

Precipitaciones extremas en la ciudad de Quito, provincia de Pichincha- Ecuador

Eugenio Villacis Rivadeneira email: evillacis@espe.edu.ec
Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción DECTC
Carrera de Ingeniería Civil. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Ecuador.

Norberto Marrero de León email: marrero@tesla.cujae.edu.cu
Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH)
Universidad Politécnica de la Habana José Antonio Echeverría (Cujae). Habana.

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio sobre eventos extremos de precipitaciones que han tenido lugar en la ciudad de Quito, así como su valoración del comportamiento espacio-temporal, a través de indicadores tales como el coeficiente pluviométrico C_p y las curvas de intensidad-frecuencia-duración IFD que señalan que los eventos de precipitación extrema en el entorno de la ciudad de Quito están asociados principalmente, con el período lluvioso de enero a mayo, con mayor probabilidad de ocurrencia durante el mes de abril. Además, se evidencia que la ecuación obtenida para determinar las lluvias diarias por el método de Bell, satisface el cálculo de las lluvias máximas diarias, excepto por un ligero incremento de aproximadamente un 16% en los períodos de retorno de 50 y 100 años, respecto a los valores calculados por la distribución binomial.

Palabras clave: coeficiente pluviométrico, eventos extremos, períodos de retorno, precipitaciones.

Extreme precipitations in the city of Quito, Pichincha province - Ecuador

ABSTRACT

This paper is concerned with a study about maximum extreme precipitation events that have taken place in the city of Quito, as well as their assessment and space-time behavior by means of indicators such as pluviometric coefficient and intensity-frequency-duration curves which demonstrate that the extreme precipitation events around the city of Quito are mainly associated to the rainy period January-May, with a higher probability on April. Besides, it is shown that the equation obtained in order to determine the daily precipitations by means of the Bell method satisfies the calculation of the daily precipitations, except for a slight increase of 16% in the return periods of 50 and 100 years, with respect to the calculated values by the binomial distribution.

Keywords: pluviometric coefficient, extreme events, return periods, precipitations.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Quito está situada en el valle de Quito en la vertiente interandina de la Cordillera Occidental, alineada de sur a norte por más de 50 km, flanqueada por el volcán Pichincha a 4680 msnm y el Atacazo por el oeste, y por el sistema de Puengasí–Guanguiltagua al este. (Pourrut 1995). Se asienta sobre una llanura lacustre que ocupa el eje de la depresión a una cota promedio de 2800 msnm, y que corresponde a una planicie relacionada con una falla geológica longitudinal de 45 km.

Estas condiciones promueven diferentes factores de riesgo entre los que se destacan las erupciones volcánicas, la inestabilidad geomorfológica, la sismicidad, la presencia de fallas geológicas, entre otras. Sin embargo, este conjunto de riesgos presenta una menor probabilidad de ocurrencia en comparación con las precipitaciones extremas que de manera persistente y en combinación con las características topográficas de la ciudad de pendientes altas, facilitan los procesos erosivos y generan efectos tales como aluviones, deslizamientos en masa, inundaciones, colapso del sistema de alcantarillado, que forman parte cotidiana de la vida urbana en la ciudad de Quito.

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio sobre eventos extremos de precipitaciones que han tenido lugar en la ciudad de Quito, identificar su comportamiento espacio temporal a través de indicadores tales como el coeficiente pluviométrico C_p y las curvas de intensidad-frecuencia-duración IFD obtenidas mediante métodos alternativos.

ANTECEDENTES

Las observaciones regulares de las precipitaciones en la ciudad de Quito datan del año 1890. Los registros históricos están asociados con la fundación del Observatorio Astronómico de Quito en 1873, el que empieza a reportar datos climáticos en 1891 y continúa con regularidad hasta la actualidad, constituyéndose en un referente histórico por ser una de las primeras estaciones meteorológicas de América del Sur.

Las precipitaciones extremas son perjudiciales para las zonas afectadas, dependiendo de la intensidad y la cantidad de agua caída, aspectos que generan daños e impactan al entorno socio-económico. En este ámbito, resulta necesario identificar las lluvias máximas en 24 horas para diferentes períodos de retorno de tal forma que cubran las exigencias y regulaciones para la proyección de estructuras hidráulicas como parte de una planificación urbana preventiva, ante la ocurrencia de avalanchas, deslaves e inundaciones inducidas por las precipitaciones extremas.

En el área de estudio son recurrentes las inundaciones de diferente magnitud las cuales obedecen a causas estructurales y climáticas. Entre las causas estructurales se evidencia que la red de drenaje urbana no está diseñada para eventos superiores al 10% de probabilidad, en cuyo caso, la eficiencia del sistema queda limitada ante la ocurrencia de eventos extremos de precipitación, cuya singularidad y características actuales obedecen a factores de orden climático regional. Un aspecto puntual a considerar es la alta tasa de deforestación en las zonas perimetrales de la ciudad de Quito las que de manera general presentan pendientes elevadas, que favorecen la torrencialidad del escurrimiento superficial.

CARACTERÍSTICAS DE LAS LLUVIAS EXTREMAS

Las lluvias extremas en la ciudad de Quito están constituidas por los valores máximos diarios de las precipitaciones, y ello sugiere que es muy probable que las precipitaciones máximas diarias se relacionen básicamente con la condición orográfica por la influencia del callejón interandino, el cual promueve el ascenso de las masas cálidas de aire a las capas altas de la atmósfera y su posterior condensación (Pourrut 1995).

Se considera que la causa básica del proceso de convección es el contraste de temperaturas formado como resultado del calentamiento del aire en la superficie terrestre y el enfriamiento en las capas superiores, o debido a la elevación mecánica sobre una superficie frontal originando las lluvias orográficas. En este caso, los flancos de la Cordillera Occidental, cuyo punto más alto es el volcán Pichincha con 4680 msnm, que literalmente bordea Quito en su perímetro occidental, promueven la ocurrencia de precipitaciones con intensidades variables sobre el entorno urbano de la ciudad, con una relación inversa en sus valores de lámina de precipitación por unidad de tiempo y en el perímetro oriental de la ciudad próximo a los valles de Los Chillos y Tumbaco con carácter predominantemente orográfico con rasgos convectivos (Chávez 1994).

En décadas recientes y en diferentes zonas del Ecuador, el clima ha tenido un comportamiento anómalo que ha traído como resultado la variabilidad en el comportamiento de parámetros tales como la humedad, neblina, las temperaturas máximas y mínimas, las alturas pluviométricas. En el caso específico de la precipitación se detectan variaciones persistentes en su comportamiento multianual, con respecto a los valores máximos y mínimos y el adelanto y/o retardo de los períodos lluviosos que eventualmente están siendo precedidos por períodos de sequía.

COEFICIENTE PLUVIOMÉTRICO C_p

Para caracterizar el comportamiento temporal de la precipitación en la ciudad de Quito, el autor ha determinado los valores de los coeficientes pluviométricos C_p , mediante el procesamiento de la serie de precipitaciones mensuales de la estación Quito Observatorio en el período de 1891-1980, privilegiando el cálculo de la precipitación media mensual, la precipitación promedio anual, el coeficiente K resultante del cociente entre la precipitación promedio anual y el número de días calendario de un año tipo.

Según Galindo (2004) cuando $C_p < 1$ el período es seco o más propiamente de menos lluvia, si $C_p > 1$ el período es húmedo, y cuando $C_p = 1$ el período es indiferente o de transición.

En la tabla 1 se han agrupado los respectivos valores y en la figura 1 se representa el comportamiento del C_p .

Tabla 1. Valores del coeficiente pluviométrico C_p

Mes	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
C_p	1,11	1,40	1,50	1,76	1,25	0,50	0,19	0,24	0,80	1,27	1,09	0,98
[fuente propia (2015)]												

El valor máximo del C_p corresponde al mes de abril con un valor de 1,76 y el valor mínimo de C_p corresponde al mes de julio con un valor de 0,19.

De acuerdo con lo que se muestra en la figura 1, el comportamiento multianual de la precipitación en la ciudad de Quito revela que existen dos períodos lluviosos: de enero a mayo y de octubre a diciembre, así como un período menos lluvioso o de seca que se extiende de junio a septiembre.

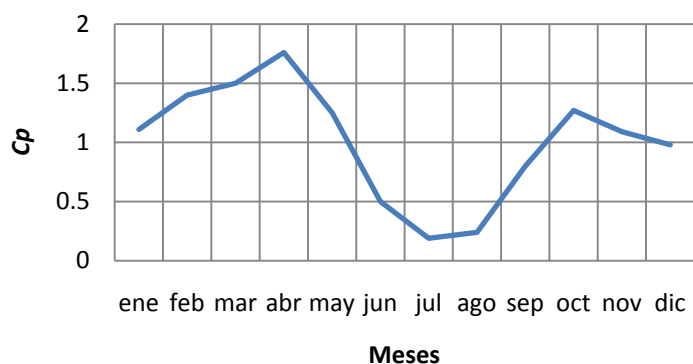


Figura 1. Variación temporal del coeficiente pluviométrico C_p

PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Las estaciones seleccionadas se encuentran ubicadas en el entorno urbano de la ciudad de Quito, administradas y operadas respectivamente por el Instituto Nacional de Metrología e Hidrología INAMHI con tres equipos, la Dirección de Aviación Civil DAC con un equipo y el Observatorio Astronómico de Quito OAQ con otro equipo. La base de datos de lluvias máximas diarias proviene de los registros de las siguientes estaciones: La Tola, Aeropuerto, Iñaquito INAMHI, Quito Observatorio e Izobamba, tabla 2.

Tabla 2. Estaciones utilizadas

Estaciones	Código	años	Institución	Condición
La Tola	M002	32	INAMHI	Activa
Aeropuerto	M055	55	DAC	Activa
Iñaquito IINAMHI	M024	37	INAMHI	Activa
Quito Observatorio	M054	90	OAQ	Activa
Izobamba	M003	44	INAMHI	Activa
[Fuente propia (2016)]				

Según la posición de estas estaciones, su radio de influencia y el número de años de observaciones, se consideró pertinente utilizar la serie de la estación de Quito Observatorio para la determinación del coeficiente pluviométrico C_p e incluir a la estación La Tola situada en el sector sur oriental de la ciudad, para complementar a las estaciones restantes que literalmente están orientadas según el eje longitudinal sur a norte, figura 2.

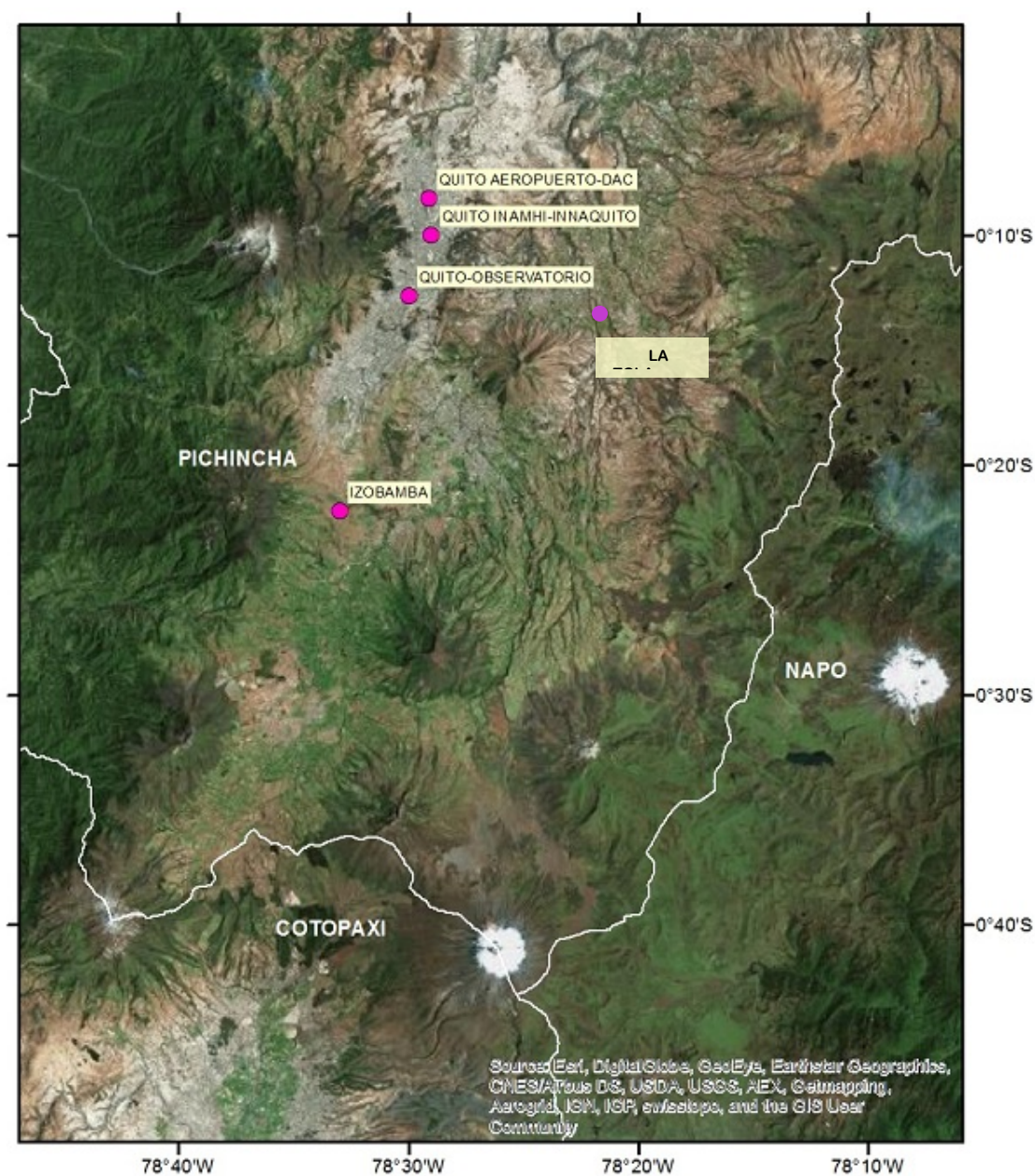


Figura 2. Ubicación espacial de las estaciones que intervienen en el estudio

La ubicación de las estaciones seleccionadas respecto al eje longitudinal sur norte tiene el punto más alto en el sur con 3432 msnm y el punto más bajo hacia el norte con 2680 msnm, valores que determinan el gradiente altimétrico que influye en el comportamiento espacial de la precipitación sobre la ciudad, según se observa en el plano isoyético, figura 3.

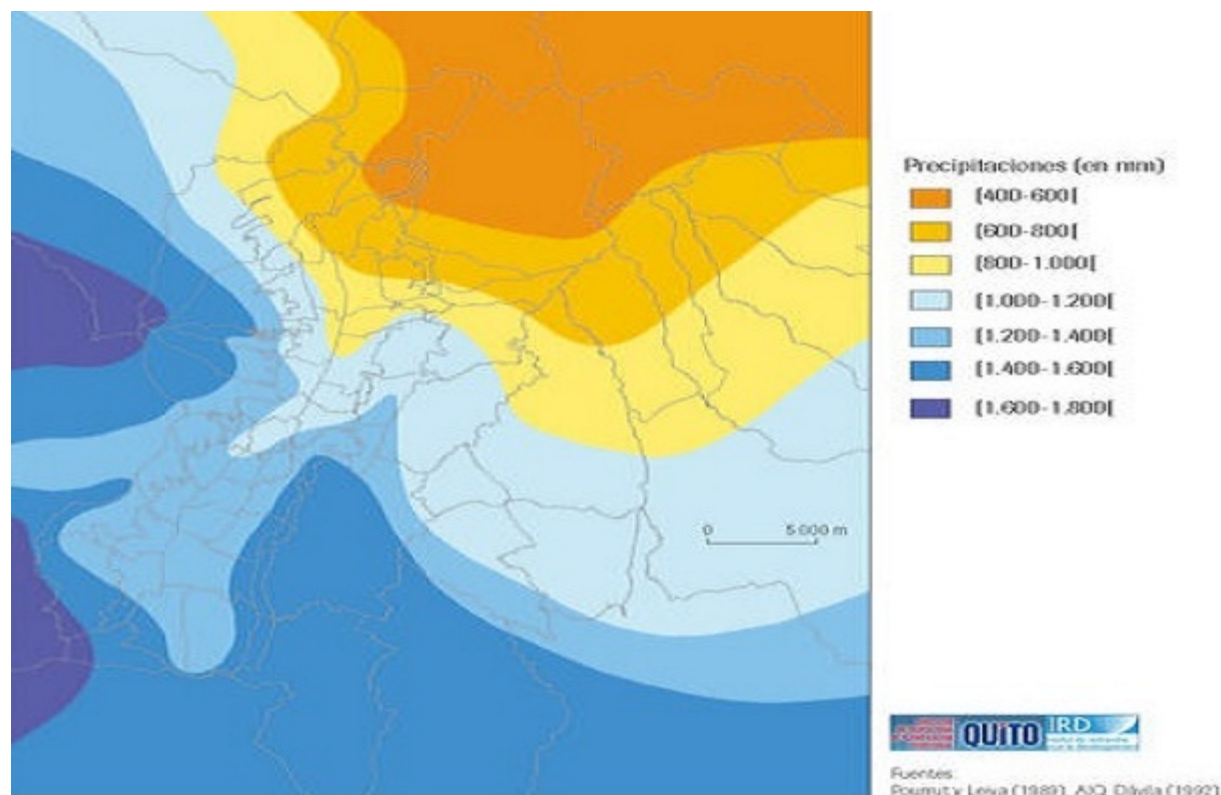


Figura 3. Mapa Isoyético del área de estudio

PRECIPITACIÓN MÁXIMA PROBABLE PMP

La PMP, teóricamente, corresponde a la mayor precipitación físicamente posible en el ámbito andino de la ciudad de Quito.

Para el análisis de la precipitación máxima probable PMP se incluyó a la estación La Tola para ampliar la base de datos en el área de estudio desde el sur hacia el norte, referenciados con los equipos Izobamba y Aeropuerto respectivamente, cuyos radios de influencia se apartan de la relativa cercanía entre la estación Quito Observatorio y la estación Iñaquito INAMHI.

Los valores de la precipitación máxima están integrados en los registros anuales, que refieren el valor máximo que ocurrió en cada mes de un año y cada máximo de los doce valores posibles. Esto constituye una serie anual de máximos, opción que generalmente es la más utilizada, por su inmediatez, su facilidad de integración, y la eventual extrapolación de eventos según el concepto de período de retorno.

Para cada serie se calculó la precipitación media P_{med} , la desviación típica σ y $P_{m\acute{a}x}$, y el factor de frecuencia K_m , se establece utilizando la ecuación (1):

$$P_{m\acute{a}x} = P_{med} + K_m * \sigma \quad (1)$$

donde:

$P_{m\acute{a}x}$: Precipitación máxima del registro anual disponible de lluvias máximas diarias, en mm

P_{med} : Precipitación media del registro anual disponible de lluvias máximas diarias, en mm

K_m : Factor de frecuencia

σ : Desviación típica en mm

Los resultados se muestran en la tabla 3, donde se especifican para cada equipo los valores de los términos de la ecuación (1). En el caso específico del factor de frecuencia K_m , los valores obtenidos en el área de estudio, son bajos respecto a la práctica internacional referido en USA como $K_m=15$. Nótese que el factor de frecuencia $K_m=15$ es un valor considerado alto para zonas con lluvias intensas y calificado como valor bajo para zonas áridas, independiente de la magnitud de la lluvia (Campos 1992).

Tabla 3. Términos de la ecuación (1) en los equipos seleccionados

Equipos	La Tola	Aeropuerto	Iñaquito	Izobamba
P_{med}	46,97	43,43	46,15	41,87
σ	11,83	10,43	10,71	10,38
$P_{m\acute{a}x}$ serie	79,20	76,20	71,60	71,40
K_m	2,72	3,14	2,38	2,84
[Fuente propia (2015)]				

El factor de frecuencia $K_m=3,14$ corresponde al mayor valor calculado, mientras el valor de $K_m=3,50$ resulta por el incremento del 10,5 % a $K_m=3,14$. Este incremento se sustenta por la diferencia entre los valores máximos y mínimos de las $P_{m\acute{a}x}$ y considerando a $K_m=3,50$ como el valor envolvente de K_m en la relación entre K_m y el promedio anual de las lluvias máximas.

De acuerdo con lo anterior, la precipitación máxima probable PMP, se establece con los valores de $K_m=3,14$ y $K_m=3,50$, descartando el valor de $K_m = 15$ que es muy elevado y no se ajusta a las características físico geográficas del área de estudio, tabla 4.

Tabla 4. Precipitación Máxima Probable PMP

Estaciones	P_{med}	σ	$P_{m\acute{a}x}(\text{mm})$	$K_m = 3,14$	$K_m = 3,50$
				PMP	PMP
La Tola	46,97	11,83	79,20	84,12	88,38
Aeropuerto	43,43	10,43	76,20	76,18	79,94
Iñaquito	46,15	10,71	71,60	79,78	83,64
Izobamba	41,87	10,38	71,40	74,46	78,20
[Fuente propia (2015)]					

PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO DE LLUVIAS MAXIMAS DIARIAS

Al procesar estadísticamente el registro de 37 años de la estación Iñaquito INAMHI se obtuvo la ecuación resultante (2), que permite obtener los valores de las lluvias máximas en 24 horas para períodos de retorno 20, 10, 5, y 2 años, que numéricamente son inferiores a los años de registro de la estación pivote y en consecuencia admite el criterio de interpolación (Campos 1992).

$$PT_r = 35,13 + 26,25 * \log(T_e) \quad (2)$$

donde:

PT_r : lluvia máxima diaria (mm) de periodo de retorno Tr de la serie anual de máximos.

T_e : periodo de retorno en años.

A los valores obtenidos de las lluvias máximas diarias, según la ecuación (2), se aplicó el ajuste mediante el coeficiente 1,13 por intervalo fijo de observación (Campos 1992) cuyos resultados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Lluvias máximas diarias. Estación Iñaquito-INAMHI

T (años)	100	50	20	10	5	2
%	1	2	5	10	20	50
Lámina (mm)	87,62	79,72	69,28	61,38	53,47	43,03
Lámina * (mm)	99,01	90,09	78,28	69,35	60,43	48,62
* ajustada	[Fuente: propia (2016)]					

De otra parte, la distribución probabilística Binomial Pearson Tipo III aplicada a la serie de la estación Iñaquito INAMHI, genera valores de las láminas máximas diarias en 24 h para distintas probabilidades, según se aprecia en la tabla 6.

Tabla 6. Distribución probabilística de láminas máximas. Estación Iñaquito-INAMHI

T (años)	100	50	20	10	5	2
$\% = (1/T) * 100$	1	2	5	10	20	50
Lámina (mm)	72,15	68,68	63,64	59,30	54,26	45,17
[Fuente: propia (2016)]						

Nótese que los valores de las láminas máximas diarias en 24 h de la Tabla 5 sin ajuste y los valores de las láminas máximas diarias según la distribución Binomial Pearson Tipo II son similares en los períodos de retorno de 2, 5, 10 y 20 años.

CURVAS PRECIPITACIÓN FRECUENCIA DURACIÓN PFD

Los datos idóneos para procesar las curvas intensidad frecuencia duración IFD son los datos pluviográficos, los cuales, generalmente, no son abundantes en relación con los datos pluviométricos (Monsalve 2008).

Esta circunstancia genera la necesidad de evaluar el comportamiento de la precipitación por medios alternativos como son las curvas PFD a partir de las láminas de lluvia registradas en pluviómetros y, mediante fórmulas empíricas obtener los valores de precipitaciones para diferentes tiempos y períodos de retorno. (González 2007).

Si el período de retorno T está entre 2 y 100 años, y el tiempo t está entre 5 y 120 minutos, la ecuación de la relación general de precipitación – duración – período de retorno viene dada por la ecuación (3).

$$P_T^t = (0,21 \ln(T) + 0,52) * (0,54 t^{0,25} - 0,50) * P_{10}^{60} \quad (3)$$

donde:

P_T^t : Representa la precipitación de duración t (minutos) y período de retorno T (años), en mm.

P_{10}^{60} : Representa la precipitación de duración 60 minutos, y período de retorno 10 años, en mm

Si: $2 \leq T \leq 100$ años; $5 \leq t \leq 120$ min

Respecto a la lluvia de duración de una hora y período de retorno 2 años, la ecuación 3 se transforma en la ecuación (4).

$$P_T^t = (0,35 \ln(T) + 0,76) * (0,54 t^{0,25} - 0,50) * P_2^{60} \quad (4)$$

donde:

P_T^t : Representa la precipitación de duración t minutos y período de retorno T años, en mm

El cociente entre la lluvia de 1 hora y la de 24 horas, ambas con período de retorno de 2 años varía para USA de 0,10 a 0,60 (Campos 1992). En este contexto, el área de estudio presenta condiciones orográficas favorables para promover lluvias máximas y también es probable que la lluvia máxima diaria en 24 h provenga de una tormenta convectiva, de tal forma que se toman los cocientes de 0,40 y 0,50 para evaluar P_2^{60} , según ecuaciones (5) y (6).

$$P_2^{60} = 0,40 * P_2^{1440} = (0,40 * 43,0286) = 17,21 \text{ mm} \quad (5)$$

$$P_2^{60} = 0,50 * P_2^{1440} = (0,50 * 43,0286) = 21,51 \text{ mm} \quad (6)$$

Se escoge $P_2^{60} = 17,21$ mm como el valor más adecuado debido a que el coeficiente 0,40 es el valor límite para áreas donde la influencia orográfica es determinante.

Al evaluar la ecuación 4, se obtienen las magnitudes de lluvia expresadas mediante lámina de precipitación en mm y posteriormente expresadas en forma de intensidades de precipitación en mm/h, cuyos valores se tabulan en las tablas 7 y 8 respectivamente y se muestran en las figuras 4 y 5.

Tabla 7. Láminas máximas de lluvia en mm

	<i>T</i> (años)					
	2	5	10	25	50	100
<i>t</i> (min)	Láminas (mm)					
5	5,2	6,9	8,2	9,9	11,1	12,4
10	7,8	10,4	12,3	14,8	16,7	18,6
20	10,9	14,4	17,1	20,6	23,2	25,9
40	14,6	19,3	22,8	27,5	31,1	34,6
60	17,1	22,6	26,7	32,2	36,3	40,4
100	20,6	27,2	32,1	38,7	43,7	48,7
120	21,9	29	34,3	41,3	46,6	51,9
180	25,2	33,2	39,3	47,4	53,5	59,6
720	39,2	51,7	61,2	73,7	83,2	92,6
1440	48,2	63,6	75,2	90,7	102,3	114,0
[Fuente: propia (2015)]						

Tabla 8. Intensidades máximas de lluvia en mm/h

	<i>T</i> (años)					
	2	5	10	25	50	100
<i>t</i> (min)	Intensidades (mm/h)					
5	62,9	83	98,2	118,3	133,6	148,8
10	47,1	62,1	73,5	88,6	100	111,4
20	32,8	43,3	51,3	61,8	69,7	77,7
40	21,9	29	34,3	41,3	46,6	51,9
60	17,1	22,6	26,7	32,2	36,3	40,4
100	12,3	16,3	19,3	23,2	26,2	29,2
120	11	14,5	17,1	20,6	23,3	26
180	8,4	11,1	13,1	15,8	17,8	19,9
720	3,3	4,3	5,1	6,1	6,9	7,7
1440	2	2,6	3,1	3,8	4,3	4,7
[Fuente: propia (2015)]						

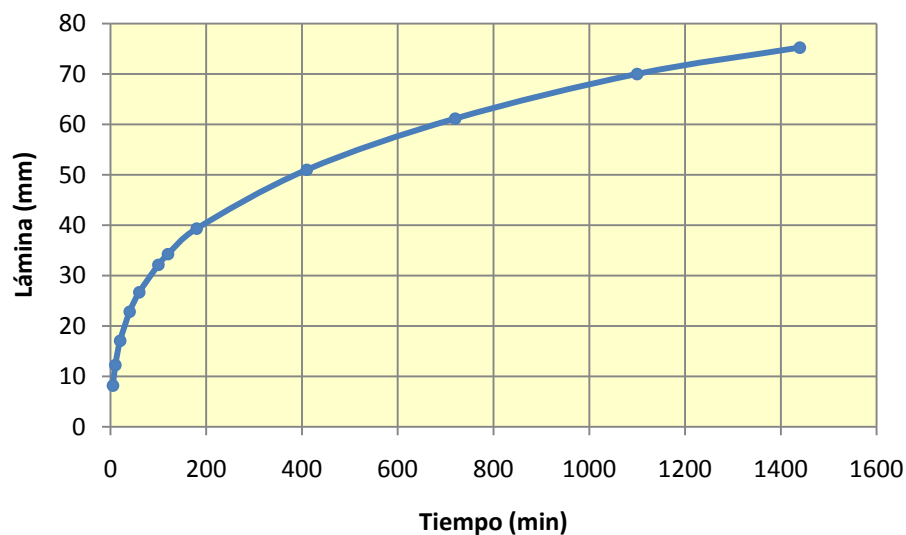


Figura 4. Curva PDF 10% M024. Estación Iñaquito-INAMHI

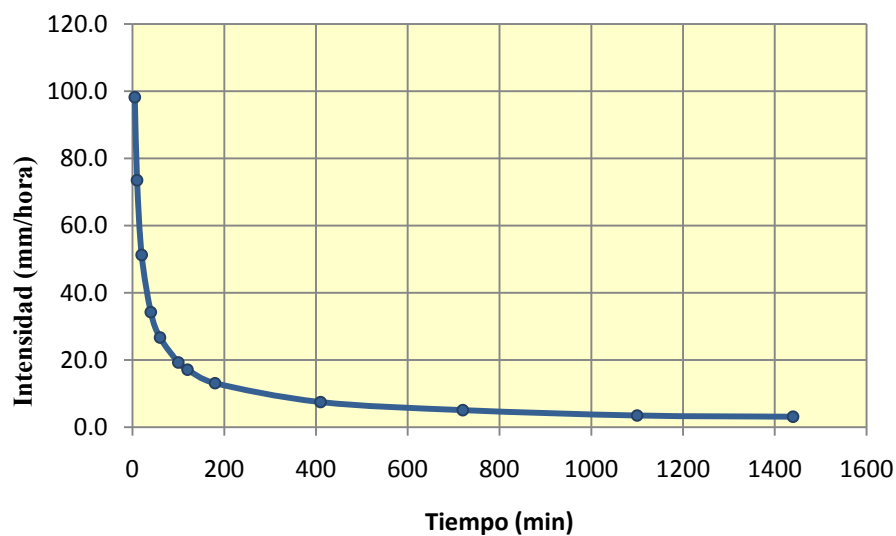


Figura 5. Curva IFD 10% M024 Estación Iñaquito-INAMHI

La figura 4 y la figura 5 establecidas para el 10 % de probabilidad representan gráficamente los resultados de las tablas 7 y 8 respectivamente. La figura 5 es el resultado de la aplicación del método alternativo de la obtención de curva intensidad-frecuencia-duración IFD a partir de datos pluviométricos, manteniendo el criterio de grado óptimo de seguridad en función del análisis estadístico de los datos logrados en la zona de estudio (Aparicio 2010).

CONCLUSIONES

1. El coeficiente pluviométrico C_p relaciona temporalmente la ocurrencia de lluvias máximas con el periodo lluvioso establecido de enero a mayo, y eventualmente con mayor incidencia durante el mes de abril, el cual presenta el mayor valor de $C_p = 1,75$.
2. El factor de frecuencia $K_m = 3,50$ establecido como el valor envolvente de todos los valores de K_m calculados, promueve la obtención de los valores más propicios de las precipitaciones máximas probables PMP para la ciudad de Quito, hasta un periodo de retorno de $T=50$ años.
3. Los valores de las lluvias máximas diarias obtenidos por la ecuación (4) coinciden con los valores calculados mediante la aplicación de la Distribución binomial Pearson Tipo II a la serie de la Estación Iñaquito INAMHI excepto en los periodos de retorno de 50 y 100 años, que registran un incremento de 16 %.
4. La curva de intensidad-frecuencia-duración IFD al 10% obtenida a partir de datos pluviométricos, es una alternativa factible y confiable para la proyección de obras hidráulicas que intervengan en el planeamiento urbano de la ciudad de Quito.

REFERENCIAS

- Aparicio F.** (2010). “Fundamentos de Hidrología de Superficie”. Editorial Limusa, ISBN 978-968-18-3014-4, México.
- Campos D.** (1992). “Procesos del Ciclo Hidrológico”. Editorial Universidad Autónoma de San Luis Potosí, ISBN 968-6194-44-4-0592-98041-A 0160, México.
- Chávez R.** (1994). “Hidrología para Ingenieros”. Fondo Editorial Pontificia. Universidad Católica del Perú, ISBN 84-8390-964-2. Lima, Perú.
- Galindo J.** (2004). “Problemas resueltos de Hidrología Superficial y Subterránea”, Universidad de la Salle, ISBN 9589290396, Bogotá, Colombia.
- González L.** (2007). “Temas de Hidrología Superficial para Ingenieros”. Editorial Félix Varela. ISBN 978-959-07-0310-2, La Habana, Cuba.
- Monsalve G.** (2008). “Hidrología en la Ingeniería”, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, ISBN 9701504046, Bogotá, Colombia.
- Pourrut P.** (1995). “El agua en el Ecuador. Clima, precipitaciones, escorrentía”. Corporación Editora Nacional, ISBN 9978-84-035-4, Quito, Ecuador.