

DISEÑO DE REDES DE ALCANTARILLADO PLUVIAL: METODOLOGIA

Agustin Felipe Breña Puyol¹

Resumen – La lluvia de diseño es el concepto hidrológico básico para diseñar redes de alcantarillado pluvial en las grandes ciudades y para estimarla con precisión es necesario calcular las variables involucradas con la magnitud, la duración, la probabilidad de ocurrencia, el factor de reducción por área (FRA) y la distribución temporal de la lluvia de diseño. Con el apoyo de las 5 variables descritas se desarrolla una metodología de tipo regional cuya característica básica es calcular la lluvia de diseño asociada a cualquier área tributaria de una red de alcantarillado pluvial, en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Además, con la metodología de tipo regional se obtienen diseños de redes homogéneos y consistentes para cualquier porción de área de la ZMCM, en contraposición con los resultados inconsistentes y heterogéneos que se obtienen con los métodos tradicionales estructurados con diferentes metodologías y de aplicación común por los organismos operadores de agua potable y alcantarillado de nuestro medio.

Abstract – The design storm is the basic hydrologic concept to design networks of stormwater sewage system in large cities and to consider it accurately it is necessary to calculate the variables involved with the magnitude, the duration, the probability of occurrence, the area reduction factor (ARF) and the temporary distribution of the design storm. With the support of the 5 described variables, a methodology of regional type whose basic feature is to calculate the design storm associated to any tributary area in a network of pluvial sewage system is developed for the Metropolitan Zone of Mexico City (MZCM). In addition, with the methodology of regional type, the designs of homogenous and consistent networks for any portion of area of the ZMCM are obtained, in contrast with the inconsistency and heterogeneous results that are obtained with the traditional methods structured with different methodologies and of common application by the current water supply and sewage systems or other water utilities.

Palabras clave: Lluvia de diseño, factor de reducción por área (FRA), grandes ciudades.

Keywords: Design storm, areal reduction factor (ARF), large cities.

¹ Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa – Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica – Av. San Rafael Atlixco No. 186, Col Vicentina, 09340 Mexico, D. F. – Tel: (+55) 58 044646, Fax: (+55) 58 044900 – E-mail: bpaf@xanum.uam.mx

INTRODUCCIÓN

Las grandes metrópolis presentan hoy día problemas graves en la dotación de servicios urbanos, situación derivada por el crecimiento acelerado y continuo de estos núcleos. A su vez, hay que advertir que el crecimiento de los grandes centros urbanos se acelera e incrementa por la dinámica poblacional, es decir por la elevada tasa de crecimiento de la población y por la emigración de la población rural hacia las ciudades más desarrolladas.

Ahora bien, se puede decir que el nivel de cobertura de los servicios urbanos de los grandes centros de población en los rubros de vivienda, vialidad, agua potable, drenaje, saneamiento, educación y de otra índole es muy variable, ya que dependen de factores de tipo social, político y económico o bien de factores técnicos relacionados con la topografía, la climatología, la hidrología o de otro tipo. Por su parte, las grandes urbes modifican radicalmente el ciclo hidrológico, ya que al transformar las áreas naturales en zonas artificiales con diferentes grados de urbanización, se modifican de forma drástica las condiciones naturales del escurrimiento superficial. En síntesis, la urbanización cambia fundamentalmente el proceso de transformación de la lluvia en escurrimiento.

De acuerdo con observaciones que se han realizado en los grandes núcleos urbanos, la modificación principal en la relación lluvia-escurrimiento es la reducción de los volúmenes de lluvia que deben infiltrarse en el suelo y el aumento de los volúmenes que escurren superficialmente sobre las áreas urbanizadas. La razón de esta variación es evidente, ya que la lluvia que ocurre en zonas urbanas no se precipita sobre un suelo natural, sino generalmente sobre grandes extensiones de concreto y asfalto, las cuales impiden que los volúmenes de lluvia se infiltren en el suelo. Además, la lluvia que no se infiltra escurre sobre las superficies urbanizadas y para evitar inundaciones en zonas reducidas o sobre grandes extensiones, dichos volúmenes deben ser evacuados a través de colectores subterráneos o por medio de canales superficiales.

Las grandes ciudades requirieron, en consecuencia, de redes de alcantarillado pluvial cuyo objetivo es evacuar los escurrimientos generados por las descargas residuales y por las tormentas pluviales que se presentan en sus áreas de captación, a través de redes de artificiales de colectores urbanos o de circuitos naturales. En relación a este último elemento, en la mayoría de los centros urbanos las corrientes naturales son absorbidas por la urbanización y por lo regular se transforman en colectores urbanos, formando parte del sistema general de desagüe.

Además, las redes de alcantarillado pluvial han evolucionado a lo largo del tiempo, en especial al florecer las grandes ciudades. En su fase inicial, el drenaje de un centro poblacional se realizaba con el auxilio de zanjas primitivas sobre la superficie del terreno. Posteriormente, al crecer y surgir las grandes ciudades las zanjas primitivas han cambiado a redes de alcantarillado pluvial integradas por colectores de tipo subterráneo y superficial. Junto con la complejidad de las redes de alcantarillado, es necesario comprender y analizar con profundidad los procesos hidrológicos que ocurren en las áreas urbanizadas.

Las nociones anteriores han sido determinantes para enfocar este artículo al desarrollo de una metodología de tipo regional cuyo propósito es determinar la tormenta de diseño, elemento fundamental que se utiliza para diseñar redes de alcantarillado pluvial. Además, ha sido seleccionada la Cuenca del Valle de México, región donde se localiza la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), núcleo poblacional de grandes dimensiones donde sobresalen los problemas relacionados con la revisión y diseño de redes de alcantarillado pluvial.

METODOLOGIA

El objetivo básico de la metodología es calcular la tormenta o lluvia de diseño asociada a cualquier área tributaria de una red de alcantarillado pluvial de la ZMCM, para cortas o largas duraciones y para periodos de retorno que oscilen entre 1 y 100 años.

En áreas urbanas, la tormenta de diseño puede estimarse para un punto, para áreas de diferente tamaño o bien en forma regional, esquema que se utiliza en la metodología de este artículo. Además, para definir una tormenta de diseño es necesario considerar a las variables involucradas con la magnitud, la duración, la frecuencia o probabilidad de ocurrencia, la porción de área que abarca la tormenta y la distribución en el tiempo.

La variable relacionada con la magnitud de una tormenta de diseño se analiza con los valores de altura de lluvia máxima o de intensidad máxima de lluvia, mientras que la duración de la tormenta es función del intervalo de tiempo durante el cual se presenta la lluvia. En la hidrología, la frecuencia o probabilidad de ocurrencia se analiza a través del periodo de retorno y con el factor de reducción por área (FRA), se reducen los valores de la lluvia puntual máxima, a valores medios asociados a áreas de diferentes tamaños. Respecto a la distribución de la lluvia en el tiempo, es necesario transformar el valor de la lluvia correspondiente a la duración total, en un hietograma cuyas barras indican la variación de la altura lluvia asociada a la duración de la tormenta analizada.

En síntesis, las 5 variables intervienen en la metodología desarrollada para estimar las tormentas de diseño en cuencas urbanas de la ZMCM, y a continuación se describen sus aspectos más relevantes tales como hipótesis, datos utilizados y sus resultados obtenidos.

REGIONALIZACION DE LLUVIAS MAXIMAS

En relación a la magnitud de la tormenta representada por las lluvias máximas es necesario llevar cabo una regionalización de sus valores en la Cuenca del Valle de México, región donde se localiza la ZMCM. Por su parte, el proceso de la regionalización de lluvias máximas consiste en obtener fórmulas o procedimientos factibles de aplicarse a una región, aprovechando las características que son comunes para todos sus puntos y señalando la forma como influyen para el fenómeno hidrológico de estudio, aquellas características que no son comunes. Al respecto puede decirse que varios autores han desarrollado este tipo de formulaciones, sobresaliendo los trabajos llevados a cabo por Bell (1969) y Chen (1983).

Es obvio que al formular un evento hidrológico a través de una regionalización deben establecerse, como punto de partida, las hipótesis necesarias las cuales son función de los fenómenos meteorológicos que predominan en la zona de estudio. En el caso específico de la Cuenca del Valle de México, las características de las hipótesis de la regionalización de lluvias máximas deben formularse para analizar el comportamiento de lluvias convectivas, debido a que es el evento meteorológico de mayor incidencia en esta región.

Los conceptos anteriores fueron básicos para formular el proceso de regionalización a través de una hipótesis, la cual estipula que los atributos que distinguen un área de otra se reflejan en un mapa de isoyetas construido con datos de lluvias medias anuales. La hipótesis establecida presenta tres ventajas: la primera está asociada con el mapa de isoyetas, el cual ha sido construido con los registros de los pluviómetros ubicados en un gran número de puntos en la zona de estudio y aforados durante un periodo largo de años, el cual garantiza su confiabilidad; la segunda estipula que el valor de la variancia de los datos de lluvia media anual es menor a los valores correspondientes a otras variables asociadas con duraciones menores; y la tercera establece que la hipótesis puede ser aceptada o rechazada de acuerdo con los resultados obtenidos.

Otro factor relevante a considerar en la regionalización es que dicho proceso debe realizarse para lluvias máximas asociadas a cortas y largas duraciones. En consecuencia, se utilizarán para las cortas duraciones los registros pluviográficos de lluvias máximas de duraciones comprendidas entre 5 y 120 minutos, mientras que para largas duraciones se usará la información disponible en los registros de pluviómetros para periodos de tiempo mayores a 2 horas.

Con el apoyo de la hipótesis estipulada y sus características adicionales se procedió a elaborar la regionalización de lluvias máximas en la cuenca de estudio, construyendo para tal efecto tres planos de isoyetas: en el primero se utilizaron datos de lluvia media anual, mientras que en el segundo y tercero se usaron datos de lluvia máxima anual asociados a cortas duraciones (30 min) y largas duraciones (24 h) y para un periodo de retorno de 5 años.

El plano de isoyetas medias anuales, el cual indica las diferencias entre las lluvias de cada punto de la región de estudio, se elaboró con valores puntuales de las lluvias medias anuales registrados en las estaciones pluviométricas y la longitud de la información abarcó un periodo de 40 años (1951-1990). Los resultados se observan en la figura 1.

El plano de isoyetas de cortas duraciones se construyó con datos de lluvias máximas asociados a una duración de 30 minutos y un periodo de retorno de 5 años. Previo análisis de los datos disponibles y de la bondad de ajuste entre datos observados y teóricos, en las estaciones de medición, se seleccionó la función de distribución de Gumbel (1958) como el criterio de mayor precisión para estimar lluvias máximas asociadas a cortas duraciones. En una fase posterior, con la función de Gumbel se calcularon los valores de lluvia máxima para

una duración de 30 minutos y un periodo de retorno de 5 años, en cada una de las estaciones pluviográficas, y con sus resultados se construyó el plano de isoyetas indicado en la figura 2.

El plano de isoyetas de largas duraciones se elaboró con datos de lluvia máxima anual en 24 horas, y para estimar los valores de la lluvia máxima para una duración de 24 h y un periodo de retorno de 5 años se usó la función de Gumbel (1958), ya que es el método de mejor ajuste entre los valores observados y teóricos. Los resultados se indican en la figura 3.

La regionalización de lluvias máximas, asociadas a cortas y largas duraciones, se formuló con la hipótesis de que la distribución de precipitaciones máximas permanece constante para cualquier duración y para aceptar o rechazar la hipótesis se efectuó un análisis comparativo entre los resultados obtenidos con el análisis regional (lluvia media anual) y el análisis independiente (lluvias asociadas a 30 min. y 24 h).

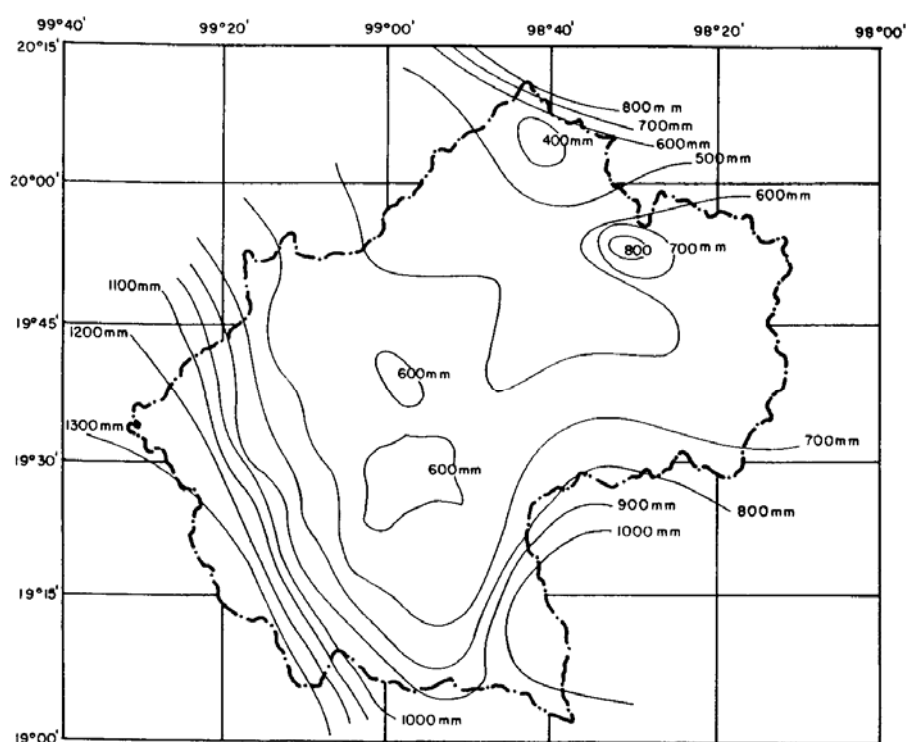


Figura 1. Plano de isoyetas medias anuales, para la Cuenca del Valle de México

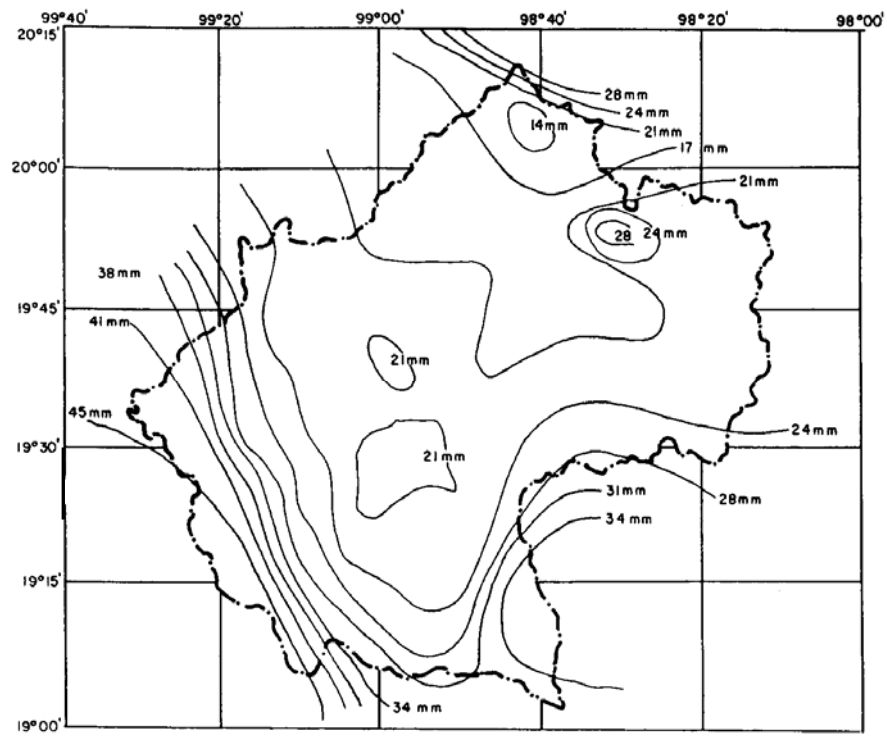


Figura 2. Plano de isoyetas para $d=30$ min y $Tr=5$ años, para la Cuenca del Valle de México

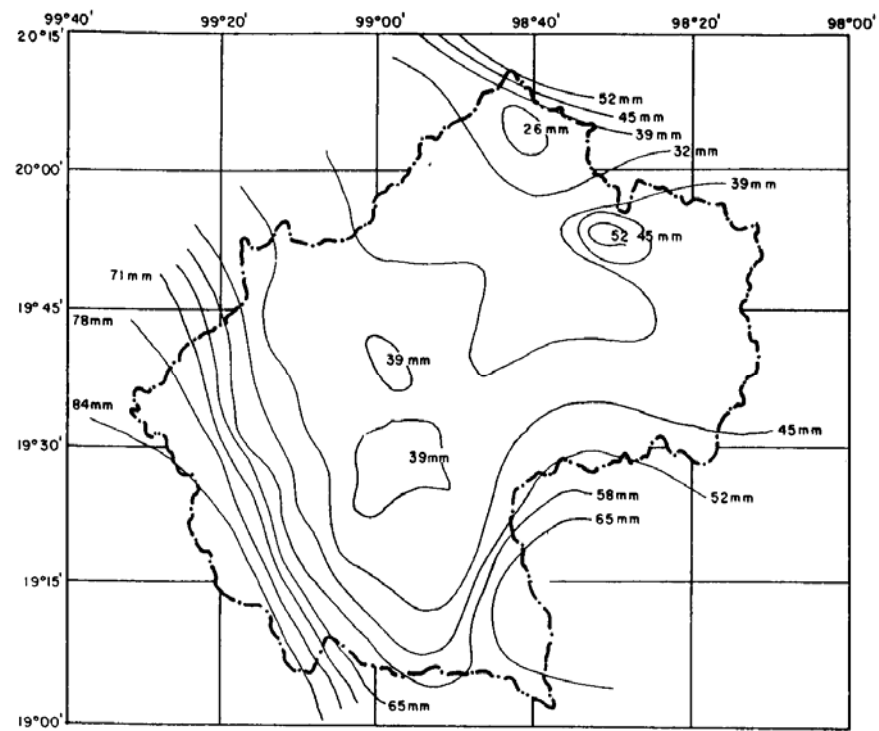


Figura 3. Plano de isoyetas para $d=24$ h y $Tr=5$ años, para la Cuenca del Valle de México

La norma establecida, para aceptar o rechazar la hipótesis (NERC, 1975), establece que se eliminarían aquellas lluvias con diferencias mayores del 10% entre el valor puntual y el valor medio estimado con las dos isoyetas adyacentes.

De un total de 96 valores puntuales de lluvias máximas asociadas a 30 minutos y 24 horas, solamente se eliminaron 11 valores (12% del total de valores puntuales) y de acuerdo con estos resultados se concluye que la hipótesis formulada no se rechaza y que el plano de isoyetas de la figura 2 se podrá utilizar para definir lluvias de diseño asociadas a tormentas concentradas, aisladas y de corta duración ($d \leq 2h$), mientras que el plano de la figura 3, se puede utilizar para lluvias de diseño asociadas a áreas relativamente grandes donde las condiciones de la lluvia corresponden a tormentas extensas de larga duración ($4h \leq d \leq 24h$).

FACTORES DE AJUSTE POR DURACION Y PERIODO DE RETORNO

La regionalización de lluvias máximas obtenida para la cuenca de estudio y representada por los dos planos de isoyetas (figuras 2 y 3) tiene una limitación en su aplicación, debido a que solamente se pueden obtener lluvias para las duraciones de 30 min y 24 h y un periodo de retorno de 5 años. En consecuencia, para ampliar su rango de aplicación se procede a determinar unos valores denominados factores de ajuste, a través de los cuales se pueden calcular lluvias para duraciones y periodos de retorno diferentes a los que usaron en la construcción de los planos de isoyetas.

A partir de un análisis cualitativo y cuantitativo de lluvias máximas anuales asociadas a cortas y largas duraciones, se procedió a estimar dos factores de ajuste por duración, uno para duraciones menores o iguales a 2 horas (F_1) y el otro para duraciones comprendidas entre 4 y 24 horas (F_2).

Factor de ajuste asociado a cortas duraciones (F_1)

El objetivo del factor de ajuste asociado a cortas duraciones (F_1) es ampliar el rango de aplicación de cortas duraciones entre 5 y 120 min y para tal efecto es necesario seleccionar un valor base que permanezca fijo durante la estimación de los factores de ajuste relacionados con diversas duraciones. El valor base adoptado es el valor de la lluvia máxima asociada a una duración de 30 min y un periodo de retorno de 5 años, y aplicando el proceso desarrollado por Bell (1969) se obtuvo la expresión:

$$F_1 = 0.27 + 2.11d - 1.52d^2 + 0.37d^3 \quad (1)$$

donde F_1 es el factor de ajuste asociado a cortas duraciones; y d es la duración de la tormenta, en h.

Factor de ajuste asociado a largas duraciones (F_2)

El factor de ajuste asociado a largas duraciones (F_2) es válido para el intervalo de tiempo comprendido entre 4 y 24 horas y para su estimación se eligió como valor base la lluvia asociada a 24 horas y a un periodo de retorno de 5 años. Al aplicar el proceso desarrollado por Bell (1969) se determinó la expresión:

$$F_2 = 0.74 + 0.03d - 0.0013d^2 + 0.0000213d^3 \quad (2)$$

donde F_2 es el factor de ajuste asociado a largas duraciones; y d es la duración de la tormenta, en h.

Factor de ajuste por periodo de retorno (F_3)

La hipótesis del factor de ajuste por periodo de retorno F_3 estipula que debe existir independencia entre la ubicación de la estación, la duración de la tormenta y el tamaño del área analizada. Lo anterior implica que los tres elementos descritos deben ser independientes entre si para aceptar la hipótesis establecida.

Por su parte, para evaluar el factor F_3 se seleccionó como valor base el periodo de retorno de 5 años y previamente se verificó la independencia de los tres elementos mencionados. Además, aplicando el procedimiento desarrollado por Bell (1969) se obtuvo la expresión válida para periodos de retorno comprendido entre 1 y 100 años, la cual está definida por:

$$F_3 = 0.583 + 0.26\text{Ln}(T_r) \quad (3)$$

donde F_3 es el valor del factor de ajuste por periodo de retorno; Ln es el logaritmo natural; y T_r es el periodo de retorno, en años.

FACTOR DE REDUCCION POR AREA

El factor de reducción por área (FRA), es una de variables más importantes que intervienen en el cálculo de una tormenta de diseño. Con este factor se podrá estimar la lluvia media a medida que va aumentando el tamaño del área de estudio, en otras palabras con la aplicación de este factor se reduce la magnitud de la lluvia puntual máxima a un valor medio sobre un área dada.

El proceso para estimar el FRA en una cuenca consiste en seleccionar un conjunto de tormentas asociadas a una duración y calcular para cada una de ellas la curva altura de lluvia-área. Este tipo de curvas varían para cada tormenta, pero en promedio tienden a valores estables los cuales dependen a su vez del área de la cuenca y del periodo de retorno.

En general, existen dos métodos para estimar el FRA, el de tormentas centradas y el de áreas fijas. En el primero, se supone que la magnitud del área bajo estudio está determinada por la forma de las isoyetas, lo cual implica que dicha superficie sea variable para cada tormenta, mientras que en el segundo método la superficie del área en estudio permanece fija. En fin, cada método está estructurado con una concepción teórica diferente proporcionando factores de reducción con un grado de aproximación variable.

Ahora bien, tomando como base las concepciones teóricas de ambos métodos Breña (1996) estimó, para la cuenca del Valle de México, el factor de reducción por área (FRA). Los resultados obtenidos con este criterio se indican en la tabla 1.

Tabla 1. FRA para diferentes duraciones y porciones de área

Duración	Área, en km ²						
	0	10	50	100	200	500	1000
5 min	1.00	0.86	0.67	0.58	0.42	0.20	0.11
15 min	1.00	0.88	0.69	0.59	0.44	0.24	0.15
1 h	1.00	0.90	0.70	0.60	0.47	0.28	0.20
2 h	1.00	0.91	0.71	0.61	0.48	0.31	0.23
4 h	1.00	0.92	0.72	0.62	0.49	0.33	0.26
8 h	1.00	0.93	0.73	0.63	0.51	0.35	0.28
12 h	1.00	0.94	0.74	0.64	0.52	0.36	0.30
24 h	1.00	0.97	0.75	0.65	0.53	0.38	0.33
1 mes	1.00	0.98	0.93	0.88	0.82	0.71	0.61
1 año	1.00	0.99	0.95	0.91	0.87	0.79	0.71

En relación a este factor de reducción, puede decirse que se detectaron variaciones relevantes, al comparar los resultados obtenidos en este artículo con los valores que se han determinado en otras regiones hidrológicas (Bell, 1979; Raudkivi, 1979).

La causa principal de las fluctuaciones es producto del comportamiento hidrológico que presentan las tormentas convectivas, fenómeno meteorológico de mayor ocurrencia en la cuenca de estudio, el cual provoca la convergencia o concentración de las lluvias en áreas de poca magnitud. Analizando los resultados de la tabla 1 se detecta que el FRA para una duración de 24 h, se reduce a un valor de 0.50 en un área de 250 km², mientras que según Bell (1979) para la misma área en Gran Bretaña, el FRA equivale a 0.91.

DISTRIBUCION TEMPORAL DE LA LLUVIA DE DISEÑO

La distribución temporal de la lluvia es otra de las variables que intervienen en la estimación de las tormentas de diseño y en la hidrología se han desarrollado, a lo largo del tiempo, varios métodos para determinar el hietograma de diseño, concepto básico que permite distribuir la lluvia total correspondiente a la duración total en un diagrama de barras.

Los métodos desarrollados para definir hietogramas de diseño se han estructurado a través de concepciones teóricas diferentes, sobresaliendo los métodos de la curva altura de lluvia-duración (Franco, 1981), el estadístico (NERC, 1975) y el de Tholin y Keifer (1959).

Previo análisis de la información disponible y del tipo de tormentas de mayor ocurrencia en la cuenca de estudio, se eligió el método de Tholin y Keifer (1959) para estimar los hietogramas de diseño. Dichos autores consideran como fundamental la forma típica de las curvas masas acumuladas de lluvia registradas en el pasado y con el apoyo de un análisis estadístico, se procede a calcular el comportamiento espacial de las tormentas en la zona de análisis.

El procedimiento, para definir el hietograma de diseño, inicia con la recopilación de las principales tormentas de mayor magnitud asociadas a cortas duraciones (5 a 120 minutos) durante un periodo de 17 años (1972-1988), en cada una de las 47 estaciones pluviográficas ubicadas en la cuenca del Valle de México. En total se recopilaron, durante el periodo de tiempo elegido, un total de 4845 tormentas (Breña, 2003), es decir en promedio se escogieron, en cada estación, 103 tormentas.

Posteriormente, en cada estación pluviográfica se calculó la curva masa media de lluvia y para cada uno de los valores discretos asociados a 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 80, 100 y 120 minutos se estimaron la media, desviación estándar y coeficiente de variación. Los valores de estos parámetros estadísticos permiten detectar si la distribución de las curvas masas medias, a nivel regional, presenta un comportamiento homogéneo y/o heterogéneo.

Los resultados obtenidos (Breña, 2003) indican que los parámetros estadísticos se encuentran ubicados en el rango que estipula el método de Tholin y Keifer (1959), es decir las curvas masas medias de las 47 estaciones pluviográficas presentan un comportamiento sin grandes variaciones en la cuenca de estudio.

En la etapa final se calcula, con el promedio de las 47 curvas masas medias de lluvia de las estaciones pluviográficas, la curva masa media de lluvia global válida para la cuenca del Valle de México. Posteriormente, con el apoyo de este resultado se procedió a determinar la curva media del porcentaje de lluvia total acumulada contra porcentaje de duración de la tormenta, es decir sus valores oscilan entre 0 y 100%, para las alturas de lluvia y duración, respectivamente. La figura 4 indica la curva lluvia total acumulada-duración de la tormenta, para la cuenca del Valle de México.

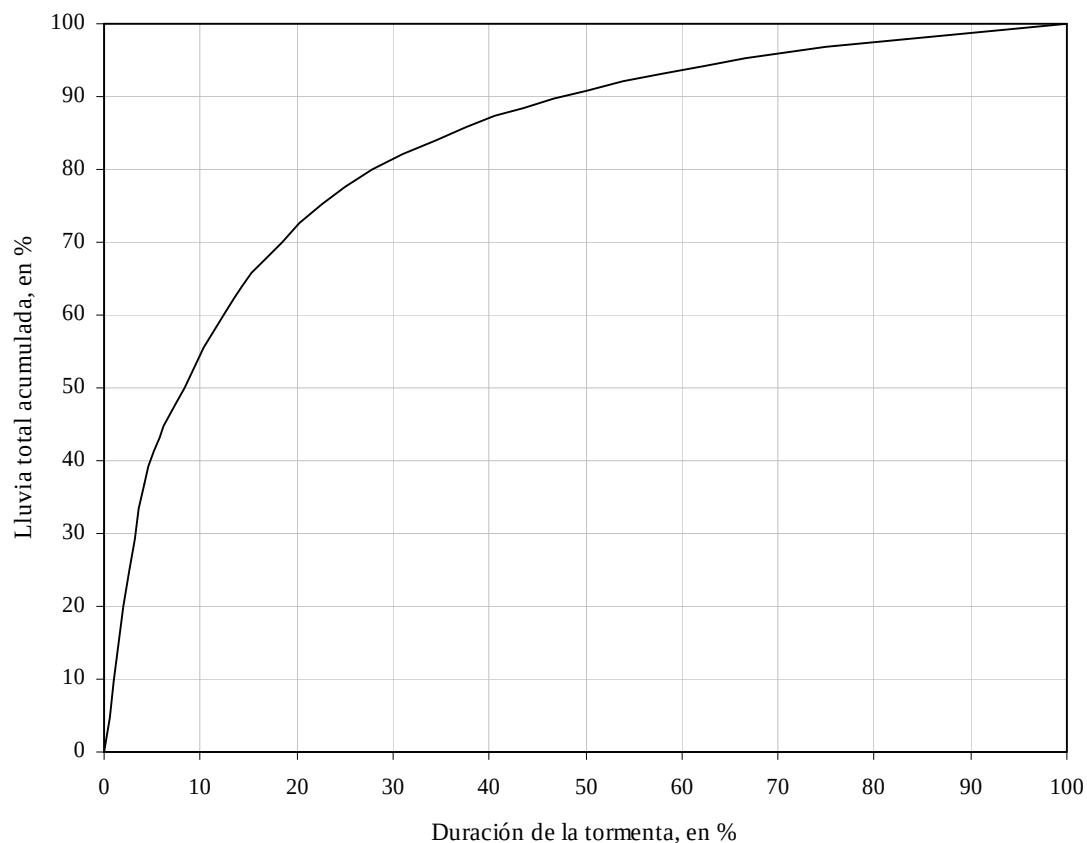


Figura 4. Curva lluvia total acumulada-duración de la tormenta, para la Cuenca del Valle de México

Además, se definió un hietograma de la lluvia de diseño para 10 intervalos constantes discretizando la curva de la figura 4. El proceso de discretización consiste en determinar para cada uno de los 10 intervalos el porcentaje de la duración de la tormenta, el valor del porcentaje de lluvia acumulada y los porcentajes de incremento.

Acto seguido, aplicando el criterio de los bloques alternos, se define un diagrama de barras de tal forma que el valor máximo ocurra en el centro de la duración y los demás valores se ubican en orden descendente alternándolos hacia la derecha e izquierda, respectivamente.

La figura 5 muestra el hietograma de la lluvia de diseño para 10 intervalos constantes y de acuerdo con el fenómeno meteorológico de mayor ocurrencia en la Cuenca del Valle de México, es un hietograma típico de lluvias convectivas.

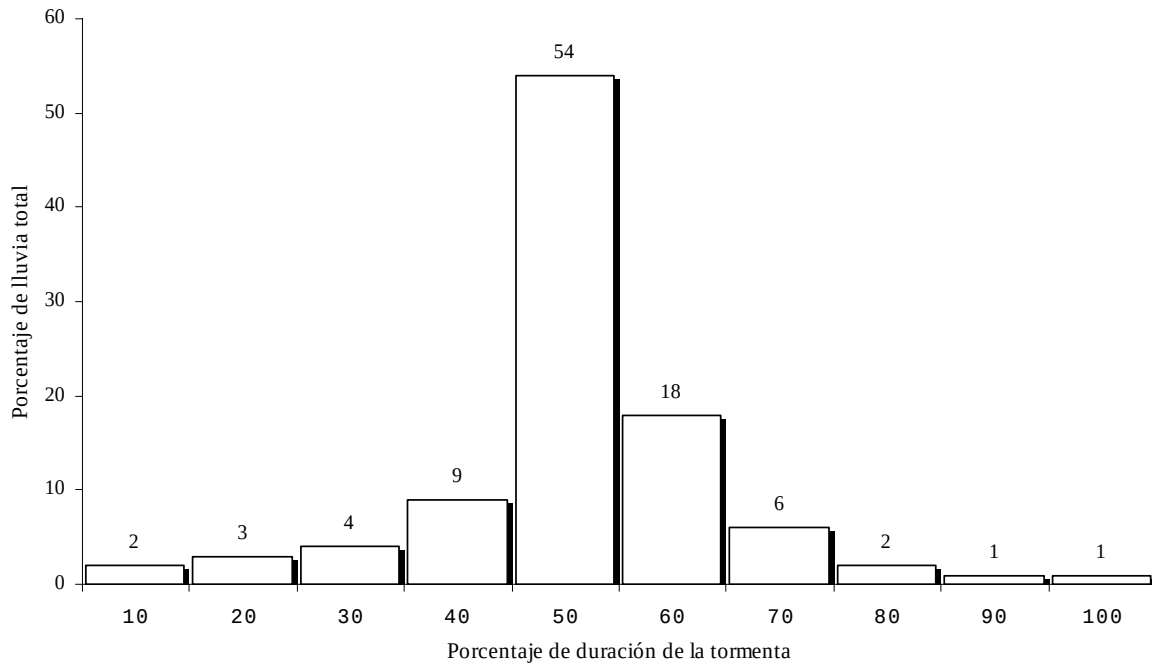


Figura 5. Hietograma de la lluvia de diseño para 10 intervalos constantes

PROCESO PARA DETERMINAR TORMENTAS DE DISEÑO

El método de regionalización de lluvias máximas permite estimar la tormenta de diseño para cualquier punto de la Cuenca del Valle de México, y para el caso específico de un área asociada a una red de alcantarillado pluvial se determina el centroide y para este punto se calcula la tormenta de diseño.

A continuación se describe el procedimiento que permite determinar las tormentas de diseño, a partir del método de regionalización de lluvias máximas, esquema que se desarrolla en este artículo.

a). Se determina la lluvia base asociada a un $T_r = 5$ años ($h_{T_r=5}$) con las figuras 2 o 3, si la duración requerida oscila entre 5 y 120 minutos o bien entre 4 y 24 horas. Para duraciones comprendidas entre 2 y 4 horas, se puede utilizar cualquiera de las dos figuras.

b). Con la ecuación (1) se evalúa el factor F_1 asociado a cortas duraciones, mientras que con la ecuación (2) se define el factor F_2 correspondiente a largas duraciones. Si se multiplica el valor base de la lluvia base ($h_{T_r=5}$) por el factor F_1 o F_2 se define la magnitud de la lluvia asociada a un $T_r = 5$ años y a la duración requerida.

c). Para el intervalo de transición ($2 \leq d \leq 4$ h) se recomienda calcular con cada plano de apoyo la magnitud de la lluvia base y su factor de ajuste correspondiente. Posteriormente estimar un valor promedio.

d). Con la ecuación (3) se obtiene el valor del factor F_3 con el cual es posible pasar del periodo de retorno de 5 años, al periodo de retorno deseado.

e). Se define el valor del (FRA), asociado a la duración de la tormenta requerida y a la porción del área analizada, con los valores de la tabla 1.

f). Se calcula la magnitud de la lluvia asociada al área de la cuenca en estudio, para duración y el periodo de retorno deseado ($P_{A,d,Tr}$), con las expresiones:

Cortas duraciones:
$$P_{A,d,Tr} = (h_{Tr=5})(F_1)(F_3)(FRA) \quad (4)$$

Largas duraciones:
$$P_{A,d,Tr} = (h_{Tr=5})(F_2)(F_3)(FRA) \quad (5)$$

g). En la fase siguiente, se determina la distribución en el tiempo de la lluvia total con el apoyo de la figura 4, definiendo previamente los intervalos de tiempo requeridos para tal fin.

h). Finalmente, definido el hietograma de la lluvia de diseño para la cuenca de estudio, se calcula la avenida de diseño con el apoyo de un modelo que transforme la lluvia en escurrimiento.

CONCLUSIONES

Los redes de alcantarillado pluvial de las grandes ciudades, dada su complejidad, requieren de un análisis integral que comprenda los aspectos de cantidad y calidad del agua, diseño, construcción, operación y mantenimiento. Llevar a cabo un análisis que incluya estos conceptos requiere de un gran esfuerzo y de un desarrollo muy extenso, el cual no podría ser analizado en este artículo. No obstante, el aspecto de diseño es de vital importancia para cualquier estructura hidráulica, motivo por el cual este artículo se ha enfocado a la estimación de tormentas de diseño, elemento fundamental para llevar a cabo tal acción.

Se utiliza una metodología de tipo regional ya que se obtienen diseños de redes homogéneos y consistentes para cualquier porción de área de la Cuenca del Valle de México, en contraposición con los resultados inconsistentes y heterogéneos que se obtienen con los métodos tradicionales estructurados con diferentes metodologías y de aplicación común por los organismos operadores de agua potable y alcantarillado de nuestro medio.

En relación a las variables que intervienen en la estimación de las tormentas de diseño, el factor de reducción por área (FRA) es el que presenta las variaciones más relevantes. En

efecto, las fluctuaciones del FRA son producidas por las características peculiares de las lluvias de tipo convectivo, las cuales ocurren en áreas de poca extensión y con magnitudes y distribuciones muy irregulares. No obstante, con el método desarrollado por Breña (1984) se obtienen resultados confiables para áreas de pequeñas y grandes magnitudes.

La aplicación principal de las tormentas de diseño calculadas con el método regional de lluvias máximas es diseñar la red de alcantarillado pluvial, pero estas tormentas se pueden aplicar para diseñar otro tipo de estructuras hidráulicas tales como vertedores, drenaje de aeropuertos, alcantarillas de vías de comunicación y algunas otras más.

Finalmente, una recomendación sobre estudios futuros es efectuar análisis similares al desarrollado en este artículo en las regiones hidrológicas donde ocurren lluvias orográficas y ciclónicas, para tener un conocimiento detallado de las tormentas de diseño correspondientes a estos dos tipos de lluvia, los cuales tienen una gran incidencia en nuestro país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bell, F. C. (1969), "*Generalized Rainfall-Duration-Frequency*", Journal Hydraulic Division, ASCE, 1, pp. 311-327.
- Breña, P. A. F. (1984), "*Análisis de Tormentas en el Valle de México*", Tesis de Maestría, División de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- Breña, P. A. F. (1996), "*Regionalización de lluvias máximas aplicada al diseño de colectores urbanos*", Universidad Autónoma Metropolitana, Revista ContactoS, 18, pp. 39-46, México.
- Breña, P. A. F. (2003), "*Hietogramas de diseño de tormentas convectivas en la cuenca del Valle de México*", Universidad Autónoma Metropolitana, Revista ContactoS, 49, pp. 15-24, México.
- Franco, V. (1981), "*Integración de Estudios de Hidráulica Urbana*", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- NERC, Natural Environmental Research Council (1975), "*Flood Studies Report*", Vol. 2, Whitefriars Press Ltd, London.
- Raudkivi, A. J. (1979), "*Hydrology*", Pergamon Press, England.
- Tholin, A. and Keifer, C. (1959), "*The Hydrology of Urban Runoff*", Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE, 85, pp. 47-106.