,  $k = 21.142$ ;  $m = 0.456$  y  $n = 0.401$ ; con estos parámetros se encontraron las curvas para periodos de retorno de 1 año, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

**Palabras clave:** Precipitación, estación meteorológica, curvas IDF, Viacha.

### ABSTRACT

The majority of the meteorological stations in the country do not have rain gauge data information as well as rain gauge data. The problem is recurrent in not having the intensities of rainfall, because these data are essential for the design of different types of hydraulic works, roads, irrigation systems, etc. For this reason, the objective of this research work is to determine the IDF curves (intensity, duration and frequency) from rainfall data obtained from rain gauges. The work was carried out at the Viacha Meteorological Station, located in the municipality of Viacha, province of Ingavi, La Paz city, Bolivia. To fulfill the objective, the quantitative research approach was used, the procedure being the following: collection of precipitation data, estimation of missing data, analysis of annual and monthly precipitation, estimation of model parameters and obtaining of curves IDF. Based on the analysis of rainfall, the following results were obtained: the average annual precipitation at the Station was  $573.29 \pm 158.90$  mm, with a minimum value of 361.30 mm and a maximum value of 1108.90 mm. 52.67% of the rains occur in the months of January, February and March. By means of the statistical analysis it was possible to verify that the monthly precipitation of the Station is highly correlated with that of Choquenaira; with the discretization of the rains, the constants of the IDF curves were obtained,  $k = 21.142$ ;  $m = 0.456$  and  $n = 0.401$ ; with these parameters the curves were found for return periods of 1 year, 5, 10, 25, 50 and 100 years.

**Keywords:** Precipitation, meteorological station, IDF curves, Viacha.

<sup>1</sup> Consultor independiente, Bolivia. qmjuca@yahoo.es

## INTRODUCCIÓN

El Altiplano boliviano es una de las zonas más altas donde se practica la agricultura a nivel mundial localizado entre los 3600 a 4000 m s.n.m. (García et al., 2004). Bajo las características propias del Altiplano, se presenta muchos inconvenientes, como heladas, escasas precipitaciones, evapotranspiración relativamente altas y desconocimiento de los caudales que aportan las cuencas, lo cual es determinante para la construcción de represas, atajados, construcción de sistemas de riego y otras obras hidráulicas.

Estas condiciones hacen que el agua deba ser aprovechada de una forma eficiente y eficaz para satisfacer la demanda de los cultivos, contribuir al incremento de la producción y coadyuvar a la seguridad alimentaria a nivel mundial; por la estratégica situación en que se encuentra la región, varios estudios indican que los cultivos a grandes alturas generan sustancias protectoras que pueden ser aprovechadas por la humanidad (Tancara, 2016).

La precipitación en el Altiplano y en todas las ecoregiones de Bolivia, es aleatoria e impredecible existiendo épocas de gran precipitación y de escasa o nula precipitación, esto ocasiona la necesidad de acumular el agua en épocas de lluvia y distribuirlo en la época seca a través de diferentes métodos de riego, especialmente el riego por aspersión y goteo.

La fuente principal de agua son las precipitaciones pluviales, datos que son importantes tanto en cantidad como en calidad. Lamentablemente en nuestro país en general no se cuenta con estaciones meteorológicas que registren las precipitaciones en diferentes intervalos de tiempo, es decir existe carencia de pluviógrafos, ocasionando la imposibilidad de determinar la intensidad de las precipitaciones en diferentes zonas de nuestro país.

La intensidad es un dato muy importante para la obtención de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) y curvas Intensidad-Duración-Periodo de retorno. Curvas que son requeridas para el diseño de obras hidráulicas, diseño de sistemas de riego, diseño de obras viales, diseño de sistemas de agua potable, alcantarillado entre otros.

Por tanto se requiere obtener las curvas IDF para zonas que tienen potencialidad en la producción agrícola, necesidades de infraestructura vial, sistemas

de alcantarillado, agua potable, etc., donde el recurso agua es imprescindible.

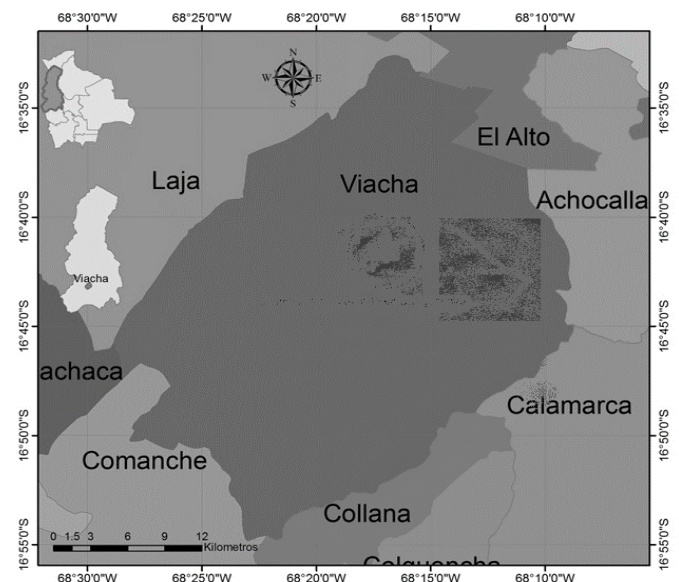
El agua es un recurso estudiado por la hidrología, que es la ciencia que estudia los fenómenos naturales involucrados en el ciclo hidrológico, es importante considerar el diseño hidrológico relacionado con el control y uso del agua para conocer el pronóstico de escurrimientos en cuencas (Fattorelli y Fernández, 2011).

Los mismos autores indican que el diseño hidrológico tiene como objetivo la recolección de datos, análisis y procesamiento posterior, ya sea por medios matemáticos o estadísticos, con el objeto de convertir los datos en información útil para la toma de decisiones y solución a problemas de la ingeniería de manera general.

En consecuencia, el objetivo del estudio es determinar las curvas IDF en la Estación Meteorológica de Viacha con datos de precipitación entre los periodos de 1973 a 2012.

## METODOLOGÍA

La Estación Meteorológica de Viacha se encuentra localizada en el municipio de Viacha, primera sección de la provincia Ingavi del departamento de La Paz. Sus coordenadas geográficas son: latitud sur 16°39'30" y longitud oeste de 68°16'55". Se encuentra a una altitud aproximada de 3850 m s.n.m. (SENAMHI, 2015).



Fuente: (Quispe, 2017).

Figura 1. Localización de la Estación Meteorológica de Viacha

La zona conforme a Holdridge (1982) citado por Flores (2012), corresponde al clima templado frío, enmarcada por una estación seca (invierno) y una estación húmeda de cuatro meses (verano).

La recolección de los datos fue del SENAMHI (2015), los datos fueron de precipitación pluvial diaria desde el año 1973 al 2012 de la Estación Meteorológica de Viacha. Las unidades de la precipitación fueron en mm el cual equivale a una cantidad de L m<sup>-2</sup>. En total se computaron 42 años de registros de la Estación Meteorológica. Para obtener datos de precipitación menor a 24 horas se utilizó los registros de la Estación

$$P_x = \frac{1}{3} \left( \frac{\bar{x}_{viacha}}{\bar{x}_{collana}} p_{collana} + \frac{\bar{x}_{viacha}}{\bar{x}_{El\ Alto}} p_{El\ Alto} + \frac{\bar{x}_{viacha}}{\bar{x}_{Tiahuanacu}} p_{Tiahuanacu} \right) \quad (1)$$

Dónde:  $P_x$  = dato faltante de precipitación (mm);  $\bar{x}$  = precipitación (mm).

Con la obtención de los datos faltantes de la precipitación se realizó el análisis de las precipitaciones de manera anual y mensual, este análisis con herramientas de la estadística descriptiva.

Para la estimación de parámetros se seleccionó la distribución teórica de mejor ajuste para los datos de precipitación máxima diaria: distribución normal o gaussiana, distribución log normal, distribución log normal de dos parámetros, distribución log normal de tres parámetros, distribución Gamma, distribución Log Pearson tipo III, etc. La selección de la distribución teórica de mejor ajuste fue utilizando el software HidroEsta (Villón, 2005).

Para relacionar la precipitación para una duración cualquiera con la precipitación del pluviómetro se aplicó la metodología propuesta por Mendoza (1994), se seleccionaron eventos registrados por la estación automática de la Estación Experimental Choquenaira en el periodo 2005-2014, puesto que son los únicos datos disponibles, luego se obtuvo el índice de discretización horaria (Ecuación 2).

$$IDH = \frac{P_d}{P_{24}} \quad (2)$$

Dónde: IDH = índice de discretización horaria;  $P_d$  = precipitación para una duración cualquiera (mm);  $P_{24}$  = precipitación del pluviómetro para 24 horas (mm).

Experimental Choquenaira dependiente de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés, del periodo 2005 al 2014.

La serie histórica de precipitación de la Estación Meteorológica de Viacha, presentó datos faltantes y como la precipitación anual media difiere en más del 10% de esta Estación, se utilizó el método del U.S. Weather (Ecuación 1) para completar estos datos faltantes (Chereque, s.f.). Los valores de precipitación fueron de la Estación Collana, Estación El Alto (aeropuerto), Estación Tiahuanacu y Estación Viacha.

A través de la relación  $P_d$  y  $P_{24}$  se utilizó la función de la curva S (Ecuación 3) (Mendoza, 1994).

$$S = e^{(b_0 + \frac{b_1}{t})} \quad (3)$$

Dónde:  $e$  = base del logaritmo neperiano;  $b_0$  y  $b_1$  = constantes de la función S;  $t$  = tiempo de duración de la precipitación (min).

La obtención de los parámetros de la función se lo realizó con el software HidroEsta (Villón, 2005), con el cual se obtuvo los coeficientes de correlación que se detallan en la sección de resultados.

Para la obtención de las curvas IDF, se utilizó la Ecuación 4, que relaciona la intensidad, duración y el periodo de retorno (Mendoza, 1994 y Villón, 2010).

$$I = \frac{k \cdot T^m}{d^n} \quad (4)$$

Dónde:  $I$  = intensidad (mm h<sup>-1</sup>);  $T$  = periodo de retorno (años);  $d$  = duración de la precipitación (min);  $k$ ,  $m$  y  $n$  = constantes.

Las constantes de la Ecuación 4, fueron determinadas con los valores de la precipitación para diferentes duraciones mediante el uso de la Ecuación 3, las constantes determinadas fueron para periodos de retorno de 1 año, 3 años y 47 años.

## RESULTADOS

### Estimación de datos faltantes

La Tabla 1 indica que la diferencia entre la precipitación media de las otras estaciones difiere en más del 10% con la Estación Meteorológica de Viacha cuya precipitación promedio anual es muy similar a la Estación Collana, siendo la diferencia entre ambas estaciones menores al 1%.

Tabla 1. Precipitaciones anuales medias (periodo 1973-012).

Estación	Promedio anual media (mm)	Diferencia (absoluta)	Diferencia (%)
Collana	555.18	2.57	0.46
El Alto	629.31	71.56	12.83
Aeropuerto			
Tiahuanacu	524.70	33.05	5.92
Viacha (incompleto)	557.75		

### Nivel anual

En la Estación de Viacha la precipitación media fue  $573.29 \pm 82.06$  mm año<sup>-1</sup>. El valor mínimo de precipitación fue 361.30 mm año<sup>-1</sup> y máximo de 1108.90 mm año<sup>-1</sup> (Tabla 2). Callisaya (1994), citado por Flores (2012), menciona que la Estación Experimental Choquenaria tiene una precipitación promedio anual de 580 mm, valor que se encuentra en el rango del estudio para la Estación Meteorológica de Viacha. Este valor reafirma el comportamiento muy similar de la precipitación entre ambas estaciones. Con los datos completos de la Estación Meteorológica de Viacha, se obtuvieron los siguientes estadígrafos de 42 años de registro.

Tabla 2. Estadígrafos para la serie anual en Viacha (periodo 1973-2014).

Estadígrafo	Notación	Valor	L-momentos
Número de datos	n	42	
Mínimo (mm año <sup>-1</sup> )	X <sub>min</sub>	361.30	
Máximo (mm año <sup>-1</sup> )	X <sub>max</sub>	1108.90	
Rango (mm año <sup>-1</sup> )	R	747.60	
Mediana (mm año <sup>-1</sup> )	Me	532.92	
Media (mm año <sup>-1</sup> )	$\bar{x}$	573.29	573.29
Varianza (mm año <sup>-1</sup> )	S <sup>2</sup>	25250.08	6733.59
Desviación estándar (mm año <sup>-1</sup> )	S	158.90	82.06
Coeficiente de variación (%)	C.V.	27.72	14.31
Sesgo	C <sub>s</sub>	1.56	0.33
Curtosis	C <sub>k</sub>	5.56	0.22

La Figura 2 muestra el comportamiento de la precipitación anual de la Estación Meteorológica de Viacha, donde la tendencia general es decreciente con el tiempo. Luna (2013), encontró una tendencia incremental creciente con el tiempo en la Estación San Calixto, localizada en La Paz. Por lo tanto, la tendencia de las precipitaciones anuales en el tiempo son variables, pudiendo ser una tendencia creciente o decreciente.

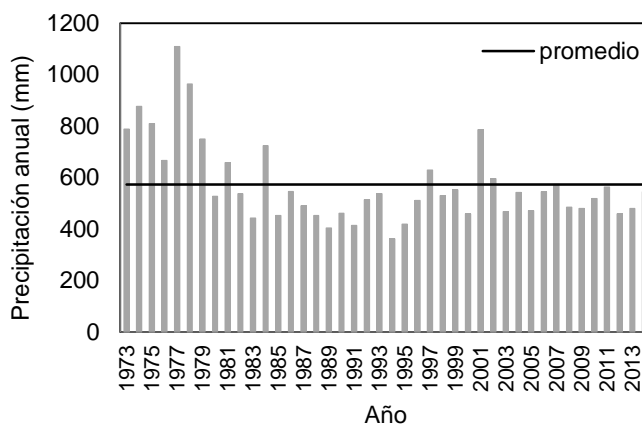


Figura 2. Relación de la precipitación anual con el tiempo para la Estación Meteorológica de Viacha.

### Nivel mensual

El 52.67% de las precipitaciones en el año ocurren en los meses de enero, febrero y marzo; este porcentaje se incrementa al 83.41% de la precipitación cuando se adiciona los porcentajes de precipitación de los meses de octubre, noviembre y diciembre. Consecuentemente, se debe aprovechar el agua en estos meses a través de infraestructura de acumulación de agua para los meses más secos.

Conforme los resultados, el mes más seco en Viacha es el mes de junio con apenas un 0.86% de la precipitación de todo el año en el lugar de estudio, el mes más lluvioso es enero con 24.07%, el cual alcanza casi una cuarta parte de toda la precipitación anual en Viacha (Figura 3).

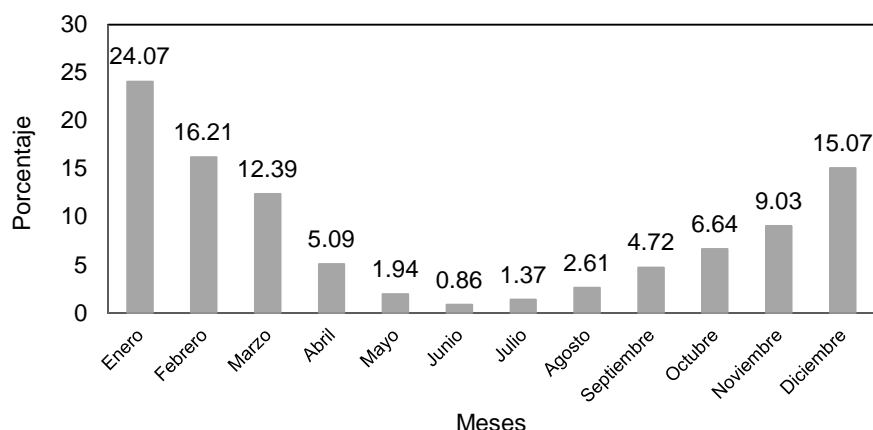


Figura 3. Porcentaje de lluvia anual por mes, periodo 1973-2014 en la Estación Meteorológica de Viacha.

La época húmeda en la Estación Experimental Choquenaira se inicia en septiembre y concluye en abril, la época seca es entre los meses de mayo a agosto (Callisaya, 1994, citado por Flores, 2012). Conforme a los resultados de la Estación Meteorológica de Viacha, se tendrá una precipitación mayor al 80% entre los meses de octubre a marzo, por lo tanto, en este periodo se debe aprovechar la producción de cultivos y animales en la zona. En estos seis meses se debería aprovechar el agua para almacenarlo en reservorios para luego ser utilizados en los meses secos comprendidos entre abril a septiembre.

### Estimación de los parámetros del modelo

En este caso, un evento es considerado a la lluvia total precipitada durante 24 horas. Para cada año se seleccionaron los eventos con precipitación total mayor o igual a 15 mm, para cada evento se obtuvieron los valores máximos para duraciones de 15, 30, 45, 60, 120, 180, 360, 720 y 1440 min, de estos valores se seleccionaron las máximas precipitaciones anuales para las duraciones indicadas anteriormente. Posteriormente se obtuvo el índice de discretización horaria para cada duración y evento correspondiente a la Estación Experimental Choquenaira (Tabla 3).

Tabla 3. Valores de la relación del índice de discretización horaria para las diferentes duraciones en la Estación Experimental Choquenaira.

Año	15 min	30 min	45 min	1 hora	2 horas	3 horas	6 horas	12 horas	24 horas
2005	0.045	0.124	0.135	0.146	0.236	0.371	0.517	0.517	17.80
2006	0.068	0.233	0.210	0.278	0.420	0.602	0.849	0.890	35.20
2007	0.037	0.099	0.284	0.383	0.728	0.827	0.840	0.852	16.20
2008	0.038	0.159	0.299	0.400	0.419	0.600	0.627	0.688	36.50
2009	0.056	0.169	0.342	0.458	0.669	0.810	1.000	1.000	28.40
2010	0.128	0.439	0.463	0.598	0.622	0.646	0.793	0.793	16.40
2011	0.059	0.150	0.330	0.399	0.599	0.680	0.750	0.874	70.90
2012	0.057	0.136	0.307	0.422	0.596	0.700	0.762	0.861	33.20
2013	0.086	0.222	0.348	0.489	0.753	0.864	0.951	0.963	18.40
2014	0.113	0.241	0.411	0.518	0.830	0.922	0.986	1.000	28.20

Para el año 2005 con una precipitación máxima de 17.80 mm se obtuvo un periodo de retorno de 1 año con una probabilidad de no excedencia del valor máximo de 3.56%. En cambio para el año 2011 con una precipitación máxima de 70.90 mm se obtuvo un periodo de retorno de 47 años con una probabilidad de no excedencia del 97.87%. Esto indica que se tiene una relación directa, pero no lineal entre la precipitación máxima, el periodo de retorno y la probabilidad de no excedencia (Tabla 4).

Esta tendencia de los datos encontrados es corroborado por Luna (2013), donde a cantidades mayores de precipitaciones se obtienen menores frecuencias y viceversa. Esto implica que se tendrá mayor probabilidad de encontrar eventos de precipitación con valores menores de precipitación.

Los valores del índice de discretización horaria para las diferentes duraciones se ordenan en forma creciente, tal como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 4. Frecuencia de no excedencia y periodos de retorno para las precipitaciones de 24 horas.

Año	Precipitación máxima (mm)	Probabilidad de excedencia del valor máximo (%)	Tiempo (años)
2005	17.80	3.56	1.0
2006	35.20	63.64	2.7
2007	16.20	1.49	1.0
2008	36.50	67.21	3.0
2009	28.40	39.94	1.7
2010	16.40	1.69	1.0
2011	70.90	97.87	47.0
2012	33.20	56.89	2.3
2013	18.40	4.64	1.0
2014	28.20	39.14	1.6

Tabla 5. Valores del índice de discretización horaria ordenados crecientemente para las diferentes duraciones.

Tiempo (años)	Duración								
	15 min	30 min	45 min	1 hora	2 horas	3 horas	6 horas	12 horas	24 horas
1	0.038	0.124	0.135	0.146	0.236	0.371	0.517	0.517	1.000
3	0.045	0.150	0.299	0.399	0.419	0.600	0.627	0.688	1.000
47	0.059	0.159	0.330	0.400	0.599	0.680	0.750	0.874	1.000

La información referida a la duración en minutos y horas para los diferentes periodos de retorno, se sometió a diferentes pruebas de regresión, seleccionándose la función que obtuvo el mayor valor de R (coeficiente de correlación), esta función seleccionada fue la curva S. Para un periodo de retorno de un año el valor de R fue 0.921, para el periodo de retorno de tres años el valor de R fue 0.986 y para el periodo de retorno de 47 años el valor de R fue 0.990. El coeficiente de correlación fue superior al 0.9, esto implica una alta correlación de los datos discretizados y la duración de las precipitaciones en minutos y horas.

### Curvas IDF

El coeficiente de correlación es 0.8519, esto muestra la relación de la intensidad de una precipitación con su periodo de retorno y su duración. Información que es útil para el diseño de diferentes tipos de estructuras civiles y de aplicación en el campo agrícola.

Amaya et al. (2009) utilizaron la misma función potencial para relacionar las intensidades, periodos de retorno y duración de las lluvias en las ciudades de La Paz, El Alto, Cochabamba y Santa Cruz. Para la ciudad de El Alto encontraron valores de 118.4339, 0.204 y 0.636 para k, m y n respectivamente, mientras que para el estudio fueron  $k = 21.1419$ ;  $m = 0.4565$  y  $n = 0.4008$ , valores diferentes encontrados en el presente estudio. Este resultado apoya a la mayor diferencia que se encontró entre las estaciones de Viacha y El Alto, llegando al 12.83% entre las precipitaciones promedio anuales de ambas estaciones.

La Figura 4 muestra las curvas IDF para la zona en estudio en seis periodos de retorno, conforme las seis curvas graficadas existe una relación inversa no lineal entre la intensidad de la precipitación y la duración del evento de lluvia, es decir a mayores intensidades de lluvia se tendrán duraciones menores del evento. Además se presenta mayores intensidades de lluvia a mayores periodos de retorno.

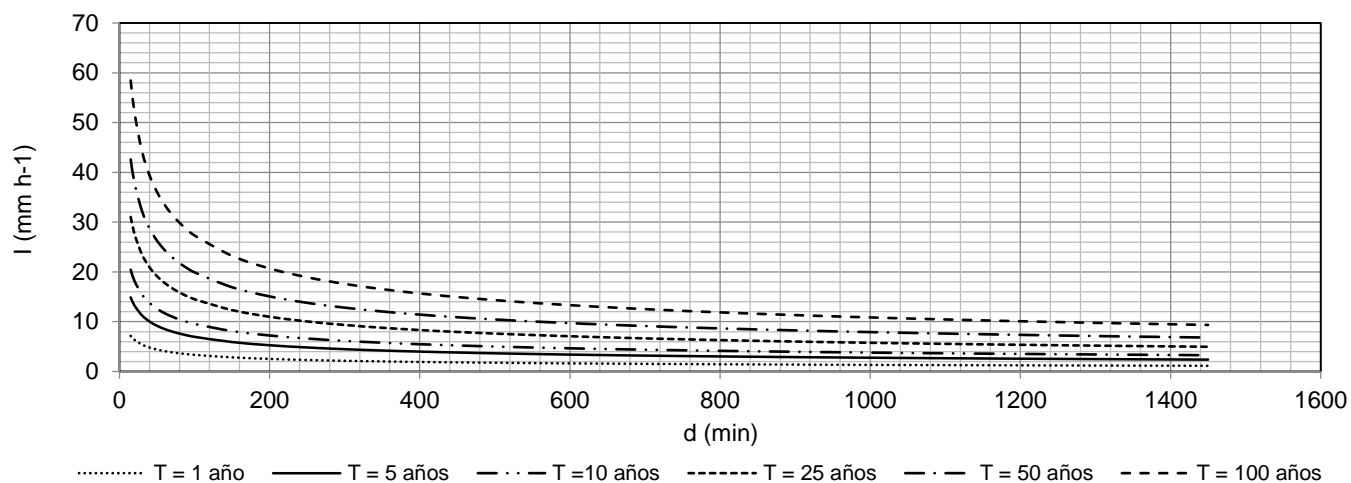


Figura 4. Curvas IDF a partir de los datos calculados con la curva S para el periodo 1973-2014.

## CONCLUSIONES

La Estación Meteorológica de Viacha tiene una precipitación promedio anual de  $573.29 \pm 82.06$  mm, con un coeficiente de variación del 14.31%. La época húmeda comprende desde octubre hasta marzo con más del 80% del total de la precipitación. La curva que mejor ajuste logro fue la curva S, ecuación con el cual se obtuvieron coeficientes de correlación de 0.921, 0.986 y 0.990 para periodos de retorno de 1, 3 y 47 años respectivamente. Estos resultados permiten efectuar una planificación de la ocurrencia e intensidad de la precipitación, hecho que es considerado para la producción agrícola en el área rural.

## BIBLIOGRAFÍA

Amaya, R., López, M. y Seoane, M. 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). Facultad de Ingeniería. Universidad Mayor de San Andrés. 203 p.

Chereque, W. s.a. Hidrología para estudiantes de Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú. 223 p.

Fattorelli, S., Fernández, P. 2011. Diseño Hidrológico. Mendoza, Argentina. 531 p.

Flores, V. 2012. Diagnóstico de la situación actual del sistema de producción de la Estación Experimental de Choquenaira. Tesis de licenciatura. La Paz, Bolivia, Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 135 p.

García, M., Raes, D., Allen, R. and Herbas, C. 2004. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). *Agricultural and Forest Meteorology*. 125: 67-82.

Luna, J. 2013. Predicción y pronóstico de tormentas en regiones de montaña. Aplicación en la cuenca del río La Paz, Bolivia. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. 292 p.

Mendoza, J. 1994. Estudio del régimen pluviométrico en la cuenca del río La Paz. Tesis licenciatura. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ingeniería. 150 p.

Quispe, J. 2017. Modelo de serie estacional sintética de precipitación para la estación meteorológica de Viacha. *Revista Aphapi*, v. 3, n. 2. pp. 514-523.

SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología), 2015. Disponible en: <http://www.senamhi.gob.bo>. Consultado el 14/03/2018.

Tancara, A. 2016. Seminario de introducción a la metodología de investigación. Doctorado en Ciencias Tecnología Humanidades. Universidad Pública de El Alto. El Alto, Bolivia.

Villón, M. 2005. HIDROESTA. Software para cálculos hidrológicos. Manual del usuario. Lima, Perú. 300 p.

Villón, M. 2010. HEC – HMS: Ejemplos. Centro de Desarrollo de Material Bibliográfico. Lima, PE. 536 p.

Estudio de caso recibido en: 15 de marzo 2018

Aceptado en: 13 de junio 2018