

CONSTRUCCIÓN DE CURVAS I-D-TR DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DE MÉXICO A PARTIR DE LA BASE DE DATOS PLUVIOMÉTRICOS SMN-CONAGUA

Conde Rivera Raúl¹, Vita Garza Álvaro¹, Castro Ortiz Verulo Alejandro² y
López Mejía José Rafael³

¹Consultoría AQUA. Agualeguas No. 6613, Col. Hacienda Santa Clara, Monterrey, Nuevo León, México. C.P.64346

²Hidráulica Termo Plus. 3ª cerrada de la 23 sur No. 4501, Col. Granjas Atoyac, Puebla, Puebla, México. C.P. 72400

³ADS Mexicana. Carretera a García km 0.8, Santa Catarina, Santa Catarina, Nuevo León, México. C.P. 66370

raulconde@consultoria-aqua.com.mx, alvarovita@consultoria-aqua.com.mx, alejandro.castro@termoplus.mx,
rafael.lopez@adsmexicana.com

Introducción

Debido a la escasez de registros pluviográficos en calidad y cantidad para las diferentes regiones hidrológicas de nuestro territorio nacional y por otro lado la existencia de registros pluviométricos en cuando menos una estación por municipio de nuestro país, nos lleva a la necesidad de emplear una metodología que proponga construir curvas I-D-TR a partir de datos pluviométricos para satisfacer las necesidades de diseño hidrológico en las áreas urbanas, suburbanas y rurales.

Considerando las investigaciones realizadas por Campos Aranda (1990 y 2010) se construyen curvas I-D-TR, para las estaciones pluviométricas existentes en la base de datos SMN-CONAGUA. y tomando en cuenta el cuaderno de curvas isoyetas de intensidades (SCT, 1990) para toda la Republica Mexicana.

Campos (1990) publica en la Revista Ingeniería Hidráulica en México, un procedimiento para obtener curvas I-D-TR a partir de la obtención del cociente lluvia-duración, que relaciona la lluvia con duración de una hora y dos años de periodo de retorno con la lluvia de 24 horas de duración e igual periodo de retorno.

Este cociente denominado R, varió de 0.4 a 0.6 en las regiones áridas y semiáridas y en las zonas húmedas de 0.3 a 0.4. Por otro lado R aumenta a mayor altitud sobre el nivel medio del mar y viceversa. Empleando el criterio de Bell (1969) y de Chen (1983) genera curvas I-D-TR, encontrando que el criterio de Bell (1969) se ajusta mejor a duraciones cortas y periodos de retorno menores de 10 años.

Posteriormente Campos (2010) contrasta 10 estaciones pluviográficas ubicadas en diferentes zonas geográficas y empleando el criterio de Chen (1983), construye curvas I-D-TR para 45 estaciones pluviométricas que incluyen las capitales de los estados y algunas de sus ciudades más importantes.

Para obtener las discrepancias entre las intensidades observadas y las estimadas obtiene un error relativo en cada una de ellas. Las diferencias máximas por defecto no rebasan el 30% y en algunos casos son menores al 10%, mientras que las diferencias máximas por exceso son del orden del 60%.

Las discrepancias por defecto conducen a diseños hidrológicos insuficientes, mientras que las diferencias máximas por exceso conducen a diseños hidrológicos conservadores.

Metodología empleada

De la estadística descriptiva de la base de datos SMN-CONAGUA se selecciona la estación pluviométrica a procesar extrayendo sus datos geográficos y las precipitaciones máximas anuales de 24 horas, para todo su registro histórico.

El procedimiento utilizado fue sugerido por Campos (1990) con la variante de estimar el cociente R a través de una ecuación polinomial de segundo grado que se obtiene de los valores encontrados por Campos (2010) en las 10 estaciones pluviográficas contrastadas para diferentes zonas geográficas del país, correlacionando estos valores de R con la altitud sobre el nivel del mar de la estación pluviométrica a procesar.

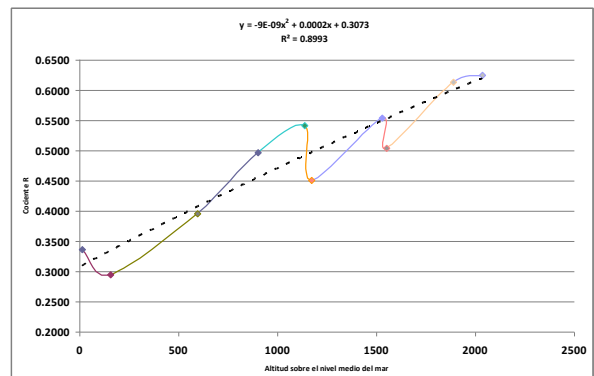


Ilustración 1. Gráfica de correlación de los valores de R con la altitud del nivel del mar.

Se desarrolló una memoria de cálculo en el Software MATHCAD, en la cual se estiman los parámetros para los criterios de Bell (1969) y Chen (1983).

Para ejemplificar esta metodología se tomo la estación pluviométrica de la capital del estado de Puebla, con clave 21035 y nombre PUEBLA (DGE).

ESTADO: PUEBLA
MUNICIPIO: PUEBLA
ESTACIÓN: 21035 PUEBLA (DGE)

DEFINICIÓN DE VARIABLES:

AÑO: años de registro en la estación meteorológica.

DP : precipitación máxima en 24 horas, en mm.

LR : número de años de registros.

TR : periodo de retorno, en años.

P1 : precipitación para 2 años de periodo de retorno y duración de 1440 minutos.

P2 : precipitación para 2 años de periodo de retorno y duración de 60 minutos.

DP := READPRN("P21035.prn")

LP := length(DP)

LP = 57

MEDIA := mean(DP)

DESV := stdev(DP)

TR := 2

AÑO := READPRN("A21035.prn")

LR := length(AÑO)

LR = 57

MEDIA = 59.505

DESV = 36.445

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FORMA Y UBICACIÓN POR EL MÉTODO DE LA DISTRIBUCIÓN GENERAL DE VALORES EXTREMOS TIPO I (GUMBEL).

$$E\mu y_1 = -1.6483 \cdot 10^{-12} \cdot LR^6 + 6.2811 \cdot 10^{-10} \cdot LR^5 - 9.7156 \cdot 10^{-8} \cdot LR^4$$

$$E\sigma y_1 = -7.1424 \cdot 10^{-12} \cdot LR^6 + 2.7029 \cdot 10^{-9} \cdot LR^5 - 4.1453 \cdot 10^{-7} \cdot LR^4$$

$$E\mu y_2 = 7.8564 \cdot 10^{-6} \cdot LR^3 - 3.5782 \cdot 10^{-4} \cdot LR^2 + 9.3362 \cdot 10^{-3} \cdot LR + 0.4308$$

$$E\sigma y_2 = 3.3168 \cdot 10^{-5} \cdot LR^3 - 1.4904 \cdot 10^{-3} \cdot LR^2 + 3.8198 \cdot 10^{-2} \cdot LR + 0.6881$$

$$\mu y := E\mu y_1 + E\mu y_2 = 0.551$$

$$\sigma y := E\sigma y_1 + E\sigma y_2 = 0.551$$

PARÁMETRO DE UBICACIÓN

$$\alpha := \sigma y / DESV = 0.032$$

PARÁMETRO DE FORMA

$$\beta := MEDIA - (\mu y / \alpha) = 42.353$$

CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN DE 1440 MINUTOS Y 2 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.

$$P1 := \beta - ((1/\alpha) \cdot \ln\{\ln[TR/(TR - 1)]\}) = 53.759 \text{ mm}$$

RELACIÓN DE PRECIPITACIÓN DE 60 MINUTOS Y 2 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO CON PRECIPITACIÓN DE 1440 MINUTOS Y EL MISMO PERIODO DE RETORNO SEGÚN CAMPOS ARANDA D.F., 1990, "PROCEDIMIENTOS PARA OBTENER CURVAS I-D-TR A PARTIR DE REGISTROS PLUVIOMÉTRICOS", INGENIERÍA HIDRÁULICA EN MÉXICO, MAYO-AGOSTO, PP 39-52.

Altitud msnm de la estación

ELEV := 2122

Ajuste polinomial de R:

$$R = -0.000000009 \cdot ELEV^2 + 0.0002 \cdot ELEV + 0.3073$$

$$R = 0.691$$

$$P2 := R \cdot P1 = (0.691) \cdot (53.756) = 37.157 \text{ mm.}$$

$$P2 := 37.157 \text{ mm}$$

DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS HP-D-TR POR EL MÉTODO DE BELL (1969) PARA PERIODOS DE RETORNO DE 2, 5 Y 10 AÑOS.

TR1: = 2 años

TR2: = 5 años

TR3: = 10 años

D: = 1..1440

$$HP1_D := (0.35 \cdot \ln(TR1) + 0.76) \cdot (0.54 \cdot D^{0.25} - 0.5) \cdot P2$$

$$HP2_D := (0.35 \cdot \ln(TR2) + 0.76) \cdot (0.54 \cdot D^{0.25} - 0.5) \cdot P2$$

$$HP3_D := (0.35 \cdot \ln(TR3) + 0.76) \cdot (0.54 \cdot D^{0.25} - 0.5) \cdot P2$$

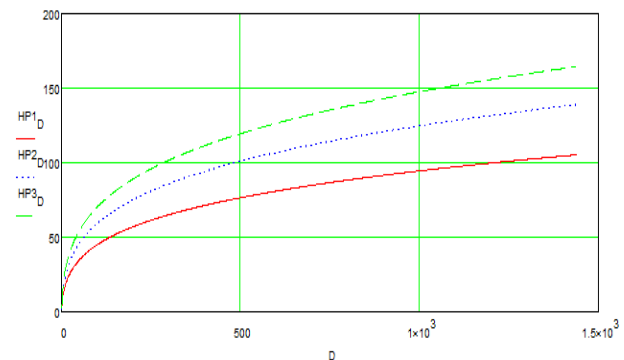


Ilustración 2. Gráfica de curva HP-D-TR para 2, 5 y 10 años, con el método de Bell.

DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS HP-D-TR POR EL MÉTODO DE CHENG LUNG CHEN PARA PERIODOS DE RETORNO DE 20, 50, 100 Y 200 AÑOS.

$$TR1 := 20$$

$$TR2 := 50$$

$$TR3 := 100$$

$$TR4 := 500$$

$$D := 1.1440$$

$$RP := R \cdot 100$$

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS a, b y c, EN FUNCIÓN DEL COCIENTE DE LLUVIA-DURACIÓN.**Para ECa**

$$ECa1 := -4.1666 \cdot 10^{-6} \cdot RP^4 + 5.2777 \cdot 10^{-4} \cdot RP^3$$

$$ECa2 := -1.6250 \cdot 10^{-2} \cdot RP^2 + 0.6662 \cdot RP - 1.5$$

$$ECa := ECa1 + ECa2 = 46.091$$

Para ECb

$$ECb1 := -2.7083 \cdot 10^{-6} \cdot RP^4 + 4.1527 \cdot 10^{-4} \cdot RP^3$$

$$ECb2 := -2.4770 \cdot 10^{-2} \cdot RP^2 + 0.9551 \cdot RP - 11.25$$

$$ECb := ECb1 + ECb2 = 11.742$$

Para ECc

$$ECc := -0.00012RP^2 + 0.019 \cdot RP + 0.1628 = 0.903$$

Por lo tanto:

$$a := ECa$$

$$b := ECb$$

$$c := ECc$$

DETERMINACIÓN DE PRECIPITACIÓN DE 1440 MINUTOS Y PERIODO DE RETORNO DE 10 Y 100 AÑOS, PARA DETERMINAR EL FACTOR "F".

$$P10 := \beta - \left[(1/\alpha) \cdot \ln(\ln(10/(10-1))) \right]$$

$$P100 := \beta - \left[(1/\alpha) \cdot \ln(\ln(100/(100-1))) \right]$$

$$F := P100/P10$$

$$P10 = 112.384$$

$$P100 = 185.508$$

$$F = 1.651$$

DETERMINACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN DE 60 MINUTOS Y UN PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS POR LA ECUACIÓN DE BELL.

$$P6010 := [0.35 \cdot \ln(10) + 0.76] \cdot (0.54 \cdot 60^{0.25} - 0.5) \cdot P2$$

$$HP11_D :=$$

$$[ECa \cdot P6010 \cdot \log(10^{2-F} \cdot TR1^{F-1}) \cdot D] / [(60) \cdot (D + ECb)^{ECc}]$$

$$HP21_D :=$$

$$[ECa \cdot P6010 \cdot \log(10^{2-F} \cdot TR2^{F-1}) \cdot D] / [(60) \cdot (D + ECb)^{ECc}]$$

$$HP31_D :=$$

$$[ECa \cdot P6010 \cdot \log(10^{2-F} \cdot TR3^{F-1}) \cdot D] / [(60) \cdot (D + ECb)^{ECc}]$$

$$HP41_D :=$$

$$[ECa \cdot P6010 \cdot \log(10^{2-F} \cdot TR4^{F-1}) \cdot D] / [(60) \cdot (D + ECb)^{ECc}]$$

VARIABLES REGIONALES**BELL**

$$P2 := 37.157 \text{ mm}$$

CHEN

$$F = 1.651$$

$$P6010 = 58.353$$

$$a = 46.091$$

$$b = 11.742$$

$$c = 0.903$$

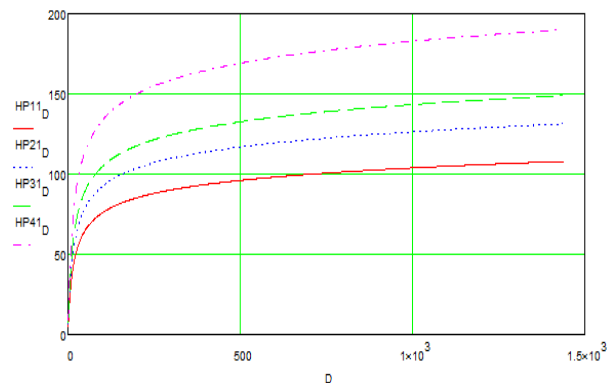


Ilustración 3. Curva HP-D-TR para 20, 50, 100 y 500 años.

DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS I-D-TR POR EL MÉTODO DE BELL PARA PERIODOS DE RETORNO DE 2, 5 Y 10 AÑOS.

$$IB1_D := [HP1_D / (D/60)]$$

$$IB2_D := [HP2_D / (D/60)]$$

$$IB3_D := [HP3_D / (D/60)]$$

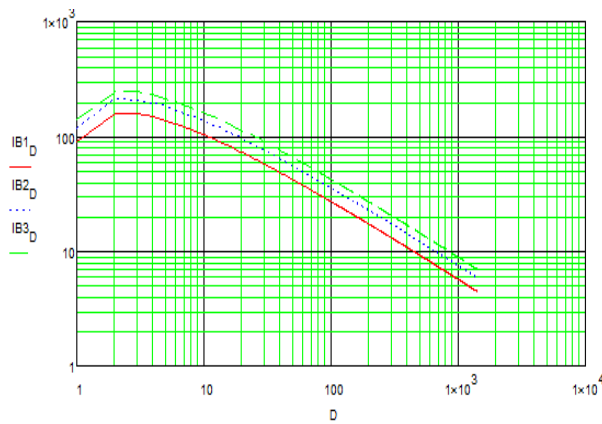


Ilustración 4. Curva I-D-TR para 2, 5 y 10 años.

DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS I-D-TR POR EL MÉTODO DE CHENG-LUNG CHEN PARA PERIODOS DE RETORNO DE 20, 50, 100 Y 500 AÑOS.

$$IC1_D := [HP11_D / (D/60)]$$

$$IC2_D := [HP21_D / (D/60)]$$

$$IC3_D := [HP31_D / (D/60)]$$

$$IC4_D := [HP41_D / (D/60)]$$

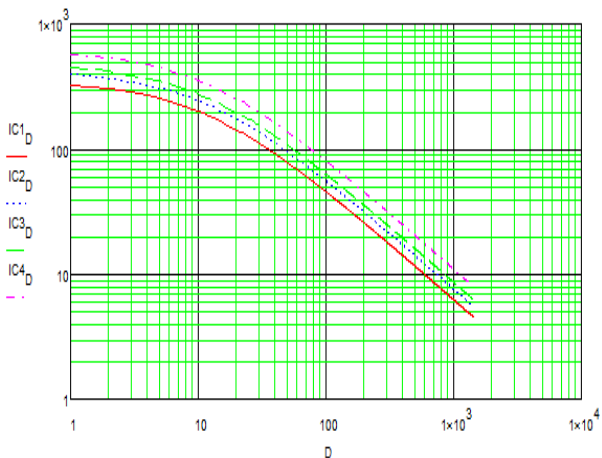


Ilustración 5. Curva I-D-TR para 20, 50, 100 y 500 años.

Periodo de retorno $TR = 2$ años.

Duración $D = 1440$ min.

Altura de precipitación $HP1_D = 105.295$ mm.

Intensidad de lluvia $IB1_D = 4.387$ mm/hr.

Periodo de retorno $TR = 5$ años.

Duración $D = 1440$ min.

Altura de precipitación $HP2_D = 138.976$ mm.

Intensidad de lluvia $IB2_D = 5.791$ mm/hr.

Periodo de retorno $TR = 10$ años.

Duración $D = 1440$ min.

Altura de precipitación $HP3_D = 164.455$ mm.

Intensidad de lluvia $IB3_D = 6.852$ mm/hr.

Periodo de retorno $TR = 20$ años.

Duración $D = 1440$

Altura de precipitación $HP11_D = 107.926$ mm.

Intensidad de lluvia $IC1_D = 4.497$ mm/hr.

Periodo de retorno $TR = 50$ años.

Duración $D = 1440$

Altura de precipitación $HP21_D = 131.294$ mm.

Intensidad de lluvia $IC2_D = 5.471$ mm/hr.

Periodo de retorno $TR = 100$ años.

Duración $D = 1440$

Altura de precipitación $HP31_D = 148.971$ mm.

Intensidad de lluvia $IC3_D = 6.207$ mm/hr.

Periodo de retorno $TR = 500$ años.

Duración $D = 1440$

Altura de precipitación $HP41_D = 148.971$ mm.

Intensidad de lluvia $IC4_D = 7.917$ mm/hr.

Análisis de resultados

Comparando los resultados obtenidos por este criterio de estimación del cociente R contra los obtenidos por Campos (2010) para esta misma estación 21035 PUEBLA (DGE), por el criterio de Chen (1983), los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparativa de resultados por criterio.

CRITERIO:	CONDE et. al. SMN-CONAGUA	CAMPOS (2010) ERIC II
ESTACIÓN:	PUEBLA (DGE)	PUEBLA 21 PTE.
CLAVE:	21035	21035
PERIODO:	1953 - 2009	1953 - 1997
AÑOS:	57	45
R:	0.691	0.643
a:	46.091	44.485
b:	11.742	11.975
c:	0.903	0.889

Para comprender cuantitativamente estas diferencias se recurre al parámetro denominado Error Relativo planteado por Campos (2010), el cual se determina en la ecuación (1):

$$E.R. = [(i_{est}^{TR} - i_{obs}^{TR}) / i_{obs}^{TR}] \cdot 100 \quad (1)$$

Donde el Error Relativo se expresa en % y presenta un valor negativo cuando la intensidad estimada es menor que la intensidad observada, en cambio cuando su valor es positivo indica que la intensidad estimada es mayor que la intensidad observada.

Para nuestro caso la intensidad observada se tomó de las isoyetas de intensidad de la SCT (1990), cuyos valores se muestran en la Tabla No 2.

Tabla 2. Isoyetas de intensidad SCT (1990).

TR (años)	10	20	25	50	100
Duración (min)	I	I	I	I	I
	mm/hr	mm/hr	mm/hr	mm/hr	mm/hr
5	278	334	352	407	461
10	184	215	225	256	286
20	127	146	152	170	189
30	97	110	114	128	141
60	61	70	73	81	89
120	36	42	44	49	55
240	23	27	29	33	37

En las tablas No 3 y 4 se muestran las intensidades estimadas por los criterios de Bell (1969) y Chen (1983) respectivamente, para las mismas duraciones de tormenta y periodos de retorno, observadas por las isoyetas de intensidad de la SCT (1990).

Tabla 3. Intensidades de lluvia por el criterio de Bell.

ESTACIÓN: 21035 PUEBLA (DGE)					
Duración (min)	TR (años)				
	10	20	25	50	100
5	214.69	247.95	258.66	291.92	325.18
10	160.68	185.58	193.59	218.49	243.38
20	112.06	129.42	135.01	152.37	169.73
30	88.88	102.65	107.08	120.85	134.62
60	58.35	67.39	70.30	79.34	88.39
120	37.45	43.25	45.12	50.92	56.72
240	23.64	27.31	28.49	32.15	35.81
Intensidad de lluvia (mm/hr), Criterio de Bell					
Variable regional					
P(60-2)					
37.157					

Tabla 4. Intensidades de lluvia por el criterio de Chen.

ESTACIÓN: 21035 PUEBLA (DGE)					
Duración (min)	TR (años)				
	10	20	25	50	100
5	211.15	252.52	265.84	307.22	348.60
10	166.76	199.44	209.96	242.64	275.32
20	118.50	141.72	149.19	172.42	195.64
30	92.53	110.67	116.51	134.64	152.77
60	56.74	67.86	71.44	82.56	93.68
120	32.78	39.20	41.27	47.69	54.11
240	18.26	21.84	23.00	26.58	30.16
Intensidad de lluvia (mm/hr), Criterio de CHEN					
Variables regionales					
P(60-10)	F	a	b	c	
58.353	1.651	46.091	11.742	0.903	

En las tablas No 5 y 6 se muestran los errores relativos para las mismas duraciones de tormenta y periodos de retorno, por los criterios de Bell (1969) y Chen (1983) respectivamente.

Tabla 5. Error relativo por el criterio de Bell.

ESTACIÓN: 21035 PUEBLA (DGE)					
Duración (min)	TR (años)				
	10	20	25	50	100
5	-22.77	-25.76	-26.52	-28.27	-29.46
10	-12.67	-13.68	-13.96	-14.65	-14.90
20	-11.77	-11.36	-11.18	-10.37	-10.20
30	-8.37	-6.68	-6.07	-5.58	-4.52
60	-4.34	-3.72	-3.69	-2.04	-0.69
120	4.03	2.98	2.54	3.92	3.13
240	2.80	1.14	-1.77	-2.58	-3.21
Error relativo (%), Criterio de Bell					

Tabla 6. Error relativo por el criterio de Chen.

ESTACIÓN: 21035 PUEBLA (DGE)					
Duración (min)	TR (años)				
	10	20	25	50	100
5	-24.05	-24.39	-24.48	-24.52	-24.38
10	-9.37	-7.24	-6.68	-5.22	-3.73
20	-6.70	-2.93	-1.85	1.42	3.51
30	-4.60	0.61	2.20	5.19	8.35
60	-6.98	-3.05	-2.13	1.93	5.26
120	-8.95	-6.67	-6.21	-2.67	-1.61
240	-20.59	-19.10	-20.70	-19.47	-18.50
Error relativo (%), Criterio de Chen					

Como se puede observar para esta estación pluviométrica en particular, los errores relativos para los criterios de Bell (1969) y Chen (1983), no rebasan el 30% para el caso en que las intensidades observadas son mayores a las intensidades estimadas. Y para el caso en que las intensidades estimadas son mayores a las observadas, el valor de los errores relativos no supera el 10%.

Conclusiones

Se aplicó este procedimiento para procesar 5,010 estaciones pluviométricas existentes en el registro de SMN-CONAGUA, las cuales se encuentran en proceso de publicación por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

La aplicación de este criterio para construir curvas I-D-TR a partir de datos pluviométricos produce resultados consistentes, útiles para el diseño de obras de infraestructura pluvial. El Error Relativo encontrado con referencia a las isoyetas de intensidad publicadas por SCT (1990) puede deberse principalmente a la metodología estadística y a que el espectro de registros de SCT es catorce años menor al actual estudio sin que por ello las Isoyetas SCT (1990) dejen de ser un importante referente.

El Error Relativo presenta valores de diferencia menores al 10% en lluvias de duraciones entre 20 min y 60 min, mientras que las mayores dispersiones se presentan en lluvias de muy corta o muy larga duración. Las diferencias por defecto son menores al 30% lo que implica una baja posibilidad de subdimensionar una obra de infraestructura pluvial, mientras que las diferencias por exceso son de hasta 60% en casos aislados lo que implica un diseño más seguro en obras de infraestructura pluvial.

Con esta metodología el proyectista podrá construir las curvas I-D-TR de cualquier estación pluviométrica cercana a su proyecto o verificar las propuestas por las diferentes fuentes como SCT, las aquí propuestas u otras, enriqueciendo las alternativas para adoptar la intensidad de diseño correspondiente.

Las variables regionales procesadas de cada estación climatológica para la construcción de las curvas I-D-Tr se presentan en una tabla de parámetros para las ecuaciones de Chen y Bell que son fácilmente programables en hojas de cálculo o programas de diseño como el CivilADS, HEC-HMS entre otros.

Referencias

BELL, F-C. Generalized Rainfall-Duration-Frequency Relationships. proc. ASCE, *Journal of Hydraulics Div.* 1969, Vol. 95, No. HY1, 311-327 pp.

CAMPOS-ARANDA D.F. Procedimiento para obtener Curvas I-D-Tr a partir de Registros Pluviométricos. *Ingeniería Hidráulica en México*, 1990 Mayo-Agosto, 39-52 pp.

CAMPOS-ARANDA D.F. Intensidades máximas de lluvia para Diseño Hidrológico Urbano en la Republica Mexicana. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, Vol. XI Num. 2, 2010 179-188, ISSN 1405-7743, FI-UNAM.

CHEN,C-L. Rainfall Intensity-duration-frequency formulas. Proc. ASCE, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol., 109, No. 12, 1983, paper No. 18441,1603-1621.

IMTA, 2009. Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III 2.0), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.

Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT), “Isoyetas de Intensidad – Duración – Frecuencia de la Republica Mexicana”, Subsecretaria de Infraestructura, México D.F., 495 Pág., 1990.

SMN-CONAGUA. *Estadística descriptiva Climatológica* [en línea]. México. septiembre de 2012 [citado el 11 de agosto de 2014].

<http://smn.cna.gob.mx/climatologia/Estadistica/21035.pdf>