



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

TORMENTAS DISEÑO PARA LOS SITIOS CHAPINGO,
CIUDAD DE MÉXICO, CUERNAVACA Y TAPACHULA.

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y
USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA:

CABRERA HERNÁNDEZ ANA LAURA



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
ORIGEN DE EXAMENES PROFESIONALES

Chapingo, México, noviembre de 2017

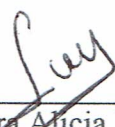


TORMENTAS DISEÑO PARA LOS SITIOS CHAPINGO, CIUDAD DE MÉXICO, CUERNAVA Y TAPACHULA

Tesis realizada por Ana Laura Cabrera Hernández bajo la dirección del Comité Asesor indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

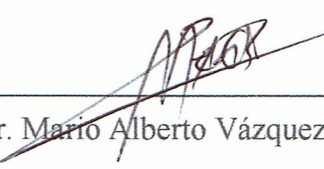
DIRECTOR (A):


Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo

ASESOR:


Dr. Ramón Arteaga Ramírez

ASESOR:


Dr. Mario Alberto Vázquez Peña



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE CUADROS.....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvi
DEDICATORIA	xviii
AGRADECIMIENTOS	xix
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT.....	xxii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	3
2.1. Objetivos	3
2.1.1. Objetivo general	3
2.1.2. Objetivos específicos.....	3
2.2. Hipótesis	3
2.2.1. Hipótesis nula.....	3
2.2.2. Hipótesis alternativa	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1. Hidrología	4
3.2. Ciclo hidrológico.....	4
3.3. Precipitación.....	5
3.3.1. Clasificación de la precipitación.....	5
3.3.2. Medición de la precipitación	6
3.4. Elementos fundamentales de una tormenta.....	9
3.5. Tormenta diseño	10
3.5.1. Aplicación de las tormentas diseño	10
3.6. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)	11
3.6.1. Construcción y estimación de curvas IDF	11
3.7. Método de Huff	12
3.8. Método del Servicio de Conservación de Suelos.....	13
3.9. Método del Bloque Alterno	16
3.10. Método de Yen y Chow.....	17
3.11. Estadística en la hidrología.....	19
3.11.1. Eficiencia de Nash-Sutcliffe.....	19



Tormentas diseño para los sitios Chapingo, Ciudad de México, Cuernavaca y Tapachula.



3.11.2. Error Medio Cuadrático.....	19
3.11.3. Error Relativo	20
3.11.4. Teorema de Chebyshev	20
3.12. Trabajos previos sobre tormentas diseño alrededor del mundo	20
3.12. Trabajos previos sobre tormentas diseño en México	22
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
4.1. Materiales.....	25
4.2. Metodología	25
4.2.1. Selección de los sitios de estudio.....	25
4.2.2. Descripción de las áreas de estudio	25
4.2.3. Revisión histórica de la información de lluvia en 24 horas	29
4.2.4. Recolección de información de lluvia horaria	30
4.2.5. Análisis de la información horaria recolectada.....	30
4.2.6. Obtención de las Curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF).....	31
4.2.7. Comparación de las intensidades de las isoyetas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) con las obtenidas mediante la ecuación IDF.	32
4.2.8. Obtención de las curvas masa.....	32
4.2.9. Cuartiles de Huff con duración de 6 y 24 horas.....	32
4.2.10. Método del Servicio de Conservación de Suelos.....	33
4.2.11. Método del Bloque Alterno	33
4.2.11. Método de Yen y Chow.....	34
4.2.12. Comparación estadística.....	35
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
5.1. Número de tormentas por mes.....	36
5.1.1. Estación meteorológica Chapingo	36
5.1.2. Observatorio meteorológico de la Ciudad de México.....	37
5.1.3. Observatorio meteorológico de Cuernavaca	38
5.1.4. Observatorio meteorológico de Tapachula	40
5.2. Clasificación de las tormentas de acuerdo a su duración	41
5.2.1. Estación meteorológica Chapingo	41
5.2.2. Observatorio meteorológico de la Ciudad de México.....	42
5.2.3. Observatorio meteorológico de Cuernavaca	43
5.2.4. Observatorio meteorológico de Tapachula	43



Tormentas diseño para los sitios Chapingo, Ciudad de México, Cuernavaca y Tapachula.



5.3. Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF)	44
5.3.1. Estación meteorológica Chapingo	44
5.3.2. Observatorio meteorológico de la Ciudad de México	46
5.3.3. Observatorio Meteorológico de Cuernavaca	48
5.3.4. Observatorio meteorológico de Tapachula	51
5.4. Comparación de las intensidades obtenidas mediante las isoyetas de la SCT y la ecuación IDF de cada sitio de estudio	53
5.4.1. Estación meteorológica Chapingo	53
5.4.2. Observatorio meteorológico de la Ciudad de México	55
5.4.3. Observatorio meteorológico de Cuernavaca	57
5.4.4. Observatorio meteorológico de Cuernavaca	59
5.5. Cálculo de coeficiente de avance de tormenta (r)	60
5.5.1. Estación meteorológica Chapingo	60
5.5.2. Observatorio meteorológico de la Ciudad de México	60
5.5.3. Observatorio meteorológico de Cuernavaca, Morelos	61
5.6. Análisis de las tormentas con duración de 24 horas	61
5.6.1. Estación meteorológica Chapingo	61
5.6.2. Observatorio meteorológico de la Ciudad de México	69
5.6.2.1. Método de Huff	69
5.6.3. Observatorio meteorológico de Cuernavaca	77
5.6.4. Observatorio meteorológico de Tapachula	85
5.7. Tormentas analizadas con 6 horas de duración	93
5.7.1. Estación meteorológica Chapingo	93
5.7.2. Observatorio meteorológico de la Ciudad de México	100
5.7.3. Observatorio meteorológico de Cuernavaca	107
5.7.4. Observatorio meteorológico de Tapachula	114
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	122
7. BIBLIOGRAFÍA	125
Anexo 1. Datos de lámina e intensidades para el periodo 1977-2014 en la estación meteorológica Chapingo	130
Anexo 2. Intensidades máximas de cada sitio de estudio con sus respectivos períodos de retorno (T)	133
Anexo 3. Cálculo del parámetro r para cada sitio de estudio	143



Tormentas diseño para los sitios Chapingo, Ciudad de México, Cuernavaca y Tapachula.



Anexo 4. Distribuciones ajustadas para la serie de datos de intensidad para cada duración propuesta para las ecuaciones IDF en cada sitio de estudio.	151
--	-----



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo hidrológico.	4
Figura 2. Esquema de un pluviómetro.	6
Figura 3. Esquema de un pluviógrafo.	7
Figura 4. Pluviograma de una tormenta.	8
Figura 5. Estación meteorológica automática.	9
Figura 6. Curvas masa de distribución del método de Huff.	12
Figura 7. Curvas masa de distribución de lluvia en 24 horas del servicio de conservación de suelos.	14
Figura 8. Distribución de los patrones de lluvia en 24 horas del SCS en los Estados Unidos.	14
Figura 9. Diseño general del hietograma triangular.	18
Figura 10. Croquis de localización de la estación meteorológica Chapingo.	26
Figura 11. Localización del Observatorio meteorológico de la ciudad de México.	27
Figura 12. Localización del observatorio meteorológico de Cuernavaca.	28
Figura 13. Localización del observatorio meteorológico de Tapachula.	29
Figura 14. Número de eventos de lluvia por mes para la estación meteorológica Chapingo.	37
Figura 15. Número de eventos de lluvia por mes para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	38
Figura 16. Distribución mensual de la lluvia para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.	39
Figura 17. Número de eventos de lluvia por mes en el observatorio meteorológico de Tapachula.	41
Figura 18. Clasificación de los eventos de acuerdo a su duración en la estación meteorológica Chapingo.	42
Figura 19. Clasificación de los eventos de acuerdo a su duración en el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	42
Figura 20. Clasificación de los eventos de acuerdo a su duración en el observatorio meteorológico de Cuernavaca.	43
Figura 21. Clasificación de los eventos de acuerdo a su duración en el observatorio meteorológico de Tapachula.	43
Figura 22. Curvas IDF elaboradas con los datos de la estación meteorológica Chapingo.	45
Figura 23. Curvas IDF elaboradas con datos del Observatorio Meteorológico de la Ciudad de México.	48
Figura 24. Curvas IDF elaboradas con los datos del observatorio meteorológico de Cuernavaca.	51
Figura 25. Curvas IDF elaboradas con los datos del observatorio meteorológico de Tapachula.	53



Tormentas diseño para los sitios Chapingo, Ciudad de México, Cuernavaca y Tapachula.



Figura 26. Comparación de las intensidades obtenidas de las isoyetas de la SCT y la ecuación IDF para la estación Chapingo.....	55
Figura 27. Comparación de las intensidades obtenidas de las isoyetas de la SCT y la ecuación IDF para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	57
Figura 28. Comparación de las intensidades obtenidas de las isoyetas de la SCT y la ecuación IDF para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.	58
Figura 29. Comparación de las intensidades obtenidas de las isoyetas de la SCT y la ecuación IDF para el observatorio meteorológico de Tapachula.	60
Figura 30. Comparación de los cuatro cuartiles de Huff con las tormentas críticas de 24 horas para la estación meteorológica Chapingo.	64
Figura 31. Comparación de las tormentas sintéticas del SCS Tipo IA y II con las tormentas críticas de 24 horas de duración para la estación meteorológica Chapingo.....	66
Figura 32. Comparación de la tormenta sintética del método del bloque alternativo y las tormentas críticas de 24 horas de duración para la estación meteorológica Chapingo.....	68
Figura 33. Comparación del método de Yen y Chow y de las tormentas críticas de 24 horas de duración para la estación meteorológica Chapingo.	69
Figura 34. Tormentas críticas de 24 horas comparadas con los cuartiles de Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	72
Figura 35. Comparación de las tormentas sintéticas del SCS Tipo IA y II con las tormentas críticas de 24 horas de duración para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	74
Figura 36. Comparación de la tormenta sintética del método del bloque alternativo y las tormentas críticas de 24 horas de duración para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	75
Figura 37. Comparación del método de Yen y Chow y de las tormentas críticas de 24 horas de duración para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	76
Figura 38. Comparación de los cuatro cuartiles de Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.....	80
Figura 39. Comparación de las tormentas sintéticas del SCS Tipo IA y II con las tormentas críticas de 24 horas de duración para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.....	82
Figura 40. Comparación del método del bloque alternativo y las tormentas críticas con 24 horas de duración para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.....	83
Figura 41. Comparación del método de bloque alternativo y las tormentas críticas con 24 horas de duración para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.....	84
Figura 42. Comparación de los cuatro cuartiles de Huff con las tormentas críticas de 24 horas de duración para el observatorio meteorológico de Tapachula.	88
Figura 43. Comparación de las tormentas sintéticas del SCS Tipo IA y II con las tormentas críticas de 24 horas de duración para el observatorio meteorológico de Tapachula.	90
Figura 44. Comparación de las tormentas reales con el método del bloque alternativo para el observatorio meteorológico de Tapachula.....	91



Tormentas diseño para los sitios Chapingo, Ciudad de México, Cuernavaca y Tapachula.



Figura 45. Comparación de las tormentas reales con el método de Yen y Chow para el observatorio meteorológico de Tapachula.....	92
Figura 46. Comparación de los cuatro cuartiles de Huff con las tormentas críticas de 6 horas para la estación meteorológica Chapingo.....	96
Figura 47. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas y la tormenta diseño del SCS para la estación meteorológica Chapingo.....	97
Figura 48. Comparación de las tormentas críticas con 6 horas de duración y la tormenta diseño del bloque alternativo para la estación meteorológica Chapingo.....	98
Figura 49. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas de duración y la tormenta diseño propuesta por Yen y Chow para la estación meteorológica Chapingo.....	100
Figura 50. Comparación de los cuatro cuartiles de Huff y las tormentas críticas de 6 horas de duración para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.....	103
Figura 51. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas de duración y la tormenta diseño del SCS para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.....	104
Figura 52. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas de duración y la tormenta diseño del bloque alternativo para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.....	105
Figura 53. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas de duración y la tormenta diseño propuesta por Yen y Chow para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México..	106
Figura 54. Comparación de los cuatro cuartiles de Huff y las tormentas críticas de 6 horas de duración para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.....	110
Figura 55. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas de duración y la tormenta diseño del SCS para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.....	111
Figura 56. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas de duración y la tormenta diseño del bloque alternativo para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.....	112
Figura 57. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas de duración y la tormenta diseño propuesta por Yen y Chow para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.....	114
Figura 58. Comparación de los cuatro cuartiles de Huff y las tormentas críticas de 6 horas de duración para el observatorio meteorológico de Tapachula.....	118
Figura 59. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas de duración y la tormenta diseño del SCS para el observatorio meteorológico de Tapachula.....	119
Figura 60. Comparación de las tormentas críticas con 6 horas de duración y la tormenta diseño del bloque alternativo para el observatorio meteorológico de Tapachula.....	120
Figura 61. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas de duración y la tormenta diseño propuesta por Yen y Chow para el observatorio meteorológico de Tapachula.....	121



ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Coeficientes adimensionales del método de Huff.	12
Cuadro 2. Coeficientes adimensionales de distribución de lluvia del SCS.	14
Cuadro 3. Rangos establecidos de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe.	35
Cuadro 4. Distribución mensual de tormentas para la estación meteorológica Chapingo.	36
Cuadro 5. Distribución mensual de tormentas para el Observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	37
Cuadro 6. Distribución mensual de tormentas para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.	39
Cuadro 7. Distribución mensual de tormentas para el observatorio meteorológico de Tapachula.	40
Cuadro 8. Alturas máximas de precipitación en milímetros para los datos de la estación meteorológica Chapingo.	44
Cuadro 9. Intensidades máximas registradas en la estación Chapingo para el año 2015 en mm/h.	44
Cuadro 10. Alturas máximas de precipitación para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México en milímetros.	46
Cuadro 11. Intensidades máximas registradas en el observatorio de la Ciudad de México en mm/h.	47
Cuadro 12. Alturas máximas de precipitación para el observatorio de Cuernavaca en milímetros.	49
Cuadro 13. Intensidades máximas registradas en el observatorio de meteorológico de Cuernavaca en mm/h.	49
Cuadro 14. Alturas máximas de precipitación para el observatorio meteorológico de Tapachula en milímetros.	51
Cuadro 15. Intensidades máximas registradas en el observatorio de meteorológico de Tapachula en mm/h.	52
Cuadro 16. Intensidades obtenidas de las isoyetas de la Secretaria de Caminos y Transportes (SCT) para la estación meteorológica Chapingo.	54
Cuadro 17. Intensidades obtenidas con la ecuación IDF para la estación meteorológica Chapingo.	54
Cuadro 18. Valores de error relativo y cuadrado medio del error obtenidos del análisis comparativo de los datos de intensidad para la estación meteorológica Chapingo.	54
Cuadro 19. Intensidades obtenidas de las isoyetas de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	55
Cuadro 20. Intensidades obtenidas con la ecuación IDF para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	55
Cuadro 21. Valores de error relativo y cuadrado medio del error obtenidos del análisis comparativo de los datos de intensidad para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	56
Cuadro 22. Intensidades obtenidas de las isoyetas de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.	57



Tormentas diseño para los sitios Chapingo, Ciudad de México, Cuernavaca y Tapachula.



Cuadro 23. Intensidades obtenidas con la ecuación IDF para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.	57
Cuadro 24. Valores de error relativo y cuadrado medio del error obtenidos del análisis comparativo de los datos de intensidad para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.	58
Cuadro 25. Intensidades obtenidas de las isoyetas de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) para el observatorio meteorológico de Tapachula.	59
Cuadro 26. Intensidades obtenidas con la ecuación IDF para el observatorio meteorológico de Tapachula.	59
Cuadro 27. Valores de error relativo y cuadrado medio del error obtenidos del análisis comparativo de los datos de intensidad para el observatorio meteorológico de Tapachula.	59
Cuadro 28. Resumen del ajuste de las tormentas críticas con duración de 24 horas de acuerdo al criterio de Nash-Sutcliffe más alto para los cuatro cuartiles propuestos por Huff en la estación meteorológica Chapingo.	62
Cuadro 29. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el primer cuartil de Huff para la estación meteorológica Chapingo.	62
Cuadro 30. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el segundo cuartil de Huff para la estación meteorológica Chapingo.	63
Cuadro 31. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el tercer cuartil de Huff para la estación meteorológica Chapingo.	63
Cuadro 32. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el cuarto cuartil de Huff para la estación meteorológica Chapingo.	64
Cuadro 33. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta Tipo IA del SCS para la estación meteorológica Chapingo.	65
Cuadro 34. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta Tipo II del SCS para la estación meteorológica Chapingo.	66
Cuadro 35. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el bloque alterno para la estación meteorológica Chapingo.	67
Cuadro 36. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el método de Yen y Chow para la estación meteorológica Chapingo.	68
Cuadro 37. Resumen del ajuste de las tormentas críticas con duración de 24 horas de acuerdo al criterio de Nash-Sutcliffe más alto para los cuatro cuartiles propuestos por Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	70

Cuadro 38. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el primer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	70
Cuadro 39. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el segundo cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	71
Cuadro 40. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el tercer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	71
Cuadro 41. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el cuarto cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	72
Cuadro 42. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta Tipo IA del SCS para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	73
Cuadro 43. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta Tipo II del SCS para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	74
Cuadro 44. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta del Bloque alterno para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	75
Cuadro 45. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta de Yen y Chow para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	76
Cuadro 46. Resumen del ajuste de las tormentas críticas con duración de 24 horas de acuerdo al criterio de Nash-Sutcliffe más alto para los cuatro cuantiles propuestos por Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.	77
Cuadro 47. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el primer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.	78
Cuadro 48. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el segundo cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.	78
Cuadro 49. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el tercer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.	79
Cuadro 50. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el cuarto cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.	79

Cuadro 51. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta Tipo IA del SCS para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.	81
Cuadro 52. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta Tipo II del SCS para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.	81
Cuadro 53. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta del Bloque alterno para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.	83
Cuadro 54. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta de Yen y Chow para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.	84
Cuadro 55. Resumen del ajuste de las tormentas críticas con duración de 24 horas de acuerdo al criterio de Nash-Sutcliffe más alto para los cuatro cuartiles propuestos por Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula.	85
Cuadro 56. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el primer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula.	85
Cuadro 57. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el segundo cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula.	86
Cuadro 58. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el tercer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula.	87
Cuadro 59. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el cuarto cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula.	87
Cuadro 60. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta Tipo IA del SCS para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.	89
Cuadro 61. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta Tipo II del SCS para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.	89
Cuadro 62. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta del bloque alterno para el observatorio meteorológico de Tapachula.	91
Cuadro 63. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta del método de Yen y Chow para el observatorio meteorológico de Tapachula.	92

Cuadro 64. Resumen del ajuste de las tormentas críticas con duración de 6 horas de acuerdo al criterio de Nash-Sutcliffe más alto para los cuatro cuartiles propuestos por Huff para la estación meteorológica Chapingo.	93
Cuadro 65. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el primer cuartil de Huff para la estación meteorológica Chapingo.	94
Cuadro 66. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el segundo cuartil de Huff para la estación meteorológica Chapingo.	94
Cuadro 67. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el tercer cuartil de Huff para la estación meteorológica Chapingo.	95
Cuadro 68. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el cuarto cuartil de Huff para la estación meteorológica Chapingo.	95
Cuadro 69. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y la tormenta sintética del SCS para la estación metrológica Chapingo.	97
Cuadro 70. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y la tormenta sintética del bloque alterno para la estación metrológica Chapingo.	98
Cuadro 71. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y la tormenta sintética de Yen y Chow para la estación metrológica Chapingo.	99
Cuadro 72. Resumen del ajuste de las tormentas críticas con duración de 6 horas de acuerdo al criterio de Nash-Sutcliffe más alto para los cuatro cuartiles propuestos por Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	101
Cuadro 73. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el primer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	101
Cuadro 74. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el segundo cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	102
Cuadro 75. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el tercer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	102
Cuadro 76. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el cuarto cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	103

- Cuadro 77. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el método del SCS para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México. 104
- Cuadro 78. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el método del bloque alterno para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México. 105
- Cuadro 79. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el método de Yen y Chow para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México. 106
- Cuadro 80. Resumen del ajuste de las tormentas críticas con duración de 6 horas de acuerdo al criterio de Nash-Sutcliffe más alto para los cuatro cuartiles propuestos por Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca. 107
- Cuadro 81. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el primer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca. 108
- Cuadro 82. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el segundo cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca. 108
- Cuadro 83. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el tercer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca. 109
- Cuadro 84. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el cuarto cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca. 109
- Cuadro 85. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y la tormenta sintética del SCS para el observatorio meteorológico de Cuernavaca. 111
- Cuadro 86. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y la tormenta sintética del bloque alterno para el observatorio meteorológico de Cuernavaca. 112
- Cuadro 87. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y la tormenta sintética del bloque alterno para el observatorio meteorológico de Cuernavaca. 113
- Cuadro 88. Resumen del ajuste de las tormentas críticas con duración de 6 horas de acuerdo al criterio de Nash-Sutcliffe más alto para los cuatro cuartiles propuestos por Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula. 115
- Cuadro 89. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el primer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula. 115

- Cuadro 90. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el segundo cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula. 116
- Cuadro 91. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el tercer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula. 116
- Cuadro 92. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el cuarto cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula. 117
- Cuadro 93. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y la tormenta sintética del SCS para el observatorio meteorológico de Tapachula. 118
- Cuadro 94. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y la tormenta sintética del bloque alterno para el observatorio meteorológico de Tapachula. 119
- Cuadro 95. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y la tormenta sintética del método de Yen y Chow para el observatorio meteorológico de Tapachula. 121



ÍNDICE DE ANEXOS

A. 1. 1. Alturas máximas de precipitación en milímetros del periodo 1977-2014 para la estación meteorológica Chapingo.....	131
A.1. 2. Intensidades máximas registradas en la Estación Chapingo, para el periodo 1977-2014 en mm/h.	132
A.2.1. Intensidades máximas de la Estación Meteorológica Chapingo con sus respectivos períodos de retorno T para los años de 1976-2015.....	134
A.2.2. Intensidades máximas del Observatorio Meteorológico de la Ciudad de México con sus respectivos períodos de retorno T para los años de 1996-2015.....	138
A.2.3. Intensidades máximas del Observatorio Meteorológico de Cuernavaca con sus respectivos períodos de retorno T para los años de 2000-2016.	139
A.2.4. Intensidades máximas del Observatorio Meteorológico de Tapachula con sus respectivos períodos de retorno T para los años de 2000-2016.	141
A.3. 1. Cálculo del parámetro r para las tormentas de 24 horas de la estación meteorológica Chapingo.	144
A.3. 2. Cálculo del parámetro r para las tormentas de 6 horas de la estación meteorológica Chapingo.	144
A.3.3. Cálculo del parámetro r para las tormentas de 24 horas del Observatorio Meteorológico de la Ciudad de México.	146
A.3. 4. Cálculo del parámetro r para las tormentas de 6 horas del Observatorio Meteorológico de la Ciudad de México.	146
A.3.5. Cálculo del parámetro r para las tormentas de 24 horas del Observatorio Meteorológico de Cuernavaca.....	147
A.3. 6. Cálculo del parámetro r para las tormentas de 6 horas del Observatorio Meteorológico de Cuernavaca.....	148
A.3.7. Cálculo del parámetro r para las tormentas de 24 horas del Observatorio Meteorológico de Tapachula.	148
A.3. 8. Cálculo del parámetro r para las tormentas de 6 horas del Observatorio Meteorológico de Tapachula.	149
A.4. 1. Distribuciones obtenidas mediante la prueba Kolmogorov-Smirnov para los datos de intensidad para las duraciones propuestas para la estación meteorológica Chapingo. ...	152
A.4. 2. Distribuciones obtenidas mediante la prueba Kolmogorov-Smirnov para los datos de intensidad de las duraciones propuestas para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.	152
A.4. 3. Distribuciones obtenidas mediante la prueba Kolmogorov-Smirnov para los datos de intensidad de varias duraciones propuestas para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.....	153



Tormentas diseño para los sitios Chapingo, Ciudad de México, Cuernavaca y Tapachula.



A.4. 4. Distribuciones obtenidas mediante la prueba Kolmogorov-Smirnov para los datos de intensidad de varias duraciones propuestas para el observatorio meteorológico de Tapachula.	153
--	-----



DEDICATORIA

A mis padres, porque siempre han sido un ejemplo para mí. Gracias a ello estoy alcanzado mis metas con mucho orgullo. Les debo un eterno agradecimiento y mi retribución total por su gran amor.

A mis hermanos, porque jamás hubiese podido alcanzar mis metas, sin el apoyo incondicional de todos ustedes, sin su amor o sin su empuje. Gracias a ustedes, supe desde pequeño lo que es el amor, y lo que significa ser parte de una familia que se quiere, compartiendo un hogar. Agradezco a cada uno de ustedes, por su hermosa forma de ser, la cual se ha impregnado en mí ser.

A mi esposo, por todo su amor, cariño y comprensión; por escucharme y apoyarme, aun cuando no siempre está de acuerdo o comprende mis ideas.

A mi hija, por hacerme sentir latir mi corazón tan fuerte, por darme la fuerza y la fortaleza para salir adelante. Por ser simplemente lo mejor que me ha pasado en la vida. Me faltan palabras para expresar lo que siento, lo que soy y lo que quiero llegar a ser por ti...



AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico durante los estudios de posgrado. A la contribución de la sociedad, que suplementa toda institución.

A mi alma mater, Universidad Autónoma Chapingo, por la oportunidad de estudiar el posgrado.

Al programa de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por permitirme estudiar sus planes de estudio. A su personal administrativo.

Al Servicio Meteorológico Nacional por las facilidades para hacer uso de la información requerida de cada lugar de estudio plasmando en este trabajo.

A la Doctora Laura Alicia Ibáñez Castillo, por la dirección del presente trabajo, por su enseñanza, por incluir esta investigación en un proyecto que de no haber sido así, no hubiera sido posible, por la gestión de recursos para la logística y materiales de este trabajo, por el compromiso y esfuerzo de no abandonar el proyecto del que dependió esta investigación.

Al Doctor Ramón Arteaga Ramírez por su asesoría en la realización de este trabajo, por sus consejos, sus cátedras, por las oportunas correcciones y observaciones

Al Doctor Mario Alberto Vázquez Peña, por la asesoría brindada para esta tesis, por sus cátedras, por sus correcciones, comentarios y sugerencias para mejorar el trabajo.

Al Instituto de Ingeniería de la UACH a su personal por su apoyo directo e indirecto en la realización de esta tesis.



DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR

El autor de la presente tesis es originario de la comunidad de Santa Lucía, municipio de Calnali, estado de Hidalgo, nació el 02 de abril de 1990, la educación básica la realizó en escuelas de la misma localidad, la educación media superior la realizó en una localidad llamada Mecatlán, municipio de Yahualica del estado de Hidalgo la cual es cercana a su población de origen. Ingresó en el año 2008 a la Universidad Autónoma Chapingo para poder realizar su educación superior. Egresó en al año 2013 de la especialidad de Ingeniería en Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. Obtuvo el Título de Licenciatura con la tesis “Relación lluvia- escurrimiento de la cuenca del Río Cocula, Jalisco”. Ha trabajado en la Universidad Autónoma Chapingo en proyectos ejecutivos relacionados con el manejo de cuencas y uso integral del agua. En agosto de 2015 ingresó en el Programa de Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua para realizar estudios de Maestría.

RESUMEN

Tormentas diseño para los sitios Chapingo, Ciudad de México, Cuernavaca y Tapachula

El objetivo de este trabajo es encontrar el mejor patrón de distribución de lluvia para cada sitio de estudio para tormentas de 24 y 6 horas. Los patrones de tormenta analizados fueron los propuestos por Huff, Servicio de Conservación de Suelos, Yen y Chow y Bloque Alterno. Se construyeron las curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF) que sirvieron de apoyo para los métodos de Yen y Chow y Bloque Alterno. Se utilizaron como parámetros estadísticos de comparación el coeficiente de Nash-Sutcliffe, el Error Relativo y el Error Medio Cuadrático. En el sitio Chapingo, para las tormentas de 24 horas el mejor patrón de distribución fue el segundo cuartil de Huff con coeficientes de Nash-Sutcliffe hasta de 0.97, para las tormentas de 6 horas fue el primer cuartil de Huff con coeficientes de Nash-Sutcliffe hasta de 0.76. En el Observatorio meteorológico de la Ciudad de México, para las tormentas de 24 horas el mejor patrón de distribución fue el cuarto cuartil de Huff con coeficientes de Nash-Sutcliffe hasta de 0.78, mientras que para las tormentas de 6 horas fue el segundo cuartil de Huff con coeficientes de Nash-Sutcliffe hasta de 0.93. En el Observatorio meteorológico de Cuernavaca, para las tormentas de 24 horas el mejor patrón de distribución fue el primer cuartil de Huff con coeficientes de Nash-Sutcliffe hasta de 0.91, mientras que para las tormentas de 6 horas fue el segundo cuartil de Huff con coeficientes de Nash-Sutcliffe hasta de 0.95. En el Observatorio meteorológico de Tapachula para las tormentas de 24 horas el mejor patrón de distribución fue el tercer cuartil de Huff con coeficientes de Nash-Sutcliffe hasta de 0.97, mientras que para las tormentas de 6 horas fue el primer cuartil de Huff con coeficientes de Nash-Sutcliffe hasta de 0.97.

Palabras Clave: Intensidad de lluvias máximas, Distribución temporal de la lluvia, Tormentas sintéticas, Lluvias para diseño de estructuras hidráulicas, Tormentas de Huff, Tormentas del SCS, Tormentas de bloque alterno, Tormentas triangulares



ABSTRACT

Storms design for the sites Chapingo, Mexico City, Cuernavaca and Tapachula

The objective of this work is to find the best rainfall distribution pattern for each study site for 24 and 6 hours storms. The storm patterns analyzed were those proposed by Huff, Soil Conservation Service, Alternate Block method and Yen and Chow. Intensity Duration Frequency (IDF) curves were constructed, which served as support for the Yen and Chow methods and the Alternate Block. The Nash-Sutcliffe coefficient was used to determine which distribution pattern presented the best fit. In the Chapingo site, for the 24-hour storms the best distribution pattern was the second Huff quartile with Nash-Sutcliffe ratios of up to 0.97, for the 6-hour storms the first Huff quartile with Nash-Sutcliffe coefficients up to 0.76. In the meteorological observatory of Mexico City, for the 24-hour storms the best distribution pattern was the fourth quartile of Huff with Nash-Sutcliffe coefficients up to 0.78, while for the 6-hour storms it was the second quartile of Huff with Nash-Sutcliffe ratios up to 0.93. At the Cuernavaca Meteorological Observatory, for the 24-hour storms the best distribution pattern was the first Huff quartile with Nash-Sutcliffe ratios of up to 0.91, while for the 6-hour storms the second Huff quartile with coefficients was of Nash-Sutcliffe up to 0.95. At the Tapachula meteorological observatory for 24-hour storms, the best distribution pattern was the third Huff quartile with Nash-Sutcliffe ratios of up to 0.97, while for the 6-hour storms it was the first Huff quartile with coefficients of Nash-Sutcliffe up to 0.97.

Keywords: maximum rainfall intensity, Temporal distribution of the rainfall, synthetic storms, rains for hydraulic structure design, Huff storms, Storms of the SCS, alternate block storms, triangular storms.

1. INTRODUCCIÓN

El término tormenta diseño es usado para referirse a lluvias de gran intensidad que se cree tiene las características que son críticas para la seguridad del proyecto de una obra hidráulica (Levy and McCuen, 1999). Una tormenta es comúnmente representada por un hietograma. Un hietograma es una gráfica de barras, donde se dibuja tiempo versus lámina de lluvia. (Aparicio, 2011). La lámina está en milímetros y el tiempo comúnmente en una hora, media hora, 20 minutos, 15 minutos, etc.

Para cualquier dimensionamiento de estructuras hidráulicas, desde una alcantarilla hasta una presa de embalse, resulta imprescindible cuantificar el tipo de tormenta que la obra deberá soportar y el correspondiente riesgo asociado (Zamanillo *et al.*, 2008).

Quizá un criterio intuitivo de lo que es una tormenta severa es cuando la lluvia en 24 horas o la intensidad de la lluvia para una cierta duración, se encuentren arriba de la mediana (Beguiría and Vicente-Serrano, 2006).

Un concepto teórico importante en el marco de la definición de una tormenta diseño, es el de periodo de retorno o intervalo de recurrencia de una lluvia en 24 horas. El periodo de retorno de una tormenta o intervalo de recurrencia, es el tiempo que transcurre, en años, entre una lluvia y otra de igual o mayor magnitud (Bedient *et al.*, 2013).

En México, y en muchos países, es común que los únicos registros de lluvia con registros históricos de varios años, sean de duración de 24 horas (Campos, 1998), lo que lleva a plantearse la pregunta de cómo obtener un hietograma que distribuya a nivel de horas y/o minutos tal tormenta (Yen and Chow, 1980).

Existen varios trabajos científicos alrededor del mundo que han estudiado la distribución temporal de eventos extremos (El-Sayed, 2017; Yin et al., 2016; Dick and Ghavasieh, 2015; Watt and Marselek, 2013). Dicha distribución de la lluvia en el tiempo, para eventos extremos se le conoce como tormenta diseño. Entre los diferentes tipos de tormentas diseño destacan cuatro: (1) método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, (2) Método de los cuartiles de Huff, (3) Método de los bloques alternos, y (4) Método de Yen y Chow. Algunos de estos cuatro tipos, tienen sus subtipos.



Tormentas diseño para los sitios Chapingo, Ciudad de México, Cuernavaca y Tapachula.



Actualmente en México, no hay una propuesta contundente de cual método de tormenta diseño se debe usar, por consiguiente el propósito de este trabajo es plantear una propuesta de tormentas diseño, con duraciones de 24 y 6 horas, para los sitios Chapingo, Estado de México, Observatorio de la Ciudad de México, Cuernavaca, Morelos y Tapachula, Chiapas. Se espera que este trabajo proporcione elementos concluyentes sobre cual patrón de distribución es más conveniente usar en cada sitio o zona aledaña al área de estudio y obtener un diseño hidráulico más confiable.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivo general

- Obtener el patrón de tormenta diseño que se ajuste a las tormentas críticas de los sitios Chapingo, Tacubaya, Cuernavaca y Tapachula.

2.1.2. Objetivos específicos

- Evaluar el ajuste de los diferentes patrones de distribución de lluvia para los datos de los sitios Chapingo, Tacubaya, Cuernavaca y Tapachula.
- Analizar el comportamiento temporal de las lluvias máximas de los sitios Chapingo, Tacubaya, Cuernavaca y Tapachula.
- Comparar las intensidades obtenidas con las ecuaciones Intensidad duración Frecuencia y las isoyetas de intensidad duración periodo de retorno elaboradas por la Secretaria de Caminos y Transportes.

2.2. Hipótesis

2.2.1. Hipótesis nula

Hipótesis nula (H_0):

Los patrones de distribución de las tormentas críticas de los sitios Chapingo, Tacubaya, Cuernavaca y Tapachula son diferentes entre sí.

2.2.2. Hipótesis alternativa

Hipótesis alternativa (H_a):

Los patrones de distribución de las tormentas críticas de los sitios Chapingo, Tacubaya, Cuernavaca y Tapachula no son diferentes entre sí.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Hidrología

La Hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos (Chow *et. al.*, 1994).

Se llama Hidrología a la rama de la Hidráulica encargada del estudio de los procesos de circulación, ocurrencia y distribución del agua sobre la superficie terrestre, así como su interacción con el medio ambiente (CONAGUA, 2007).

3.2. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico está compuesto por diferentes variables, las cuales se relacionan entre sí por medio de los procesos hidrológicos. En general, se entiende por proceso a una serie de acciones que producen un cambio o desarrollo en un sistema y para el caso particular de la Hidrología, los procesos están asociados con aquellos fenómenos que intervienen tanto en el movimiento del agua como en los cambios que sufre ésta en sus características físicas, químicas y biológicas al desplazarse por diversos medios (Breña & Jacobo, 2005).

El ciclo hidrológico, se considera el concepto fundamental de la hidrología (Aparicio, 2015). Una de las muchas representaciones que se pueden hacer de él se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Ciclo hidrológico.

Fuente: <http://www.arkiplus.com/el-ciclo-del-agua>.

3.3. Precipitación

La precipitación incluye la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como el granizo y nevisca. La formación de precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense (Chow *et al.*, 1994).

Según Aparicio (2015) la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua.

3.3.1. Clasificación de la precipitación

Cahuana & Yugar (2009) mencionan que de acuerdo a sus características físicas y producto de la condensación del vapor de agua atmosférico, formado en el aire libre o en la superficie de la tierra, y de las condiciones locales, la precipitación puede adquirir diversas formas.

En México, de acuerdo al Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED, (2014), en su fascículo “tormentas severas”, clasifican a las lluvias en 5 categorías, considerando la lluvia en 24 horas: (a) lluvia ligera cuando en 24 horas llueve de 0.1 a 5 mm; (b) lluvia moderada cuando en 24 horas llueve de 5 a 20 mm; (c) lluvia fuerte cuando en 24 horas llueve de 20 a 70 mm; (d) lluvia intensa cuando en 24 horas llueve de 70 a 150 mm; y, (e) lluvia torrencial cuando en 24 horas llueve más de 150 mm.

En otra publicación del CENAPRED (2013), titulada “inundaciones”, las lluvias, según su intensidad en 24 horas son clasificadas en 6 tipos de tormentas: (a) Lluvias escasas cuando en 24 horas es menor de 5 mm; (b) lluvias ligeras cuando la lluvia en 24 horas, es entre 5 y 10 mm; (c) lluvias moderadas cuando la lluvia en 24 horas, es entre 10 y 20 mm; (d) lluvias fuertes cuando la lluvia en 24 horas, es entre 20 y 50 mm; (e) lluvias muy fuertes, cuando la lluvia en 24 horas es de entre 50 y 70 mm; y, (f) lluvias intensas cuando la lluvia en 24 horas es mayor a 70 mm.

3.3.2. Medición de la precipitación

A lo largo del tiempo, se ha desarrollado una gran variedad de instrumentos y técnicas para obtener información de las diferentes fases de precipitación. Los instrumentos para medir la cantidad y la intensidad de la precipitación son los más importantes e incluyen aparatos para medir el tamaño y la distribución de las gotas de agua, y para establecer el tiempo de comienzo y el fin de la precipitación (García, 2006).

Aparicio (2015) menciona que los aparatos más usuales en México para medir la precipitación son los pluviómetros y los pluviógrafos.

3.3.2.1. Pluviómetro

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (1974) un pluviómetro es un instrumento para medir la altura de agua de precipitación en un punto.

Para Aparicio (2015) los pluviómetros están formados por un recipiente cilíndrico graduado al que descarga un embudo que capta el agua de lluvia, con un área de captación, como el que se muestra en la Figura 2.

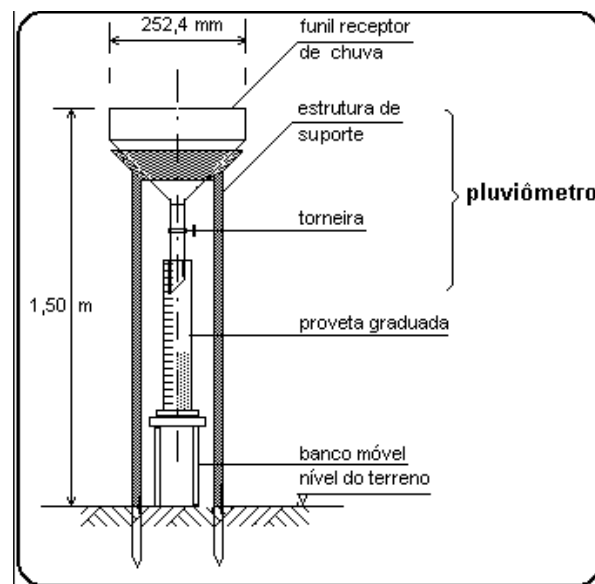


Figura 2. Esquema de un pluviómetro.

Fuente: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAhLRAAH/hidrologia?part=3>

3.3.2.2. Pluviógrafo

Según Aparicio (2015) los pluviógrafos son semejantes a los pluviómetros, con la diferencia de que tienen un mecanismo de relojería para producir un registro continuo de precipitación.

Campos (2010) menciona que los pluviógrafos registran en forma continua la variación de la altura o lámina de lluvia con respecto al tiempo, sin embargo, son sus registros llamados bandas pluviográficas los que permiten hacer un análisis más completo de las tormentas de la zona. La banda pluviográfica constituye la gráfica sobre la cual la pluma del pluviógrafo registra la lluvia acumulada (Figura 3).

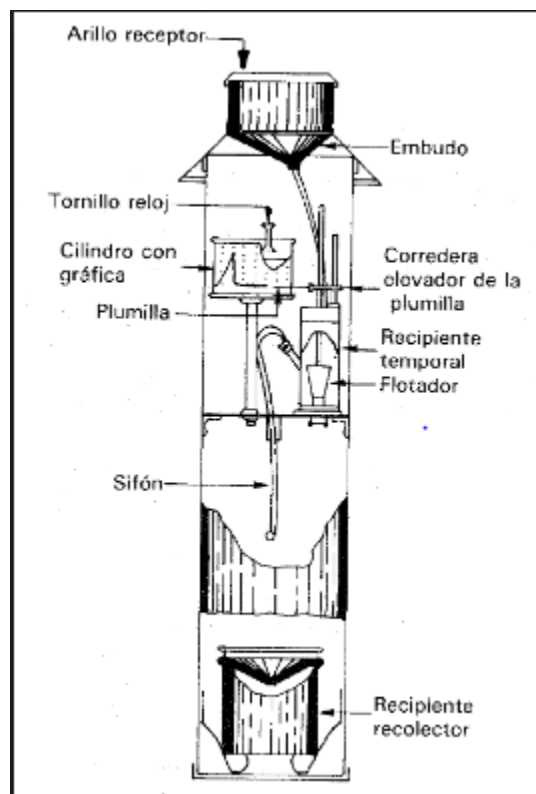


Figura 3. Esquema de un pluviógrafo.

Fuente: <http://gaia.geologia.uson.mx/academicos/lvega/ARCHIVOS/PRECIPITACION.htm>

3.3.2.2.1 Pluviograma

Cahuana y Yugar (2009) define como pluviograma (Figura 4) el registro que se obtiene de un pluviógrafo mientras que Campos (2010) lo nombra como banda pluviográfica, y dice que ésta presenta una seria limitación para su uso, pues su amplitud de registro es de 10 milímetros de lluvia acumulada, que corresponde al punto de vaciado del volumen acumulado de lluvia (sistema Hellman).

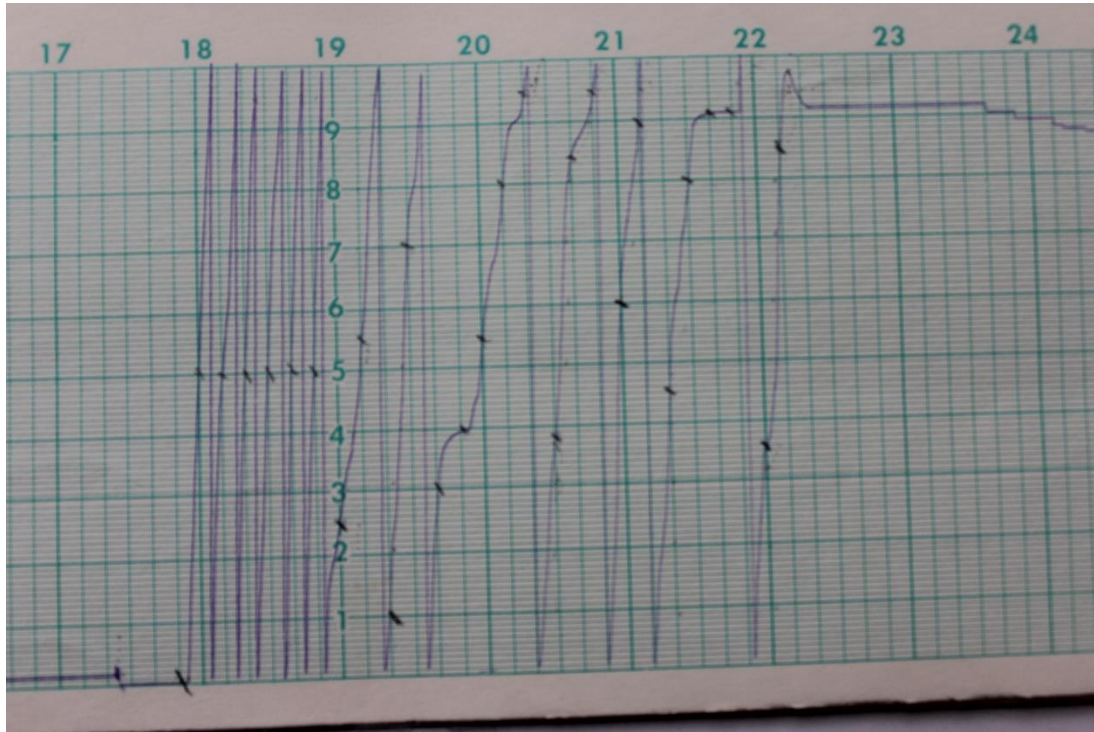


Figura 4. Pluviograma de una tormenta.

3.3.2.3. Estación meteorológica automática (EMA)

Una estación meteorológica automatizada es una estructura o dispositivo dotado con sensores que responden a estímulos electrónicos, que tienen la capacidad de registrar y coleccionar información meteorológica en forma automática y en tiempo real (Figura 5), que permiten monitorear la variación de la temperatura del aire, precipitación, humedad relativa, radiación solar, humedad foliar, dirección y velocidad del viento, lluvia, temperatura del suelo, presión atmosférica, entre otras (Medina *et. al.*, 2008).



Figura 5. Estación meteorológica automática.

Fuente: (INIFAP, 2016).

3.4. Elementos fundamentales de una tormenta

Villón (2002) menciona que una tormenta o evento lluvioso está definida por tres variables:

- **La magnitud de la lluvia:** Es la lámina total ocurrida en el lapso de duración de la tormenta, una forma de definir la magnitud de la lluvia es mediante la intensidad:

Intensidad: Es la cantidad de agua caída por unidad de tiempo. De las tormentas interesa la intensidad máxima que se haya presentado, es decir, la altura máxima de agua caída por unidad de tiempo. Comúnmente se expresa en mm/h.

- **La duración:** Según Onate (2004) en el análisis de la tormenta se distinguen:

Duración de la tormenta: Tiempo total transcurrido desde el inicio de la tormenta hasta su final.

Intervalo de duración: Es el tiempo transcurrido entre dos cambios de intensidad (pendiente) de la tormenta.

Periodo de duración: Es un periodo de tiempo determinado adoptado dentro del total que dura la tormenta, por lo general se habla de periodos de 5, 10, 15, 20, 30, 60, 120, 240, 360 minutos.

- **La frecuencia:** Es el número de veces que se repite una tormenta de características de intensidad y duración definida en un período de tiempo más o menos largo, generalmente en años, se expresa por su periodo de retorno.

3.5. Tormenta diseño

Chow *et al.* (1994) define la tormenta diseño como un patrón de precipitación para la utilización en el diseño de un sistema hidrológico, la que conforma la entrada al sistema, y a través de éste los caudales se calculan utilizando procedimientos de lluvia-escorrentía y tránsito de caudales. Además, Rivano (2004) menciona que la lluvia de diseño se estima a través de un análisis de frecuencia de eventos extremos de precipitación.

Para Levy y McCuen (1999) el término tormenta diseño se utiliza para referirse a un hietograma de lluvia que se cree que tiene las características que son críticas para la seguridad del proyecto. Una tormenta diseño puede ser una distribución sintética basada en las características inherentes a una curva de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) o hietogramas reales de tormentas que causaron daños importantes inundaciones en el pasado, y se está tratando de evitar este tipo de daños en el futuro. Las tormentas diseño de 24 horas del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) son ejemplos de tormentas diseño.

3.5.1. Aplicación de las tormentas diseño

Las tormentas diseño se pueden utilizar para cualquier dimensionamiento de estructuras hidráulicas, desde una alcantarilla hasta una presa de embalse, resulta imprescindible cuantificar el tipo de tormenta que la obra deberá soportar y el correspondiente riesgo asociado. El tipo de información requerida para el análisis hidrológico incluye altura de agua caída, probabilidad de ocurrencia (recurrencia), intensidad, duración y patrón de distribución temporal (Zamanillo, 2008).

De acuerdo con Chow *et al.*, (1994) la aplicación de una tormenta diseño va desde el uso de valores puntuales de precipitación en el método racional para determinar los caudales picos en alcantarillados de agua pluvial y alcantarillas de carreteras, hasta el uso de hietogramas de tormenta como las entradas para el análisis de lluvia-escorrentía en embalses de detención de aguas urbanas o en el diseño de vertederos en proyectos que involucren grandes embalses.

La distribución en el tiempo de la lluvia es un factor determinante de la forma, magnitud y volumen de la crecida resultante. Su conocimiento es esencial para estimar tormentas diseño para proyectos de redes de agua pluvial, sistemas de drenaje de carreteras, estudios de erosión, estimación de arrastres y socavación y otros problemas de ingeniería hidráulica (Dölling y Varas, 2006).

3.6. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Según Pizarro *et al.*, (2001), las curvas IDF son la representación gráfica de la relación existente entre la intensidad, la duración y la frecuencia o periodo de retorno de la precipitación.

De acuerdo con Campos (2010) el enfoque más confiable y eficiente para la estimación de crecientes en zonas urbanas, las cuales sirven de base al diseño hidrológico de la infraestructura necesaria en los sistemas de drenaje inicial o de aguas pluviales o de evacuación y protección contra crecientes, es la aplicación de los métodos hidrológicos que transforman lluvias de diseño en escurrimiento, al tomar en cuenta las condiciones físicas actuales y/o futuras de las áreas o cuencas urbanas. La aplicación de estos métodos comienza con el establecimiento de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), las cuales representan las características relevantes de las tormentas que ocurren en la zona.

Uno de los primeros pasos que debe seguirse en muchos proyectos de diseño hidrológico, como el diseño de un drenaje urbano, es la determinación del evento o los eventos de lluvia que deben usarse. La forma más común de hacerlo es utilizar una tormenta diseño o un evento que involucre una relación entre la intensidad de lluvia (o profundidad), la duración y las frecuencias o periodos de retorno apropiados para la obra y el sitio.

CONAGUA (2011) define el período de retorno como el número promedio de años en que un evento puede ser igualado o excedido. Por ejemplo, si se diseña una obra para un gasto de $700 \text{ m}^3/\text{s}$ que tiene asignado un periodo de retorno de 10 años, ello significa que el tiempo que transcurre para que vuelva a presentarse un gasto mayor o igual a él puede ser de 8, 12, 13 o bien 7 años, nótese que el promedio de ellos es precisamente 10 años.

3.6.1. Construcción y estimación de curvas IDF

Entonces cuando se analizan probabilísticamente los registros de un pluviógrafo y se presentan los resultados o predicciones en un gráfico logarítmico con la duración en el eje horizontal, las intensidades en el eje vertical y la frecuencia definiendo cada curva correspondiente a un periodo de retorno, se están construyendo unas curvas IDF. Por otra parte, cuando a partir de datos de lluvia máxima diaria anual, se obtienen sus predicciones con duración 24 horas y tales datos se utilizan conjuntamente con una fórmula empírica que representa a las curvas IDF, se está en un proceso de estimación de éstas (Campos, 2010).

3.7. Método de Huff

Huff (1967) clasificó las tormentas en Illinois, dependiendo si la mayor precipitación es observada en el primer, segundo, tercer o último cuarto de la duración total del temporal. El método de Huff es práctico porque no asume una duración. En este método, lo que se pide es que se tenga claro en cual cuartil ocurre la lluvia máxima (Figura 6). Si se asume que ocurre en el primer cuartil, entonces se usará la curva masa I; si se asume que ocurre en el segundo cuartil, entonces se usará la curva masa II y así sucesivamente. Nótese que en las ordenadas se tiene el tiempo como una fracción de cualquiera que sea la duración de la tormenta.

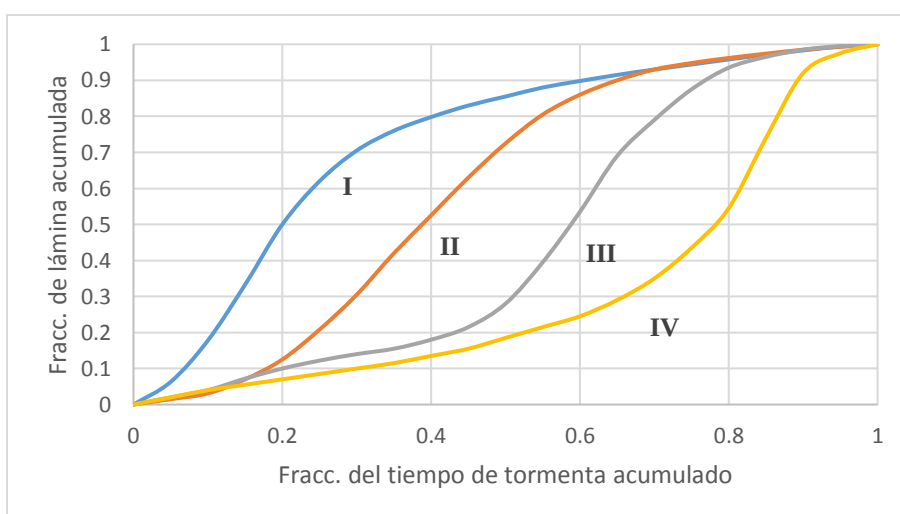


Figura 6. Curvas masa de distribución del método de Huff.

Las distribuciones de Huff son utilizados por el Estado de Illinois y se representan en forma de tabla (Cuadro 1).

Cuadro 1. Coeficientes adimensionales del método de Huff.

t/t_d	P(t)/P total para cada cuartil			
	Primer cuartil	Segundo cuartil	Tercer cuartil	Cuarto cuartil
0	0	0	0	0
0.05	0.063	0.015	0.02	0.02
0.1	0.178	0.031	0.04	0.04
0.15	0.333	0.07	0.072	0.055
0.2	0.5	0.125	0.1	0.07
0.25	0.62	0.208	0.122	0.085
0.3	0.705	0.305	0.14	0.1
0.35	0.76	0.42	0.155	0.115

0.4	0.798	0.525	0.18	0.135
0.45	0.83	0.63	0.215	0.155
0.5	0.855	0.725	0.28	0.185
0.55	0.88	0.805	0.395	0.215
0.6	0.898	0.86	0.535	0.245
0.65	0.915	0.9	0.69	0.29
0.7	0.93	0.93	0.79	0.35
0.75	0.944	0.948	0.875	0.435
0.8	0.958	0.962	0.935	0.545
0.85	0.971	0.974	0.965	0.74
0.9	0.983	0.985	0.985	0.92
0.95	0.994	0.993	0.995	0.975
1	1	1	1	1

Fuente: Smith, 2014.

De acuerdo con Prodanovic y Simonovic (2004) el método de Huff tiene características similares al método de SCS, excepto que se ofrece al usuario una mayor flexibilidad ya que la duración de la tormenta puede ser variable. El número total de tormentas considerado fue 291, con una duración de entre 3 y 48 horas.

Los parámetros de entrada requeridos para el hietograma de diseño son:

- Cuartiles de distribución (I, II, III o IV)
- Duración de la tormenta, t_d
- Altura total de la tormenta, D.

3.8. Método del Servicio de Conservación de Suelos

El Servicio de Conservación de suelos (SCS), (1986) propone 4 curvas adimensionales de lluvia acumulada para un periodo de 24 h (Figura 7), que recogen las distribuciones temporales de lluvias extremas más frecuentes en todo el territorio norteamericano (Figura 8).

Los parámetros de entrada requeridos son:

- Distribución tipo (uno de los cuatro tipos, dependiendo de la localidad de interés);
- Profundidad de la Tormenta Total, D.

Muñoz & Ritter (2005) mencionan que los Tipos I y IA corresponden al clima marítimo del Pacífico con inviernos húmedos y veranos secos. El Tipo III corresponde al Golfo de

México y las áreas costeras del Atlántico, donde las tormentas tropicales producen lluvias de 24 horas muy grandes. El Tipo II corresponde al resto del país. El

Cuadro 2 recoge las coordenadas de las curvas que muestra la Figura 7.

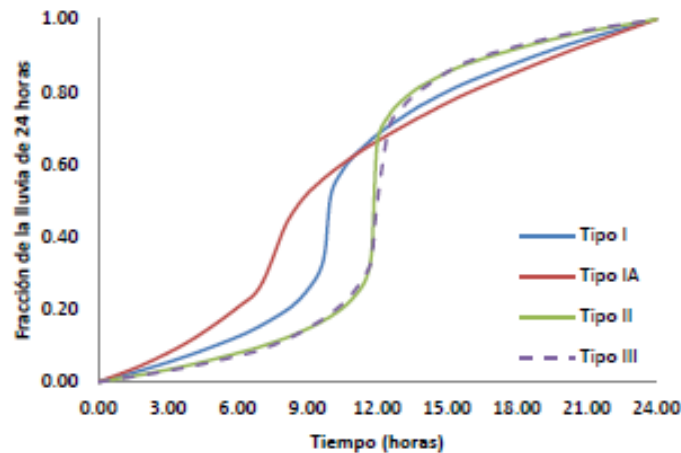


Figura 7. Curvas masa de distribución de lluvia en 24 horas del servicio de conservación de suelos.



Figura 8. Distribución de los patrones de lluvia en 24 horas del SCS en los Estados Unidos.

Cuadro 2. Coeficientes adimensionales de distribución de lluvia del SCS.

Tormentas de 24 horas					Tormenta de 6 horas		
Pt/24							
Hora t	Tipo I	Tipo IA	Tipo II	Tipo III	Hora t	t/6	Pt/P6
0	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00
0.5	0.008	0.0100	0.0053	0.0053	0.60	0.10	0.04
1	0.017	0.0200	0.0108	0.0108	1.20	0.20	0.10
1.5	0.026	0.0350	0.0164	0.0164	1.50	0.25	0.14
2	0.035	0.0500	0.0223	0.0223	1.80	0.30	0.19

2.5	0.045	0.0670	0.0284	0.0284	2.10	0.35	0.31
3	0.055	0.0820	0.0347	0.0347	2.28	0.38	0.44
3.5	0.065	0.0980	0.0414	0.0414	2.40	0.40	0.53
4	0.076	0.1160	0.0483	0.0483	2.52	0.42	0.60
4.5	0.087	0.1350	0.0555	0.0555	2.64	0.44	0.63
5	0.099	0.1560	0.0632	0.0632	2.76	0.46	0.66
5.5	0.112	0.1800	0.0712	0.0712	3.00	0.50	0.70
6	0.126	0.2060	0.0797	0.0797	3.30	0.55	0.75
6.5	0.140	0.2370	0.0887	0.0887	3.60	0.60	0.79
7	0.156	0.2680	0.0984	0.0984	3.90	0.65	0.83
7.5	0.174	0.3100	0.1089	0.1089	4.20	0.70	0.86
8	0.194	0.4250	0.1203	0.1203	4.50	0.75	0.89
8.5	0.219	0.4800	0.1328	0.1328	4.80	0.80	0.91
9	0.254	0.5200	0.1467	0.1467	5.40	0.90	0.96
9.5	0.303	0.5500	0.1625	0.1625	6.00	1.00	1.00
10	0.515	0.5770	0.1808	0.1808			
10.5	0.583	0.6010	0.2042	0.2042			
11	0.624	0.6240	0.2351	0.2351			
11.5	0.655	0.6450	0.2833	0.2833			
12	0.682	0.6640	0.6632	0.6632			
12.5	0.706	0.6830	0.7351	0.7351			
13	0.728	0.7010	0.7724	0.7724			
13.5	0.748	0.7190	0.7989	0.7989			
14	0.766	0.7360	0.8197	0.8197			
14.5	0.783	0.7530	0.838	0.838			
15	0.799	0.7690	0.8538	0.8538			
15.5	0.815	0.7850	0.8676	0.8676			
16	0.830	0.8000	0.8801	0.8801			
16.5	0.844	0.8150	0.8914	0.8914			
17	0.857	0.8300	0.9019	0.9019			
17.5	0.870	0.8440	0.9115	0.9115			
18	0.882	0.8580	0.9206	0.9206			
18.5	0.893	0.8710	0.9291	0.9291			
19	0.905	0.8660	0.9371	0.9371			
19.5	0.916	0.8960	0.9446	0.9446			
20	0.926	0.9080	0.9519	0.9519			
20.5	0.936	0.9200	0.9588	0.9588			
21	0.946	0.9320	0.9653	0.9653			
21.5	0.956	0.9440	0.9717	0.9717			
22	0.965	0.9560	0.9777	0.9777			
22.5	0.974	0.9670	0.9836	0.9836			
23	0.983	0.9780	0.9892	0.9892			
23.5	0.992	0.9890	0.9947	0.9947			

24	1.000	1.0000	1	1
----	-------	--------	---	---

Fuente: McCuen, 1998.

3.9. Método del Bloque Alterno

En ocasiones no es suficiente el dato de que la precipitación máxima para las 5 horas más lluviosas es de 100 mm. Es posible que se requiera conocer la evolución de esos 100 mm a lo largo de esas 5 horas.

Los métodos hidrológicos más modernos requieren no sólo del valor de lluvia o intensidad de diseño, sino de una distribución temporal (tormenta), es decir, el método estudia la distribución en el tiempo, de las tormentas observadas. Una de las maneras de obtenerlo es a partir de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), dentro de ellas el método del Bloque Alterno.

Es el método utilizado tradicionalmente en Cuba (Cruz, 1999). Es una forma simple para desarrollar un hietograma de diseño utilizando una curva Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF).

El hietograma de diseño producido por este método especifica la profundidad de precipitación que ocurre en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt sobre una duración total de $T_d = n \Delta t$. De forma general, los pasos a seguir para el cálculo del hietograma de una lluvia a partir de las curvas IDF son:

- Seleccionar el período de retorno de diseño, la duración de la lluvia ($T_d = n \Delta t$) y el intervalo de tiempo Δt .
- Las intensidades se obtienen directamente de las curvas IDF o de la ecuación que refleje dichas curvas.
- Se calculan las láminas totales multiplicando la intensidad por Δt .
- Se calculan las láminas por intervalos como la diferencia entre los valores sucesivos de lámina de precipitación total.
- Estos incrementos o bloques se reordenan en una secuencia temporal de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida T_d y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el hietograma de diseño (Chow *et al.*, 1994).

3.10. Método de Yen y Chow

El método de Yen y Chow (1980), originalmente fue desarrollado para su uso en el diseño de estructuras pequeñas de drenaje, el método debido a su simplicidad, también ha visto su uso en otras aplicaciones. Los parámetros básicos necesarios para su utilización son:

- Diseño del período de retorno, T en años;
- Duración de la tormenta, t_d en horas;
- Intensidad media, i en mm/h;
- Parámetro r , una relación entre el pico de la tormenta y la duración de la tormenta.

Los tres primeros parámetros son obtenidos de la curva IDF.

Yen y Chow analizaron 9,869 tormentas en cuatro lugares: Urbana, Illinois; Boston, Massachusetts; Elizabeth City, New Jersey; y San Luis Obispo, California. Su análisis indicó que los hietogramas triangulares para la mayor parte de las tormentas fuertes eran idénticos en su forma, con sólo algunos efectos secundarios causados por la duración de la tormenta, las inexactitudes de las medidas y la localización geográfica (Chow et al., 1994).

Este método también es nombrado método del hietograma triangular. Los autores simplificaron el método a una figura como el triángulo, la cual de acuerdo con Chow (1994) es una figura simple para un hietograma de diseño debido a que una vez que se conozcan tanto la altura de precipitación de diseño P como la duración T_d , la longitud de la base y la altura del triángulo se determinan.

Los componentes de este hietograma triangular se muestran en la Figura 9, donde la longitud de la base es T_d y la altura es h , luego la profundidad total de la precipitación en el hietograma está dada por la ecuación 1:

$$P = \frac{1}{2} T_d h \quad (1)$$

Donde despejando se obtiene que h está dada por la ecuación (2):

$$h = \frac{2p}{T_d} \quad (2)$$

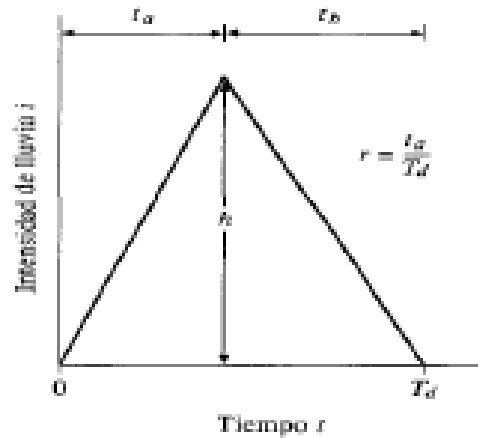


Figura 9. Diseño general del hietograma triangular.

Un coeficiente de avance de tormenta r se define como la relación del tiempo antes del pico t_a con respecto de la duración total t_d (Chow *et al.*, 1994) ecuación 3.

$$r = \frac{t_a}{T_d} \quad (3)$$

Diferentes autores mencionados en este trabajo utilizan este coeficiente r para la determinación de hietogramas, también se le conoce como parámetro r . Luego el tiempo de recesión t_b está dado por la ecuación 4:

$$t_b = T_d - t_a = (1 - r)T_d \quad (4)$$

Chow *et al.*, (1994) mencionan que un valor de r igual a 0.5 corresponde a una intensidad pico que ocurre en la mitad de la tormenta, mientras que un valor menor que 0.5 tendrá el pico antes y un valor mayor que 0.5 tendrá el pico después del punto medio de la tormenta. Un valor apropiado de r se determina calculando la relación entre el tiempo de intensidad pico y la duración de la tormenta para una serie de tormentas de diferentes duraciones. La media de estas relaciones, ponderada de acuerdo con la duración de cada evento es el valor r .

3.11. Estadística en la hidrología

3.11.1. Eficiencia de Nash-Sutcliffe

El coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (1970), se utiliza para evaluar la capacidad de predicción de los modelos hidrológicos ya que compara los valores observados y simulados (Yusop *et al.*, 2007). Se define como (ecuación 5):

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \overline{Q_o})^2} \quad (5)$$

Donde E es el índice de eficiencia, Q_o^t valor observado en el tiempo t, Q_m^t es el valor simulado en el instante t, $\overline{Q_o}$ es el promedio de los datos observados, y T es el número de datos.

La eficiencia de Nash- Sutcliffe oscila entre $-\infty$ y 1.0 (1 incluido), siendo 1 el valor óptimo. Los valores mayores a 0.0 y menores o iguales a 1.0 generalmente se consideran como niveles aceptables de desempeño, mientras que los valores menores o iguales a 0.0 indican que la media observada es un mejor predictor que el valor simulado, lo que indica rendimiento inaceptable (Moriassi *et al.*, 2007).

McCuen *et al.*, (2006) comentan que el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe es una estadística ampliamente utilizada y potencialmente fiable para evaluar la bondad de ajuste de los modelos hidrológicos si se interpreta correctamente.

3.11.2. Error Medio Cuadrático

Alonso (2013) menciona que otro de los estadísticos de comparación empleados es la Raíz Cuadrada del Cuadrado Medio del Error (RCCME) o también conocido como Error Medio Cuadrático (EMC) el cual se calcula con la Ecuación (6).

$$RCCME = \sqrt{\frac{Sr}{n-1}} \quad (6)$$

Dónde:

Sr = Es la suma de los cuadrados de los residuos entre los datos de tablas o estimados y los calculados u observados, ver Ecuación (7).

$$S_r = \sum (O_i - M_i)^2 \quad (7)$$

Dónde:

O_i = Valor observado

M_i = Valor estimado

n = Número de datos.

3.11.3. Error Relativo

Alonso (2013) menciona que uno de los estadísticos de comparación empleados es el Error Relativo (ER) el cual se calcula con la ecuación 8.

$$ER = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i)^2} * 100 \quad (8)$$

Donde: O_i es el valor observado y E_i es el valor estimado por el modelo.

3.11.4. Teorema de Chebyshev

El matemático ruso P. L. Chebyshev (1821-1894) descubrió que la fracción del área entre cualesquiera dos valores simétricos alrededor de la media está relacionada con la desviación estándar. Como el área bajo una curva de distribución de probabilidad, o la de un histograma de probabilidad, suma 1, el área entre cualesquiera dos números es la probabilidad de que la variable aleatoria tome un valor entre estos números.

El teorema, planteado por Chebyshev, ofrece una estimación conservadora de la probabilidad de que una variable aleatoria tome un valor dentro de k desviaciones estándar de su media para cualquier número real k.

(**Teorema de Chebyshev** (ecuación 9)) La probabilidad de que cualquier variable aleatoria X tome un valor dentro de k desviaciones estándar de la media es de al menos $1 - 1/k^2$. Es decir,

$$p(\mu - k\sigma < X < \mu + k\sigma) \geq 1 - \frac{1}{k^2} \quad (9)$$

3.12. Trabajos previos sobre tormentas diseño alrededor del mundo

Weesakul, *et. al.*, (2017), en primer lugar examinaron la precisión de la tormenta diseño de Chicago utilizando datos observados. En segundo lugar, se investigaron los impactos del cambio climático en la intensidad de la lluvia y en la tormenta diseño de Chicago. Bangkok y sus alrededores fueron seleccionados como área de estudio. Los datos de tormenta pluvial

con registros de 1-5 minutos y registros de 15 minutos fueron recolectados de la estación meteorológica de AIT en los últimos 21 años y de la estación de lluvias en el área de Sukhumvit en Bangkok durante 15 años.

La distribución tipo Gumbel se usó en un Análisis de frecuencia para establecer curvas IDF. Los métodos CDS, Yen & Chow y Sifalda se usaron para sintetizar un Patrón de tormenta de diseño. La comparación de los resultados de estos métodos con los datos observados reveló que el CDS tiene una buena concordancia en la forma, es decir, la intensidad máxima y el tiempo hasta el pico. El CDS todavía se recomienda para su uso en la práctica. Sin embargo, MAPE también se usó para evaluar la precisión del CDS sintetizado en comparación con los datos observados. Se encontró que el CDS debería modificarse para reducir su intensidad máxima. Por otra parte, el impacto del clima también fue investigado.

El Modelo Global del Clima (GCM) y HasGEM2-ES con RCP4.5 se utilizaron para generar datos de lluvia para los próximos 25 años. Se compararon los cambios en las curvas IDF debido al cambio climático. Con las curvas IDF modificadas, la intensidad máxima de las tormentas de diseño aumentó hasta en un 25%. Por lo tanto, se recomienda dar cuenta de los impactos del cambio climático en las tormentas de diseño.

Amatya *et. al.*, (2016), examinaron cómo los patrones de lluvia cambiarán durante el resto del siglo en todo el estado de Carolina del Sur. Analizó simulaciones de lluvia de 134 realizaciones de 21 modelos climáticos globales en todo el estado de Carolina del Sur hasta el año 2099.

Los resultados muestran que habrá aumentos tanto en la precipitación total anual (ATR) como en la profundidad de las tormentas de 24 horas. En Carolina del Sur, se predice que la precipitación total anual aumentará aproximadamente 2.3-4.0 pulgadas durante el período de pronóstico, mientras que se predice que la profundidad de la tormenta de diseño de 100 años aumentará en 0.5-1.2 pulgadas dependiendo de la ubicación. Sin embargo, hay variaciones regionales significativas con la cuenca del río Savannah experimentando incrementos más pequeños en ATR en comparación con el resto del estado.

Carbone *et. al.* (2015), propone una función exponencial doble de dos parámetros para parametrizar eventos históricos de tormentas. La función propuesta se evaluó contra las tormentas seleccionadas a partir de series temporales de lluvia de 5 años con una resolución

de 1 minuto, medida por tres estaciones meteorológicas ubicadas en Calabria, Italia. En particular, se utilizó una optimización no lineal de mínimos cuadrados para identificar parámetros. Un parámetro está relacionado con el centroide de la distribución de la lluvia; el segundo está relacionado con valores altos de la desviación estándar de la curtosis para los eventos seleccionados. Finalmente, considerando la similitud entre la función propuesta y la función de Gumbel, los dos parámetros se calcularon con el método de los momentos; en este caso, los valores de correlación fueron más bajos que los calculados con optimización de mínimos cuadrados no lineales pero suficientemente precisos para propósitos de diseño.

3.12. Trabajos previos sobre tormentas diseño en México

Anteriormente (Ibáñez *et al.* 2011) construyeron para la Estación Meteorológica Chapingo las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) en el período comprendido de 1975-2005, sin embargo, como lo mencionan en el año 1976 no se cuenta con datos. Este trabajo realizó tanto la construcción como la estimación de las curvas IDF, es decir, se utilizaron datos obtenidos tanto del pluviógrafo a través de los pluviogramas, como del pluviómetro. Mediante el análisis de los datos de ambos casos se llegó a la conclusión, entre otras más, que las curvas obtenidas por medio de datos de pluviógrafo son más que confiables que las obtenidas con datos de pluviómetro.

La ecuación obtenida por (Ibáñez *et al.* 2011) fue:

$$i = \frac{375.79 T^{0.399}}{d^{0.906}} \quad (10)$$

Mientras que, la obtenida mediante los datos de pluviómetro es:

$$i = \frac{4136.942 T^{0.164}}{d^{0.717}} \quad (11)$$

Donde: i es la intensidad de la precipitación, en milímetros/hora; T es el periodo de retorno, en años; y d es la duración de la lluvia, en minutos.

Al comparar las ecuaciones IDF de pluviómetro y pluviógrafo, los errores de estimar intensidades con la ecuación IDF del pluviómetro se incrementan a medida que se incrementa el periodo de retorno (Ibáñez *et al.* 2011).

Gutiérrez y Arellano (2010) analizaron y detallaron el origen de las lluvias extremas que ocasionan severos daños en el municipio de Querétaro utilizando variogramas e imágenes de satélite para hacer la comparación de ajuste de los datos obtenidos.

Morales (2013) revisó el patrón de distribución temporal de varias tormentas en la Costa de Chiapas, en especial aquellas de duración de 24 y 6 horas y algunas de menor duración. Se tuvo como referencia el patrón de distribución de tormentas sintéticas del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos de Norteamérica Tipo III propuesto para zonas costeras para el período de abril a mayo de 2011 y el Huracán Stan de octubre del 2005.

De acuerdo con Morales (2013) a partir de las tormentas ajustadas se concluye que la distribución de tormenta del SCS Tipo III se puede aplicar de manera confiable a la Costa de Chiapas, en aquellos lugares donde no existan datos de pluviógrafos, tomando en cuenta que para duraciones de 24 horas hay más confianza que para las de 6 horas.

Torres (2014) presentó una propuesta de distribución temporal de la lluvia para la estación Chapingo utilizando el método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), analizando tormentas con duración de 6 y 24 horas para el periodo 1990-2014.

De acuerdo con Torres (2014) de las tormentas analizadas con duración de 24 horas se concluyó que la distribución propuesta por el SCS tuvo un ajuste excelente en 3 de los 6 eventos ocurridos (50% de los eventos analizados), 1 evento registrado en la estación Chapingo y 2 eventos registrados en la estación Montecillos los cuales fueron los eventos extremos.

De la misma forma para las tormentas de duración de 6 horas se realizó un análisis con el método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), para dichas tormentas se obtuvo que de las tormentas analizadas sólo el 29% se ajustaron al método empleado. Se analizaron 51 eventos de los cuales 15 se ajustaron a los rangos propuestos entre deficiente y, mientras que los otros 36 eventos no se ajustaron, sin embargo, tienen un comportamiento similar entre ellos (Torres, 2014).

A partir de los eventos ajustados se concluye que la distribución de tormenta del SCS Tipo II se puede aplicar de manera confiable para el área de Chapingo, siempre y cuando la

duración de la tormenta sea mayor o igual a 24 horas ya que las tormentas de duraciones cortas no tienden a ajustarse al modelo que plantea el SCS Tipo II para 6 horas (Torres, 2014).

Márquez y Mendoza (2015) analizaron el ajuste de las tormentas en el sitio Chapingo con los patrones de distribución de lluvia propuestos por Huff, Yen y Chow y el método del Bloque Alternativo, con la finalidad de encontrar el mejor ajuste a la distribución temporal de las tormentas de 6 y 24 horas de duración, para el período de 1990-2014.

Encontraron que para las tormentas de 24 horas el mejor patrón de distribución fue el segundo cuartil de Huff con coeficientes de Nash-Sutcliffe desde 0.26 hasta 0.98, errores relativos desde 0.51% hasta 36.96%, y errores medios cuadráticos desde 1.43 mm hasta 9.19 mm. Mientras que para las tormentas de 6 horas el mejor patrón de distribución fue el primer cuartil de Huff con coeficientes de Nash-Sutcliffe desde -3.90 hasta 0.98, errores relativos desde 0.28% hasta 154.5% y errores medios cuadráticos desde 0.61 mm hasta 22.33 mm.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales

- Datos históricos de por lo menos 15 años de lluvia provenientes de pluviógrafos y/o de estaciones meteorológicas automáticas. Los sitios seleccionados son: (1) Chapingo, (2) Observatorio de la Ciudad de México, (3) Cuernavaca, Morelos, (4) Tapachula, Chis.
- Computadora Personal con sistema operativo Windows
- Software: Excel y MsWord.

4.2. Metodología

4.2.1. Selección de los sitios de estudio

Se eligió la Estación Chapingo, Edo. de México debido a que se cuenta con un registro de precipitación más completo. En el sitio se cuenta con datos de más de 30 años de precipitación. Como ya se tenían trabajos previos se decidió actualizarlos.

La selección del observatorio meteorológico de la Ciudad de México se debió a la cercanía de este con la Universidad Autónoma Chapingo y a la amplia longitud de datos, tanto del pluviógrafo como de la estación automática que se encuentra en el sitio.

El Observatorio Meteorológico de Cuernavaca fue seleccionado debido a que se tendría una longitud amplia de registros y debido a que en esta área de estudio se han registrado precipitaciones importantes.

El observatorio meteorológico de Tapachula fue seleccionado debido a la intensidad de las lluvias que presenta este sitio y por la longitud amplia de registro que se obtendrían.

4.2.2. Descripción de las áreas de estudio

4.2.2.1. Estación meteorológica Chapingo

a) Localización

La Universidad Autónoma Chapingo se ubica en el km. 38.5 de la carretera federal México- Texcoco, en el municipio de Texcoco, Estado de México dentro de ella la Estación

Meteorológica Chapingo con coordenadas: 19° 30' latitud norte, 98°51' longitud oeste y altitud de 2,241 msnm (Figura 10).

La estación Montecillos también se ubica dentro del campus de la Universidad con coordenadas 19°29' latitud norte y 98°53' longitud oeste.

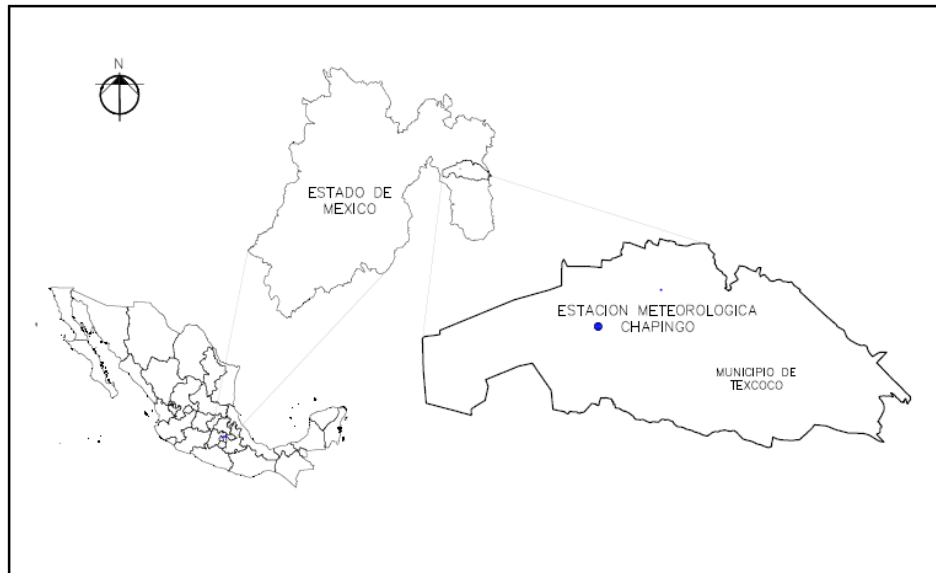


Figura 10. Croquis de localización de la estación meteorológica Chapingo.

b) Clima

El clima en la estación Chapingo, de acuerdo con la clasificación de García (1998) corresponde a Templado, subhúmedo C (wo), que se caracteriza por tener temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual.

La temperatura media anual en el sitio de estudio es de 17.2°C y la precipitación normal anual es de 613 mm.

4.2.2.2. Observatorio meteorológico de la Ciudad de México

a) Localización

El Observatorio Meteorológico de la Ciudad de México se localiza en la Av. Observatorio 192 en la delegación Miguel Hidalgo de la Ciudad de México, con coordenadas: 19° 24' latitud norte, 99° 12' Longitud oeste y una altitud de 2380 msnm (INEGI, 2016a). La ubicación se muestra en la Figura 11.

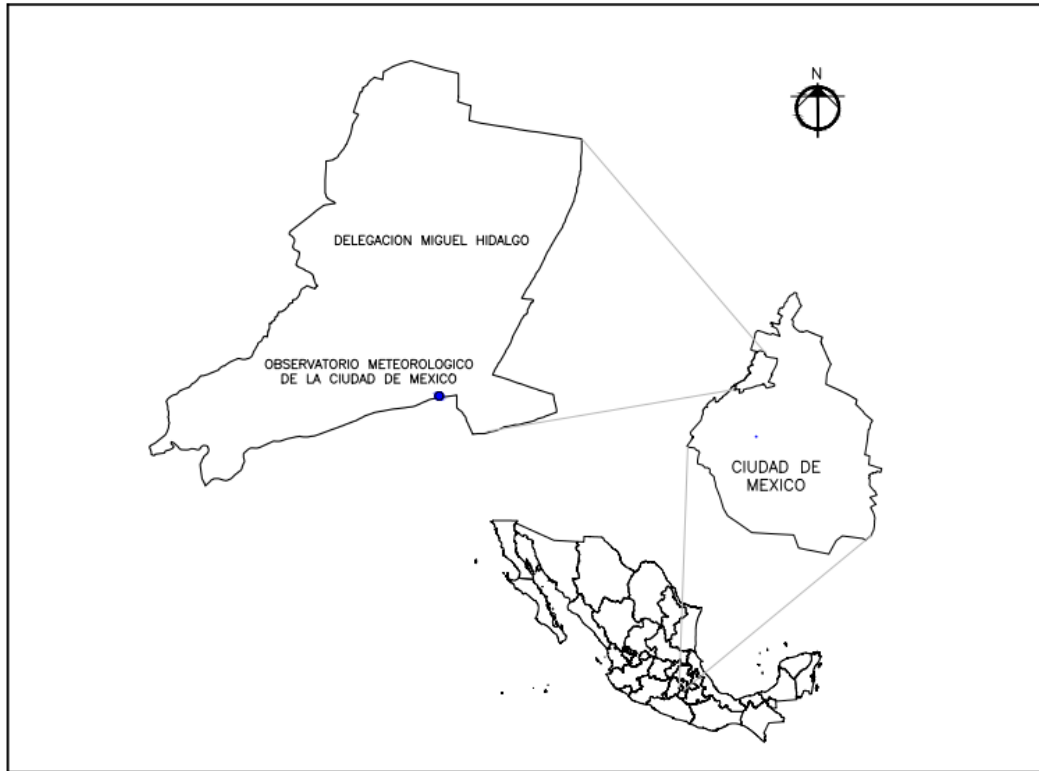


Figura 11. Localización del Observatorio meteorológico de la ciudad de México.

b) Clima

El clima en la estación Tacubaya de acuerdo con la clasificación de García (1998) corresponde a Templado, subhúmedo, C (w1), temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

4.2.2.3. Observatorio meteorológico de Cuernavaca, Morelos

a) Localización

El observatorio meteorológico de Cuernavaca se localiza en la Calle Sonora 324, Extensión Vista Hermosa, Lomas de Vista Hermosa, 62293, Cuernavaca, Morelos (Figura 12), con coordenadas: 18.9 latitud norte, -99.2 Longitud oeste y una altitud de 1510 msnm (INEGI, 2016b).

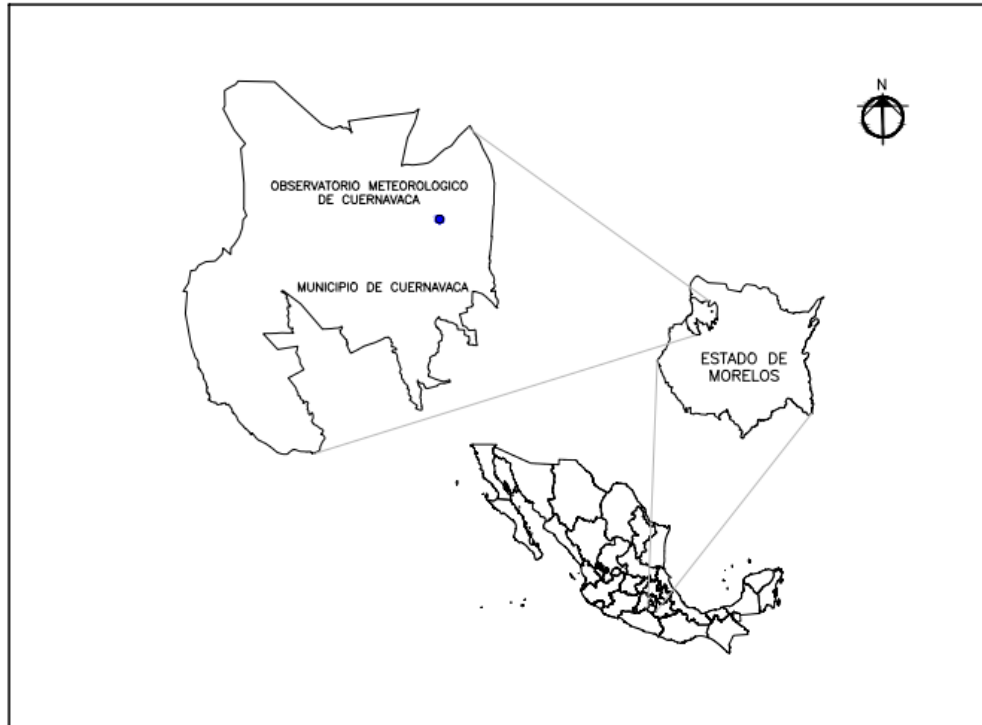


Figura 12. Localización del observatorio meteorológico de Cuernavaca.

b) Clima

El clima en la estación Cuernavaca de acuerdo con la clasificación de García (1998) corresponde a un clima Semicálido subhúmedo, ACw, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor a 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

La temperatura media anual en el sitio de estudio es de 21.2 °C y la precipitación normal anual es de 1088 mm.

4.2.2.4. Observatorio meteorológico Tapachula

a) Localización

El observatorio meteorológico de Tapachula se localiza en el No. 30700, Tapachula de Córdova y Ordoñez, Chis., con coordenadas (Figura 13): 14.9 latitud norte, -92.3 Longitud oeste y una altitud de 170 msnm (INEGI, 2016c).

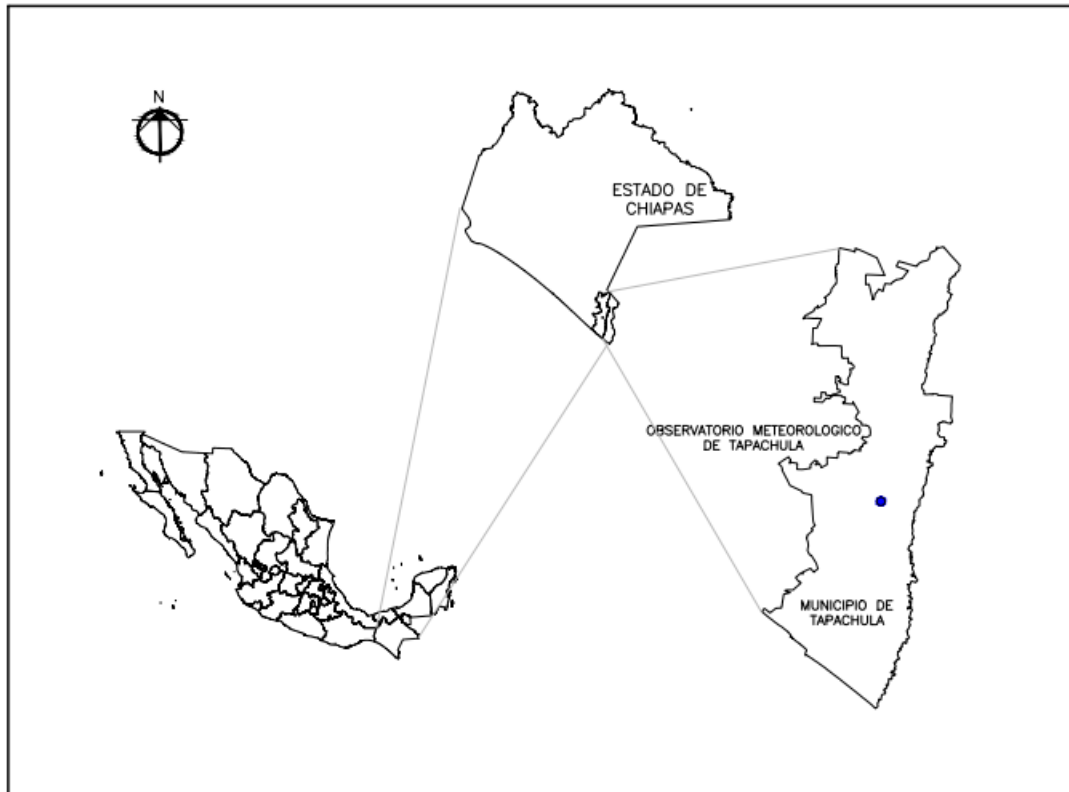


Figura 13. Localización del observatorio meteorológico de Tapachula.

b) Clima

El clima en la estación Cuernavaca de acuerdo con la clasificación de García (1998) corresponde a un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, Aw2, temperatura media anual mayor de 22 °C, temperatura del mes más frío mayor de 18 °C, temperatura del mes más caliente mayor de 42 °C. Precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor a 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

La temperatura media anual en el sitio de estudio es de 21.2 °C y la precipitación media anual oscila entre 500 y 2500 mm (CONABIO, 2017).

4.2.3. Revisión histórica de la información de lluvia en 24 horas

Para cada uno de los sitios seleccionados se identificaron los cinco valores máximos de lluvia en 24 horas, posteriormente estos valores se cotejaron con los registros tanto de pluviógrafo como de la estación meteorológica automática. Al revisar los datos proporcionados se obtuvieron más de 5 tormentas máximas por cada año en cada lugar de estudio.

4.2.4. Recolección de información de lluvia horaria

Una vez obtenidas las fechas de los eventos máximos para cada año del que se tenía registro se revisaron los datos del pluviógrafo y estación automática. Los datos del Observatorio meteorológico de la Ciudad de México, Cuernavaca y Tapachula se solicitaron al Servicio Meteorológico Nacional.

Se revisaron los pluviogramas y datos solicitados de las estaciones automáticas. Para cada año se eligieron las tormentas cuya duración fuera entre 5-7 horas las que se consideraron de 6 horas; y de 20 horas en adelante fueron consideradas de 24 horas. El criterio de selección fue que la lámina total superara los 20 mm, a excepción del Observatorio meteorológico de Tapachula en el cual la lámina total supera los 30 mm debido a que solo se tienen láminas mayores, para este sitio se retomaron algunas tormentas revisadas por Morales (2014) tanto para 24 y 6 horas de duración. Para la estación Chapingo se retomaron las tormentas revisadas por Márquez y Mendoza (2015).

4.2.5. Análisis de la información horaria recolectada

Para realizar la comparación con los coeficientes de Huff, el método del Bloque Alternativo, el método de Yen y Chow, y el Servicio de Conservación de Suelos, se analizaron eventos extremos con duraciones de 24 y 6 horas.

Del total de las tormentas de 24 y 6 horas de duración recabadas se realizó un promedio de la precipitación, así para cada duración se obtuvo una precipitación promedio. La precipitación promedio obtenida fue la referencia para seleccionar las tormentas críticas de 24 y 6 horas de duración que fueron evaluadas. Se seleccionaron las tormentas cuya precipitación total fuese mayor a la media de cada duración. Este procedimiento se realizó para cada sitio de estudio.

La metodología para la realización de las curvas IDF con los datos recolectados, consistió en primer lugar en obtener las alturas máximas de todas las tormentas, para diferentes duraciones: 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60 minutos y para 2, 3, 4, 5, 10, 15 y 24 horas.

4.2.6. Obtención de las Curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF)

Una vez que se obtuvieron las alturas máximas de las tormentas se procede a seguir la metodología empleada por Aparicio (2015) para la estimación de las curvas IDF. La cual consiste en obtener las alturas máximas anuales y posteriormente, las intensidades a partir de las alturas máximas (ecuación 12), la altura en milímetros se dividió entre su respectivo tiempo en horas. Las intensidades se ordenaron de mayor a menor, se calculó el período de retorno para cada dato.

$$Intensidad = \frac{mm}{\left(\frac{min}{60}\right)} = mm/h \quad (12)$$

El periodo de retorno no se obtuvo de forma empírica como en la metodología empleada por Aparicio (2015). Para cada serie de datos de intensidad pertenecientes a una determinada duración se obtuvo una distribución de probabilidad (Anexo 4) aplicando la prueba de bondad y ajuste de Kolmogorov-Smirnov, posteriormente se calculó el periodo de retorno para cada uno de los datos de intensidad.

La probabilidad de excedencia se calculó con la ecuación 13.

$$P(X \geq x) = 1 - F(x) = 1 - P(X \leq x) \quad (13)$$

El inverso de la probabilidad de excedencia es el periodo de retorno, ecuación 14.

$$T = \frac{1}{P(X \geq x)} \quad (14)$$

Con los periodos de retorno obtenidos, las intensidades de lluvia y la duración se procedió a obtener los parámetros necesarios de las ecuaciones 15, 16 y 17.

$$\sum y = Na_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 \quad (15)$$

$$\sum (x_1 y) = a_0 \sum x_1 + a_1 \sum x_1^2 + a_2 \sum (x_1 x_2) \quad (16)$$

$$\sum (x_2 y) = a_0 \sum x_2 + a_1 \sum (x_1 x_2) + a_2 \sum (x_2^2) \quad (17)$$

Donde N es el número de datos y las incógnitas son a_0 , a_1 y a_2 . x_1 , x_2 y y son respectivamente, los logaritmos del periodo de retorno, la duración y la intensidad, obtenidos de un registro de precipitación. Una vez calculados los coeficientes a_0 , a_1 y a_2 se obtienen los valores de los parámetros k , m y n ;

$$k = 10^{a_0}; \quad m = a_1; \quad n = a_2$$

Una vez obtenidos los valores es posible evaluar los parámetros k , m y n de la ecuación 18.

$$i = \frac{kT^m}{d^n} \quad (18)$$

Donde: i es la intensidad de la precipitación, en milímetros/hora; T es el periodo de retorno, en años; y d es la duración de la lluvia, en minutos, k es una constante obtenida de las ecuaciones 15, 16 y 17 al resolver el sistema de ecuaciones.

4.2.7. Comparación de las intensidades de las isoyetas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) con las obtenidas mediante la ecuación IDF.

Para realizar dicha comparación se descendieron los mapas de isoyetas de intensidad de la SCT (2017) para cada sitio de estudio, de estas se obtuvieron los datos de intensidad de 5, 10, 20, 30, 60, 120 y 240 minutos para periodos de retorno de 10, 20, 25, 50 y 100 años.

Con la ecuación IDF se obtuvieron las intensidades para las duraciones y periodos de retorno mencionados anteriormente. La comparación se realizó mediante los estadísticos de error relativo, cuadrado medio del error y el teorema de Chevysheb.

4.2.8. Obtención de las curvas masa

Las curvas masa se obtuvieron directamente de los pluviogramas y de los datos de las estaciones automáticas. Se tomaron datos a cada 10 minutos para construir la curva masa, a partir de las cuales se obtuvieron las alturas de precipitación requeridas por cada método de tormenta diseño.

4.2.9. Cuartiles de Huff con duración de 6 y 24 horas

Los coeficientes propuestos por Huff son adimensionales como ya se ha mencionado, tanto el tiempo como la altura de precipitación y se muestran en el Cuadro 1. Los valores van desde cero hasta uno.

Los coeficientes de tiempo se multiplicaron, por la duración total de la tormenta, ya sea 6 o 24 horas. De este modo se obtuvieron tiempos nuevos. Lo anterior se repitió, ahora con los coeficientes de altura de precipitación. Teniendo la curva masa de la tormenta se obtuvieron las alturas de precipitación para cada tiempo resultante. De esta forma se construyó la curva masa, y como se trata de cuatro cuartiles, fueron cuatro curvas más una de la tormenta real.

Se realizó la comparación entre las curvas resultantes y la curva de la tormenta real mediante los estadísticos de Nash-Sutcliffe, el Error Relativo (ER) y el Error Medio Cuadrático (EMC).

4.2.10. Método del Servicio de Conservación de Suelos

Para las tormentas de 24 y 6 horas de duración se multiplica el valor de la precipitación total para el tiempo requerido con los coeficientes propuestos por el SCS y se obtienen los valores de precipitación de la tormenta real de acuerdo a los valores de tiempo propuestos por el método de tormenta sintética. Se utilizaron las tormentas Tipo IA y Tipo II.

4.2.11. Método del Bloque Alterno

El método del Bloque Alterno está basado en las curvas IDF, que ya se obtuvieron con anterioridad. Para llevar a cabo el método se eligió una duración de tormenta, un período de retorno y un intervalo de tiempo que divida la tormenta en partes iguales. Los pasos a seguir se muestran en el apartado 3.9. de la revisión de literatura. En resumen, con los datos requeridos se obtuvo lo siguiente:

1. Las intensidades para cada intervalo se obtuvieron de la ecuación IDF.
2. La intensidad se convirtió en lámina precipitada al multiplicarla por su respectivo tiempo en horas.
3. Se desacumularon los valores suponiendo que, dentro de los primeros 60 minutos más lluviosos se encuentran los 30 minutos más lluviosos, esto es dependiendo del intervalo de tiempo que se haya elegido.
4. Se construyó el hietograma de intensidades de la siguiente forma: en el centro se colocó la mayor precipitación registrada, a su derecha se colocó la precipitación registrada en el 2° intervalo más lluvioso, a la izquierda, la registrada en el 3er intervalo más lluvioso, a la derecha el 4° y así sucesivamente.

La curva masa se obtuvo acumulando los valores del hietograma de intensidades obtenido anteriormente. En el eje de las abscisas se encuentra el tiempo en minutos, en el eje de las ordenadas, la precipitación o lámina acumulada en milímetros.

La curva masa obtenida se comparó con la tormenta real mediante los estadísticos descritos en el apartado 3.11.

4.2.11. Método de Yen y Chow

Para la elaboración del hietograma triangular se establecieron los siguientes parámetros:

Periodo de retorno: El periodo de retorno está en función del tipo de estructura que se va a diseñar. El periodo de retorno que se eligió para este trabajo fue de 50 años para las tormentas con duración de 6 horas y 500 años para las tormentas con duración de 24 horas ya que las tormentas analizadas en esta investigación son extremas.

Duración de la tormenta: Se analizaron dos duraciones de tormenta, 24 y 6 horas, dichas duraciones permitieron la comparación con los demás métodos de elaboración de la tormenta sintética.

Coefficiente de avance de la tormenta (r): Se obtuvieron dos coeficientes de avance, el primero corresponde a las tormentas con duración de 6 horas y el segundo coeficiente que se calculó fue el correspondiente a las tormentas de 24 horas (Anexo 3). El procedimiento de cálculo que se empleó para dichos coeficientes fue el siguiente:

- Para cada tormenta se tiene el tiempo y lámina total, así como la duración de cada intervalo y la lámina precipitada por cada intervalo de tiempo.
- Se localizó el mayor incremento de lámina precipitada y se ubicó el tiempo acumulado correspondiente a dicho incremento.
- El valor del paso anterior se dividió entre la duración total de la tormenta. De esta forma se obtuvo un coeficiente para una tormenta.
- El procedimiento se repite para el resto de las tormentas de la misma duración. Para cada tormenta se obtuvo un coeficiente de avance de tormenta.
- Para obtener un coeficiente representativo de todas las tormentas de seis horas, bastó con promediar los coeficientes.

Para las tormentas de 24 horas se repitió el procedimiento anterior con su respectiva duración.

Intensidad de lluvia: La intensidad de lluvia empleada se obtuvo de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia que se elaboraron anteriormente.

4.2.11.1. Elaboración del hietograma triangular

Posteriormente se procedió a calcular los parámetros que caracterizan el hietograma triangular, tales como la precipitación total, el tiempo a la intensidad máxima, tiempo de recesión y la intensidad máxima. Las fórmulas utilizadas se describen en el apartado 3.10., específicamente en las ecuaciones (1) y (2) y se ilustran en la Figura 9.

4.2.12. Comparación estadística

La comparación estadística se realizó mediante el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, el Error Medio Cuadrático y el Error Relativo, se realizó una comparación entre los valores observados o reales y los estimados. La comparación estadística se realizó para cada método que se analizó y por cada evento.

Tomando como referencia a la Eficiencia de Nash-Sutcliffe, se establecieron los rangos para la toma de decisiones en los resultados como se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Rangos establecidos de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe.

E	Ajuste
< 0	Malo
0.0-0.3	Deficiente
0.3-0.5	Satisfactorio
0.5-0.8	Bueno
0.8-1.0	Excelente

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Número de tormentas por mes

5.1.1. Estación meteorológica Chapingo

Se obtuvieron datos de tormentas de diferente duración en el período 1977-2015, desde 0.5 horas hasta 24 horas. Los datos de las tormentas que se tienen cuentan con láminas mayores a 20 mm, tanto en 6 como en 24 horas de duración. Se recolectó un total de 245 tormentas, se clasificaron de acuerdo a su duración total y a los meses de mayor incidencia de lluvia, un resumen se presenta en el Cuadro 4 y su distribución se muestra en la Figura 14.

Cuadro 4. Distribución mensual de tormentas para la estación meteorológica Chapingo.

Mes	No. de tormentas
Enero	2
Febrero	0
Marzo	0
Abril	13
Mayo	15
Junio	46
Julio	58
Agosto	50
Septiembre	38
Octubre	21
Noviembre	2
Diciembre	0
Total	245

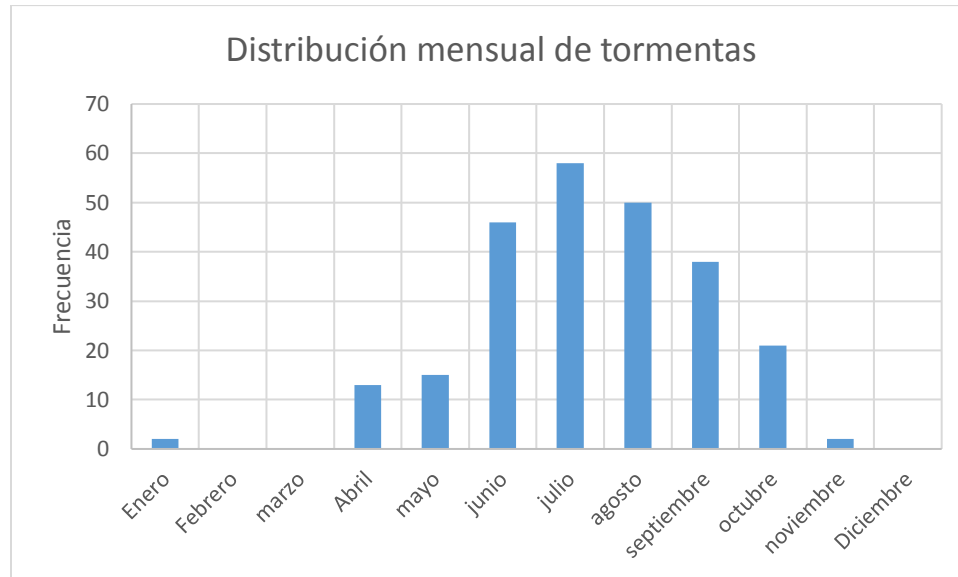


Figura 14. Número de eventos de lluvia por mes para la estación meteorológica Chapingo.

En la Figura 14 se observa que en los meses de julio y agosto es en los que se presenta con mayor frecuencia las lluvias más intensas, seguidos de los meses de junio y septiembre, mientras que en los meses de febrero, marzo y diciembre no se presentan.

5.1.2. Observatorio meteorológico de la Ciudad de México

Se obtuvieron datos de tormentas de diferente duración en el período 1996-2015, desde 0.5 horas hasta 24 horas. Los datos de las tormentas que se tienen cuentan con láminas mayores a 20 mm, tanto en 6 como en 24 horas de duración. Se recolectó un total de 84 tormentas, se clasificaron de acuerdo a su duración total y a los meses de mayor incidencia de lluvia, un resumen se presenta en el Cuadro 5 y su distribución se muestra en la Figura 15.

Cuadro 5. Distribución mensual de tormentas para el Observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Mes	No. De tormentas
Enero	0
Febrero	1
Marzo	2
Abril	1
Mayo	14
Junio	14
Julio	16
Agosto	13

Septiembre	16
Octubre	5
Noviembre	2
Diciembre	0
Total	84

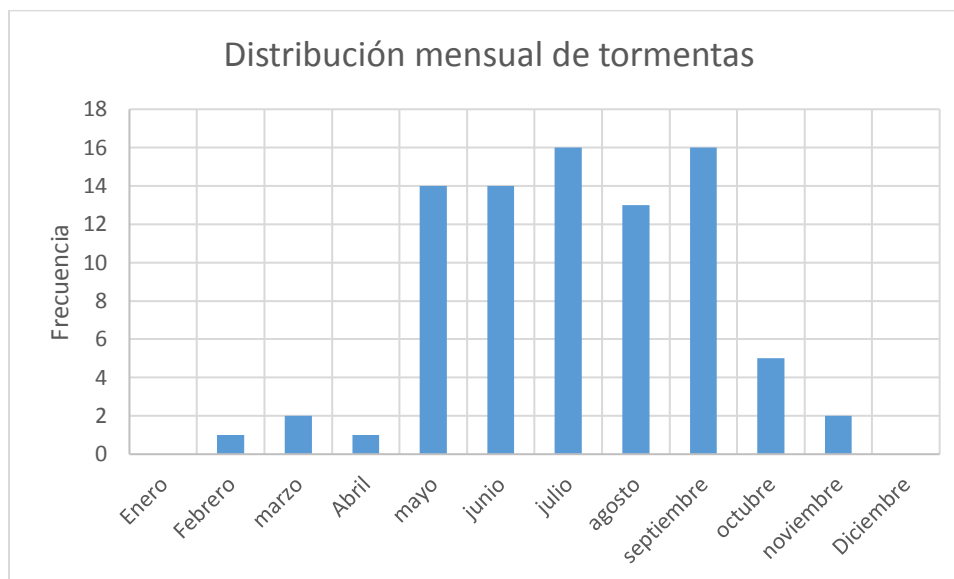


Figura 15. Número de eventos de lluvia por mes para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

En la Figura 15 se observa que en los meses de julio y septiembre es en los que se presenta con mayor frecuencia las lluvias más intensas, seguidos de los meses de mayo y junio, mientras que en los meses de enero y diciembre no se presentan.

5.1.3. Observatorio meteorológico de Cuernavaca

Se obtuvieron datos de tormentas de diferente duración para el período 1996-2015, desde 0.5 horas hasta 24 horas. Los datos de las tormentas que se tienen cuentan con láminas mayores a 20 mm, tanto en 6 como en 24 horas de duración. Se recolectó un total de 62 tormentas, se clasificaron de acuerdo a su duración total y a los meses de mayor incidencia de lluvia (Cuadro 6), su distribución se muestra en la Figura 16.

Cuadro 6. Distribución mensual de tormentas para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Mes	No. de tormentas
enero	0
febrero	1
marzo	1
abril	0
mayo	0
junio	17
julio	15
agosto	11
septiembre	16
octubre	2
noviembre	0
diciembre	0
Total	62

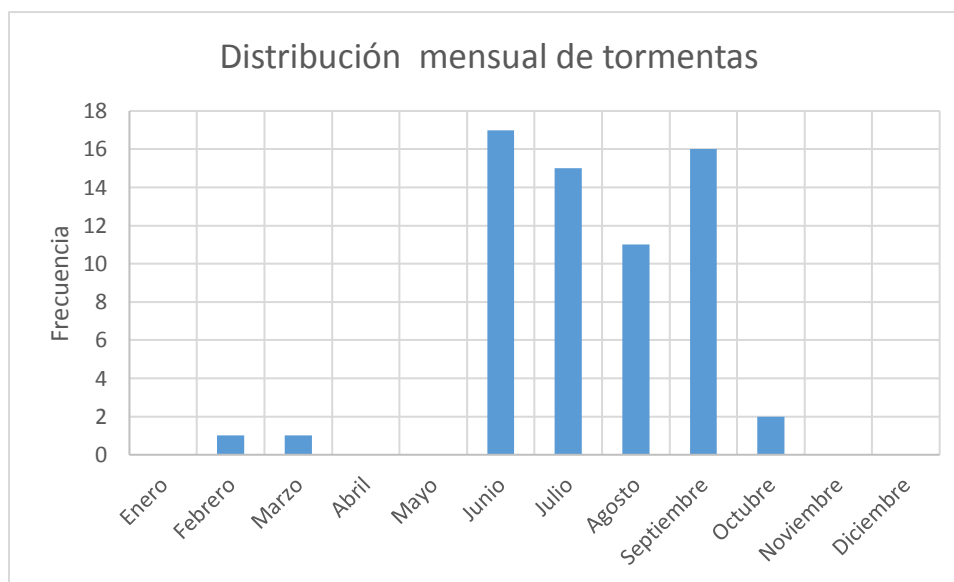


Figura 16. Distribución mensual de la lluvia para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

En la Figura 16 se observa que el mes de junio es en el que se presenta con mayor frecuencia las lluvias más intensas, seguido del mes de septiembre, mientras que en los meses de enero, abril, mayo, noviembre y diciembre no se presentan.

5.1.4. Observatorio meteorológico de Tapachula

Se obtuvieron datos de tormentas de diferente duración en el período 1990-2011, desde 0.5 horas hasta 24 horas, las cuales cumplen el criterio de máxima intensidad en menor tiempo. Los datos de las tormentas que se tiene cuentan con láminas mayores a 30 mm, tanto en 6 como en 24 horas de duración, esto debido a la información recabada. Se tiene un total de 89 tormentas, se clasificaron de acuerdo a su duración total y a los meses de mayor incidencia de lluvia (Cuadro 7), su distribución se muestra en la Figura 17.

Cuadro 7. Distribución mensual de tormentas para el observatorio meteorológico de Tapachula.

Mes	No. de tormentas
Enero	0
Febrero	0
Marzo	0
Abril	2
Mayo	5
Junio	15
Julio	18
Agosto	15
Septiembre	20
Octubre	12
Noviembre	2
Diciembre	0
Total	89

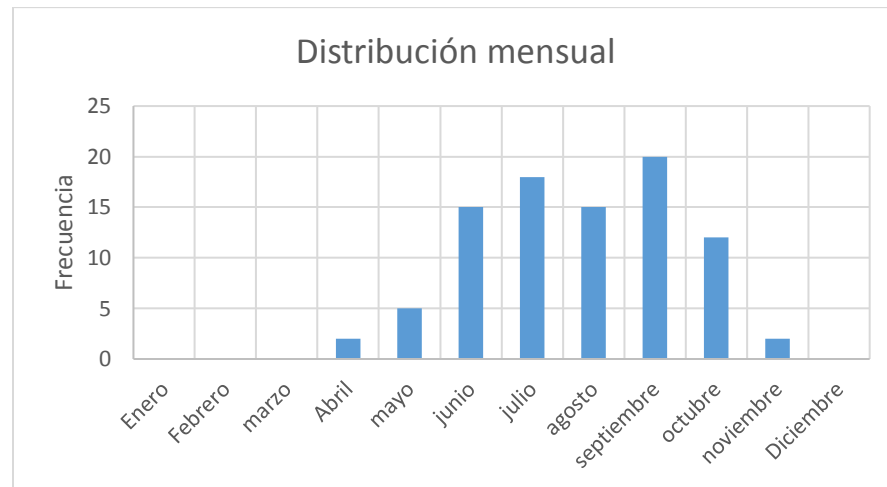


Figura 17. Número de eventos de lluvia por mes en el observatorio meteorológico de Tapachula.

En la Figura 17 se observa que el mes de septiembre es en el que se presenta con mayor frecuencia las lluvias más intensas, seguido del mes de julio mientras que en los meses de febrero, marzo y diciembre no se presentan.

5.2. Clasificación de las tormentas de acuerdo a su duración

5.2.1. Estación meteorológica Chapingo

En la Figura 18 se observa que la mayor frecuencia de tormentas se da en el intervalo de 0-2 horas de duración, seguido del intervalo de 2-5 horas.

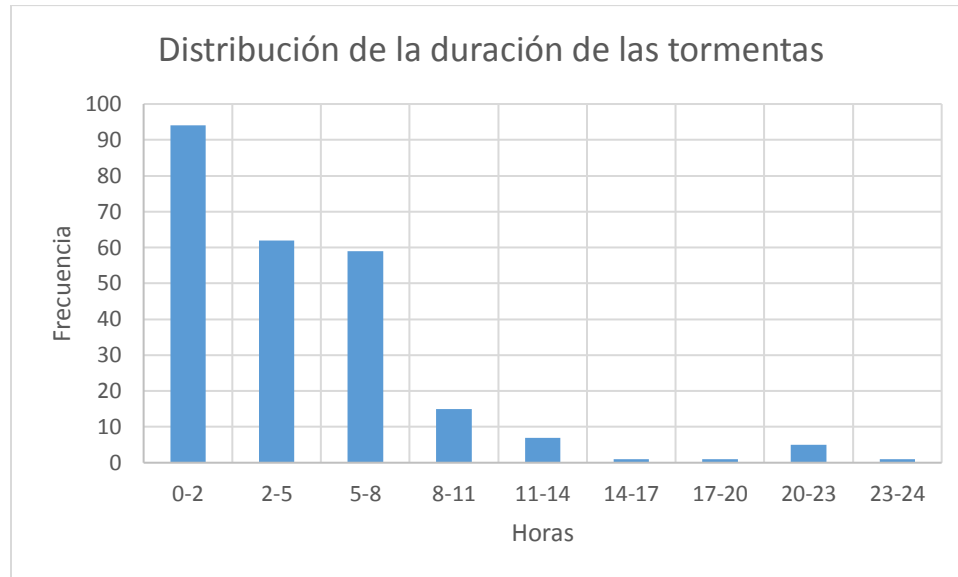


Figura 18. Clasificación de los eventos de acuerdo a su duración en la estación meteorológica Chapingo.

5.2.2. Observatorio meteorológico de la Ciudad de México

En la Figura 19 se observa que la mayor frecuencia de tormentas se da en el intervalo de 2-3 y 3-4 horas de duración, seguido del intervalo de 4-5 horas.

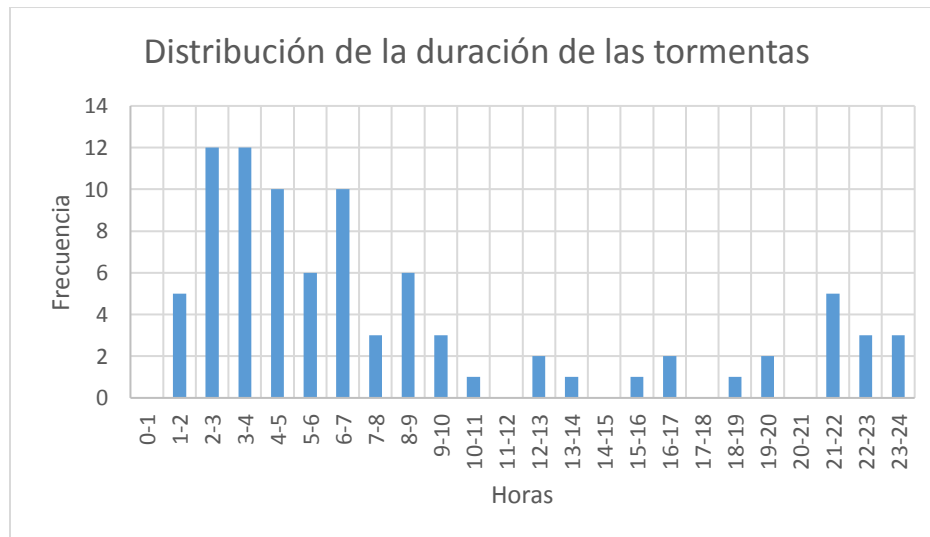


Figura 19. Clasificación de los eventos de acuerdo a su duración en el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

5.2.3. Observatorio meteorológico de Cuernavaca

En la Figura 20 se observa que la mayor frecuencia de tormentas se da en el intervalo de 23-24 horas de duración.

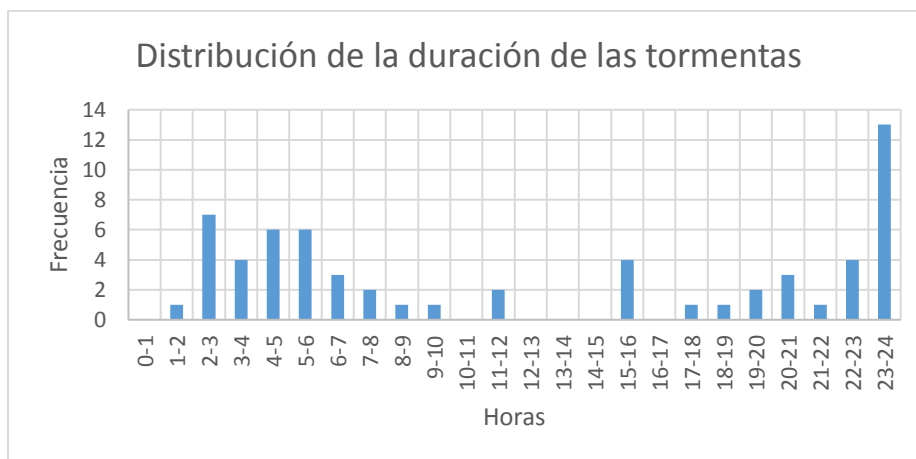


Figura 20. Clasificación de los eventos de acuerdo a su duración en el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

5.2.4. Observatorio meteorológico de Tapachula

En la Figura 21 se observa que la mayor frecuencia de tormentas se da en el intervalo de 5-6 horas de duración, seguido del intervalo de 4-5 horas.

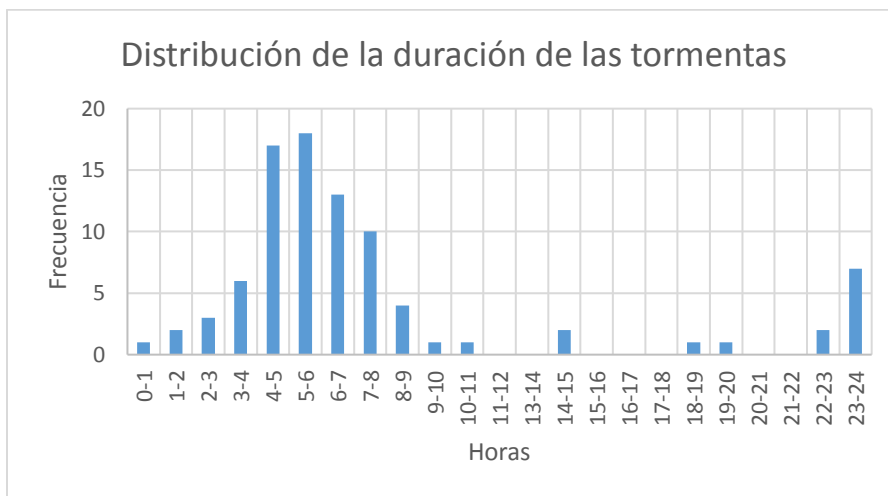


Figura 21. Clasificación de los eventos de acuerdo a su duración en el observatorio meteorológico de Tapachula.

5.3. Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF)

5.3.1. Estación meteorológica Chapingo

5.3.1.1. Actualización de las curvas IDF para la estación meteorológica Chapingo

Se utilizaron los datos tomados del pluviógrafo y se complementaron con los datos de la estación automática para el año 2015 (Cuadro 8). Sólo se muestran los datos de dicho periodo, sin embargo, se utilizan datos desde 1977 para la actualización de las curvas. Los datos de 1977-2014 se muestran en el Anexo A. 1. 1.

Cuadro 8. Alturas máximas de precipitación en milímetros para los datos de la estación meteorológica Chapingo.

Año	Duración, minutos														
	5	10	15	20	30	40	50	60	120	180	240	300	600	900	1440
2015	7.0	13.5	18.4	23.9	31.0	37.1	44.2	48.3	66.9	67.8	72.3	74.5	75.7	77.0	77.3

Las alturas de precipitación se convirtieron en intensidades, de acuerdo con Aparicio (2015) se dividen las alturas de precipitación entre su respectivo tiempo, y los tiempos se convierten en horas, los resultados se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Intensidades máximas registradas en la estación Chapingo para el año 2015 en mm/h.

Año	Duración, minutos														
	5	10	15	20	30	40	50	60	120	180	240	300	600	900	1440
2015	84.0	81.0	73.6	71.7	62.0	55.7	53.0	48.3	33.5	22.6	18.1	14.9	7.6	5.1	3.2

El siguiente paso fue calcular el periodo de retorno para cada dato de intensidad de 1977-2015 con la metodología mencionada anteriormente en el apartado 4.2.6. El periodo de retorno calculado para cada dato de intensidad se muestra en el Anexo 2 (A.2.1), donde la primera columna corresponde a la duración de 5 minutos, a un lado el período de retorno de esta duración.

Como explica Aparicio (2015), con los datos del Anexo 2 (A.2.1) se construye un sistema de ecuaciones que puede resolverse de forma matricial con el propósito de obtener los parámetros: k , m y n .

Los valores de los parámetros obtenidos para la ecuación IDF son:

$$k = 10^{2.60} = 395.60$$

$$m = 0.34$$

$$n = 0.80$$

Al sustituir los parámetros anteriores se tiene la ecuación 19 para los datos de la estación Chapingo en el periodo 1977-2015:

$$i = \frac{395.60T^{0.34}}{d^{0.8}} \quad (19)$$

Donde: i es la intensidad de la precipitación, en milímetros/hora; T es el periodo de retorno, en años; y d es la duración de la lluvia, en minutos.

Con la ecuación 19, se construyeron las curvas IDF, para varios años de estudio y diferentes duraciones, tal como se muestra en la Figura 22.

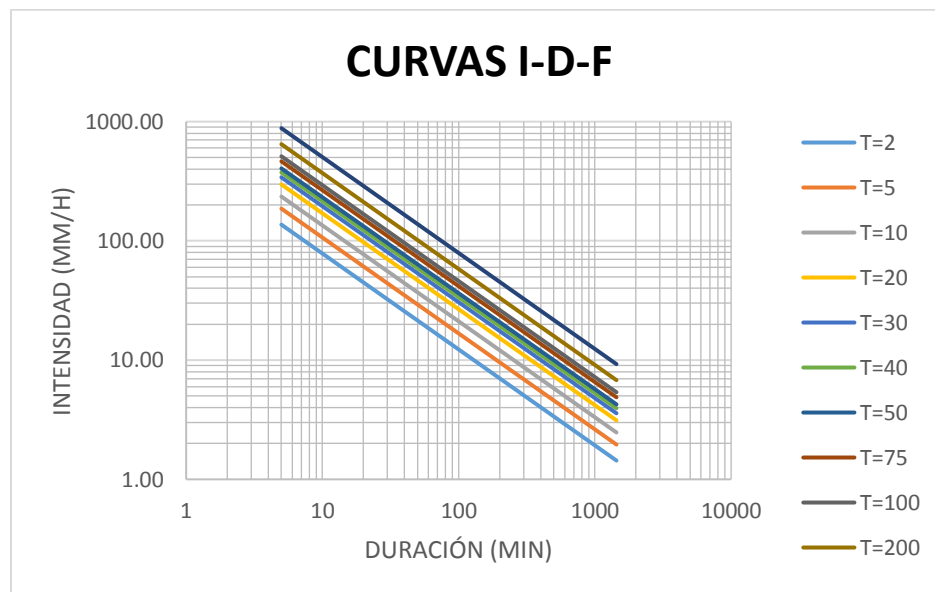


Figura 22. Curvas IDF elaboradas con los datos de la estación meteorológica Chapingo.

De acuerdo con los resultados obtenidos los parámetros k y m de la ecuación IDF difieren un poco de los obtenidos por Márquez y Mendoza (2015), esto puede deberse a que se anexo

una tormenta máxima histórica en la serie de datos. En el trabajo de Márquez y Mendoza (2015) los datos analizados se ajustaron a una distribución tipo Gumbel, en la presente investigación se obtuvo una distribución diferente para cada duración (Anexo 5). Al calcular los datos de intensidad con la ecuación IDF obtenida en este trabajo y compararlos con los obtenidos con la ecuación IDF propuesta por Márquez y Mendoza (2015) se observaron grandes diferencias, esto para tormentas de corta duración, en el caso de las tormentas mayores a una hora la diferencia fue mínima.

5.3.2. Observatorio meteorológico de la Ciudad de México

Se utilizaron los datos tomados del pluviógrafo y se complementaron con los datos de la estación automática. La ecuación IDF se realizó para duraciones a partir de una hora hasta 24 debido a que en algunos años no se contaba con información correspondiente a 5 y 50 minutos. El periodo analizado es de 1996 a 2015, de los cuales en algunos años no se tiene registros, el total de años analizados fue de 13, las alturas máximas de precipitación correspondientes a dicho periodo se presentan en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Alturas máximas de precipitación para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México en milímetros.

Años	Duración, minutos							
	60	120	180	240	300	600	900	1440
1996	36.8	36.9	36.9	36.9	38.3	40.9	40.9	40.9
1999	44.6	44.6	45.4	46.6	46.6	46.6	46.6	46.6
2004	27.8	29.0	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4	30.4
2006	41.66	50.8	63.75	65.53	68.32	68.32	68.32	68.32
2007	51.6	51.8	51.8	51.8	51.8	51.8	51.8	51.8
2008	23.88	25.91	32.25	32.5	35.04	38.34	38.34	38.34
2009	26.8	27.8	28.5	37	38.5	39	43.4	43.4
2010	21.84	23.37	45.21	45.72	47.5	48.52	48.52	48.52
2011	24	38.1	38.35	38.6	38.85	41.9	49.1	57.1
2012	26.67	29.46	32.77	32.77	37.59	38.6	42.92	43.93
2013	46.74	46.7	46.7	57.91	57.91	68.83	76.19	76.19
2014	70.12	125.49	71.88	97.54	97.54	105.69	105.69	109.97
2015	24.89	35.56	35.81	36.32	36.32	36.32	36.32	38.34

Las alturas de precipitación se convirtieron en intensidades, de acuerdo con Aparicio (2015). Los resultados se muestran en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Intensidades máximas registradas en el observatorio de la Ciudad de México en mm/h.

Año	Duración, minutos							
	60	120	180	240	300	600	900	1440
1996	36.80	18.45	12.30	9.23	7.66	4.09	2.73	1.70
1999	44.60	22.30	15.13	11.65	9.32	4.66	3.11	1.94
2004	27.80	14.50	10.13	7.60	6.08	3.04	2.03	1.27
2006	41.66	25.40	21.25	16.38	13.66	6.83	4.55	2.85
2007	51.60	25.90	17.27	12.95	10.36	5.18	3.45	2.16
2008	23.88	12.96	10.75	8.13	7.01	3.83	2.56	1.60
2009	26.80	13.90	9.50	9.25	7.70	3.90	2.89	1.81
2010	21.84	11.69	15.07	11.43	9.50	4.85	3.23	2.02
2011	24.00	19.05	12.78	9.65	7.77	4.19	3.27	2.38
2012	26.67	14.73	10.92	8.19	7.52	3.86	2.86	1.83
2013	46.74	23.35	15.57	14.48	11.58	6.88	5.08	3.17
2014	70.12	62.75	23.96	24.39	19.51	10.57	7.05	4.58
2015	24.89	17.78	11.94	9.08	7.26	3.63	2.42	1.60

El siguiente paso fue calcular el periodo de retorno para cada dato de intensidad de 1996-2015 con la metodología mencionada en el apartado 4.2.6. El periodo de retorno calculado para cada dato de intensidad se muestra en el Anexo 2 (A.2.2), donde la primera columna corresponde a la duración de 5 minutos, a un lado el período de retorno de esta duración.

Como explica Aparicio (2015), con los datos del Anexo 2 (A.2.2) se construye un sistema de ecuaciones que puede resolverse de forma matricial con el propósito de obtener los parámetros: k, m y n.

Por lo tanto los valores de los parámetros obtenidos para la ecuación IDF son:

$$k = 10^{2.96} = 914.06$$

$$m = 0.32$$

$$n = 0.87$$

Al sustituir los parámetros anteriores se obtuvo la ecuación 20 para los datos del observatorio meteorológico de la Ciudad de México a partir de una a 24 horas para el periodo 1996-2015:

$$i = \frac{914.06T^{0.32}}{d^{0.87}} \quad (20)$$

Donde: i es la intensidad de la precipitación, en milímetros/hora; T es el periodo de retorno, en años; y d es la duración de la lluvia, en minutos.

Con la ecuación 20, se construyeron las curvas IDF, para varios años de estudio y diferentes duraciones, tal como se muestra en la Figura 23.

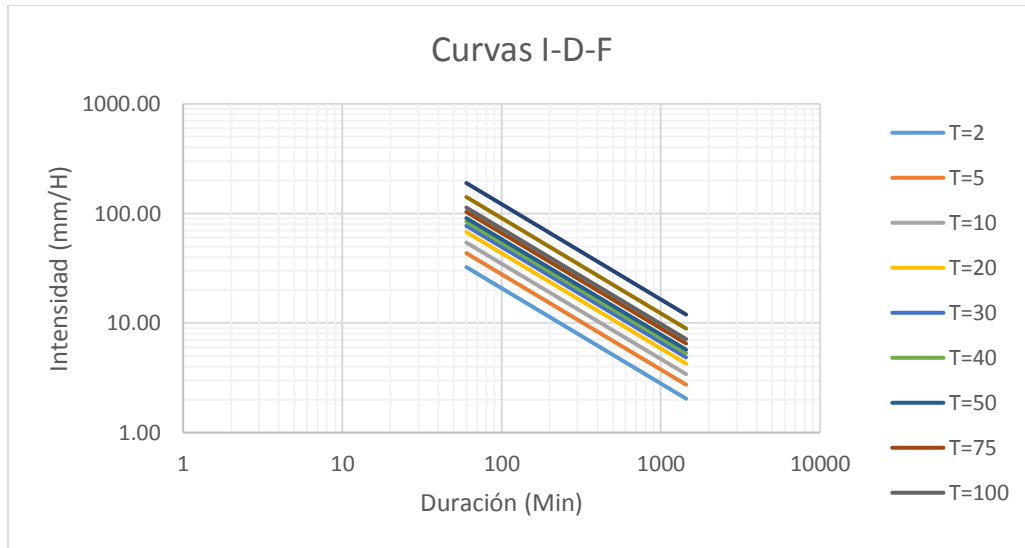


Figura 23. Curvas IDF elaboradas con datos del Observatorio Meteorológico de la Ciudad de México.

De acuerdo con los resultados obtenidos los parámetros k , m y n de la ecuación IDF no son tan confiables ya que la serie de datos analizados es un periodo muy corto. Los datos analizados fueron de una a 24 horas ya que no se contaba con datos de 10 a 50 minutos, a pesar de que el sitio de elección es la unidad central donde se concentra la información a nivel nacional. Lamentablemente en el lugar no se cuenta con periodos de registro amplios ya que con el paso del tiempo se han perdido.

5.3.3. Observatorio Meteorológico de Cuernavaca

La mayor parte de los datos utilizados fueron tomados de la estación meteorológica automática ya que no se contaba con un registro amplio de pluviógrafo. El periodo analizado fue de 2000 a 2016, el total de años analizados fue de 16, las alturas máximas de precipitación correspondientes a dicho periodo se presentan en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Alturas máximas de precipitación para el observatorio de Cuernavaca en milímetros.

Año	Duración, Minutos														
	5	10	15	20	30	40	50	60	120	180	240	300	600	900	1440
2000	3.8	7.6	8.6	9.9	11.4	13.7	14.2	16.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.8	17.8	22.6
2001	6.0	11.9	16.0	18.5	24.9	26.9	30.0	30.2	30.7	58.2	59.2	60.2	60.2	74.7	77.2
2002	1.7	3.3	4.3	5.8	6.9	8.1	8.1	9.9	14.2	17.5	19.5	20.5	20.5	20.5	20.5
2003	4.8	9.7	10.2	11.4	15.8	18.3	18.5	19.6	23.9	24.1	24.1	24.1	26.4	26.4	44.2
2004	1.1	2.3	3.3	4.3	6.4	8.4	10.4	12.2	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8
2005	8.1	16.3	18.3	24.4	38.1	42.4	42.4	42.9	45.7	48.8	51.8	54.6	64.5	64.5	64.5
2006	6.0	11.9	13.9	16.8	24.6	32.0	32.0	37.4	37.4	46.7	46.7	46.7	46.7	46.7	50.8
2007	6.9	13.7	13.7	18.0	22.4	28.2	31.8	33.3	35.8	36.8	36.8	41.9	44.2	44.2	69.1
2008	2.2	4.4	6.4	8.8	13.2	17.6	21.8	26.4	40.6	67	77.4	79.2	79.2	79.2	79.2
2009	12.6	25.2	25.2	25.2	42.6	42.6	42.6	42.6	42.6	42.6	42.6	51.0	60.6	60.6	60.6
2010	3.4	6.9	8.9	11.2	11.2	16.5	19.3	19.3	25.2	25.2	35.8	35.8	39.9	57.9	60.7
2011	4.7	9.4	9.4	10.93	13.97	13.97	20.32	21.59	28.7	37.34	41.66	46.23	46.73	46.73	46.73
2013	8.8	17.5	22.5	25.2	29.0	36.6	40.6	43.2	48.3	50.8	50.8	50.8	50.8	50.8	50.8
2014	8.5	17	18	19.6	29.4	37.2	43.8	50.6	82.6	86.4	89.6	91	91.2	91.2	91.2
2015	9.1	18.2	23.2	35.4	35.4	43.4	51	53.8	57.6	59.6	59.6	59.6	62.2	69.6	70.4
2016	8.5	17	17.5	18.2	26.6	30.4	31.2	31.6	34.8	41	48.8	55	56	56	56

Las alturas de precipitación se convirtieron en intensidades, de acuerdo con Aparicio (2015).

Los resultados se muestran en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Intensidades máximas registradas en el observatorio de meteorológico de Cuernavaca en mm/h.

Año	Duración, minutos														
	5	10	15	20	30	40	50	60	120	180	240	300	600	900	1440
2000	45.7	45.7	34.5	29.7	22.9	20.6	17.1	16.5	8.8	5.8	4.4	3.5	1.8	1.2	0.9
2001	71.6	71.6	64.0	55.6	49.8	40.4	36.0	30.2	15.4	19.4	14.8	12.0	6.0	5.0	3.2
2002	19.8	19.8	17.2	17.5	13.7	12.2	9.8	9.9	7.1	5.8	4.9	4.1	2.1	1.4	0.9
2003	57.9	57.9	40.6	34.3	31.5	27.4	22.2	19.6	11.9	8.0	6.0	4.8	2.6	1.8	1.8
2004	13.7	13.7	13.2	13.0	12.7	12.6	12.5	12.2	9.4	6.3	4.7	3.8	1.9	1.3	0.8
2005	97.6	97.6	73.0	73.2	76.2	63.6	50.9	42.9	22.9	16.3	13.0	10.9	6.5	4.3	2.7
2006	71.6	71.6	55.8	50.3	49.3	48.0	38.4	37.4	18.7	15.6	11.7	9.3	4.7	3.1	2.1
2007	82.3	82.3	54.9	54.1	44.7	42.3	38.1	33.3	17.9	12.3	9.2	8.4	4.4	2.9	2.9
2008	26.4	26.4	25.6	26.4	26.4	26.4	26.2	26.4	20.3	22.3	19.4	15.8	7.9	5.3	3.3
2009	151.2	151.2	100.8	75.6	85.2	63.9	51.1	42.6	21.3	14.2	10.7	10.2	6.1	4.0	2.5
2010	41.2	41.2	35.4	33.5	22.4	24.8	23.2	19.3	12.6	8.4	9.0	7.2	4.0	3.9	2.5
2011	56.4	56.4	37.6	32.8	27.9	21.0	24.4	21.6	14.4	12.4	10.4	9.2	4.7	3.1	1.9

2013	105.2	105.2	90.1	75.5	57.9	54.9	48.8	43.2	24.1	16.9	12.7	10.2	5.1	3.4	2.1
2014	102.0	102.0	72.0	58.8	58.8	55.8	52.6	50.6	41.3	28.8	22.4	18.2	9.1	6.1	3.8
2015	109.2	109.2	92.8	106.2	70.8	65.1	61.2	53.8	28.8	19.9	14.9	11.9	6.2	4.6	2.9
2016	102.0	102.0	70.0	54.6	53.2	45.6	37.4	31.6	17.4	13.7	12.2	11.0	5.6	3.7	2.3

El siguiente paso fue calcular el periodo de retorno para cada dato de intensidad de 1996-2015 con la metodología mencionada en el apartado 4.2.6. El periodo de retorno calculado para cada dato de intensidad se muestra en el Anexo 2 (A.2.3), donde la primera columna corresponde a la duración de 5 minutos, a un lado el período de retorno de esta duración.

Como explica Aparicio (2015), con los datos del Anexo 2 (A.2.3) se construye un sistema de ecuaciones que puede resolverse de forma matricial con el propósito de obtener los parámetros: k , m y n .

Por lo tanto los valores de los parámetros obtenidos para la ecuación IDF son:

$$k = 10^{2.26} = 181.82$$

$$m = 0.51$$

$$n = 0.64$$

Al sustituir los parámetros anteriores se obtuvo la ecuación 21 para los datos del observatorio meteorológico de Cuernavaca en el periodo 2000-2016:

$$i = \frac{181.82 T^{0.51}}{d^{0.64}} \quad (21)$$

Donde: i es la intensidad de la precipitación, en milímetros/hora; T es el periodo de retorno, en años; y d es la duración de la lluvia, en minutos.

Con la ecuación 21 se construyeron las curvas IDF, para varios años de estudio y diferentes duraciones, tal como se muestra en la Figura 24.

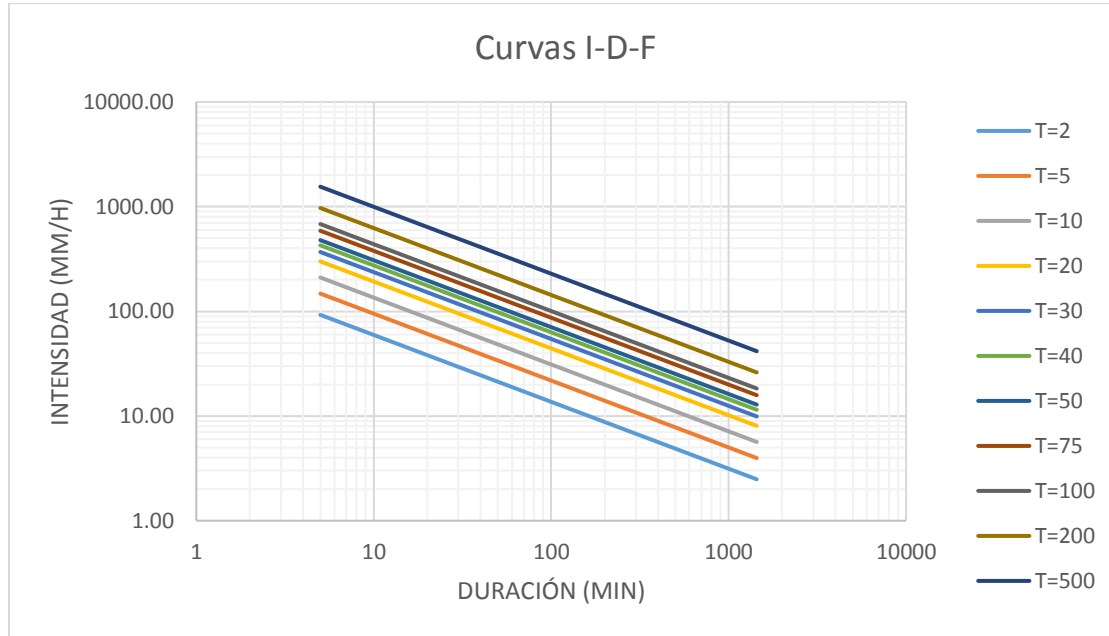


Figura 24. Curvas IDF elaboradas con los datos del observatorio meteorológico de Cuernavaca.

En este sitio a pesar de ser un Observatorio meteorológico tampoco se cuenta con gran cantidad de información, en especial de pluviógrafo ya que no se cuenta con este aparato, solo se nos pudo proporcionar datos de la estación estación automática.

5.3.4. Observatorio meteorológico de Tapachula

La mayor parte de los datos analizados fueron tomados de la estación meteorológica automática ya que no se contaba con un registro amplio de pluviógrafo. El periodo analizado fue de 1990 a 2011, aunque no se cuenta con algunos años de datos dentro del mismo periodo, el total de años analizados fue de 10. Las alturas máximas de precipitación correspondientes a dicho periodo se presentan en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Alturas máximas de precipitación para el observatorio meteorológico de Tapachula en milímetros.

Año	Duración, minutos														
	5	10	15	20	30	40	50	60	120	180	240	300	600	900	1440
1990	15	30	35	39.2	42.8	49.2	57.2	62.3	68.2	87.2	87.4	92.4	107	107	107
1992	14.7	29.4	30	35.6	45.7	54.5	68.4	73.9	81.7	88.5	89.3	89.3	89.3	89.3	89.3
1993	10.1	20.2	25	30.2	40.1	41.1	41.5	41.7	51.2	51.2	54	54	59.3	59.3	59.3
1994	8.9	17.8	17.8	21.2	23.5	31.1	32.3	32.6	42.9	44.2	50.5	53.4	53.4	53.4	53.4
2005	8.95	17.9	20	26.7	44.6	44.6	70.6	70.6	107.3	121.2	146.9	161.2	205.49	290.8	356.46
2006	7.25	14.5	20	26.4	32.5	38.6	41.6	42.1	42.4	45.4	53	67.2	72.4	72.4	72.4

2008	6.85	13.7	16	25.2	34.2	38.6	39.7	40	40.2	47.5	54.5	57	78.1	79.3	87.6
2009	5.8	11.6	15	31.3	22.3	24	34.7	34.7	34.7	48.3	49	49.4	52.7	65.7	76.5
2010	15.5	30.9	45	61.8	82.4	82.4	117.5	133.8	166.3	239.1	249	249	249	249	249
2011	20.7	31.3	35	47	61.5	71.9	92.4	92.4	123.5	131.9	139.3	147.7	149.4	149.4	149.4

Las alturas de precipitación se convirtieron en intensidades, de acuerdo con Aparicio (2015).
Los resultados se muestran en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Intensidades máximas registradas en el observatorio de meteorológico de Tapachula en mm/h.

AÑO	Duración, minutos														
	5	10	15	20	30	40	50	60	120	180	240	300	600	900	1440
1990	180.0	180.0	140.0	117.6	85.6	73.8	68.6	62.3	34.1	29.1	21.9	18.5	10.7	7.1	4.5
1992	176.4	176.4	120.0	106.8	91.4	81.8	82.1	73.9	40.9	29.5	22.3	17.9	8.9	6.0	3.7
1993	121.2	121.2	100.0	90.6	80.2	61.7	49.8	41.7	25.6	17.1	13.5	10.8	5.9	4.0	2.5
1994	106.8	106.8	71.2	63.6	47.0	46.7	38.8	32.6	21.5	14.7	12.6	10.7	5.3	3.6	2.2
2005	107.4	107.4	80.0	80.1	89.2	66.9	84.7	70.6	53.7	40.4	36.7	32.2	20.5	19.4	14.9
2006	87.0	87.0	80.0	79.2	65.0	57.9	49.9	42.1	21.2	15.1	13.3	13.4	7.2	4.8	3.0
2008	82.2	82.2	64.0	75.6	68.4	57.9	47.6	40.0	20.1	15.8	13.6	11.4	7.8	5.3	3.7
2009	69.6	69.6	60.0	93.9	44.6	36.0	41.6	34.7	17.4	16.1	12.3	9.9	5.3	4.4	3.2
2010	186.0	185.4	180.0	185.4	164.8	123.6	141.0	133.8	83.2	79.7	62.3	49.8	24.9	16.6	10.4
2011	248.4	187.8	140.0	141.0	123.0	107.9	110.9	92.4	61.8	44.0	34.8	29.5	14.9	10.0	6.2

El siguiente paso fue calcular el periodo de retorno para cada dato de intensidad de 1996-2015 con la metodología mencionada en el apartado 4.2.6. El periodo de retorno calculado para cada dato de intensidad se muestra en el Anexo 2 (A.2.3), donde la primera columna corresponde a la duración de 5 minutos, a un lado el período de retorno de esta duración.

Como explica Aparicio (2015), con los datos del Anexo 2 (A.2.4) se construye un sistema de ecuaciones que puede resolverse de forma matricial con el propósito de obtener los parámetros: k, m y n.

Como explica Aparicio (2015), con los datos anteriores, se obtienen las variables de estudio. Por lo tanto los valores de los parámetros obtenidos para la ecuación IDF son:

$$k = 10^{2.57} = 367.82$$

$$m = 0.51$$

$$n = 0.63$$

Al sustituir los parámetros anteriores se obtuvo la ecuación 22 para los datos del observatorio meteorológico de Tapachula en el periodo 1990-2011:

$$i = \frac{367.82 T^{0.51}}{d^{0.64}} \quad (22)$$

Donde: i es la intensidad de la precipitación, en milímetros/hora; T es el periodo de retorno, en años; y d es la duración de la lluvia, en minutos.

Con la ecuación 22 se construyeron las curvas IDF, para varios años de estudio y diferentes duraciones, tal como se muestra en la Figura 25.

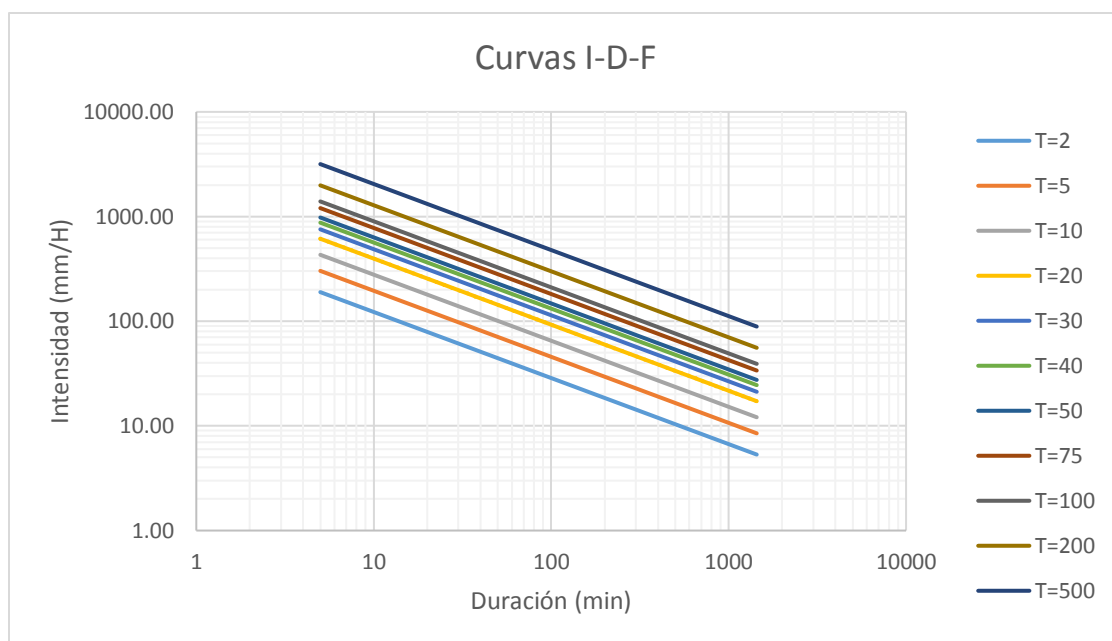


Figura 25. Curvas IDF elaboradas con los datos del observatorio meteorológico de Tapachula.

En este observatorio se cuenta con poca cantidad de información debido a que ya no se tienen registros de pluviógrafo recientes, solo se tiene algunos pluviogramas de años antiguos y son pocos. En el lugar se cuenta con una estación automática, la cual no funciona desde hace 5 años y no tienen acceso a los registros de años anteriores.

5.4. Comparación de las intensidades obtenidas mediante las isoyetas de la SCT y la ecuación IDF de cada sitio de estudio

5.4.1. Estación meteorológica Chapingo

En los cuadros 16 y 17 se muestran las intensidades obtenidas de las isoyetas de la SCT (2017b) y las obtenidas con la ecuación IDF.

Cuadro 16. Intensidades obtenidas de las isoyetas de la Secretaria de Caminos y Transportes (SCT) para la estación meteorológica Chapingo.

T (Años)	Duración, minutos						
	5	10	20	30	60	120	240
10	141	98	70	57	36	20	11
20	155	107	76	63	40	22	13
25	159	110	78	64	41	22	13
50	171	117	83	69	44	24	14
100	182	124	87	73	47	26	15

Cuadro 17. Intensidades obtenidas con la ecuación IDF para la estación meteorológica Chapingo.

T (Años)	Duración , minutos						
	5	10	20	30	60	120	240
10	238.83	137.17	78.78	56.96	32.71	18.79	10.79
20	302.29	173.62	99.72	72.10	41.41	23.78	13.66
25	326.12	187.31	107.58	77.78	44.67	25.66	14.74
50	412.79	237.09	136.17	98.45	56.54	32.48	18.65
100	522.49	300.09	172.36	124.61	71.57	41.11	23.61

En el cuadro 18 se observa que existe variación entre las intensidades obtenidas con las isoyetas y la ecuación IDF del sitio Chapingo, así mismo, aplicando el teorema de Chebyshev (Ecuación 9) y suponiendo una $k=2$ se tiene que la probabilidad de que los datos se encuentren dentro del intervalo $(\mu \pm 2\sigma)$ que se muestran en dicho cuadro es mayor o igual al 75%. En la Figura 26 se observa la comparación de las intensidades obtenidas de la isoyetas y la Ecuación IDF de la estación meteorológica Chapingo.

Cuadro 18. Valores de error relativo y cuadrado medio del error obtenidos del análisis comparativo de los datos de intensidad para la estación meteorológica Chapingo.

T (Años)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	μ de los errores	$\mu \pm 2\sigma$	Probabilidad
10	28.37	43.19	-20.15	$(-106.5 < X < 66.2)$	0.75
20	56.42	66.81	66.81	$(-66.8 < X < 200.4)$	0.75
25	70.15	76.38	-42.41	$(-195.2 < X < 110.3)$	0.75
50	134.11	113.16	-67.17	$(-293.5 < X < 159.1)$	0.75
100	244.62	162.17	-100.26	$(-424.6 < X < 224.1)$	0.75

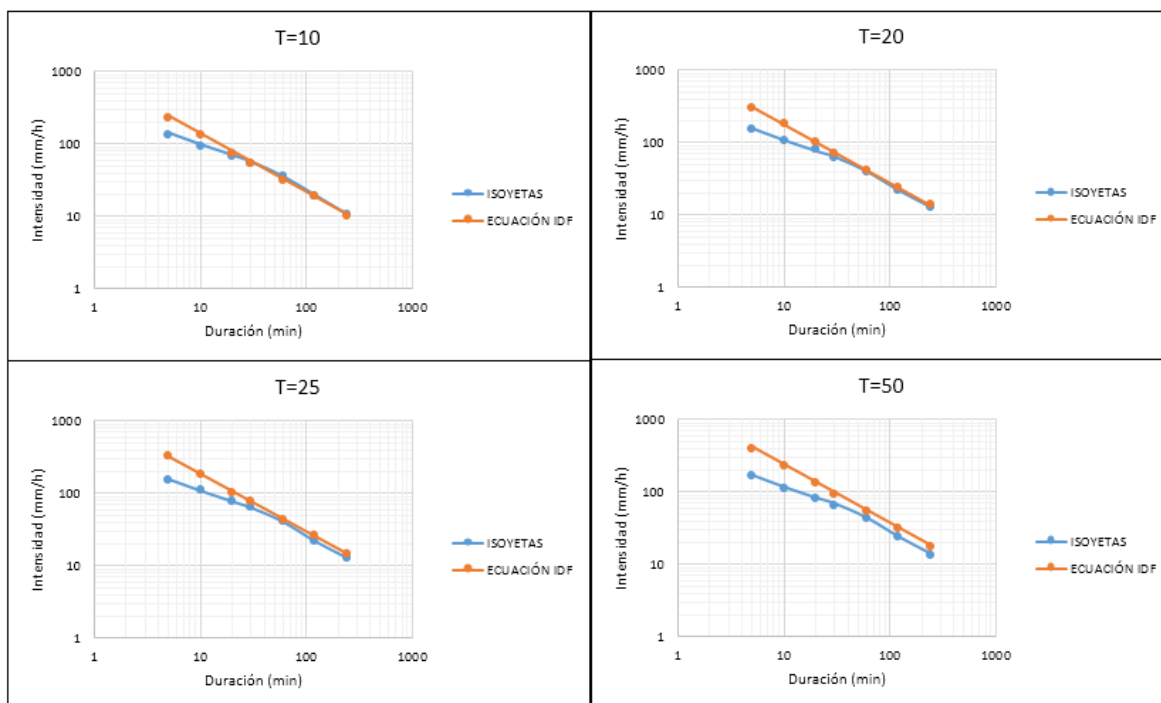


Figura 26. Comparación de las intensidades obtenidas de las isoyetas de la SCT y la ecuación IDF para la estación Chapingo.

5.4.2. Observatorio meteorológico de la Ciudad de México

En los cuadros 19 y 20 se muestran las intensidades obtenidas de las isoyetas de la SCT (2017a) y las obtenidas con la ecuación IDF del observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Cuadro 19. Intensidades obtenidas de las isoyetas de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

T (Años)	Duración, minutos		
	60	120	240
10	44	25	15
20	50	28	28
25	51	29	29
50	56	32	32
100	62	34	35

Cuadro 20. Intensidades obtenidas con la ecuación IDF para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

T (Años)	Duración, minutos
----------	-------------------

	60	120	240
10	54.20	29.65	16.23
20	67.66	37.02	20.25
25	72.66	39.76	21.75
50	90.71	49.63	27.16
100	113.24	61.96	33.90

En el Cuadro 21 se observa que existe una variación menor entre las intensidades obtenidas con las isoyetas y la ecuación IDF del observatorio meteorológico de la Ciudad de México, así mismo, aplicando el teorema de Chebyshev (Ecuación 9) y suponiendo una $k=2$ se tiene que la probabilidad de que los datos se encuentren dentro del intervalo $(\mu \pm 2\sigma)$ que se muestran en dicho cuadro es mayor o igual al 75%. En la Figura 27 se observa la comparación de las intensidades obtenidas con las isoyetas y la ecuación IDF del observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Cuadro 21. Valores de error relativo y cuadrado medio del error obtenidos del análisis comparativo de los datos de intensidad para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

T (Años)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	μ de los errores	$\mu \pm 2\sigma$	Probabilidad
10	4.56	7.97	-5.36	$(-21.3 < X < 10.6)$	0.75
20	11.14	15.05	-6.31	$(-36.4 < X < 23.8)$	0.75
25	14.89	17.86	-16.21	$(-51.9 < X < 19.5)$	0.75
50	29.69	27.74	-15.83	$(-71.3 < X < 39.6)$	0.75
100	54.74	41.28	-26.03	$(-108.6 < X < 56.5)$	0.75

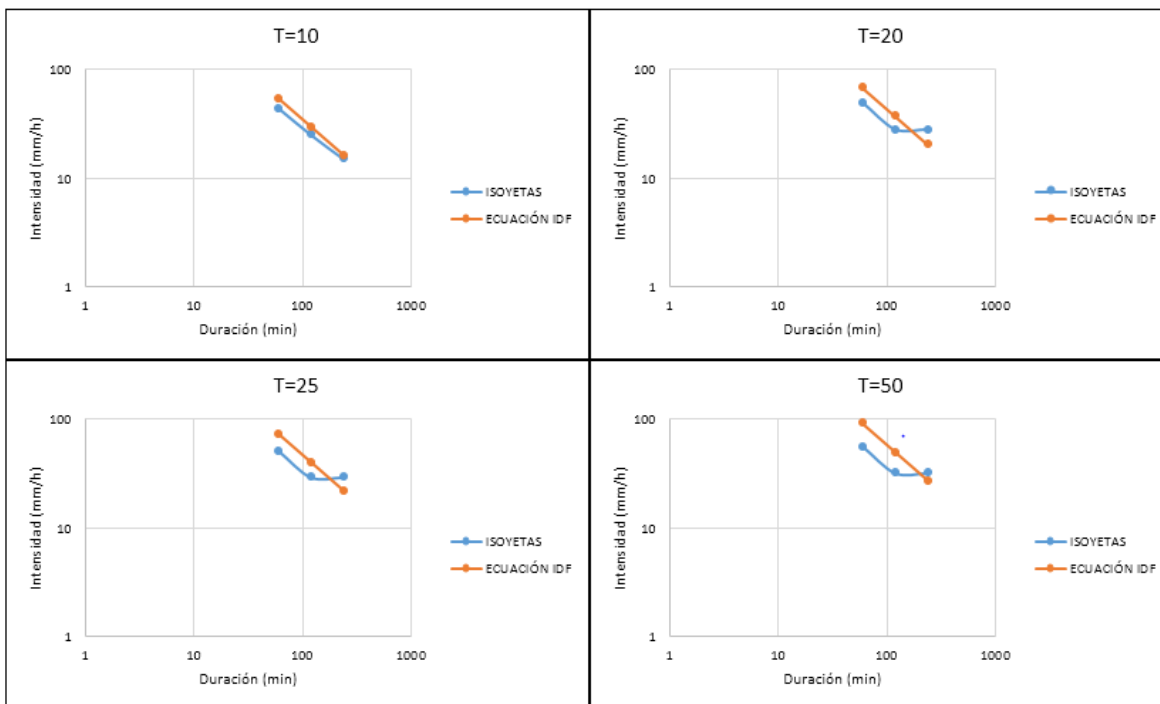


Figura 27. Comparación de las intensidades obtenidas de las isoyetas de la SCT y la ecuación IDF para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

5.4.3. Observatorio meteorológico de Cuernavaca

En los cuadros 22 y 23 se muestran las intensidades obtenidas de las isoyetas de la SCT (2017c) y las obtenidas con la ecuación IDF del observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Cuadro 22. Intensidades obtenidas de las isoyetas de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

T (Años)	Duración, minutos						
	5	10	20	30	60	120	240
10	186	144	108	96	66	42	25
20	211	162	108	108	75	48	28
25	219	168	132	111	78	50	29
50	243	185	146	123	86	56	33
100	266	203	159	134	94	61	36

Cuadro 23. Intensidades obtenidas con la ecuación IDF para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

T (Años)	Duración, minutos						
	5	10	20	30	60	120	240
10	210.04	134.79	86.49	66.72	42.82	27.48	17.63
20	299.11	191.94	123.17	95.02	60.97	39.13	25.11

25	335.16	215.08	138.02	106.47	68.32	43.84	28.14
50	477.28	306.28	196.54	151.62	97.30	62.44	40.07
100	679.67	436.16	279.89	215.92	138.56	88.91	57.06

En el Cuadro 24 se observa que la variación entre los datos va incrementando mientras el periodo de retorno es mayor, así mismo, aplicando el teorema de Chebyshev (Ecuación 9) y suponiendo una $k=2$ se tiene que la probabilidad de que los datos se encuentren dentro del intervalo $(\mu \pm 2\sigma)$ que se muestran en dicho cuadro es mayor o igual al 75%. En la Figura 28 se observa la comparación de las intensidades obtenidas con las isoyetas y la ecuación IDF del observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Cuadro 24. Valores de error relativo y cuadrado medio del error obtenidos del análisis comparativo de los datos de intensidad para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

T (Años)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	μ de los errores	$\mu \pm 2\sigma$	Probabilidad
10	0.76	9.49	-1.57	$(-20.5 < X < 17.4)$	0.75
20	9.09	39.46	-13.49	$(-92.4 < X < 65.0)$	0.75
25	13.78	51.47	-21.15	$(-124.1 < X < 81.8)$	0.75
50	51.78	110.45	-65.65	$(-286.5 < X < 155.2)$	0.75
100	147.89	204.13	-134.74	$(-543.0 < X < 273.5)$	0.75

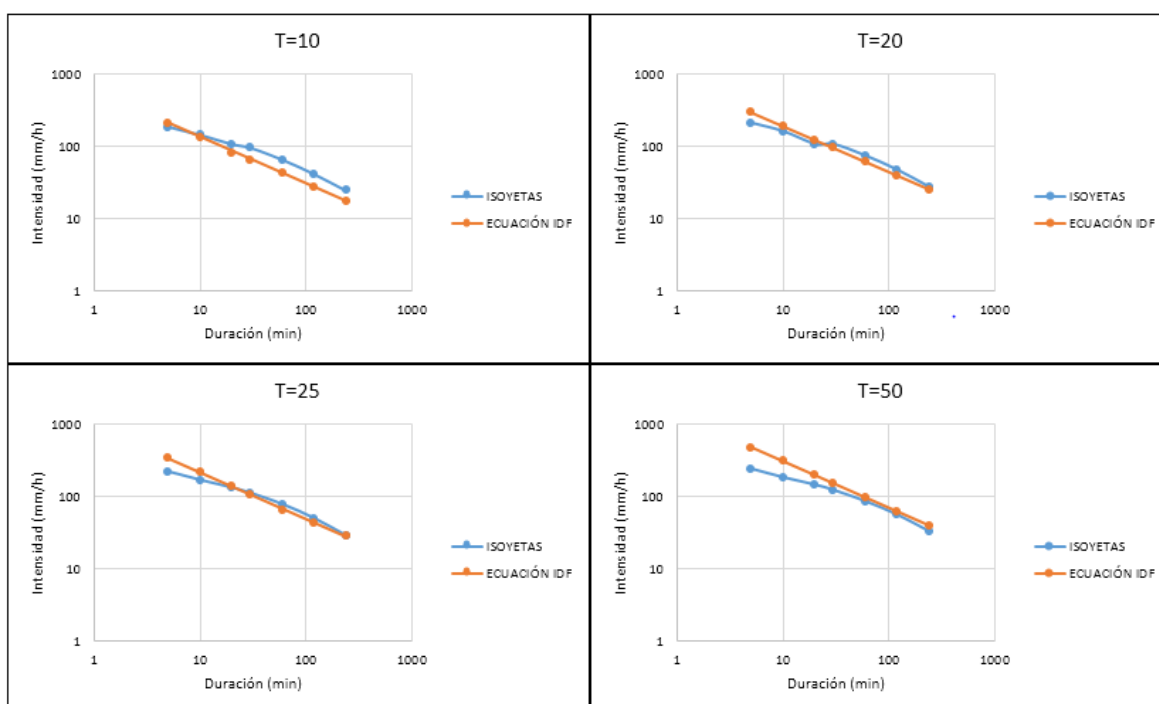


Figura 28. Comparación de las intensidades obtenidas de las isoyetas de la SCT y la ecuación IDF para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

5.4.4. Observatorio meteorológico de Cuernavaca

En los cuadros 25 y 26 se muestran las intensidades obtenidas de las isoyetas de la SCT (2017d) y las obtenidas con la ecuación IDF del observatorio meteorológico de Tapachula.

Cuadro 25. Intensidades obtenidas de las isoyetas de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) para el observatorio meteorológico de Tapachula.

T (Años)	Duración, minutos						
	5	10	20	30	60	120	240
10	225	184	152	132	92	56	30
20	247	202	168	145	101	61	33
25	254	207	172	150	104	63	34
50	275	224	186	162	113	68	37
100	295	240	200	174	122	73	39

Cuadro 26. Intensidades obtenidas con la ecuación IDF para el observatorio meteorológico de Tapachula.

T (Años)	Duración, minutos						
	5	10	20	30	60	120	240
10	431.80	279.02	180.30	139.65	90.24	58.31	37.68
20	614.91	397.34	256.75	198.87	128.51	83.04	53.66
25	689.02	445.23	287.70	222.84	144.00	93.05	60.12
50	981.20	634.03	409.70	317.34	205.06	132.50	85.62
100	1397.28	902.89	583.43	451.91	292.01	188.69	121.93

En el Cuadro 27 se observa que la variación entre los datos va incrementando mientras el periodo de retorno es mayor, así mismo, aplicando el teorema de Chebyshev (Ecuación 9) y suponiendo una $k=2$ se tiene que la probabilidad de que los datos se encuentren dentro del intervalo $(\mu \pm 2\sigma)$ que se muestran en dicho cuadro es mayor o igual al 75%. En la Figura 29 se observa la comparación de las intensidades obtenidas con las isoyetas y la ecuación IDF del observatorio meteorológico de Tapachula.

Cuadro 27. Valores de error relativo y cuadrado medio del error obtenidos del análisis comparativo de los datos de intensidad para el observatorio meteorológico de Tapachula.

T (Años)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	μ de los errores	$\mu \pm 2\sigma$	Probabilidad
10	38.34	93.74	-49.43	$(-236.9 < X < 138.0)$	0.75
20	111.98	176.05	-110.87	$(-463.0 < X < 241.2)$	0.75
25	152.73	211.30	-136.85	$(-559.4 < X < 287.7)$	0.75
50	368.07	354.97	-242.92	$(-952.9 < X < 467.0)$	0.75

100	814.70	566.84	-399.31	$(-1533.0 < X < 734.4)$	0.75
-----	--------	--------	---------	-------------------------	------

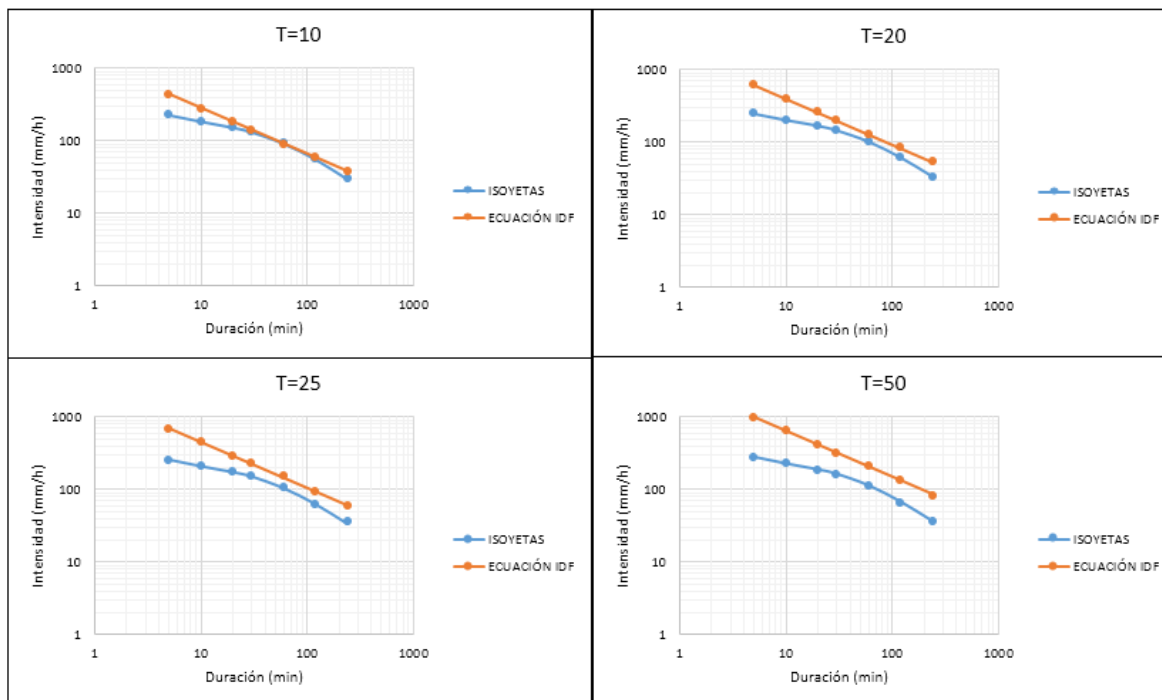


Figura 29. Comparación de las intensidades obtenidas de las isoyetas de la SCT y la ecuación IDF para el observatorio meteorológico de Tapachula.

5.5. Cálculo de coeficiente de avance de tormenta (r)

5.5.1. Estación meteorológica Chapingo

Para la obtención del coeficiente de avance de tormenta, más conocido como parámetro r, se utilizó la duración real de la tormenta y el tiempo transcurrido hasta que se presentó la mayor altura de precipitación, en horas.

En el caso de sitio Chapingo para las tormentas de 24 horas el coeficiente de avance de tormenta promedio resultó de 0.46, lo que significa que el pico se da casi a la mitad de la duración de la tormenta; para las de 6 horas, fue de 0.27, es decir, el pico se presenta antes de la mitad de la duración total. Los resultados se muestran en el Anexo 3 (A.3. 1 y A.3. 2).

5.5.2. Observatorio meteorológico de la Ciudad de México

Los coeficientes obtenidos para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México son; para las tormentas de 24 horas el coeficiente de avance de tormenta promedio resultó de 0.65,

lo que significa que el pico se da después de la mitad de la duración de la tormenta; para las de 6 horas, fue de 0.39, es decir, el pico se presenta antes de la mitad de la duración total. Los resultados se muestran en el Anexo 3 (A.3.3 y A.3. 4).

5.5.3. Observatorio meteorológico de Cuernavaca, Morelos

Los coeficientes obtenidos para el observatorio meteorológico de Cuernavaca son; para las tormentas de 24 horas el coeficiente de avance de tormenta promedio resultó de 0.43, lo que significa que el pico se da casi a la mitad de la duración de la tormenta; para las de 6 horas, fue de 0.39, es decir, el pico se presenta antes de la mitad de la duración total. Los resultados se muestran en el Anexo 3 (

A.3.5 y A.3. 6).

5.5.4. Observatorio meteorológico de Tapachula, Chiapas

Los coeficientes obtenidos para el observatorio meteorológico de Cuernavaca son; para las tormentas de 24 horas el coeficiente de avance de tormenta promedio resultó de 0.59, lo que significa que el pico se da poco después de la mitad de la duración de la tormenta; para las de 6 horas, fue de 0.36, es decir, el pico se presenta antes de la mitad de la duración total. Los resultados se muestran en el Anexo 3 (A.3.7 y A.3. 8).

5.6. Análisis de las tormentas con duración de 24 horas

5.6.1. Estación meteorológica Chapingo

5.6.1.1. Método de Huff

El criterio de selección usado fue el coeficiente de Nash-Sutcliffe más alto, sin importar que el criterio sea excelente y se ajuste a dos cuartiles, se tomó el de mayor valor. De acuerdo al criterio expuesto en el apartado 4.2.5, se obtuvieron 6 tormentas críticas para analizar en el sitio Chapingo.

En el Cuadro 28 se muestra un resumen de los cuatro cuartiles de Huff el cual se basa en el criterio Nash-Sutcliffe más alto. Se compararon los coeficientes de Nash-Sutcliffe obtenidos para cada cuartil de Huff de cada evento extremo. Del total de las 6 tormentas críticas analizadas con duración de 24 horas, el 83.30 % se adecuó al segundo cuartil de Huff.

Cuadro 28. Resumen del ajuste de las tormentas críticas con duración de 24 horas de acuerdo al criterio de Nash-Sutcliffe más alto para los cuatro cuartiles propuestos por Huff en la estación meteorológica Chapingo.

	Primer cuartil	Segundo cuartil	Tercer cuartil	Cuarto cuartil
No. de tormentas	0	5	0	1
Porcentaje (%)	0	83.3	0	16.7

5.6.1.1.1. Primer cuartil de Huff

En el primer cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 16.67% de las tormentas evaluadas se ajustó de forma excelente al método y es la tormenta del 30 de junio de 2011 con un coeficiente Nash-Sutcliffe de 0.84. En el Cuadro 29 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas reales al método del primer cuartil de Huff.

Cuadro 29. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el primer cuartil de Huff para la estación meteorológica Chapingo.

Fecha	Primer cuartil				
	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
10 de septiembre de 1979	52.1	8.82	10.91	0.66	Bueno
04 de septiembre de 1988	55.7	8.04	10.78	0.5	Satisfactorio
17 de agosto de 1995	53.2	29.14	20.55	0.36	Satisfactorio
22 de agosto de 2007	49	13.05	12.57	0.61	Bueno
30 de junio de 2011	66.1	3.62	9.38	0.84	Excelente
06 de junio de 2015	77.3	141.19	45.6	-1.02	Malo

5.6.1.1.2. Segundo cuartil de Huff

En el segundo cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe, el 50.00 % de las tormentas evaluadas se ajustó de forma excelente. Las tormentas con criterio excelente de acuerdo con Nash son; 10 de septiembre de 1979, el 22 de agosto de 2007 y el 30 de junio de 2011 con coeficientes de 0.94, 0.97 y 0.95 respectivamente. En el Cuadro 30 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas reales al método del segundo cuartil de Huff.

Cuadro 30. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el segundo cuartil de Huff para la estación meteorológica Chapingo.

Segundo cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
10 de septiembre de 1979	52.1	1.52	4.53	0.94	Excelente
04 de septiembre de 1988	55.7	6.54	9.73	0.59	Bueno
17 de agosto de 1995	53.2	9.24	11.57	0.8	Bueno
22 de agosto de 2007	49	0.86	3.23	0.97	Excelente
30 de junio de 2011	66.1	1.12	5.22	0.95	Excelente
06 de junio de 2015	77.3	89.75	36.36	-0.29	Malo

5.6.1.1.3. Tercer cuartil de Huff

En el tercer cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 16.67 % de las tormentas evaluadas se ajustó de forma excelente. La tormenta con criterio excelente de acuerdo con Nash es del 17 de agosto de 1995 con un coeficiente de 0.81. En el Cuadro 31 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas reales al método del tercer cuartil de Huff.

Cuadro 31. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el tercer cuartil de Huff para la estación meteorológica Chapingo.

Tercer cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
10 de septiembre de 1979	52.1	6.79	9.57	0.74	Bueno
04 de septiembre de 1988	55.7	10.64	12.4	0.34	Satisfactorio
17 de agosto de 1995	53.2	8.78	11.28	0.81	Excelente
22 de agosto de 2007	49	6.75	9.04	0.8	Bueno
30 de junio de 2011	66.1	11.36	16.61	0.49	Satisfactorio
06 de junio de 2015	77.3	34.07	22.4	0.51	Bueno

5.6.1.1.4. Cuarto cuartil de Huff

En el cuarto cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 16.67 % de las tormentas evaluadas se ajustó de forma excelente. La tormenta con criterio excelente de acuerdo con Nash es la del 06 de junio de 2015 con un coeficiente de 0.84. En el Cuadro 32 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas reales al método del cuarto cuartil de Huff.

Cuadro 32. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el cuarto cuartil de Huff para la estación meteorológica Chapingo.

Cuarto cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficiente de Nash-Sutcliffe	Criterio
10 de septiembre de 1979	52.1	24.63	18.23	0.04	Deficiente
04 de septiembre de 1988	55.7	24.19	18.7	-0.51	Malo
17 de agosto de 1995	53.2	27.81	20.07	0.39	Satisfactorio
22 de agosto de 2007	49	25.44	17.55	0.23	Deficiente
30 de junio de 2011	66.1	29.23	26.65	-0.32	Malo
06 de junio de 2015	77.3	11.05	12.76	0.84	Excelente

Al observar los resultados obtenidos de la evaluación estadística, se tiene que para el método de Huff el segundo cuartil es el patrón de distribución que se adecua a las tormentas críticas analizadas. En la Figura 30 se observan los cuatro cuartiles de Huff y las tormentas críticas analizadas.

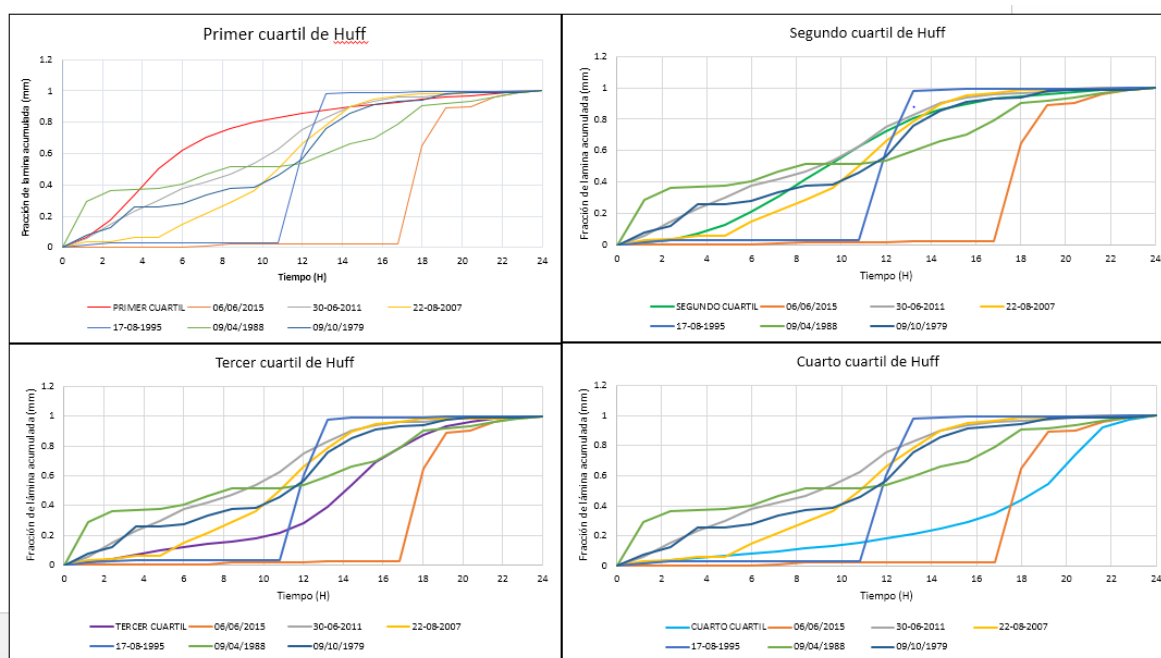


Figura 30. Comparación de los cuatro cuartiles de Huff con las tormentas críticas de 24 horas para la estación meteorológica Chapingo.

5.6.1.2. Método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS)

5.6.1.2.1. Tormenta Tipo IA del SCS

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 33.33 % de las tormentas evaluadas se ajustó a un criterio excelente. Las tormentas con criterio excelente son; el 17 de agosto de 1995 y 30 de junio de 2011 con coeficientes de 0.81 y 0.86 respectivamente. En el Cuadro 33 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas extremas y la tormenta Tipo IA del SCS.

Cuadro 33. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta Tipo IA del SCS para la estación meteorológica Chapingo.

Tormenta Tipo IA del SCS					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
10 de septiembre de 1979	52.1	12.43	14.57	0.74	Bueno
04 de septiembre de 1988	55.7	13.75	16.35	0.49	Satisfactorio
17 de agosto de 1995	53.2	7.76	10.89	0.81	Excelente
22 de agosto de 2007	49	14.69	15.28	0.76	Bueno
30 de junio de 2011	66.1	9.03	14.93	0.86	Excelente
06 de junio de 2015	77.3	19.51	20.51	0.48	Satisfactorio

5.6.1.2.2. Tormenta Tipo II del SCS

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 50.00 % de las tormentas evaluadas se ajustó a un criterio bueno. Las tormentas con criterio bueno de acuerdo con Nash son; el 17 de agosto de 1995, 30 de junio de 2011 y 06 de junio de 2015 con coeficientes de 0.79, 0.54 y 0.67 respectivamente. En el Cuadro 34 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas reales al método del tercer cuartil de Huff.

Cuadro 34. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta Tipo II del SCS para la estación meteorológica Chapingo.

Tormenta Tipo II del SCS					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
10 de septiembre de 1979	52.1	12.43	14.57	0.3	Deficiente
04 de septiembre de 1988	55.7	13.75	16.35	-0.11	Malo
17 de agosto de 1995	53.2	7.76	10.89	0.79	Bueno
22 de agosto de 2007	49	14.69	15.28	0.34	Satisfactorio
30 de junio de 2011	66.1	9.03	14.93	0.54	Bueno
06 de junio de 2015	77.3	19.51	20.51	0.67	Bueno

De acuerdo con los resultados obtenidos en la evaluación estadística se tiene que la tormenta Tipo IA del SCS representa de manera más adecuada los eventos extremos analizados. En la Figura 31 se observa la comparación de las tormentas reales con las sintéticas Tipo A y Tipo II del SCS.

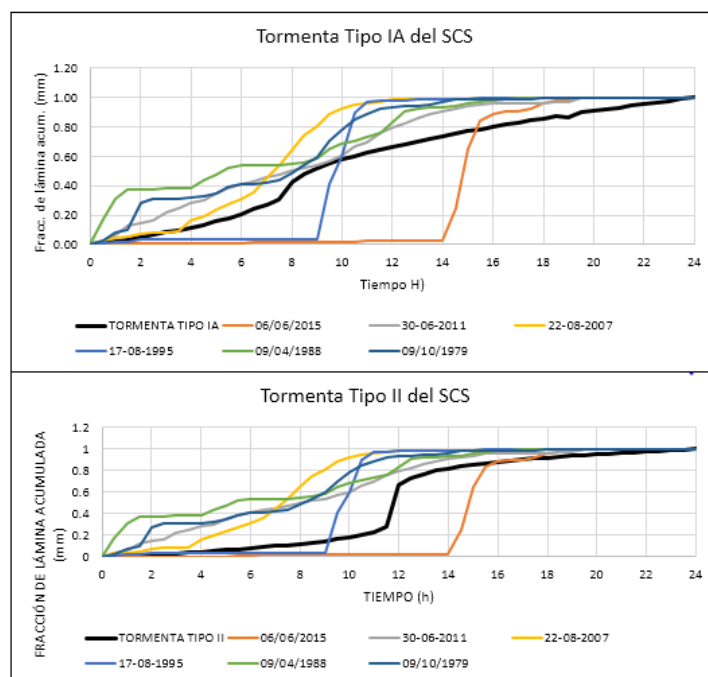


Figura 31. Comparación de las tormentas sintéticas del SCS Tipo IA y II con las tormentas críticas de 24 horas de duración para la estación meteorológica Chapingo.

5.6.1.3. Método del Bloque Alterno

Para este método se utilizó la ecuación IDF, con dicha ecuación se obtuvo la intensidad en mm/h, el periodo de retorno elegido fue de 500 años, la duración de tormenta de 24 horas y los intervalos de tiempo de 30 minutos. En el Cuadro 35 se observan los resultados obtenidos de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales a la Tormenta del Bloque Alterno. El 50 % de las tormentas presenta un criterio bueno de acuerdo con Nash. Las tormentas que tiene un criterio bueno son; el 17 de agosto de 1995, 30 de junio de 2011 y 06 de junio de 2015 con coeficientes de 0.80, 0.52 y 0.63 respectivamente. En la Figura 32 se observa la comparación de las tormentas reales con el método el bloque alterno.

Cuadro 35. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el bloque alterno para la estación meteorológica Chapingo.

Bloque Alterno					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
10 de septiembre de 1979	52.1	12.64	14.69	0.29	Deficiente
04 de septiembre de 1988	55.7	13.75	16.35	-0.14	Malo
17 de agosto de 1995	53.2	7.37	10.61	0.8	Bueno
22 de agosto de 2007	49	14.87	15.38	0.34	Satisfactorio
30 de junio de 2011	66.1	9.42	15.25	0.52	Bueno
06 de junio de 2015	77.3	21.91	21.73	0.63	Bueno

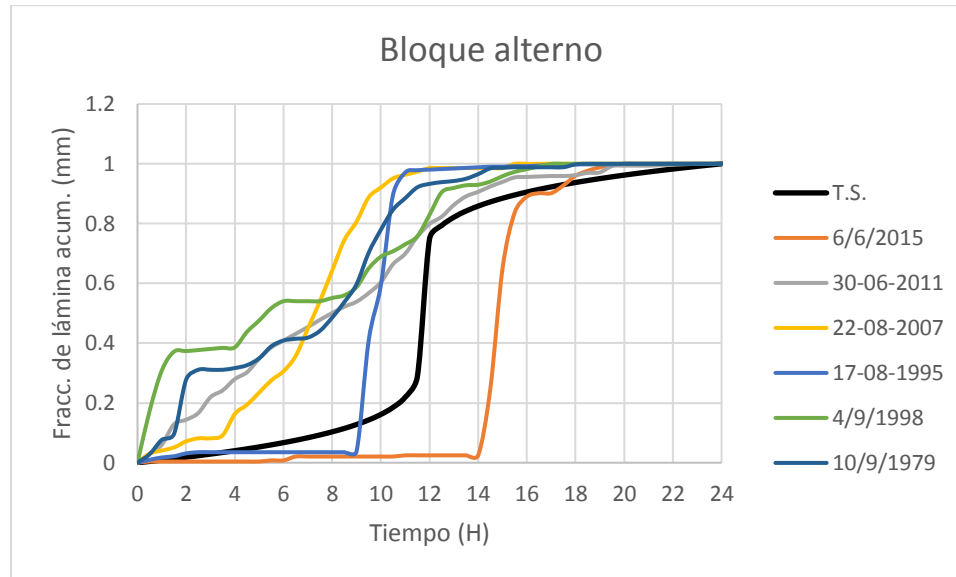


Figura 32. Comparación de la tormenta sintética del método del bloque alterno y las tormentas críticas de 24 horas de duración para la estación meteorológica Chapingo.

5.6.1.4. Método de Yen y Chow

En el Cuadro 36 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales a la Tormenta de Yen y Chow. El 16.67 % de las tormentas presenta un criterio excelente de acuerdo con Nash. La tormenta que tiene un criterio excelente es la del 06 de junio de 2015 con un coeficiente de 0.87. En la Figura 33 se observa la comparación de los eventos extremos con el método de Yen y Chow.

Cuadro 36. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el método de Yen y Chow para la estación meteorológica Chapingo.

Yen y Chow					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
10 de septiembre de 1979	52.1	21.85	19.41	-0.25	Malo
04 de septiembre de 1988	55.7	22.72	21.1	-0.87	Malo
17 de agosto de 1995	53.2	17.39	16.41	0.53	Bueno
22 de agosto de 2007	49	24.35	20.86	-0.11	Malo
30 de junio de 2011	66.1	17.49	20.88	0.08	Deficiente
06 de junio de 2015	77.3	7.96	12.97	0.87	Excelente

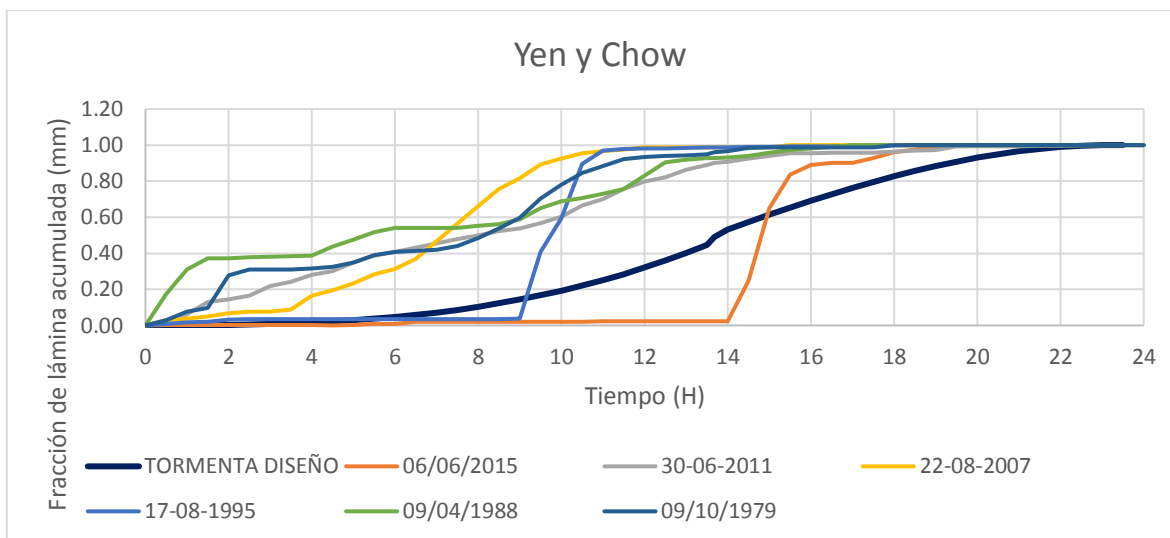


Figura 33. Comparación del método de Yen y Chow y de las tormentas críticas de 24 horas de duración para la estación meteorológica Chapingo.

De acuerdo con los resultados obtenidos para las tormentas con 24 horas de duración se recomienda la distribución de lluvia del segundo cuartil de Huff, como lo propone Márquez y Mendoza (2015), esto con base a los parámetros estadísticos mencionados en la revisión de literatura, los demás patrones de distribución se ordenaron de forma descendente con base en los indicadores estadísticos empleados: en segundo lugar se encuentra la tormenta Tipo IA del SCS; en tercer lugar el tercer cuartil de Huff, en cuarto lugar el primer cuartil de Huff, en quinto lugar el cuarto cuartil de Huff, en sexto lugar la tormenta Tipo II del SCS, en séptimo lugar el método del bloque alterno y en octavo lugar el método de Yen y Chow.

5.6.2. Observatorio meteorológico de la Ciudad de México

5.6.2.1. Método de Huff

El criterio de selección usado fue el coeficiente de Nash-Sutcliffe más alto, sin importar que el criterio sea excelente y se ajuste a dos cuartiles, se tomó el de mayor valor. De acuerdo al criterio expuesto en el apartado 4.2.5, se obtuvieron 4 tormentas críticas que fueron evaluadas.

En el Cuadro 37 se muestra un resumen de los cuatro cuartiles de Huff el cual se basa en el criterio Nash-Sutcliffe más alto. Se compararon los coeficientes de Nash-Sutcliffe obtenidos para cada cuartil de Huff de cada evento extremo.

Cuadro 37. Resumen del ajuste de las tormentas críticas con duración de 24 horas de acuerdo al criterio de Nash-Sutcliffe más alto para los cuatro cuartiles propuestos por Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

	Primer cuartil	Segundo cuartil	Tercer cuartil	Cuarto cuartil
No. De tormentas	0	0	1	3
Porcentaje (%)	0.00	0.0	25.0	75.0

5.6.2.1.1. Primer cuartil de Huff

En el primer cuartil de Huff de acuerdo al criterio de Nash- Sutcliffe el 75% de las tormentas analizadas tiende a un criterio malo, esto se corrobora observando el Cuadro 38, así mismo se encuentran los resultados de los valores obtenidos al realizar el análisis estadístico para evaluar el ajuste de la tormenta sintética a las reales.

Cuadro 38. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el primer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Primer cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error Relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
30 de junio 2011	57.9	16.09	15.18	0.48	Satisfactorio
10 de octubre de 2013	63.2	215.30	40.16	-1.87	Malo
17 de junio de 2014	109.97	418.44	69.72	-5.25	Malo
18 de junio de 2014	55.61	58.20	22.77	-0.77	Malo

5.6.2.1.2. Segundo cuartil de Huff

En el segundo cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 25.00 % de las tormentas se ajustó de forma excelente y pertenece al 30 de junio de 2011 con un coeficiente de 0.89. En el Cuadro 48 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el segundo cuartil de Huff.

Cuadro 39. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el segundo cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Segundo cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
30 de junio 2011	57.9	3.38	6.95	0.89	Excelente
10 de octubre de 2013	63.2	149.18	33.43	-0.99	Malo
17 de junio de 2014	109.97	298.16	58.86	-3.46	Malo
18 de junio de 2014	55.61	39.18	18.68	-0.19	Malo

5.6.2.1.3. Tercer cuartil de Huff

En el tercer cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 25.00% de las tormentas analizadas se ajustó de forma excelente y es la correspondiente al 30 de junio de 2011 con un coeficiente de 0.91. En el Cuadro 40 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el tercer cuartil de Huff.

Cuadro 40. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el tercer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Tercer cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
30 de junio 2011	57.9	2.84	6.38	0.91	Excelente
10 de octubre de 2013	63.2	72.61	23.32	0.03	Deficiente
17 de junio de 2014	109.97	158.90	42.97	-1.37	Malo
18 de junio de 2014	55.61	16.30	12.05	0.5	Satisfactorio

5.6.2.1.4. Cuarto cuartil de Huff

En el cuarto cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 50% de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste bueno y aunque no se obtuvo un ajuste excelente los coeficientes resultantes no son de signo negativo. En el Cuadro 41 se observan los resultados

de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el tercer cuartil de Huff.

Cuadro 41. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el cuarto cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Cuarto cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
30 de junio 2011	57.9	18.15	16.12	0.41	Satisfactorio
10 de octubre de 2013	63.2	16.21	11.02	0.78	Bueno
17 de junio de 2014	109.97	47.52	23.50	0.29	Deficiente
18 de junio de 2014	55.61	9.14	9.02	0.72	Bueno

De acuerdo con los resultados mostrados en cada cuartil se tiene que para el método de Huff el patrón de distribución que se adecua a las tormentas críticas de la Ciudad de México es el cuarto cuartil de Huff. En la Figura 34 se observan los cuatro cuartiles de Huff comparados con las tormentas críticas evaluadas.

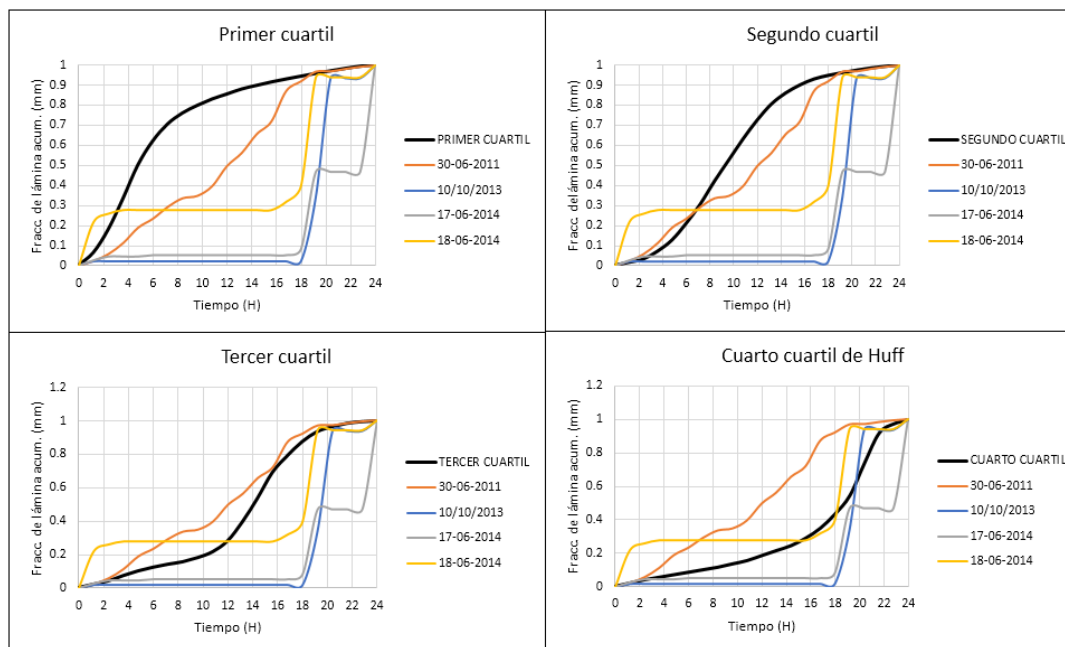


Figura 34. Tormentas críticas de 24 horas comparadas con los cuartiles de Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

5.6.2.2. Método del Servicio de Conservación de Suelos

5.6.2.2.1. Tormenta Tipo IA del SCS

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 25.00 % de las tormentas evaluadas se ajustó a un criterio excelente. La tormenta con criterio excelente es el 30 de junio de 2011 con un coeficiente de 0.93. En el Cuadro 42 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas extremas y la tormenta Tipo IA del SCS.

Cuadro 42. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta Tipo IA del SCS para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Tormenta Tipo IA					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
30 de junio 2011	57.9	2.14	5.57	0.93	Excelente
10 de octubre de 2013	63.22	109.79	29.45	-0.49	Malo
17 de junio de 2014	109.97	125.09	47.87	-0.88	Malo
18 de junio de 2014	55.61	29.08	15.68	0.07	Deficiente

5.6.2.2.2. Tormenta Tipo II del SCS

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 25.00 % de las tormentas evaluadas se ajustó a un criterio excelente. La tormenta con criterio excelente es el 30 de junio de 2011 con un coeficiente de 0.90. En el Cuadro 43 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas extremas y la tormenta Tipo IA del SCS.

Cuadro 43. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta Tipo II del SCS para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Tormenta Tipo II					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Eficiencia de Nash-Sutcliffe	Criterio
30 de junio 2011	57.9	3.15	6.75	0.90	Excelente
10 de octubre de 2013	63.22	101.26	28.28	-0.37	Malo
17 de junio de 2014	109.97	117.31	46.36	-0.17	Malo
18 de junio de 2014	55.61	34.61	17.11	0.65	Bueno

De acuerdo a la información presentada en los cuadros 42 y 43 se tiene que para los eventos de la Ciudad de México las tormentas Tipo IA y II no son representativas. En la Figura 35 se comparan las tormentas reales y las sintéticas tipo IA y II del SCS.

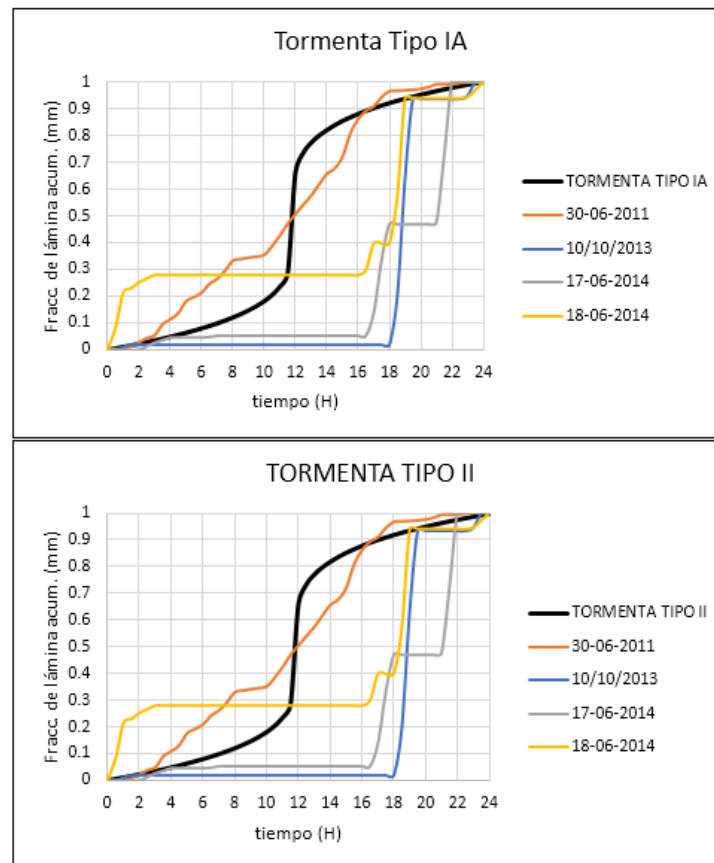


Figura 35. Comparación de las tormentas sintéticas del SCS Tipo IA y II con las tormentas críticas de 24 horas de duración para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

5.6.2.3. Método del Bloque Alterno

Para el Bloque Alterno se utilizó la ecuación IDF y se obtuvo la intensidad en mm/h, el periodo de retorno elegido es de 500 años, la duración de tormenta es de 24 horas y los intervalos de tiempo son de 30 minutos. De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 25 % de las tormentas presenta un ajuste excelente y es la tormenta del 30 de junio de 2011 con un coeficiente de 0.81, mientras que el 50% tiene un mal ajuste. En el Cuadro 44 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas extremas y la tormenta del Bloque alternativo.

Cuadro 44. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta del Bloque alternativo para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Bloque alternativo					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
30 de junio 2011	57.9	5.96	14.39	0.81	Excelente
10 de octubre de 2013	63.22	107.79	45.21	-0.46	Malo
17 de junio de 2014	109.97	126.53	74.58	-0.9	Malo
18 de junio de 2014	55.61	41.57	29.04	0.58	Bueno

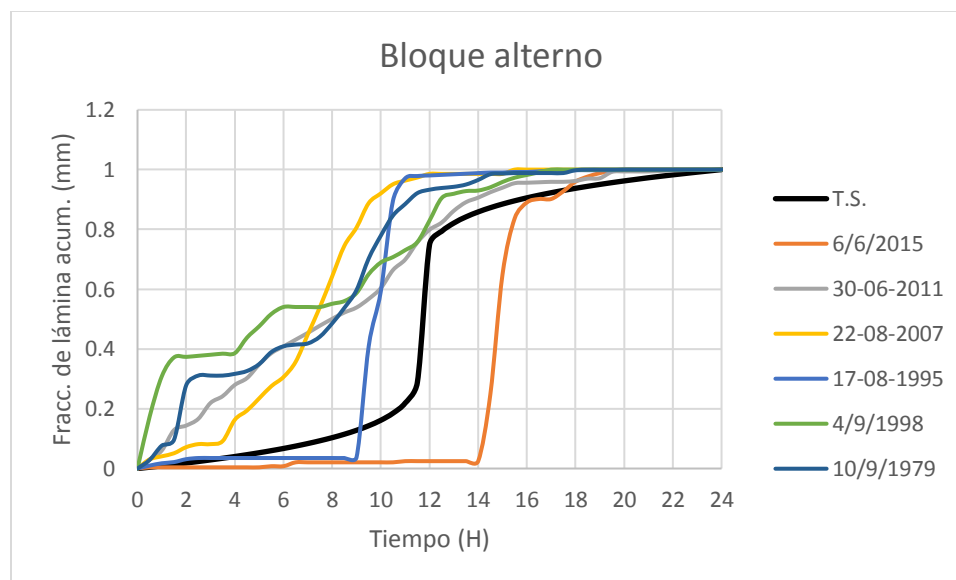


Figura 36. Comparación de la tormenta sintética del método del bloque alternativo y las tormentas críticas de 24 horas de duración para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

5.6.2.4. Método de Yen y Chow

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 25 % de las tormentas presenta un ajuste Bueno y es la tormenta del 30 de junio de 2011 con un coeficiente de 0.77, mientras que el 50 % tiene un ajuste satisfactorio. En el Cuadro 45 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas extremas y la tormenta del Bloque alterno. En la Figura 37 se observa la comparación de las tormentas críticas reales con la sintética del método de Yen y Chow.

Cuadro 45. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta de Yen y Chow para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Yen y Chow					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
30 de junio 2011	57.9	7.25	10.25	0.77	Bueno
10 de octubre de 2013	63.22	41.61	18.13	0.44	Satisfactorio
17 de junio de 2014	109.97	45.5	28.87	0.32	Satisfactorio
18 de junio de 2014	55.61	13.82	10.81	0.56	Malo

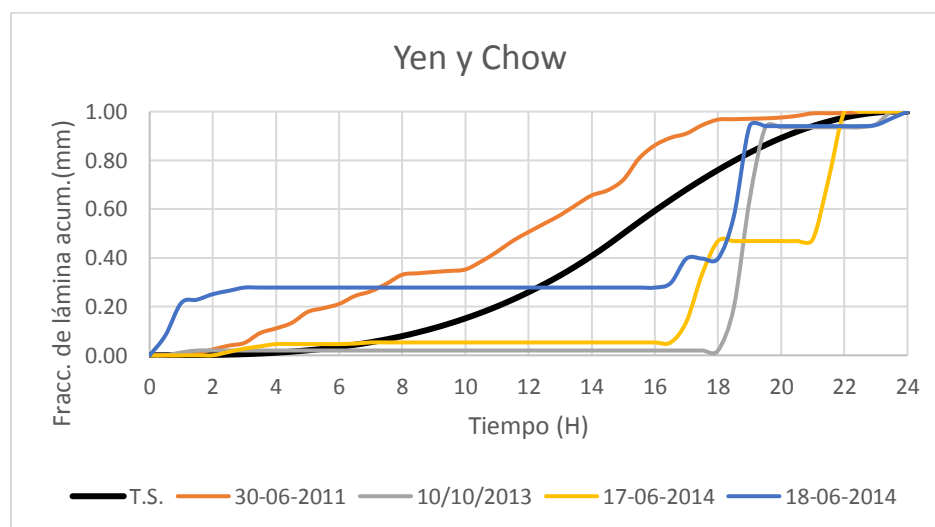


Figura 37. Comparación del método de Yen y Chow y de las tormentas críticas de 24 horas de duración para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

De acuerdo con los resultados obtenidos para las tormentas con 24 horas de duración se recomienda la distribución de lluvia del cuarto cuartil de Huff; los demás patrones de distribución se ordenaron de forma descendente con base en los indicadores estadísticos empleados: en segundo lugar se encuentra el tercer cuartil de Huff; en tercer lugar el método del bloque alterno, en cuarto lugar la Tormenta Tipo IA del SCS, en quinto lugar el método de Yen y Chow, en sexto lugar el segundo cuartil de Huff y en séptimo lugar la Tormenta Tipo II del SCS y en octavo lugar el Primer cuartil de Huff.

5.6.3. Observatorio meteorológico de Cuernavaca

5.6.3.1. Método de Huff

El criterio de selección usado fue el coeficiente de Nash-Sutcliffe más alto, sin importar que el criterio sea excelente y se ajuste a dos cuartiles, se tomó el de mayor valor. De acuerdo al criterio expuesto en el apartado 4.2.5, se obtuvieron 5 tormentas críticas que fueron evaluadas.

En el Cuadro 46 se muestra un resumen de los cuatro cuartiles de Huff el cual se basa en el criterio Nash-Sutcliffe más alto. Se compararon los coeficientes de Nash-Sutcliffe obtenidos para cada cuartil de Huff de cada evento extremo.

Cuadro 46. Resumen del ajuste de las tormentas críticas con duración de 24 horas de acuerdo al criterio de Nash-Sutcliffe más alto para los cuatro cuartiles propuestos por Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

	Primer cuartil	Segundo cuartil	Tercer cuartil	Cuarto cuartil
No. De tormentas	4	0	0	1
Porcentaje (%)	66.67	0.0	0.0	16.7

5.6.3.1.1. Primer cuartil de Huff

En el primer cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 20% de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y fue la tormenta del 04 de febrero de 2010 con un coeficiente de 0.91. En el Cuadro 47 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el primer cuartil de Huff.

Cuadro 47. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el primer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Primer cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
05 de julio de 2005	54.6	386.13	36.34	-4.1	Malo
25 de junio de 2007	69.1	9.08	13.82	0.27	Deficiente
04 de febrero de 2010	60.7	1.54	5.70	0.91	Excelente
17 de agosto de 2015	70	9.84	18.89	-0.97	Malo
27 de septiembre de 2015	59.8	2.32	7.11	0.8	Bueno

5.6.3.1.2. Segundo cuartil de Huff

En el segundo cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 20% de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste bueno y fue la tormenta del 04 de febrero de 2010 con un coeficiente de 0.76. En el Cuadro 48 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el segundo cuartil de Huff.

Cuadro 48. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el segundo cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Segundo cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
05 de julio de 2005	54.6	285.73	31.26	-2.78	Malo
25 de junio de 2007	69.1	14.3	17.34	-0.14	Malo
04 de febrero de 2010	60.7	4.08	9.29	0.76	Bueno
17 de agosto de 2015	70	23.45	29.18	-3.69	Malo
27 de septiembre de 2015	59.8	13.8	17.34	-0.19	Malo

5.6.3.1.3. Tercer cuartil de Huff

En el tercer cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 80% de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste malo y el 20 % restante obtuvo un criterio deficiente.

En el Cuadro 49 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el tercer cuartil de Huff.

Cuadro 49. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el tercer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Tercer cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
05 de julio de 2005	54.6	167.03	23.9	-1.21	Malo
25 de junio de 2007	69.1	22.47	21.74	-0.79	Malo
04 de febrero de 2010	60.7	14.63	17.59	0.14	Deficiente
17 de agosto de 2015	70	36.78	36.54	-6.36	Malo
27 de septiembre de 2015	59.8	28.4	24.87	-1.44	Malo

5.6.3.1.4. Cuarto cuartil de Huff

En el cuarto cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 80% de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste malo y el 20 % restante obtuvo un criterio satisfactorio. En el Cuadro 50 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el cuarto cuartil de Huff.

Cuadro 50. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el cuarto cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Cuarto cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
05 de julio de 2005	54.6	51.77	13.31	0.32	Satisfactorio
25 de junio de 2007	69.1	29.19	24.77	-1.33	Malo
04 de febrero de 2010	60.7	31.52	25.82	-0.86	Malo
17 de agosto de 2015	70	48.69	42.04	-8.74	Malo
27 de septiembre de 2015	59.8	41.16	29.94	-2.54	Malo

De acuerdo con los resultados mostrados en cada cuartil se tiene que el método de Huff no es el patrón de distribución adecuado para las tormentas críticas del observatorio

meteorológico de Cuernavaca la. En la Figura 38 se observan los cuatro cuartiles de Huff comparados con las tormentas críticas evaluadas.

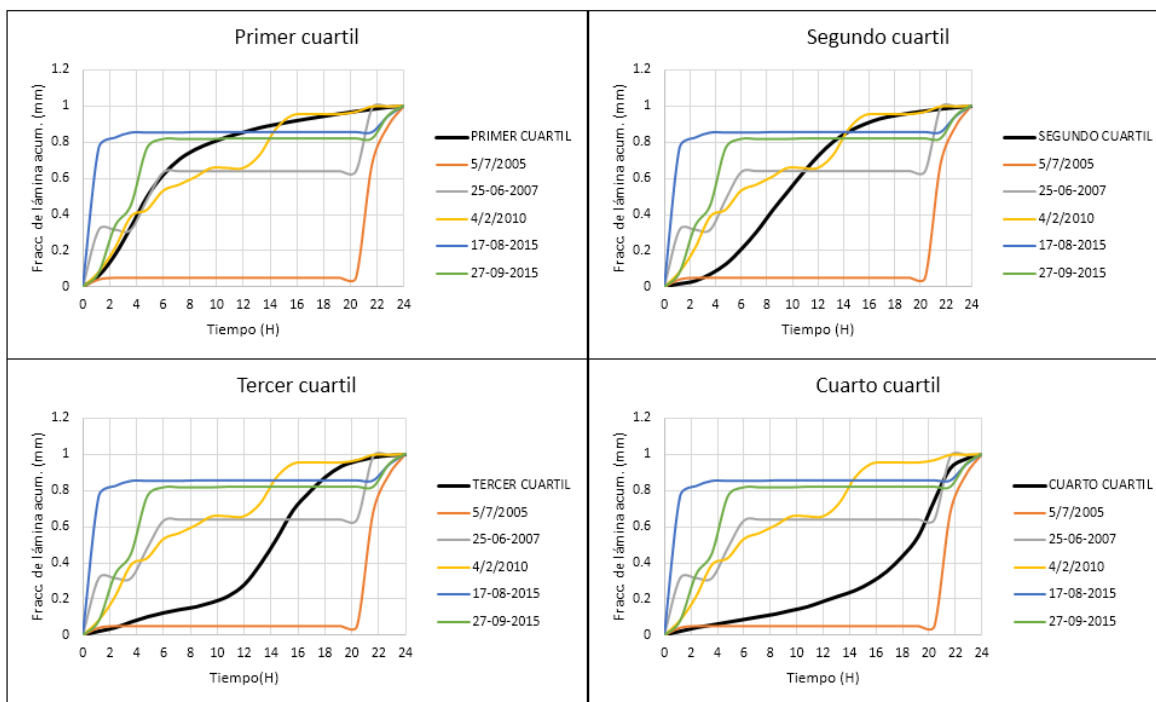


Figura 38. Comparación de los cuatro cuartiles de Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

5.6.3.2. Método del Servicio de Conservación de Suelos

5.6.3.2.1. Tormenta Tipo IA

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 20.00 % de las tormentas evaluadas se ajustó a un criterio bueno. La tormenta con criterio bueno es el 04 de febrero de 2010 con un coeficiente de 0.68. En el Cuadro 51 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas extremas y la tormenta Tipo IA del SCS.

Cuadro 51. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta Tipo IA del SCS para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Tormenta Tipo IA					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
05 de julio de 2005	54.6	299.47	44.71	-2.92	Malo
25 de junio de 2007	69.1	9.80	22.57	0.09	Deficiente
04 de febrero de 2010	60.69	5.00	16.08	0.68	Bueno
17 de agosto de 2015	70	22.30	44.29	-6.15	Malo
27 de septiembre de 2015	59.8	14.04	28.16	-0.48	Malo

5.6.3.2.2. Tormenta Tipo II

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 20.00 % de las tormentas evaluadas se ajustó a un criterio deficiente y el 80 % restante obtuvo un criterio malo. En el Cuadro 52 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas extremas y la tormenta Tipo II del SCS.

Cuadro 52. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta Tipo II del SCS para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Tormenta Tipo II					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
05 de julio de 2005	54.6	295.34	44.41	-2.86	Malo
25 de junio de 2007	69.1	23.5	34.94	-1.17	Malo
04 de febrero de 2010	60.69	13.13	26.06	0.15	Deficiente
17 de agosto de 2015	70	34.89	55.40	-10.17	Malo
27 de septiembre de 2015	59.8	27.06	39.09	-1.85	Malo

De acuerdo con los resultados mostrados en los cuadros 39 y 40 se tiene que el método del SCS no es el patrón de distribución adecuado para las tormentas críticas del observatorio meteorológico de Cuernavaca. En la Figura 39 se observan las tormenta Tipo IA y II del SCS comparadas con los eventos críticas evaluados.

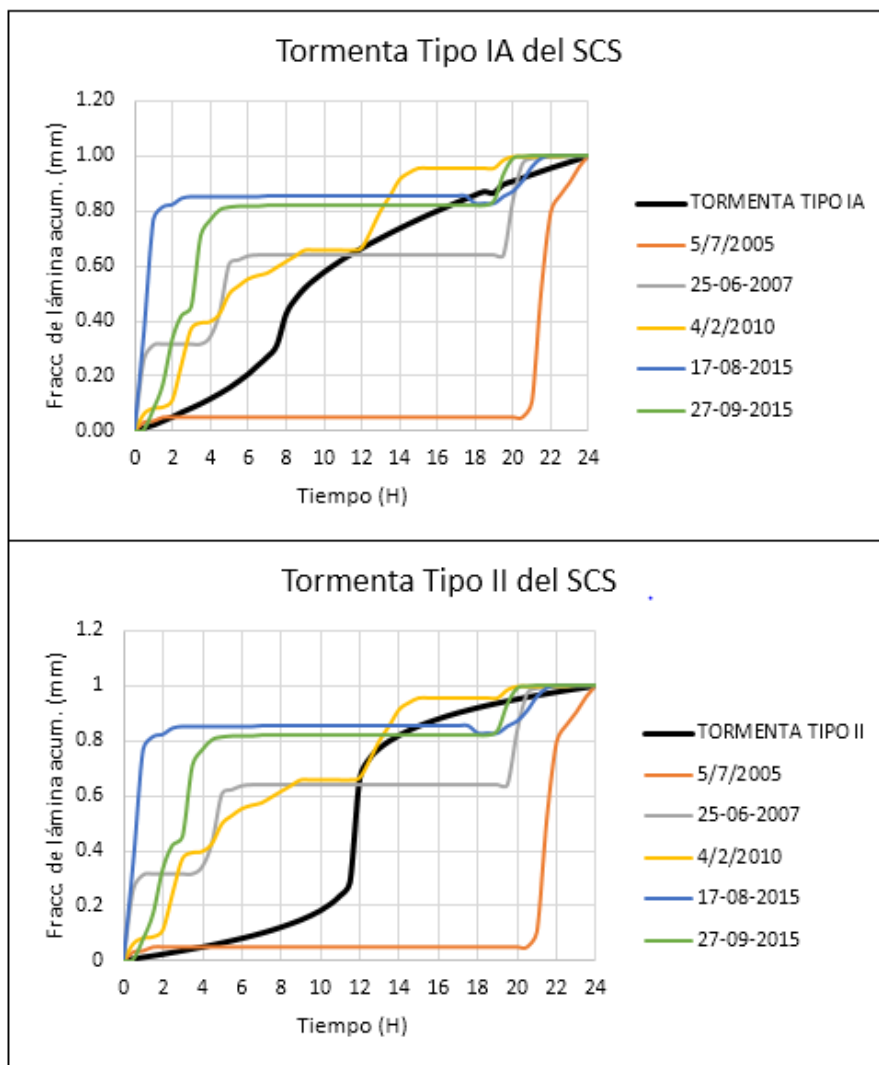


Figura 39. Comparación de las tormentas sintéticas del SCS Tipo IA y II con las tormentas críticas de 24 horas de duración para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

5.6.3.3. Método del bloque alterno

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 80.00 % de las tormentas evaluadas obtuvo mal ajuste. En el Cuadro 53 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas extremas y la tormenta del Bloque alterno. En la Figura 40 se observa la tormenta del bloque alterno comparada con los eventos críticos evaluados.

Cuadro 53. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta del Bloque alterno para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Bloque alterno					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
05 de julio de 2005	54.6	266.20	27.21	-2.48	Malo
25 de junio de 2007	69.1	19.77	20.69	-0.83	Malo
04 de febrero de 2010	60.69	11.72	15.89	0.24	Satisfactorio
17 de agosto de 2015	70	32.76	34.65	-9.51	Malo
27 de septiembre de 2015	59.8	24.81	24.16	-1.62	Malo

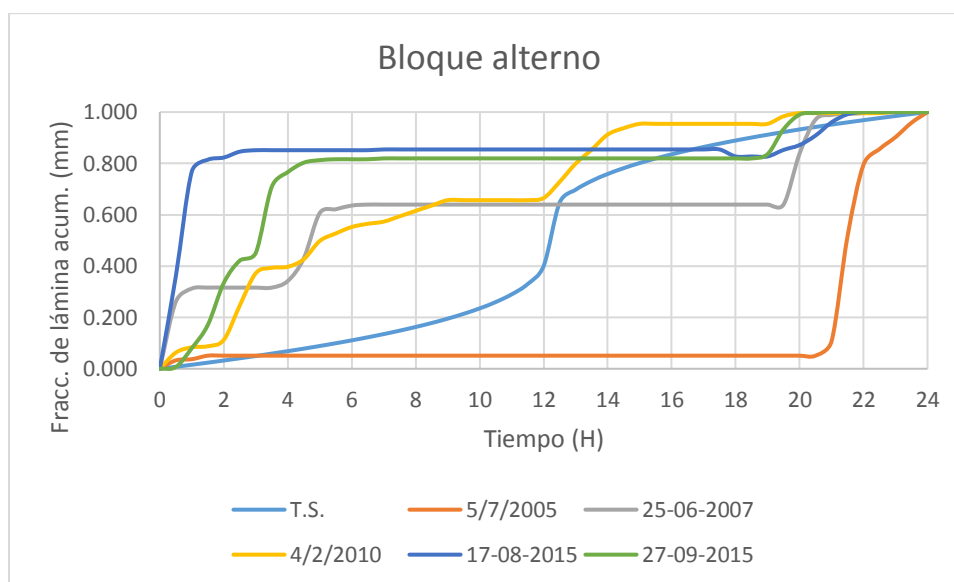


Figura 40. Comparación del método del bloque alterno y las tormentas críticas con 24 horas de duración para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

5.6.3.4. Método de Yen y Chow

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 100.00 % de las tormentas evaluadas obtuvo un mal ajuste. En el Cuadro 54 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas extremas y la tormenta del Bloque alterno y en la Figura 41 se observa la tormenta del bloque alterno comparada con los eventos críticos evaluados.

Cuadro 54. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta de Yen y Chow para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Yen y Chow					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
05 de julio de 2005	54.6	211.03	37.54	-1.76	Malo
25 de junio de 2007	69.1	20.76	32.85	-0.92	Malo
04 de febrero de 2010	60.69	15.79	28.58	-0.03	Malo
17 de agosto de 2015	70	36.74	56.85	-10.79	Malo
27 de septiembre de 2015	59.8	28.37	40.02	-1.99	Malo

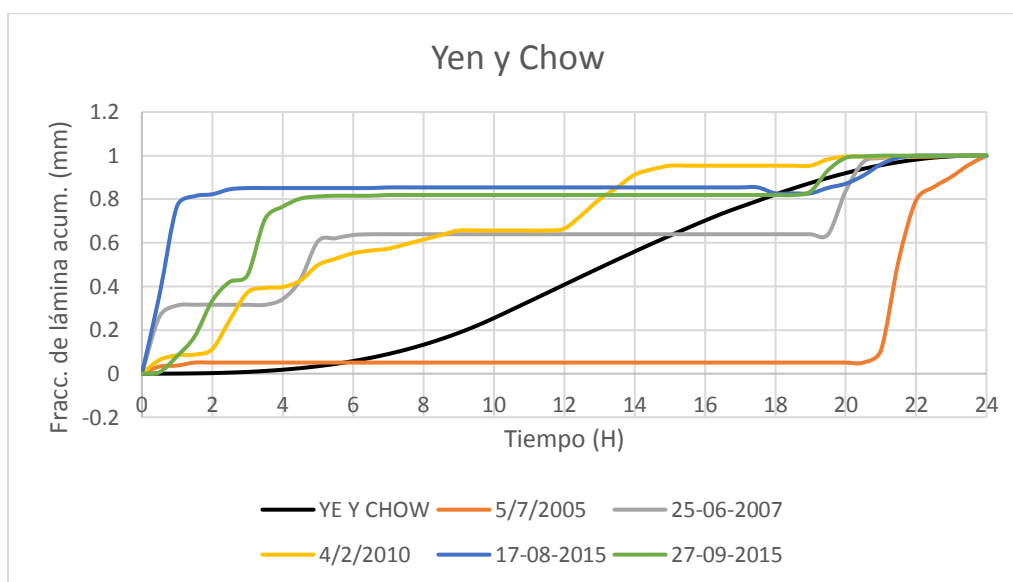


Figura 41. Comparación del método de bloque alterno y las tormentas críticas con 24 horas de duración para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Para las tormentas con 24 horas de duración se recomienda la distribución de lluvia del tercer de Huff; los demás patrones de distribución se ordenaron de forma descendente con base en los indicadores estadísticos empleados: en segundo lugar se encuentra el método del bloque alterno; en tercer lugar el método de Yen y Chow, en cuarto lugar la tormenta tipo II del SCS, en quinto lugar la tormenta Tipo IA del SCS, en sexto lugar el segundo cuartil de Huff, en séptimo lugar el cuarto cuartil de Huff y en octavo lugar el primer cuartil de Huff.

5.6.4. Observatorio meteorológico de Tapachula

5.6.4.1. Método de Huff

El criterio de selección usado fue el coeficiente de Nash-Sutcliffe más alto, sin importar que el criterio sea excelente y se ajuste a dos cuartiles, se tomó el de mayor valor. De acuerdo al criterio expuesto en el apartado 4.2.5, se obtuvieron 7 tormentas críticas que fueron evaluadas.

En el Cuadro 55 se muestra un resumen de los cuatro cuartiles de Huff el cual se basa en el criterio Nash-Sutcliffe más alto. Se compararon los coeficientes de Nash-Sutcliffe obtenidos para cada cuartil de Huff de cada evento extremo.

Cuadro 55. Resumen del ajuste de las tormentas críticas con duración de 24 horas de acuerdo al criterio de Nash-Sutcliffe más alto para los cuatro cuartiles propuestos por Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula.

	Primer cuartil	Segundo cuartil	Tercer cuartil	Cuarto cuartil
No. De tormentas	0	2	5	0
Porcentaje (%)	0.00	28.6	71.4	0.0

5.6.4.1.1. Primer cuartil de Huff

En el primer cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 14.29 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste bueno y fue la tormenta del 04 de septiembre de 2005 con un coeficiente de 0.65. En el Cuadro 56 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el primer cuartil de Huff.

Cuadro 56. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el primer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula.

Primer cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
04 de septiembre de 2005	225.65	9.93	47.99	0.65	Bueno
05 de septiembre de 2005	336.4	24.22	99.26	0.23	Deficiente
06 de septiembre de 2005	182.9	37.59	62.49	-0.17	Malo
04 de octubre de 2005	356.46	9.45	75.87	0.32	Satisfactorio
05 de octubre de 2005	151.1	21.15	43.10	0.32	Satisfactorio

06 de octubre de 2005	143.76	35.34	51.46	0.13	Deficiente
18 de octubre de 2011	123.5	74.35	57.16	-0.44	Malo

5.6.4.1.2. Segundo cuartil de Huff

En el segundo cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 42.86 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y fueron las tormentas del 04 de septiembre de 2005, 04 de octubre de 2005 y el 05 de octubre de 2005 con coeficientes de 0.93, 0.99 y 0.82 respectivamente. En el Cuadro 66 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el segundo cuartil de Huff.

Cuadro 57. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el segundo cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula.

Segundo Cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
04 de septiembre de 2005	225.65	1.87	20.82	0.93	Excelente
05 de septiembre de 2005	336.4	6.44	51.20	0.8	Bueno
06 de septiembre de 2005	182.9	14.84	39.26	0.54	Bueno
04 de octubre de 2005	356.46	0.4	15.61	0.99	Excelente
05 de octubre de 2005	151.1	5.68	22.34	0.82	Excelente
06 de octubre de 2005	143.76	11.12	28.87	0.73	Bueno
18 de octubre de 2011	123.5	35.12	39.29	0.32	Satisfactorio

5.6.4.1.3. Tercer cuartil de Huff

En el tercer cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 71.43 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y el 28.57 % restante obtuvo un criterio bueno. Los coeficientes de Nash-Sutcliffe van desde 0.61 hasta 0.97. En el Cuadro 58 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el tercer cuartil de Huff.

Cuadro 58. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el tercer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula.

Tercer cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
04 de septiembre de 2005	225.65	11.07	50.68	0.61	Bueno
05 de septiembre de 2005	336.4	2.69	33.05	0.91	Excelente
06 de septiembre de 2005	182.9	2.68	16.70	0.92	Excelente
04 de octubre de 2005	356.46	8.23	70.82	0.72	Bueno
05 de octubre de 2005	151.1	2.12	13.66	0.93	Excelente
06 de octubre de 2005	143.76	1.06	8.89	0.97	Excelente
18 de octubre de 2011	123.5	4.06	13.36	0.92	Excelente

5.6.4.1.4. Cuarto cuartil de Huff

En el cuarto cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 14.29 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y fue la tormenta del 18 de octubre de 2011 con un coeficiente de 0.83. En el Cuadro 68 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el tercer cuartil de Huff.

Cuadro 59. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y el cuarto cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula.

Cuarto cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
04 de septiembre de 2005	225.65	24.37	75.19	0.15	Deficiente
05 de septiembre de 2005	336.4	14.12	75.78	0.55	Bueno
06 de septiembre de 2005	182.9	11.56	34.65	0.64	Bueno
04 de octubre de 2005	356.46	24.98	123.37	0.15	Deficiente
05 de octubre de 2005	151.1	15.14	36.47	0.52	Bueno
06 de octubre de 2005	143.76	11.38	29.20	0.72	Bueno
18 de octubre de 2011	123.5	8.71	19.57	0.83	Excelente

De acuerdo con los resultados mostrados en cada uno de los cuartiles se tiene que para el método de Huff el tercer cuartil es el mejor patrón de distribución que representa de forma

adecuada a las tormentas críticas del observatorio meteorológico de Tapachula. En la Figura 42 se observan los cuatro cuartiles de Huff comparados con las tormentas críticas evaluadas.

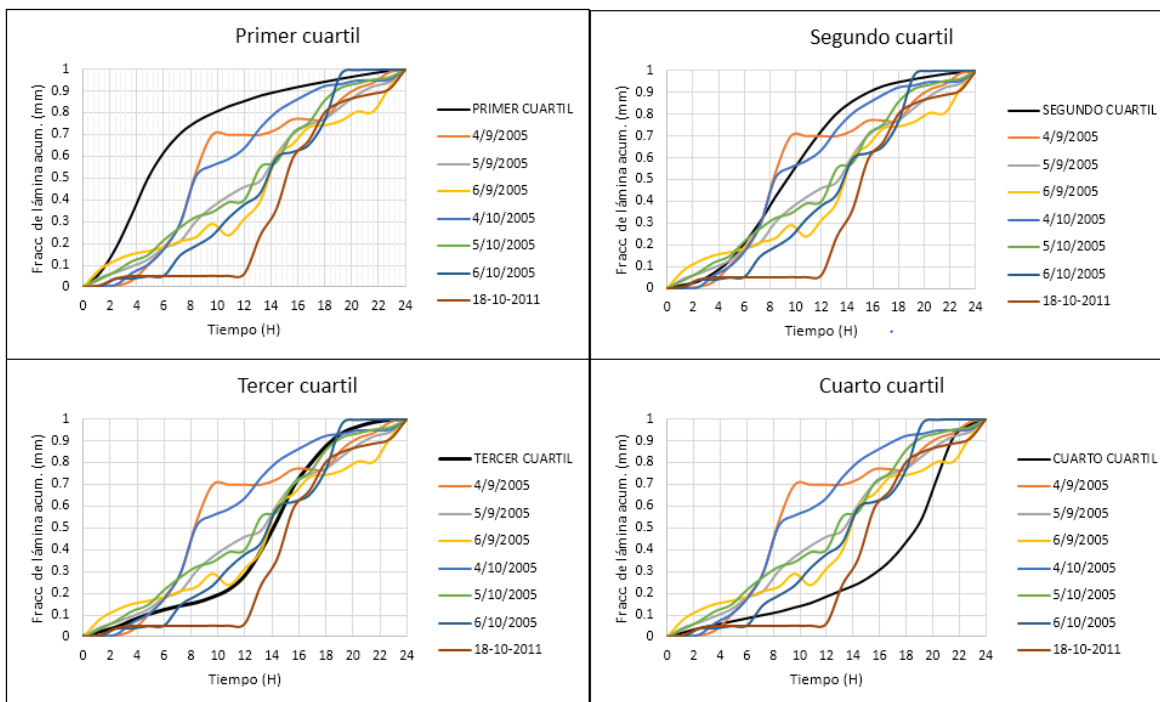


Figura 42. Comparación de los cuatro cuartiles de Huff con las tormentas críticas de 24 horas duración para el observatorio meteorológico de Tapachula.

5.6.4.2. Método del Servicio de Conservación de Suelos

5.6.4.2.1. Tormenta Tipo IA

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 71.43 % de las tormentas evaluadas se ajustó a un criterio excelente. Las tormentas con criterio excelente son; el 04 de febrero de 2005, 05 de septiembre de 2005, 06 de septiembre de 2005, 04 de octubre de 2005 y 05 de octubre de 2005 con coeficientes de 0.97, 0.89, 0.86, 0.99 y 0.88 respectivamente. En el Cuadro 60 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas extremas y la tormenta Tipo IA del SCS.

Cuadro 60. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta Tipo IA del SCS para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Tormenta Tipo IA					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Eficiencia de Nash-Sutcliffe	Criterio
04 de septiembre de 2005	225.65	0.84	11.8631758	0.97	Excelente
05 de septiembre de 2005	336.4	3.33	21.7846342	0.89	Excelente
06 de septiembre de 2005	182.9	4.49	17.7478402	0.86	Excelente
04 de octubre de 2005	356.46	0.39	9.10500063	0.99	Excelente
05 de octubre de 2005	151.1	3.6	10.5257802	0.88	Excelente
06 de octubre de 2005	143.76	8.51	16.8875017	0.79	Bueno
18 de octubre de 2011	123.5	27.6	22.4937731	0.46	Satisfactorio

5.6.4.2.2. Tormenta Tipo II

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 57.14 % de las tormentas evaluadas se ajustó a un criterio excelente. Las tormentas con criterio excelente son; el 05 de septiembre de 2005, 06 de septiembre de 2005, 05 de octubre de 2005 y el 06 de octubre de 2005 con coeficientes de 0.82, 0.92, 0.84 y 0.87 respectivamente. En el Cuadro 61 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas extremas y la tormenta Tipo II del SCS.

Cuadro 61. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta Tipo II del SCS para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Tormenta Tipo II					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
04 de septiembre de 2005	225.65	8.08	34.18	0.74	Bueno
05 de septiembre de 2005	336.4	5.45	26.97	0.82	Excelente
06 de septiembre de 2005	182.9	2.52	10.94	0.92	Excelente
04 de octubre de 2005	356.46	5.96	53.18	0.79	Bueno
05 de octubre de 2005	151.1	4.96	13.31	0.84	Excelente
06 de octubre de 2005	143.76	5.36	4.04	0.87	Excelente
18 de octubre de 2011	123.5	14.85	5.21	0.71	Bueno

De acuerdo con los resultados mostrados en los cuadros 60 y 61 se tiene que para el método del SCS la Tormenta Tipo IA es el patrón de distribución adecuado para las tormentas críticas del observatorio meteorológico de Tapachula. En la Figura 43 se observan las tormenta Tipo IA y II del SCS comparadas con los eventos críticos evaluados.

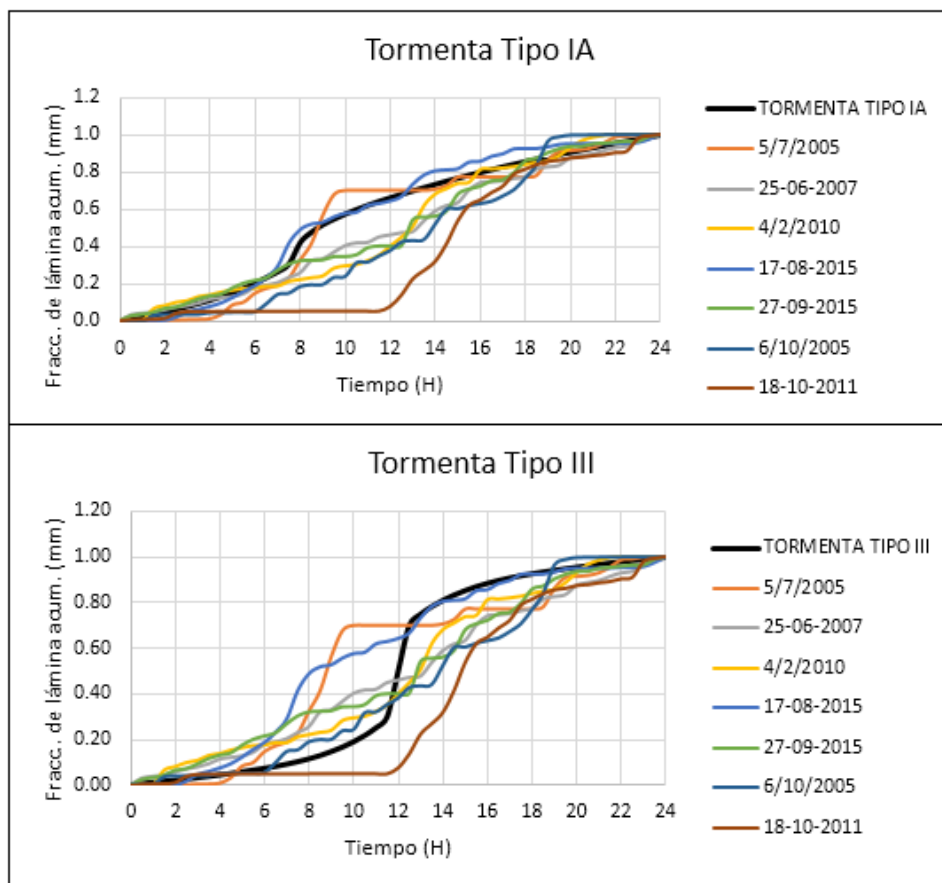


Figura 43. Comparación de las tormentas sintéticas del SCS Tipo IA y II con las tormentas críticas de 24 horas de duración para el observatorio meteorológico de Tapachula.

5.6.4.3. Método del Bloque Alterno

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 71.43 % de las tormentas evaluadas se ajustó a un criterio excelente. Las tormentas con criterio excelente son; el 05 de septiembre de 2005, 06 de septiembre de 2005, 04 de octubre de 2005, 05 de octubre de 2005 y el 06 de octubre de 2005 con coeficientes de 0.90, 0.97, 0.83, 0.91 y 0.92 respectivamente. En el Cuadro 71 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la

evaluación del ajuste de las tormentas extremas y la tormenta del bloque alternativo. En la Figura 44 se observa la tormenta del bloque alternativo comparada con los eventos críticos evaluados.

Cuadro 62. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta del bloque alternativo para el observatorio meteorológico de Tapachula.

Bloque alternativo					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
04 de septiembre de 2005	225.65	0.79	6.34	0.79	Bueno
05 de septiembre de 2005	336.4	2.91	33.82	0.9	Excelente
06 de septiembre de 2005	182.9	1.05	11.60	0.97	Excelente
04 de octubre de 2005	356.46	4.73	53.19	0.83	Excelente
05 de octubre de 2005	151.1	2.62	14.85	0.91	Excelente
06 de octubre de 2005	143.76	3.31	15.41	0.92	Excelente
18 de octubre de 2011	123.5	12.04	22.91	0.76	Bueno

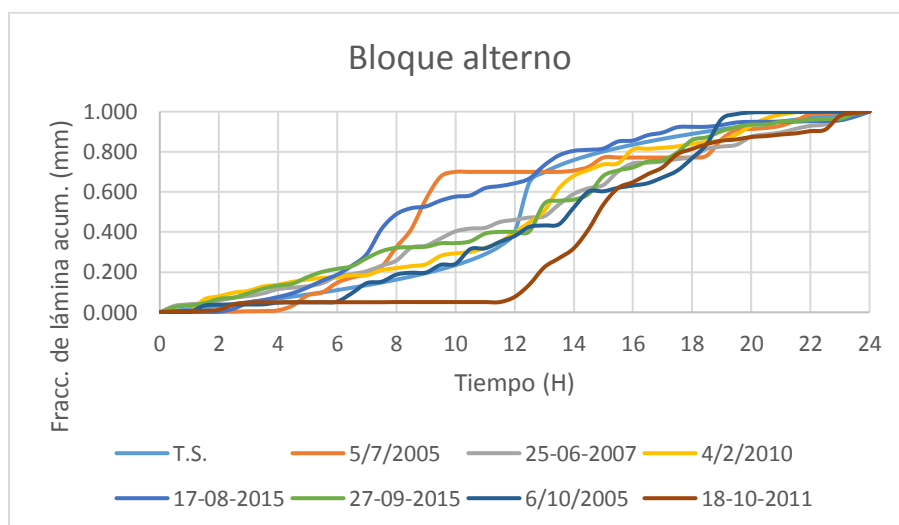


Figura 44. Comparación de las tormentas reales con el método del bloque alternativo para el observatorio meteorológico de Tapachula.

5.6.4.4. Método de Yen y Chow

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 71.43 % de las tormentas evaluadas se ajustó a un criterio excelente y el 21.43 % un ajuste bueno. En el Cuadro 72 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las

tormentas extremas y la tormenta de Yen y Chow. En la Figura 45 se observa la tormenta del método de Yen y Chow comparada con los eventos críticos evaluados.

Cuadro 63. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 24 horas y la tormenta del método de Yen y Chow para el observatorio meteorológico de Tapachula.

Yen y Chow					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
04 de septiembre de 2005	225.65	11.77	36.46	0.62	Bueno
05 de septiembre de 2005	336.4	4.22	32.19	0.86	Excelente
06 de septiembre de 2005	182.9	3.59	14.11	0.89	Excelente
04 de octubre de 2005	356.46	11.95	57.78	0.57	Bueno
05 de octubre de 2005	151.1	4.26	15.81	0.86	Excelente
06 de octubre de 2005	143.76	1.21	5.88	0.97	Excelente
18 de octubre de 2011	123.5	2.14	4.38	0.96	Excelente

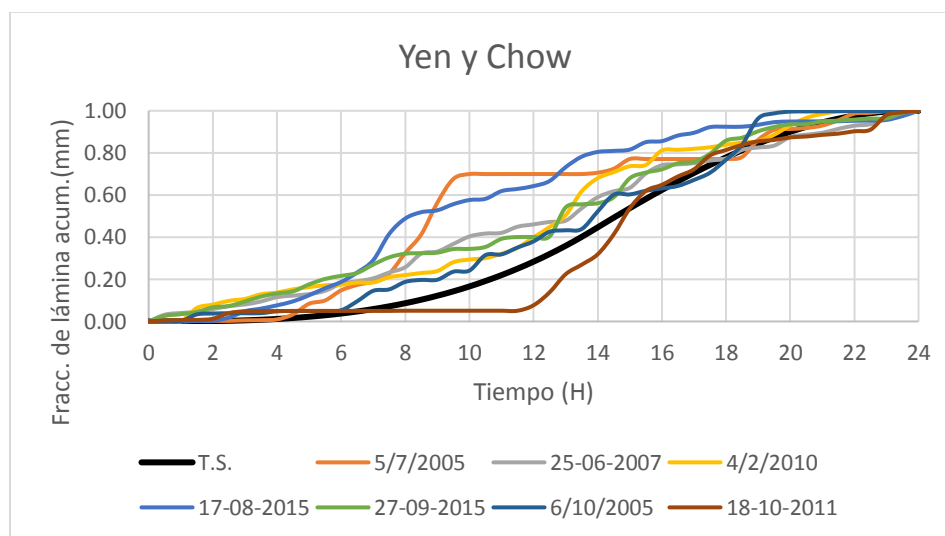


Figura 45. Comparación de las tormentas reales con el método de Yen y Chow para el observatorio meteorológico de Tapachula.

De acuerdo con los resultados obtenidos, para las tormentas de 24 horas de duración se recomienda la distribución del tercer cuartil de Huff; los demás patrones de distribución se ordenaron de forma descendente con base en los indicadores estadísticos empleados: en segundo lugar se encuentra el método del bloque alterno; en tercer lugar el método de Yen y Chow, en cuarto lugar la tormenta Tipo II del SCS, en quinto lugar la tormenta Tipo II del

SCS, en sexto lugar el segundo cuartil de Huff, en séptimo lugar el cuarto cuartil de Huff y en octavo lugar el primer cuartil de Huff.

5.7. Tormentas analizadas con 6 horas de duración

5.7.1. Estación meteorológica Chapingo

5.7.1.1. Método de Huff

El criterio de selección usado fue el coeficiente de Nash-Sutcliffe más alto, sin importar que el criterio sea excelente y se ajuste a dos cuartiles, se tomó el de mayor valor. De acuerdo al criterio expuesto en el apartado 4.2.5, se obtuvieron 7 tormentas críticas que fueron evaluadas.

En el Cuadro 73 se muestra un resumen de los cuatro cuartiles de Huff el cual se basa en el criterio Nash-Sutcliffe más alto. Se compararon los coeficientes de Nash-Sutcliffe obtenidos para cada cuartil de Huff de cada evento extremo.

Cuadro 64. Resumen del ajuste de las tormentas críticas con duración de 6 horas de acuerdo al criterio de Nash-Sutcliffe más alto para los cuatro cuartiles propuestos por Huff para la estación meteorológica Chapingo.

	Primer cuartil	Segundo cuartil	Tercer cuartil	Cuarto cuartil
No. De tormentas	4	1	1	1
Porcentaje (%)	66.67	14.3	14.3	14.3

5.7.1.1.1. Primer cuartil de Huff

En el primer cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 14.29 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste bueno y fue la tormenta del 21 de agosto de 1998 con un coeficiente de 0.76. En el Cuadro 74 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el primer cuartil de Huff.

Cuadro 65. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el primer cuartil de Huff para la estación meteorológica Chapingo.

Primer cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
12 de octubre de 1990	65.5	4.44	12.24	0.42	Satisfactorio
26 de septiembre de 1992	36.2	4.66	6.9	0.32	Satisfactorio
29 de junio de 1998	35.1	41.85	13.8	0.02	Deficiente
11 de agosto de 1998	47.7	46.93	21.38	0.1	Deficiente
21 de agosto de 1998	47.4	3.01	7.44	0.76	Bueno
01 de julio de 2007	32.2	22.03	10.26	0.43	Satisfactorio
25 de julio de 2011	30.9	6.84	7.41	-0.13	Malo

5.7.1.1.2. Segundo cuartil de Huff

En el segundo cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 14.29 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y fue la tormenta del 01 de julio de 2009 con un coeficiente de 0.90. En el Cuadro 66 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el segundo cuartil de Huff.

Cuadro 66. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el segundo cuartil de Huff para la estación meteorológica Chapingo.

Segundo cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
12 de octubre de 1990	65.5	16.68	23.73	-1.18	Malo
26 de septiembre de 1992	36.2	15.71	12.66	-1.31	Malo
29 de junio de 1998	35.1	17.93	9.03	0.58	Bueno
11 de agosto de 1998	47.7	20.05	13.98	0.62	Bueno
21 de agosto de 1998	47.4	15.25	16.76	0.07	Deficiente
01 de julio de 2007	32.2	3.86	4.29	0.9	Excelente
25 de julio de 2011	30.9	19.89	12.63	-2.3	Malo

5.7.1.1.3. Tercer cuartil de Huff

En el tercer cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 28.57 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y fueron las tormentas del 11 de agosto de 1998 y el 01 de julio de 2007 con coeficientes de 0.91 y 0.90 respectivamente. En el Cuadro 76 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el tercer cuartil de Huff.

Cuadro 67. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el tercer cuartil de Huff para la estación meteorológica Chapingo.

Tercer cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
12 de octubre de 1990	65.5	30.98	32.34	-3.05	Malo
26 de septiembre de 1992	36.2	29.9	17.5	-3.4	Malo
29 de junio de 1998	35.1	5422.99	157.07	-126.44	Malo
11 de agosto de 1998	47.7	4.73	6.79	0.91	Excelente
21 de agosto de 1998	47.4	31.27	24	-0.9	Malo
01 de julio de 2007	32.2	3.96	4.35	0.9	Excelente
25 de julio de 2011	30.9	34.05	16.53	-4.65	Malo

5.7.1.1.4. Cuarto cuartil de Huff

En el cuarto cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 28.57 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste bueno y son el 29 de junio de 1998 y el 21 de agosto de 1998 con coeficientes de 0.91 y 0.90 respectivamente. En el Cuadro 77 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el cuarto cuartil de Huff.

Cuadro 68. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el cuarto cuartil de Huff para la estación meteorológica Chapingo.

Cuarto cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Eficiencia de nash-sutcliffe	Criterio
12 de octubre de 1990	65.5	45.44	39.17	-4.94	Malo
26 de septiembre de 1992	36.2	44.91	21.41	-5.6	Malo
29 de junio de 1998	35.1	14.5	8.12	0.66	Bueno
11 de agosto de 1998	47.4	46.45	29.25	-1.83	Malo
21 de agosto de 1998	47.7	21.42	14.45	0.59	Bueno

01 de julio de 2007	32.2	21.62	10.16	0.44	Satisfactorio
25 de julio de 2011	30.9	48.03	19.63	-6.96	Malo

De acuerdo con los resultados mostrados en cada uno de los cuartiles se tiene que para el método de Huff el primer cuartil es el mejor patrón de distribución que representa de forma adecuada a las tormentas críticas de la estación meteorológica Chapingo. En la Figura 46 se observan los cuatro cuartiles de Huff comparados con las tormentas críticas evaluadas.

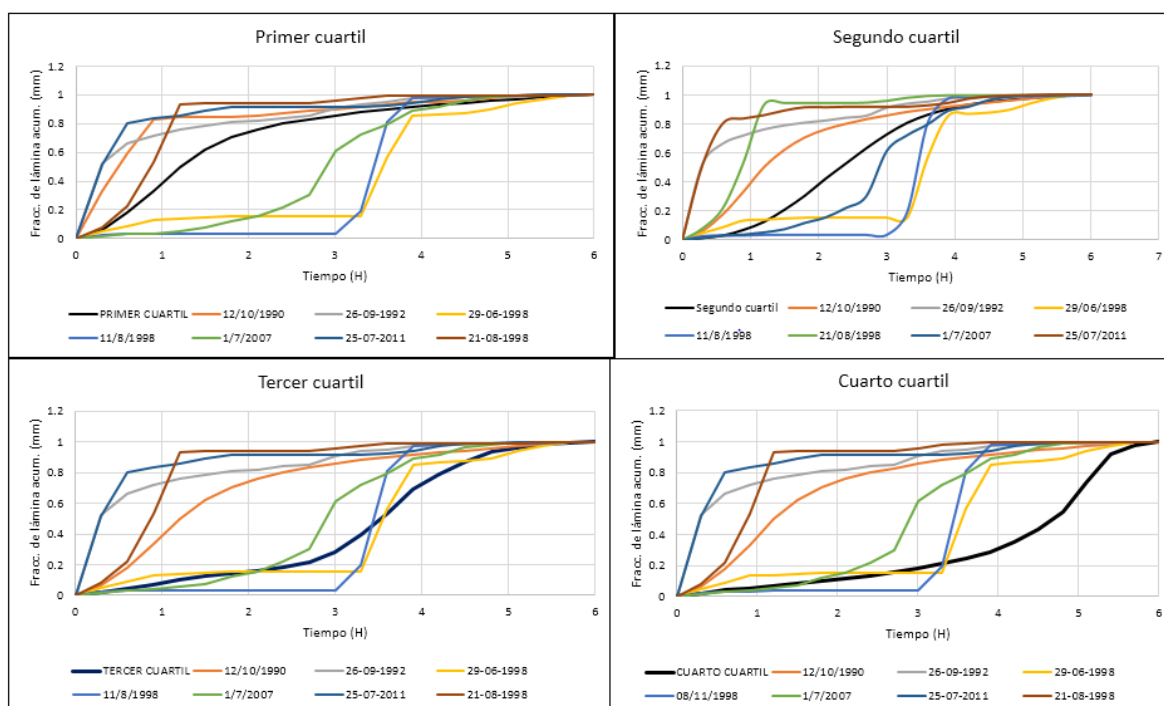


Figura 46. Comparación de los cuatro cuartiles de Huff con las tormentas críticas de 6 horas para la estación meteorológica Chapingo.

5.7.1.2. Servicio de Conservación de Suelos

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 14.29 % de las tormentas evaluadas se ajustó a un criterio excelente. La tormenta con criterio excelente es el 01 de julio de 2007 con un coeficiente de 0.88. En el Cuadro 69 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas extremas y la tormenta del SCS para 6 horas de duración. En la Figura 47 se aprecia la comparación de la tormenta sintética del SCS y los eventos analizados en la estación Chapingo.

Cuadro 69. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y la tormenta sintética del SCS para la estación meteorológica Chapingo.

Tormenta del SCS					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
12 de octubre de 1990	65.5	16.47	23.06	-1.37	Malo
26 de septiembre de 1992	36.2	15.43	12.74	-1.35	Malo
29 de junio de 1998	35.1	46.53	11.61	0.02	Deficiente
11 de agosto de 1998	47.7	54	18.79	0.16	Deficiente
21 de agosto de 1998	47.4	65.53	25.59	-7.02	Malo
01 de julio de 2007	32.2	6.92	5.53	0.82	Excelente
25 de julio de 2011	30.9	19.73	12.47	-2.75	Malo

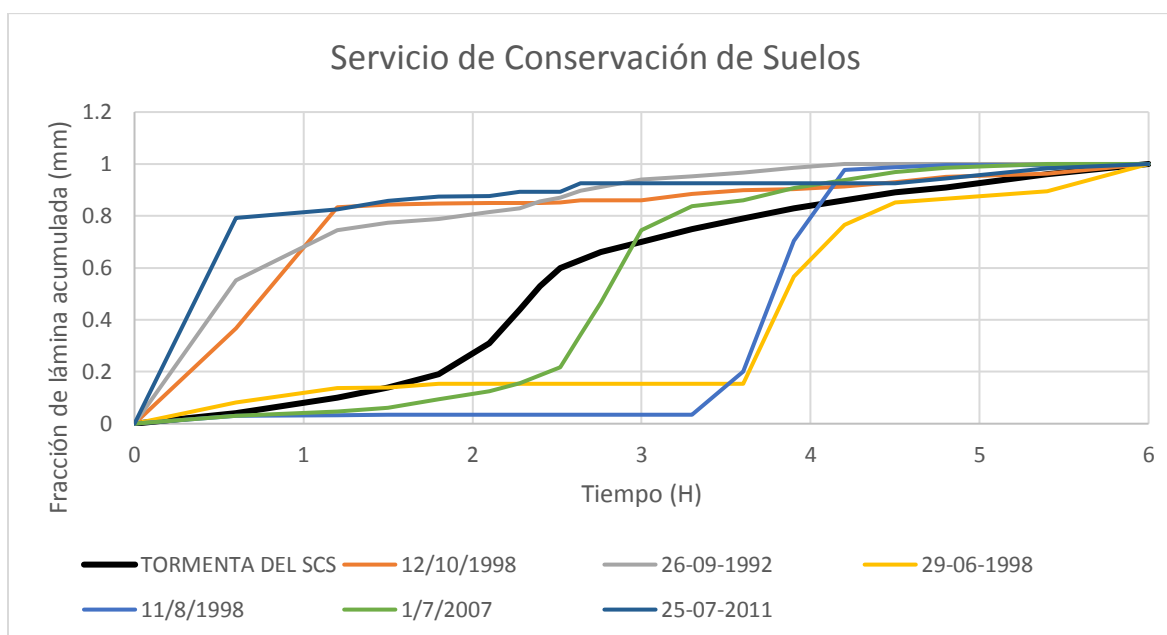


Figura 47. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas y la tormenta diseño del SCS para la estación meteorológica Chapingo.

5.7.1.3. Método del bloque alterno

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 14.29 % de las tormentas evaluadas se ajustó a un criterio excelente. La tormenta con criterio excelente es el 01 de julio de 2007 con un coeficiente de 0.97. En el Cuadro 70 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas extremas y la tormenta del

SCS para 6 horas de duración. En la Figura 48 se aprecia la comparación de la tormenta sintética del SCS y los eventos analizados en la estación Chapingo.

Cuadro 70. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y la tormenta sintética del bloque alterno para la estación meteorológica Chapingo.

Bloque alterno					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
12 de octubre de 1990	65.5	27.95	29.22	-3.4	Malo
26 de septiembre de 1992	36.2	29.28	17.91	-4.26	Malo
29 de junio de 1998	35.1	36.81	10.89	0.2	Deficiente
11 de agosto de 1998	47.4	22.16	13.48	0.61	Bueno
21 de agosto de 1998	47.7	27.73	22.39	-1.37	Malo
01 de julio de 2007	32.2	1.08	2.26	0.97	Excelente
25 de julio de 2011	30.9	30.95	15.43	-5.22	Malo

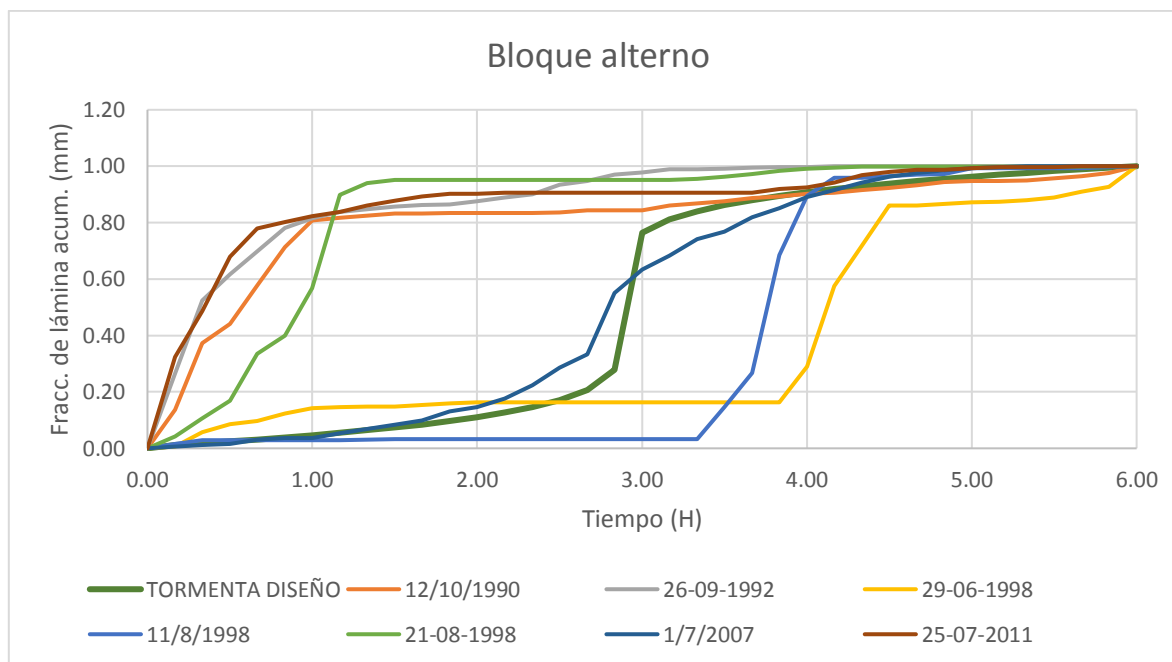


Figura 48. Comparación de las tormentas críticas con 6 horas de duración y la tormenta diseño del bloque alterno para la estación meteorológica Chapingo.

5.7.1.4. Método de Yen y Chow

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 14.29 % de las tormentas evaluadas se ajustó a un criterio excelente. La tormenta con criterio excelente es el 01 de julio de 2007 con un coeficiente de 0.96. En el Cuadro 71 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados en la evaluación del ajuste de las tormentas extremas y la tormenta del SCS para 6 horas de duración. En la Figura 49 se aprecia la comparación de la tormenta sintética del método de Yen y Chow y los eventos analizados en la estación Chapingo.

Cuadro 71. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y la tormenta sintética de Yen y Chow para la estación metrológica Chapingo.

Primer cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
12 de octubre de 1990	65.5	25.02	27.63	-2.71	Malo
26 de septiembre de 1992	36.2	27.56	17.34	-4.06	Malo
29 de junio de 1998	35.1	36.81	10.89	0.52	Bueno
11 de agosto de 1998	47.7	15.8	11.22	0.73	Bueno
21 de agosto de 1998	47.4	25.5	21.51	-1.24	Malo
01 de julio de 2007	32.2	1.64	2.74	0.96	Excelente
25 de julio de 2011	30.9	28.43	14.78	-4.86	Malo

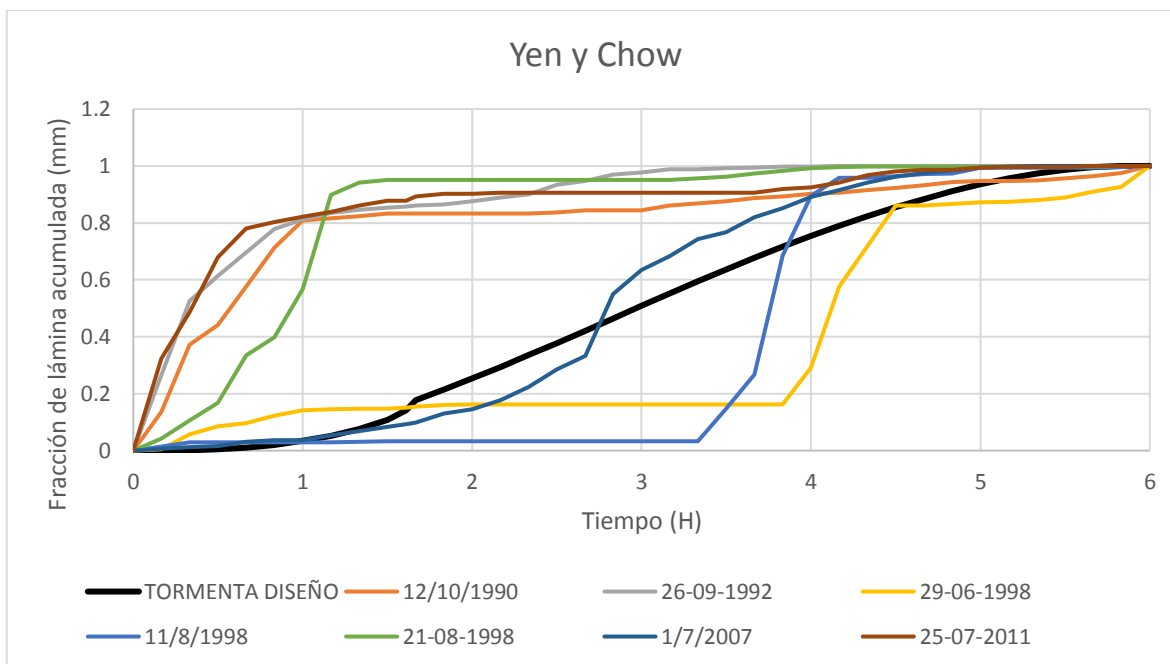


Figura 49. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas de duración y la tormenta diseño propuesta por Yen y Chow para la estación meteorológica Chapingo.

De acuerdo con los resultados obtenidos en cada método, para las tormentas con duración de 6 horas se recomienda la distribución del primer cuartil de Huff, como lo propone Márquez y Mendoza (2015), aunque no se tiene tormentas con ajuste excelente y los coeficientes son más bajos solo una tormenta tuvo un mal ajuste a comparación de los otros patrones diseño; los demás patrones de distribución se ordenaron de forma descendente con base en los indicadores estadísticos empleados: en segundo lugar se encuentra el segundo cuartil de Huff; en tercer lugar el tercer cuartil de Huff; en cuarto lugar método de Yen y Chow; en quinto lugar el método del Bloque Alternó; en sexto lugar el SCS y en séptimo lugar el cuarto cuartil de Huff.

5.7.2. Observatorio meteorológico de la Ciudad de México

5.7.2.1. Método de Huff

El criterio de selección usado fue el coeficiente de Nash-Sutcliffe más alto, sin importar que el criterio sea excelente y se ajuste a dos cuartiles, se tomó el de mayor valor. De acuerdo al criterio expuesto en el apartado 4.2.5, se obtuvieron 4 tormentas críticas que fueron evaluadas.

En el Cuadro 72 se muestra un resumen de los cuatro cuartiles de Huff el cual se basa en el criterio Nash-Sutcliffe más alto. Se compararon los coeficientes de Nash-Sutcliffe obtenidos para cada cuartil de Huff de cada evento extremo.

Cuadro 72. Resumen del ajuste de las tormentas críticas con duración de 6 horas de acuerdo al criterio de Nash-Sutcliffe más alto para los cuatro cuartiles propuestos por Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

	Primer cuartil	Segundo cuartil	Tercer cuartil	Cuarto cuartil
No. De tormentas	1	1	1	1
Porcentaje (%)	25.00	25.00	25.0	25.0

5.7.2.1.1. Primer cuartil de Huff

En el primer cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 50.0 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y son las tormentas del 02 de agosto de 2006 y 04 de mayo de 2014 con coeficientes de 0.83 y 0.94 respectivamente. En el Cuadro 73 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el primer cuartil de Huff.

Cuadro 73. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el primer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Primer cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
02 de agosto de 2006	66	3.89	10.94	0.83	Excelente
18 de septiembre de 2006	68.3	28.11	23.32	0.27	Deficiente
04 de mayo de 2014	70.34	0.92	5.17	0.94	Excelente
13 de mayo de 2014	66.79	126.4	31.66	-2.01	Malo

5.7.2.1.2. Segundo cuartil de Huff

En el segundo cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 50.0 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste bueno y son las tormentas del 18 de septiembre de 2006 y 04 de mayo de 2014 con coeficientes de 0.69. En el Cuadro 74 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el segundo cuartil de Huff.

Cuadro 74. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el segundo cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Segundo cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
02 de agosto de 2006	66	2.05	7.93	0.93	Excelente
18 de septiembre de 2006	68.3	11.98	15.22	0.69	Bueno
04 de mayo de 2014	70.34	16.36	21.79	0.69	Bueno
13 de mayo de 2014	66.79	75.75	24.51	-0.8	Malo

5.7.2.1.3. Tercer cuartil de Huff

En el tercer cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 25.0 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y es la tormenta del 18 de septiembre de 2006 con un coeficiente de 0.91. En el Cuadro 75 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el tercer cuartil de Huff.

Cuadro 75. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el tercer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Tercer cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Error medio cuadrático	Eficiencia de Nash-Sutcliffe	Criterio
02 de agosto de 2006	66	15.24	21.65	0.48	Satisfactorio
18 de septiembre de 2006	68.3	3.28	7.97	0.91	Excelente
04 de mayo de 2014	70.34	16.36	21.79	-0.06	Malo
13 de mayo de 2014	66.79	32.78	16.12	0.79	Bueno

5.7.2.1.4. Cuarto cuartil de Huff

En el tercer cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 25.0 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y es la tormenta del 13 de mayo de 2014 con un coeficiente de 0.91. En el Cuadro 76 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el tercer cuartil de Huff.

Cuadro 76. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el cuarto cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Cuarto cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Error medio cuadrático	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
02 de agosto de 2006	66	31.94	31.35	-0.09	Malo
18 de septiembre de 2006	68.3	9.27	13.39	0.76	Bueno
04 de mayo de 2014	70.34	32.60	30.76	-1.12	Malo
13 de mayo de 2014	66.79	3.81	5.50	0.91	Excelente

De acuerdo con los resultados mostrados en cada uno de los cuartiles se tiene que para el método de Huff el segundo cuartil es el mejor patrón de distribución que representa de forma adecuada a las tormentas críticas del observatorio meteorológico de la Ciudad de México. En la Figura 50 se observan los cuatro cuartiles de Huff comparados con las tormentas críticas evaluadas.

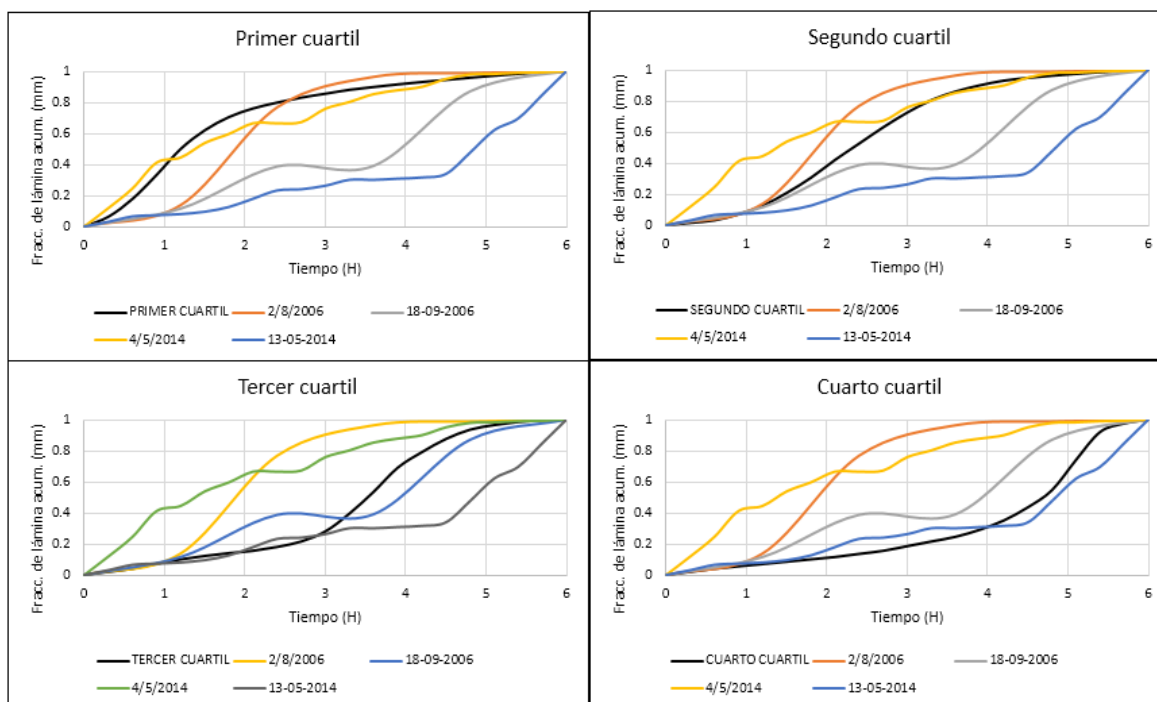


Figura 50. Comparación de los cuatro cuartiles de Huff y las tormentas críticas de 6 horas de duración para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

5.7.2.2. Servicio de Conservación de Suelos

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 25.0 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y es la tormenta del 18 de septiembre de 2006 con un coeficiente de 0.89. En el Cuadro 77 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el método del SCS. En la Figura 51 se observa la comparación de la tormenta sintética del SCS y los eventos reales analizados

Cuadro 77. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el método del SCS para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Servicio de Conservación de Suelos					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Eficiencia de Nash-Sutcliffe	Criterio
02 de agosto de 2006	66	7.02	15.20	0.72	Bueno
18 de septiembre de 2006	68.3	3.64	9.32	0.89	Excelente
04 de mayo de 2014	70.34	8.69	30.04	0.27	Deficiente
13 de mayo de 2014	66.79	99.17	24.25	-1.51	Malo

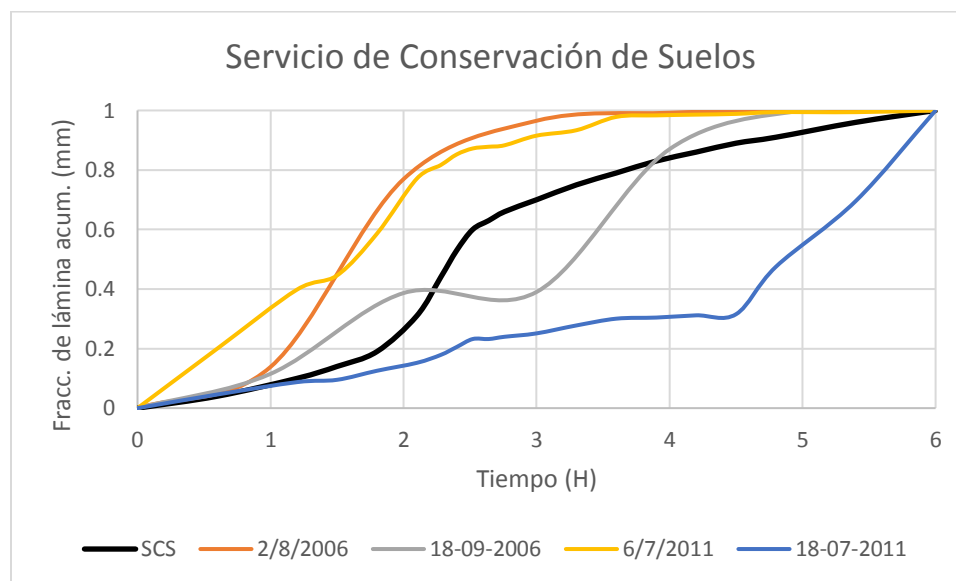


Figura 51. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas de duración y la tormenta diseño del SCS para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

5.7.2.3. Método del bloque alterno

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 50.0 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste bueno y son las tormentas del 02 de agosto de 2006 y 18 de septiembre de 2006 con coeficientes de 0.55 y 0.70 respectivamente. En el Cuadro 78 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el método del bloque alterno. En la Figura 52 se observa la comparación de la tormenta sintética del bloque alterno y los eventos reales analizados

Cuadro 78. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el método del bloque alterno para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Bloque alterno					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo	Cuadrado medio del error	Eficiencia de nash-sutcliffe	Criterio
02 de agosto de 2006	66	11.28	19.25	0.55	Bueno
18 de septiembre de 2006	68.3	10.12	15.17	0.70	Bueno
04 de mayo de 2014	70.34	17.04	22.33	-0.23	Malo
13 de mayo de 2014	66.79	115.03	26.53	-1.83	Malo

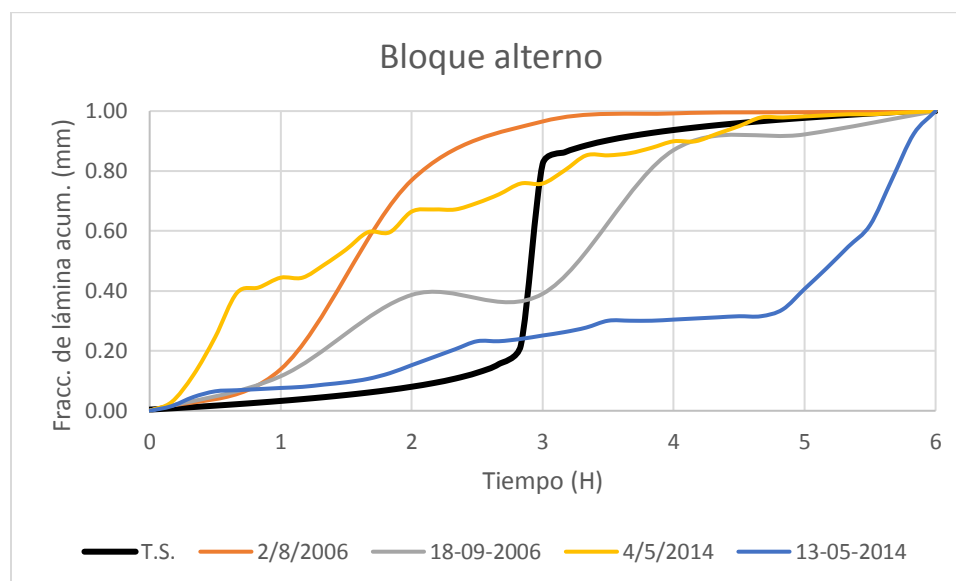


Figura 52. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas de duración y la tormenta diseño del bloque alterno para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

5.7.2.4. Método de Yen y Chow

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 75.0 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste malo. En el Cuadro 79 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el método de Yen y Chow. En la Figura 53 se observa la comparación de la tormenta sintética de Yen y Chow y los eventos reales analizados.

Cuadro 79. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el método de Yen y Chow para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Yen y Chow					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
02 de agosto de 2006	66	16.01	22.95	0.37	Satisfactorio
18 de septiembre de 2006	68.3	67.84	39.64	-1.01	Malo
04 de mayo de 2014	70.34	14.29	20.45	-0.03	Malo
13 de mayo de 2014	66.79	71.05	20.12	-0.83	Malo

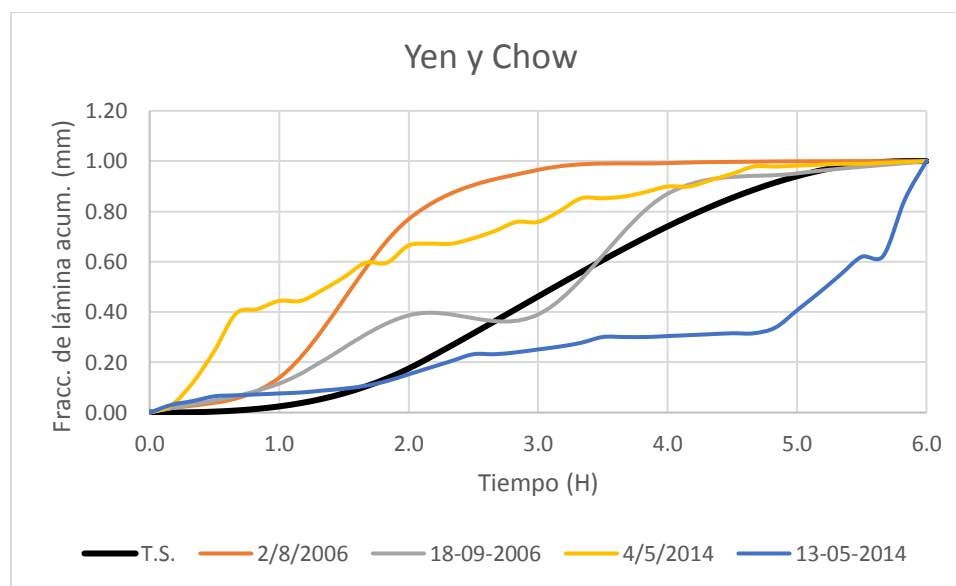


Figura 53. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas de duración y la tormenta diseño propuesta por Yen y Chow para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

De acuerdo con los resultados obtenidos en cada método, para las tormentas con duración de 6 horas se recomienda la distribución del segundo cuartil de Huff, los demás patrones de

distribución se ordenaron de forma descendente con base en los indicadores estadísticos empleados: en segundo lugar se encuentra el primer cuartil de Huff; en tercer lugar la tormenta tipo II del SCS; en cuarto lugar el tercer cuartil de Huff; en quinto lugar el cuarto cuartil de Huff; en sexto lugar el método del bloque alterno y en séptimo lugar el método de Yen y Chow.

5.7.3. Observatorio meteorológico de Cuernavaca

5.7.3.1. Método de Huff

El criterio de selección usado fue el coeficiente de Nash-Sutcliffe más alto, sin importar que el criterio sea excelente y se ajuste a dos cuartiles, se tomó el de mayor valor. De acuerdo al criterio expuesto en el apartado 4.2.5, se obtuvieron 7 tormentas críticas que fueron evaluadas.

En el Cuadro 80 se muestra un resumen de los cuatro cuartiles de Huff el cual se basa en el criterio Nash-Sutcliffe más alto. Se compararon los coeficientes de Nash-Sutcliffe obtenidos para cada cuartil de Huff de cada evento extremo.

Cuadro 80. Resumen del ajuste de las tormentas críticas con duración de 6 horas de acuerdo al criterio de Nash-Sutcliffe más alto para los cuatro cuartiles propuestos por Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

	Primer cuartil	Segundo cuartil	Tercer cuartil	Cuarto cuartil
No. De tormentas	3	3	1	0
Porcentaje (%)	42.9	42.9	14.3	0.0

5.7.3.1.1. Primer cuartil de Huff

En el primer cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 28.57 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y son las tormentas del 22 de junio de 2011 y el 15 de julio de 2014 con coeficientes de 0.85 y 0.93 respectivamente. En el Cuadro 81 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el primer cuartil de Huff.

Cuadro 81. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el primer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Primer cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
22 de junio de 2011	46.7	3.41	6.31	0.85	Excelente
03 de agosto de 2011	44.4	16.65	12.38	0.53	Bueno
15 de julio de 2014	71.45	0.85	7.23	0.93	Excelente
06 de octubre de 2014	43.4	7.13	12.31	-0.05	Malo
20 de junio de 2015	53	19.85	14.49	0.20	Deficiente
21 de julio de 2015	51.8	20.95	16.66	0.46	Satisfactorio
10 de agosto de 2016	56	3.52	7.85	0.66	Bueno

5.7.3.1.2. Segundo cuartil de Huff

En el segundo cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 42.86 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y son las tormentas del 22 de junio de 2011, 03 de agosto de 2011 y el 21 de julio de 2015 con coeficientes de 0.92, 0.95 y 0.90 respectivamente. En el Cuadro 82 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el segundo cuartil de Huff.

Cuadro 82. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el segundo cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Segundo cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
22 de junio de 2011	46.7	1.74	4.51	0.92	Excelente
03 de agosto de 2011	44.4	1.86	4.14	0.95	Excelente
15 de julio de 2014	71.45	10.14	24.98	0.22	Deficiente
06 de octubre de 2014	43.4	21.37	21.31	-2.15	Malo
20 de junio de 2015	53	12.26	11.39	0.51	Bueno
21 de julio de 2015	51.8	3.99	7.27	0.90	Excelente
10 de agosto de 2016	56	9.23	12.71	0.11	Deficiente

5.7.3.1.3. Tercer cuartil de Huff

En el tercer cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 28.57 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y son las tormentas del 03 de agosto de 2011 y el 21 de julio de 2015 con coeficientes de 0.86 y 0.82 respectivamente. En el Cuadro 83 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el tercer cuartil de Huff.

Cuadro 83. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el tercer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Tercer cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
22 de junio de 2011	46.7	14	12.78	0.38	Satisfactorio
03 de agosto de 2011	44.4	5.08	6.84	0.86	Excelente
15 de julio de 2014	71.45	26.32	40.25	-1.03	Malo
06 de octubre de 2014	43.4	36.25	27.76	-4.34	Malo
20 de junio de 2015	53	7.4	8.85	0.70	Bueno
21 de julio de 2015	51.8	7.06	9.67	0.82	Excelente
10 de agosto de 2016	56	19.14	18.30	-0.84	Malo

5.7.3.1.4. Cuarto cuartil de Huff

En el cuarto cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 57.14 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste malo y el 42.87 % restante se ajusta a un criterio satisfactorio. En el Cuadro 84 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el cuarto cuartil de Huff.

Cuadro 84. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el cuarto cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Cuarto cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
22 de junio de 2011	46.7	29.59	18.59	-0.31	Malo

03 de agosto de 2011	44.4	22.44	14.37	0.36	Satisfactorio
15 de julio de 2014	71.45	713113.663	6626.00	-55109.57	Malo
06 de octubre de 2014	43.4	49.7	32.50	-6.32	Malo
20 de junio de 2015	53	14.87	12.54	0.40	Satisfactorio
21 de julio de 2015	51.8	25.44	18.36	0.34	Satisfactorio
10 de agosto de 2016	56	33.01	24.03	-2.18	Malo

De acuerdo con los resultados mostrados en cada uno de los cuartiles se tiene que para el método de Huff el segundo cuartil es el mejor patrón de distribución que representa de forma adecuada a las tormentas críticas del observatorio meteorológico de Cuernavaca. En la Figura 54 se observan los cuatro cuartiles de Huff comparados con las tormentas críticas evaluadas.

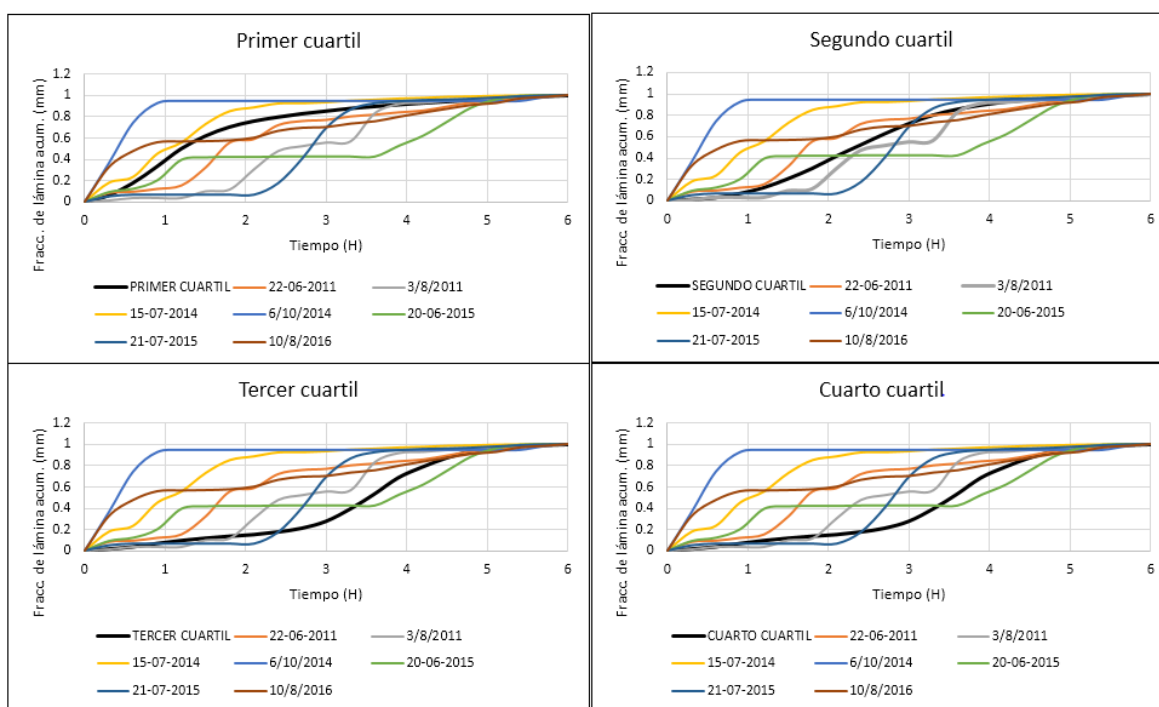


Figura 54. Comparación de los cuatro cuartiles de Huff y las tormentas críticas de 6 horas de duración para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

5.7.3.2. Servicio de Conservación de Suelos

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 28.57 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y son las tormentas del 03 de agosto de 2011 y el 21 de julio de 2015 con coeficientes de 0.96 y 0.88 respectivamente. En el Cuadro 85 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con la

tormenta sintética del SCS. En la Figura 55 se observan los eventos reales analizados y la tormenta sintética del SCS.

Cuadro 85. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y la tormenta sintética del SCS para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Servicio de Conservación de Suelos					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
22 de junio de 2011	46.73	5.13	8.22	0.64	Bueno
03 de agosto de 2011	44.42	1.13	3.20	0.96	Excelente
15 de julio de 2014	91.2	16	33.25	-1.08	Malo
06 de octubre de 2014	50.2	23.67	22.94	-3.50	Malo
20 de junio de 2015	53	9.12	9.53	0.58	Bueno
21 de julio de 2015	51.8	4.16	7.33	0.88	Excelente
10 de agosto de 2016	56	9.1	12.98	-0.07	Malo

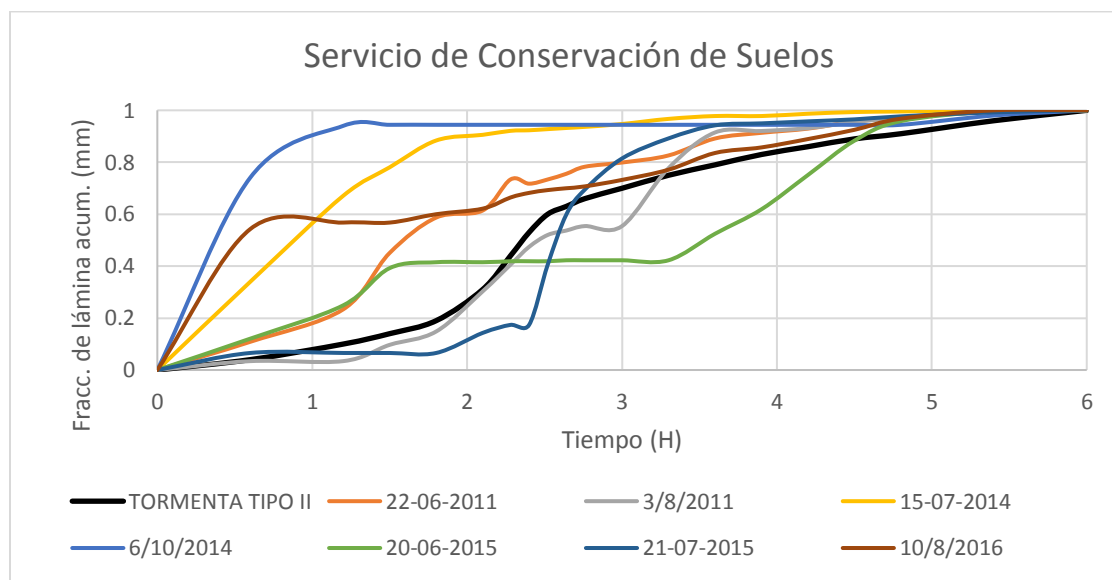


Figura 55. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas de duración y la tormenta diseño del SCS para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

5.7.3.3. Método del bloque alterno

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 28.57 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y son las tormentas del 03 de agosto de 2011 y el 21 de julio de 2015 con coeficientes de 0.92 y 0.90 respectivamente. En el Cuadro 86 se observan los resultados de

los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el método del bloque alterno. En la Figura 56 se observan los eventos reales analizados y la tormenta sintética del bloque alterno.

Cuadro 86. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y la tormenta sintética del bloque alterno para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Bloque alterno					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
20 de junio de 2015	46.73	6.36	8.50	0.75	Bueno
22 de junio de 2011	44.42	11.44	11.98	0.43	Satisfactorio
15 de julio de 2014	91.2	23.42	38.50	-1.5	Malo
21 de julio de 2015	50.2	3.69	7.13	0.9	Excelente
03 de agosto de 2011	53	2.75	5.11	0.92	Excelente
06 de octubre de 2014	51.8	31.8	25.68	-3.63	Malo
10 de agosto de 2016	56	16.35	17.48	-0.56	Malo

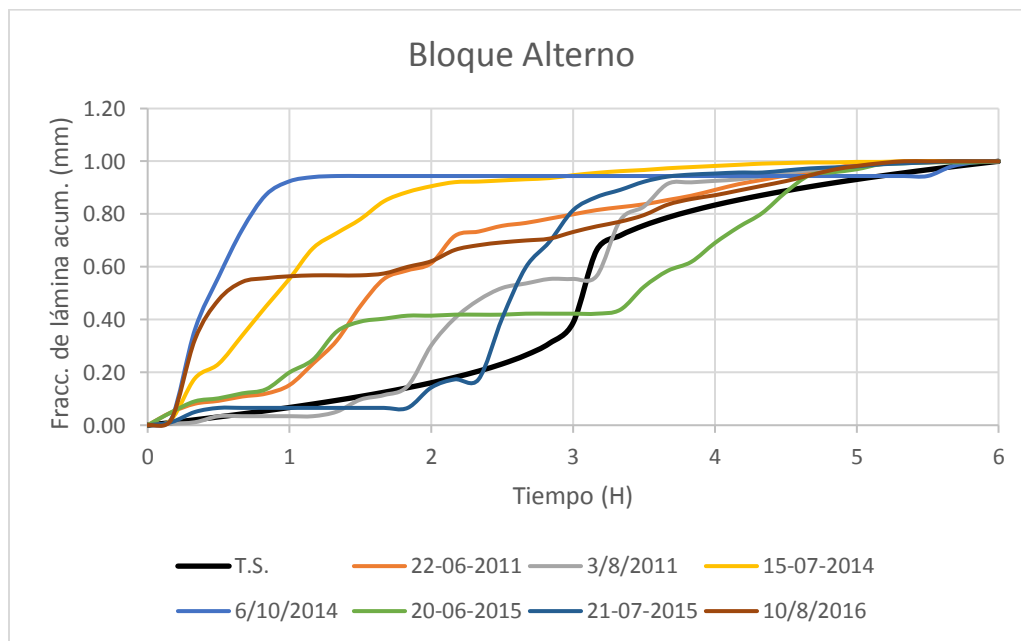


Figura 56. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas de duración y la tormenta diseño del bloque alterno para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

5.7.3.4. Método de Yen y Chow

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 28.57 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y son las tormentas del 03 de agosto de 2011 y el 21 de julio de 2015 con coeficientes de 0.92 y 0.90 respectivamente. En el Cuadro 87 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el método del bloque alterno. En la Figura 57 se observan los eventos reales analizados y la tormenta sintética del bloque alterno.

Cuadro 87. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y la tormenta sintética del bloque alterno para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Yen y Chow					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
22 de junio de 2011	46.73	11.44	11.87	0.43	Satisfactorio
03 de agosto de 2011	44.42	2.75	4.71	0.92	Excelente
15 de julio de 2014	91.2	23.42	37.90	-1.05	Malo
06 de octubre de 2014	50.2	31.8	25.53	-3.63	Malo
20 de junio de 2015	53	6.36	7.64	0.75	Bueno
21 de julio de 2015	51.8	3.69	6.44	0.9	Excelente
10 de agosto de 2016	56	16.35	17.42	-0.56	Malo

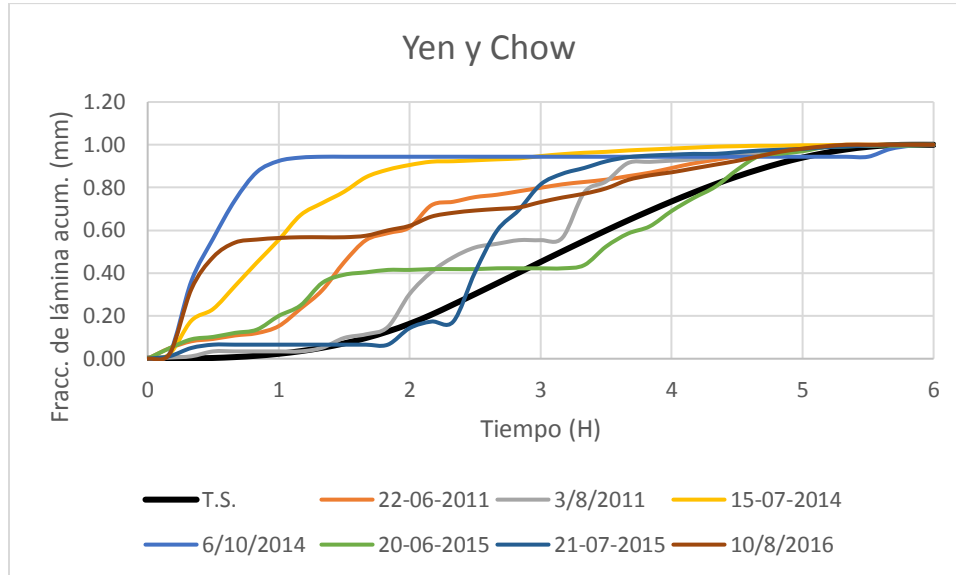


Figura 57. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas de duración y la tormenta diseño propuesta por Yen y Chow para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

De acuerdo con los resultados obtenidos para las tormentas con 6 horas de duración se recomienda la distribución del primer cuartil de Huff, los demás patrones de distribución se ordenaron de forma descendente con base en los indicadores estadísticos empleados: en segundo lugar se encuentra el primer cuartil de Huff; en tercer lugar el tercer cuartil de Huff; en cuarto lugar el hietograma triangular; en quinto lugar el SCS; en sexto lugar el bloque alterno y en séptimo lugar el cuarto cuartil de Huff.

5.7.4. Observatorio meteorológico de Tapachula

5.7.4.1. Método de Huff

El criterio de selección usado fue el coeficiente de Nash-Sutcliffe más alto, sin importar que el criterio sea excelente y se ajuste a dos cuartiles, se tomó el de mayor valor. De acuerdo al criterio expuesto en el apartado 4.2.5, se obtuvieron 9 tormentas críticas que fueron evaluadas.

En el Cuadro 88 se muestra un resumen de los cuatro cuartiles de Huff el cual se basa en el criterio Nash-Sutcliffe más alto. Se compararon los coeficientes de Nash-Sutcliffe obtenidos para cada cuartil de Huff de cada evento extremo.

Cuadro 88. Resumen del ajuste de las tormentas críticas con duración de 6 horas de acuerdo al criterio de Nash-Sutcliffe más alto para los cuatro cuartiles propuestos por Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula.

	Primer cuartil	Segundo cuartil	Tercer cuartil	Cuarto cuartil
No. De tormentas	6	2	1	0
Porcentaje (%)	66.67	22.2	11.1	0.0

5.7.4.1.1. Primer cuartil de Huff

En el primer cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 66.67 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y solo el 11.11 % obtuvo un ajuste deficiente. En el Cuadro 89 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el primer cuartil de Huff.

Cuadro 89. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el primer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula.

Primer cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
10 de noviembre de 1990	92.4	9.04	19.91	0.68	Bueno
07 de junio de 2011	132.1	54.34	45.76	0.05	Deficiente
06 de julio de 2011	149.4	1.07	12.56	0.92	Excelente
18 de julio de 2011	120.5	0.97	9.43	0.95	Excelente
19 de julio de 2011	134.3	1.42	14.16	0.90	Excelente
14 de agosto de 2011	132.6	2.6	15.37	0.86	Excelente
24 de agosto de 2011	112.9	1.51	12.10	0.92	Excelente
19 de septiembre de 2011 (Coatán)	131	7.33	25.05	0.70	Bueno
19 de septiembre de 2011 (Huixtla)	161.6	0.46	9.10	0.97	Excelente

5.7.4.1.2. Segundo cuartil de Huff

En el segundo cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 44.44 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y solo el 11.11 % obtuvo un ajuste deficiente. En el Cuadro 90 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el segundo cuartil de Huff.

Cuadro 90. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el segundo cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula.

Segundo cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
10 de noviembre de 1990	92.4	0.11	6.98	0.96	Excelente
07 de junio de 2011	132.1	15.45	31.57	0.68	Bueno
06 de julio de 2011	149.4	7.17	32.46	0.49	Satisfactorio
18 de julio de 2011	120.5	3.48	17.84	0.81	Excelente
19 de julio de 2011	134.3	11.36	40.01	0.24	Deficiente
14 de agosto de 2011	132.6	3.37	17.50	0.82	Excelente
24 de agosto de 2011	112.9	9.55	30.41	0.49	Satisfactorio
19 de septiembre de 2011 (Coatán)	131	1.13	9.82	0.95	Excelente
19 de septiembre de 2011 (Huixtla)	161.6	7.27	36.09	0.58	Bueno

5.7.4.1.3. Tercer cuartil de Huff

En el tercer cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 44.44 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste malo y solo el 11.11 % obtuvo un ajuste excelente. En el Cuadro 91 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el tercer cuartil de Huff.

Cuadro 91. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el tercer cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula.

Tercer cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
10 de noviembre de 1990	92.4	8.57	19.39	0.7	Bueno
07 de junio de 2011	132.1	2.63	13.02	0.95	Excelente
06 de julio de 2011	149.4	20.63	55.05	-0.47	Malo
18 de julio de 2011	120.5	17.73	40.26	0.04	Deficiente
19 de julio de 2011	134.3	28.35	63.21	-0.90	Malo
14 de agosto de 2011	132.6	12.92	34.24	0.3	Deficiente
24 de agosto de 2011	112.9	27.03	51.14	-0.45	Malo
19 de septiembre de 2011 (Coatán)	131	7.42	25.21	0.69	Bueno
19 de septiembre de 2011 (Huixtla)	161.6	22.8	63.91	-0.31	Malo

5.7.4.1.4. Cuarto cuartil de Huff

En el cuarto cuartil de Huff de acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 77.78 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste malo y solo el 11.11 % obtuvo un ajuste bueno. En el Cuadro 92 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de las tormentas reales con el cuarto cuartil de Huff.

Cuadro 92. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y el cuarto cuartil de Huff para el observatorio meteorológico de Tapachula.

Cuarto cuartil					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
10 de noviembre de 1990	92.4	26.92	34.36	0.06	Deficiente
07 de junio de 2011	132.1	14.95	31.06	0.69	Bueno
06 de julio de 2011	149.4	38	74.71	-1.7	Malo
18 de julio de 2011	120.5	34.98	56.56	-0.89	Malo
19 de julio de 2011	134.3	44.12	78.86	-1.95	Malo
14 de agosto de 2011	132.6	27.74	50.18	-0.49	Malo
24 de agosto de 2011	112.9	43.04	64.54	-1.32	Malo
19 de septiembre de 2011 (Coatán)	131	24.67	45.97	-0.02	Malo
19 de septiembre de 2011 (Huixtla)	161.6	38.96	83.55	-1.23	Malo

De acuerdo con los resultados mostrados en cada uno de los cuartiles se tiene que para el método de Huff el primer cuartil es el mejor patrón de distribución que representa de forma adecuada a las tormentas críticas del observatorio meteorológico de Tapachula. En la Figura 58 se observan los cuatro cuartiles de Huff comparados con las tormentas críticas evaluadas.

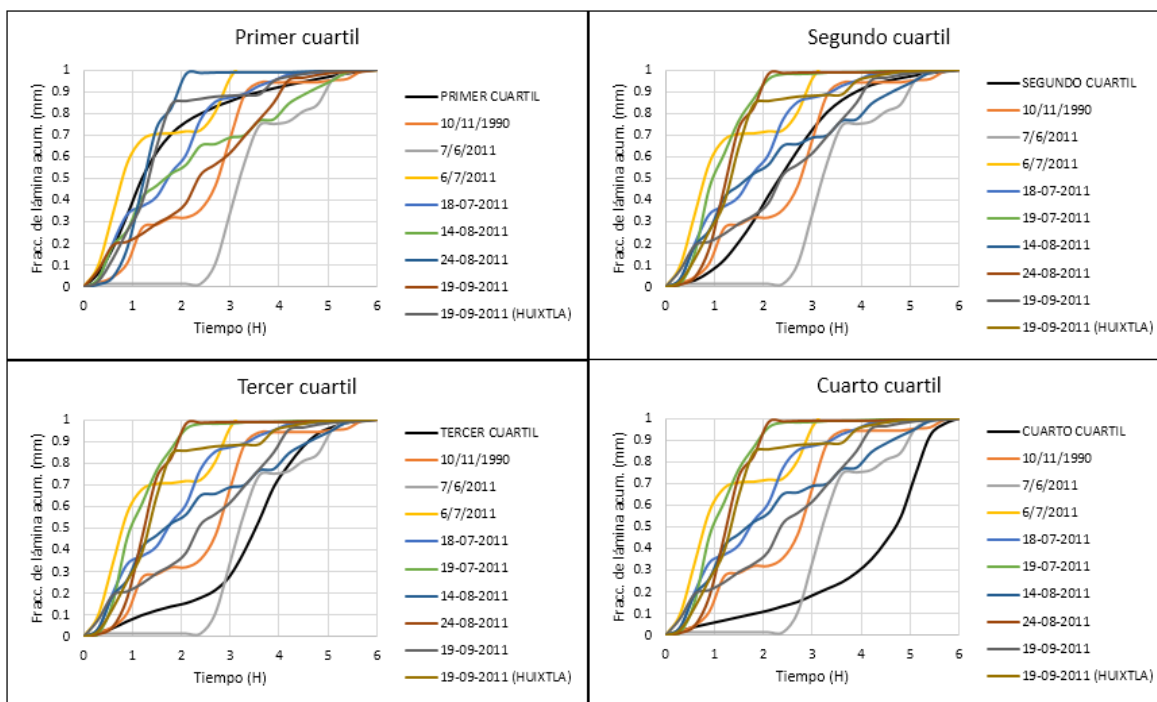


Figura 58. Comparación de los cuatro cuartiles de Huff y las tormentas críticas de 6 horas de duración para el observatorio meteorológico de Tapachula.

5.7.4.2. Servicio de Conservación de Suelos

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 22.22 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente y el 33.33 % obtuvo un ajuste malo. En el Cuadro 93 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de los eventos reales con la tormenta sintética del SCS. En la Figura 59 se observa la comparación de los eventos reales y la tormenta sintética del SCS.

Cuadro 93. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y la tormenta sintética del SCS para el observatorio meteorológico de Tapachula.

Servicio de Conservación de Suelos					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
10 de noviembre de 1990	92.4	2.46	10.78	0.9	Excelente
07 de junio de 2011	132.1	32.23	40.59	0.41	Satisfactorio
06 de julio de 2011	149.4	8.08	32.49	0.28	Deficiente
18 de julio de 2011	120.5	8.69	30.04	0.27	Deficiente
19 de julio de 2011	134.3	16.18	50.02	-0.71	Malo

14 de agosto de 2011	132.6	3.69	18.81	0.78	Bueno
24 de agosto de 2011	112.9	16.25	42.23	-0.56	Malo
19 de septiembre de 2011 (Coatán)	131	3.22	17.87	0.80	Bueno
19 de septiembre de 2011 (Huixtla)	161.6	11.58	46.68	-0.06	Malo

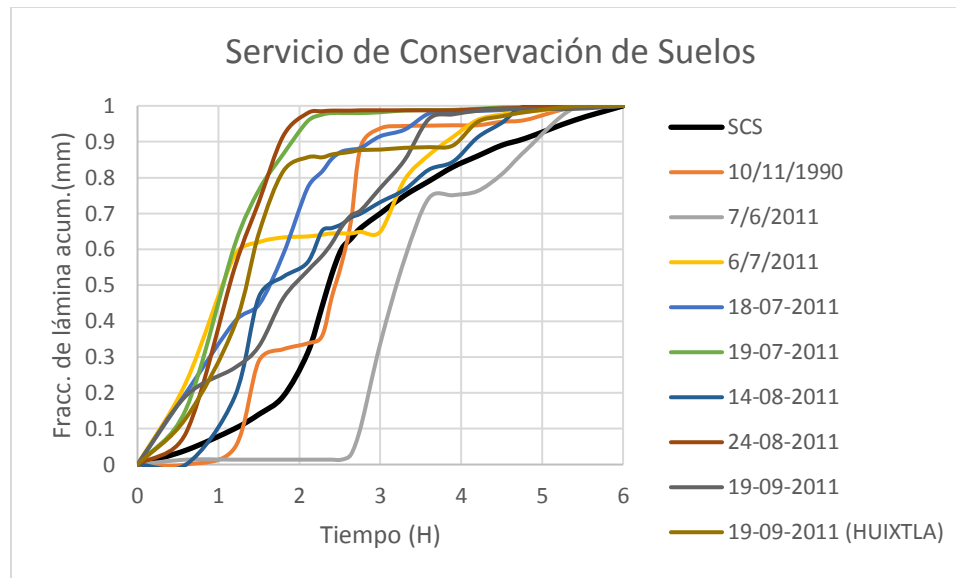


Figura 59. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas de duración y la tormenta diseño del SCS para el observatorio meteorológico de Tapachula.

5.7.4.3. Método del bloque alterno

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 22.22 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente. En el Cuadro 94 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de los eventos reales con la tormenta sintética del bloque alterno. En la Figura 60 se observa la comparación de los eventos reales y la tormenta sintética del bloque alterno.

Cuadro 94. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y la tormenta sintética del bloque alterno para el observatorio meteorológico de Tapachula.

Bloque alterno					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coefficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
10 de noviembre de 1990	92.4	3.18	11.80	0.9	Excelente
07 de junio de 2011	132.1	1.76	10.67	0.96	Bueno
06 de julio de 2011	149.4	13.72	43.66	0.08	Excelente

18 de julio de 2011	120.5	12.24	33.28	0.36	Deficiente
19 de julio de 2011	134.3	20.6	52.13	-0.26	Satisfactorio
14 de agosto de 2011	132.6	6.38	23.40	0.75	Malo
24 de agosto de 2011	112.9	20.16	43.28	-0.03	Malo
19 de septiembre de 2011 (Coatán)	131	4.88	20.45	0.79	Bueno
19 de septiembre de 2011 (Huixtla)	161.6	14.59	48.76	0.27	Deficiente

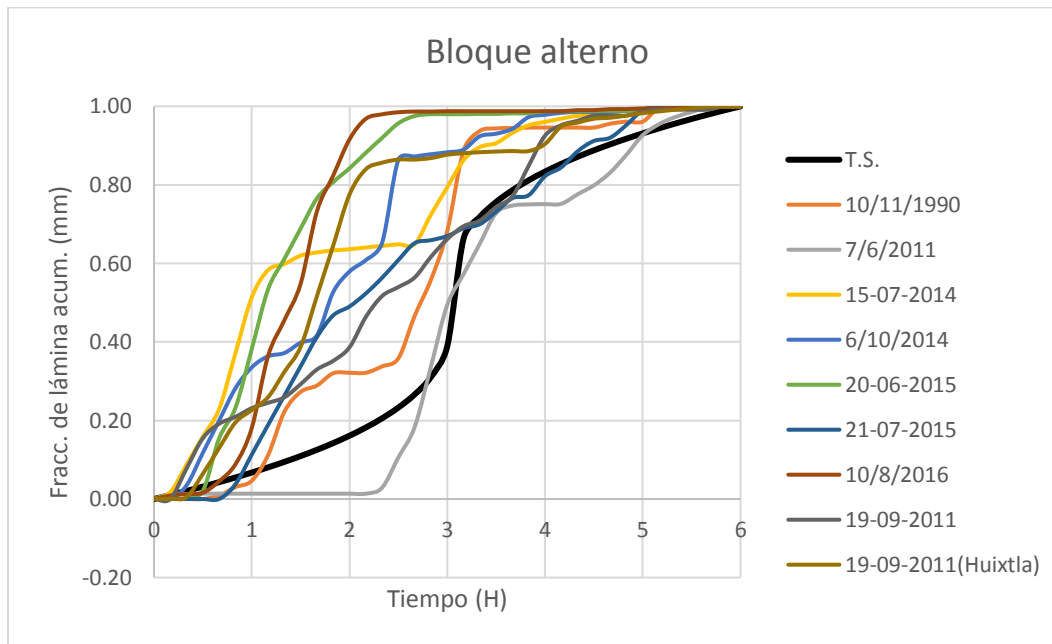


Figura 60. Comparación de las tormentas críticas con 6 horas de duración y la tormenta diseño del bloque alterno para el observatorio meteorológico de Tapachula.

5.7.4.4. Método de Yen y Chow

De acuerdo con el criterio de Nash-Sutcliffe el 22.22 % de las tormentas analizadas obtuvo un ajuste excelente. En el

Cuadro 95 se observan los resultados de los tres parámetros estadísticos usados para evaluar el ajuste de los eventos reales con la tormenta sintética del bloque alterno. En la Figura 61 se observa la comparación de los eventos reales y la tormenta sintética del método de Yen y Chow.

Cuadro 95. Valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, error relativo y el cuadrado medio del error para evaluar el ajuste de las tormentas reales con duración de 6 horas y la tormenta sintética del método de Yen y Chow para el observatorio meteorológico de Tapachula.

Yen y Chow					
Fecha	Lámina (mm)	Error relativo (%)	Cuadrado medio del error	Coeficientes de Nash-Sutcliffe	Criterio
10 de noviembre de 1990	92.4	6.65	17.05	0.79	Excelente
07 de junio de 2011	132.1	2.28	12.12	0.95	Satisfactorio
06 de julio de 2011	149.4	14.84	45.41	0.01	Deficiente
18 de julio de 2011	120.5	12.57	33.73	0.34	Deficiente
19 de julio de 2011	134.3	28.5	52.45	-0.27	Malo
14 de agosto de 2011	132.6	7.59	25.50	0.7	Bueno
24 de agosto de 2011	112.9	20.06	43.18	-0.02	Malo
19 de septiembre de 2011 (Coatán)	131	4.97	20.64	0.79	Bueno
19 de septiembre de 2011 (Huixtla)	161.6	14.2	48.10	0.29	Malo

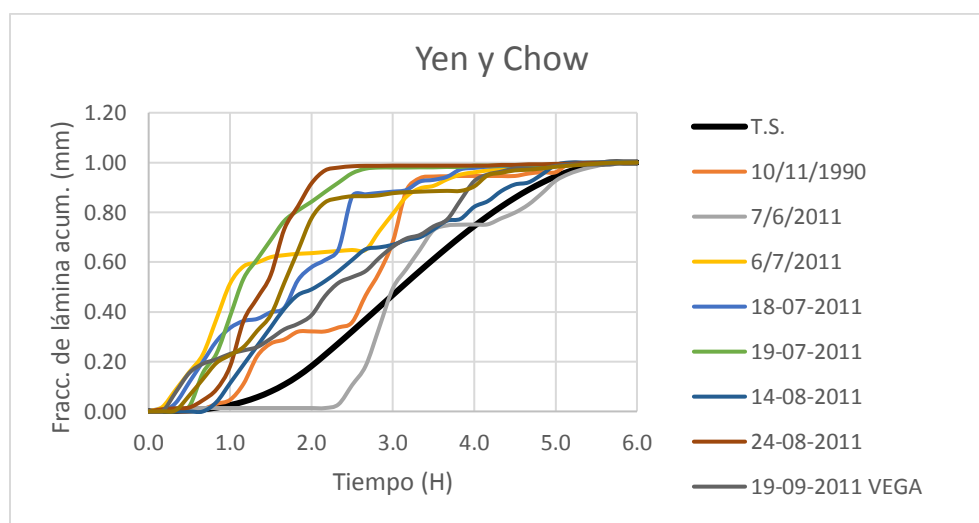


Figura 61. Comparación de las tormentas críticas de 6 horas de duración y la tormenta diseño propuesta por Yen y Chow para el observatorio meteorológico de Tapachula.

De acuerdo con los resultados obtenidos para las tormentas con 6 horas de duración se recomienda la distribución del primer cuartil de Huff, los demás patrones de distribución se ordenaron de forma descendente con base en los indicadores estadísticos empleados: en segundo lugar se encuentra el segundo cuartil de Huff; en tercer lugar el tercer el método del bloque alterno; en cuarto lugar el método de Yen y Chow; en quinto lugar el método del SCS; en sexto lugar el tercer cuartil de Huff y en séptimo lugar el cuarto cuartil de Huff.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con la hipótesis planteada así como a los resultados obtenidos en el presente trabajo, los patrones de distribución no son diferentes entre sí al menos para las tormentas de 6 horas de duración ya que para las tormentas con una duración de 24 horas los patrones de distribución son diferentes entre sí.

De acuerdo con los objetivos planteados se obtuvo lo siguiente:

- De un total de 245 eventos analizados en el sitio Chapingo el 38.37 % de las tormentas corresponden a un duración de 0 a 2 horas, el 25.31 % corresponde a una duración de 2 a 5 horas mientras que el 24.08% corresponde a duraciones entre 5 y 8 horas y solo el 2.45 % corresponde a duraciones de 20 a 24 horas, el 9.80 % restante pertenece a duraciones entre 8 y 20 horas. Para el sitio Chapingo el mejor patrón de distribución para las tormentas con una duración de 24 horas es el segundo cuartil de Huff y se obtuvo lo siguiente: Coeficientes de Nash-Sutcliffe de -0.29 hasta 0.94; Errores Relativos de 0.86 % hasta 89.75 % y Errores Medios Cuadráticos de 0.89 mm hasta 6.63 mm. Para las tormentas de 6 horas de duración el mejor patrón de distribución es el primer cuartil de Huff y se obtuvo lo siguiente: Coeficientes de Nash-Sutcliffe de -0.13 hasta 0.76; Errores Relativos de 3.01 % hasta 46.93 % y Errores Medios Cuadráticos de 6.90 mm hasta 21.38 mm.
- De un total de 84 eventos analizados en el observatorio meteorológico de la Ciudad de México el 38.64 % de las tormentas corresponden a un duración de 2.1 a 4.9 horas, el 18.18 % corresponde a una duración de 5 a 7 horas mientras que el 5.70 % corresponde a duraciones de 0 a 2 horas y solo el 12.50 % corresponde a duraciones de 20 a 24 horas, el 25 % restante pertenece a duraciones entre 7.1 y 19.9 horas. Para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México se obtuvo que el mejor patrón de distribución para las tormentas con una duración de 24 horas es el cuarto cuartil de Huff y se tiene lo siguiente: Coeficientes de Nash-Sutcliffe de 0.41 hasta 0.78; Errores Relativos de 9.14 % hasta 47.52 % y Errores Medios Cuadráticos de 9.02 mm hasta 23.50 mm. Para las tormentas de 6 horas de duración el mejor patrón de distribución es el segundo cuartil de Huff y se tiene lo siguiente: Coeficientes de Nash

Sutcliffe de -0.08 hasta 0.93; Errores Relativos desde 2.05 % hasta 75.75 % y Errores Medios Cuadráticos de 7.93 mm hasta 24.51 mm.

- De un total de 62 eventos analizados en el observatorio meteorológico de Cuernavaca el 33.90 % de las tormentas corresponden a un duración de 20 a 24 horas, el 29.03 % corresponde a una duración menor de 5 horas mientras que el 14.50 % corresponde a duraciones de 5 a 7 horas y el 29.00 % restante corresponde a duraciones entre 7.1 y 19.9 horas. Meses lluviosos de junio a septiembre. Para el observatorio meteorológico de Cuernavaca se obtuvo que el mejor patrón de distribución para las tormentas con una duración de 24 horas es el primer cuartil de Huff y se tiene lo siguiente: Coeficientes de Nash-Sutcliffe de -4.10 hasta 0.91; Errores Relativos de 1.54 % hasta 386.413 % y Errores Medios Cuadráticos de 5.70 mm hasta 36.34 mm. Para las tormentas de 6 horas de duración el mejor patrón de distribución es el segundo cuartil de Huff y se tiene lo siguiente: Coeficientes de Nash-Sutcliffe de -2.15 hasta 0.95; Errores Relativos de 1.74 % hasta 21.37 % y Errores Medios Cuadráticos de 4.14 mm hasta 21.37 mm.
- De un total de 89 eventos analizados en el observatorio meteorológico de Tapachula el 37.00 % de las tormentas corresponden a un duración de 5 a 7 horas, el 30.00 % corresponde a una duración menor de 5 horas mientras que el 11.00 % corresponde a duraciones de 20 a 24 horas y el 22.00 % restante corresponde a duraciones entre 7.1 y 19.9 horas. Para el observatorio meteorológico de Tapachula se obtuvo que el mejor patrón de distribución para las tormentas con una duración de 24 horas es el tercer cuartil de Huff y se tiene lo siguiente: Coeficientes de Nash-Sutcliffe de 0.61 hasta 0.97; Errores Relativos de 1.06 % hasta 11.07 % y Errores Medios Cuadráticos de 8.89 mm hasta 70.82 mm. Para las tormentas de 6 horas de duración el mejor patrón de distribución es el primer cuartil de Huff y se tiene lo siguiente: Coeficientes de Nash-Sutcliffe de 0.05 hasta 0.97; Errores Relativos de 0.46 % hasta 54.34 % y Errores Medios Cuadráticos de 9.10 mm hasta 45.76 mm.

- Al comparar las intensidades obtenidas con las ecuaciones IDF de este trabajo y las isoyetas de la SCT se concluyó que existe una gran variación entre los datos y que a medida que el periodo de retorno incrementa el error entre los datos es aún más grande.

Se recomienda probar cada uno de los métodos que se han puesto a prueba en este trabajo, en otras estaciones climatológicas, con la finalidad de elaborar mapas, en los cuales se pueda ingresar de forma rápida y determinar el patrón de distribución temporal de lluvia que le corresponde.

Se recomienda actualizar los datos para años posteriores y así poder obtener una base de datos más amplia y confiable, así mismo se actualice la evaluación de los patrones de tormenta diseño para cada sitio de estudio presentado en este trabajo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, S. H. (2013). Relación Lluvia-Escorrentamiento en la Cuenca del Río Coatlán, Chiapas, México. Tesis Doctoral, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua: Universidad Autónoma Chapingo. 103 p.
- Amatya, D. M., Harrison, C. A., & Trettin, C. C. (2016). Hydro-meteorologic Assessment of October 2015 Extreme Precipitation Event on Santee Experimental Forest Watersheds, South Carolina. Journal of South Carolina Water Resources, 3(1), 4
- Aparicio, M. F. (2015). Fundamentos de Hidrología de Superficie. Ed. LIMUSA, México. 303 p.
- Breña, P. A., & Jacobo, V. M. (2005). Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial. Mexico.: Universidad Autónoma Metropolitana. 289 p.
- Cahuana, A. A., y Yugar, M. W. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología. Tesis de licenciatura. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Colombia. 287 p.
- Campos A. D. (2010). Introducción a la Hidrología Urbana. Primera edición. San Luís Potosí. 269 p.
- Carbone, M., Turco, M., Brunetti, G., y Piro, P. (2015). A Cumulative Rainfall Function for Subhourly Design Storm in Mediterranean Urban Areas. Advances in Meteorology. ID 528564, 10 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/528564>.
- CENAPRED. (2013). Serie Fascículos: Inundaciones. Versión electrónica. 54 p. México.
- CENAPRED. (2014). Serie Fascículos: Tormentas Severas. Versión electrónica. 54 p.
- Chow, V. T.; Maidment, D. R.; Mays, L. W. (1994). Hidrología Aplicada. Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL. 572 p.
- CONABIO (2017). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [5030 mapas] - CONABIO. [online] Available at: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> [Accessed 6 Octubre. 2017].



- CONAGUA. (2007). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua. 84 p.
- CONAGUA. (2011). Manual para el control de inundaciones. 338 p.
- Cruz G. M. (1999). Determinación de la tormenta de diseño. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 22(2) 27-30.
- Dooling, O.R. Varas, E.A. (2006). Tormentas de diseño usando redes neuronales artificiales. Ingeniería Hidráulica en México. 21(4): 103-113.
- García E. (1998). Climas (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1000000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- García R. A. (2006). Hietogramas de diseño en zonas urbanas. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. 76 p.
- Gutiérrez L. M. A., Arellano L. F. del R. (2010). Estudio de tormentas tipo en la ciudad de Querétaro. CIENCIA@UAQ. 3(1): 62-79.
- Huff, F. A. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms, Water Resources Research, 3(4), 1007-1019.
- INEGI (2016a). Anuario Estadístico y Geográfico de la Ciudad de México. 514 p. Recuperado de: http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/CDMX_ANUARIO_PDF16.pdf
- INEGI. (2016b). Anuario Estadístico y Geográfico de Morelos. 524 p. Recuperado de: http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/MOR_ANUARIO_PDF16.pdf
- INEGI. (2016c). Anuario Estadístico y Geográfico de Chiapas. 651 p. Recuperado de: http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/CHIS_ANUARIO_PDF16.pdf
- Ibáñez C. L.A., Lorenzo C. A., Arteaga, R. R., Vázquez P. M. A. (2011). Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia de la lluvia registrada en Chapingo, México. Ingeniería Agrícola y Biosistemas 3(1): 25-32.

- Levy B.; McCuen R.H., (1999). Assessment of Storm Duration for Hydrologic Design. J. Hydrol. Eng. 4:209-213.
- Márquez, C. R., Mendoza, Z. E. (2015). Propuesta de tormenta diseño para Chapingo, Estado de México. Tesis de licenciatura, Departamento de irrigación: Universidad Autónoma Chapingo. 103 p.
- McCuen H. R., Knight Z, and Cutter G. A. (2006). Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index. J. Hydrol. Eng., 11(6), 597–602.
- Medina, G. G.: Grageda, G. J.; Ruíz, C. J.; Báez, G. A. (2008). Uso de Estaciones Meteorológicas en la Agricultura. México D.F.: Instituto Nacional de Investigación Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).
- Morales H. J.E. (2013). Distribución temporal de la lluvia por eventos. Tesis Profesional. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 155 p.
- Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; Van Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D.; Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, Transactions of the ASABE, 50 (3), 885–900.
- Muñoz, R., & Ritter, A. (2005). Hidrología Agroforestal. Madrid, España: Mundi-Prensa. 348 p.
- Nash J. E.; Sutcliffe J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles. Journal of Hydrology. 10:282–290.
- Onate, V. F. (2004). Hidrología (Apuntes de la clase). Universidad Técnica Particular de Loja.
- Organización Meteorológica Mundial. (1974). Glosario Hidrológico Internacional. WMO-No.385. Secretaría de la OMM. Ginebra, Suiza. Primera edición.
- Pizarro T., R., Abarza M., A. y Flores V., J. P. (2001). Análisis comparativo de las curvas IDF en 6 estaciones pluviográficas (VII Región del Maule, Chile). Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Talca. Chile. 48 p.

- Prodanovic, P., y Simonovic, S. P. (2004). Generation of Synthetic Design Storm for the Upper Thames River Basin. The University of Western Ontario. Dept. of Civil Engr. Report No. 049.
- Rivano G., M. (2004). Análisis de eventos extremos de precipitación y su efecto en el diseño de drenaje superficial de tierras agrícolas del sur de Chile. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 95 p.
- Sánchez S.R. F. J. (2013). Cálculos Estadísticos en Hidrología. Universidad de Salamanca, España.
- SCT. (2017a). Isoyetas de intensidad de lluvia (mm/h). Recuperado de: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Isoyetas/distrito_federal.pdf
- SCT. (2017b). Isoyetas de intensidad de lluvia (mm/h). Recuperado de: <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Isoyetas/mexico.pdf>
- SCT. (2017c). Isoyetas de intensidad de lluvia (mm/h). Recuperado de: <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Isoyetas/morelos.pdf>
- SCT. (2017d). Isoyetas de intensidad de lluvia (mm/h). Recuperado de: <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Isoyetas/chiapas.pdf>
- Servicio de Conservación de suelos. (1986). Urban hydrology for small watersheds, Technical Report 55, Engineering Division. Washington, D. C.: Soil Conservation Service, US Department of Agriculture.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2016. <http://smn1.conagua.gob.mx/emas/>.
- Torres S., Z. (2014). Distribución temporal de la lluvia por eventos para Chapingo, México. Tesis Profesional. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 109 p.
- Villón, B. M. (2002). Hidrología. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.



Tormentas diseño para los sitios Chapingo, Ciudad de México, Cuernavaca y Tapachula.



- Weesakul, U., Chaowiwat, W., Rehan, MM, y Weesakul, S. (2017). Modification of a design storm pattern for urban drainage systems considering the impact of climate change. Engineering and Applied Research Sciences. 44(3), 161-169.
- Yusop Z., Chan C. H., and Katimon A. (2007). Runoff characteristics and application of HEC-HMS for modeling stormflow hydrograph in an oil palm catchment. Water science and technology 56:41-48.
- Zamanillo. E. A. (2008). Tormentas de diseño para la provincia de Entre Ríos. 1a edición Buenos Aires: Univ. Tecnológica Nacional. pp: 13.



Tormentas diseño para los sitios Chapingo, Ciudad de México, Cuernavaca y Tapachula.



Anexo 1. Datos de lámina e intensidades para el periodo 1977-2014 en la estación meteorológica Chapingo.

A. 1. 1. Alturas máximas de precipitación en milímetros del periodo 1977-2014 para la estación meteorológica Chapingo.

Año	Duración, minutos														
	5	10	15	20	30	40	50	60	120	180	240	300	600	900	1440
1977	10.0	14.5	20.0	26.7	27.7	27.7	34.1	35.3	37.8	38.5	38.5	38.5	38.5	38.5	38.5
1978	10.3	10.7	17.2	20.7	22.3	31.1	38.0	40.7	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5
1979	6.5	9.9	15.4	19.8	25.1	29.3	30.1	31.3	37.0	37.9	38.3	38.3	43.5	49.5	52.1
1980	10.0	12.0	14.1	16.2	17.9	21.0	24.7	26.2	29.8	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5
1981	10.2	20.0	31.0	32.2	33.1	40.5	47.0	47.7	49.2	49.8	49.9	49.9	49.9	49.9	49.9
1982	4.3	5.3	8.8	9.2	10.1	11.2	11.6	11.7	12.1	12.2	12.3	14.5	23.0	23.0	23.0
1983	7.7	8.5	10.8	10.8	13.0	14.6	15.0	15.0	18.7	18.7	18.7	18.7	20.7	20.7	20.7
1984	9.7	9.7	10.2	10.2	15.2	19.2	20.0	20.0	23.7	25.0	25.0	25.0	37.7	37.7	37.7
1985	8.3	11.0	11.0	19.0	22.2	31.0	34.0	34.8	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0
1986	6.0	10.3	10.5	11.6	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.9	13.1	13.5	13.5
1987	10.4	18.3	26.7	28.5	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3	29.3
1988	6.6	7.1	9.6	11.6	14.3	15.5	18.0	19.0	21.8	21.9	21.9	26.0	37.6	53.1	55.7
1989	10.0	13.7	13.9	13.9	13.9	14.9	19.6	21.1	22.6	22.7	23.4	24.6	24.6	24.6	24.6
1990	9.2	18.0	23.2	27.0	33.0	36.0	51.0	51.1	53.4	54.0	55.8	58.8	65.5	65.5	65.5
1991	10.0	14.5	18.0	18.3	24.0	24.5	24.8	24.9	28.8	28.8	28.8	28.8	29.5	29.5	29.5
1992	14.4	19.5	26.5	28.5	29.8	29.9	29.9	29.9	30.6	32.6	35.7	36.2	36.2	40.2	40.2
1993	10.4	10.4	11.2	13.3	21.8	23.3	25.0	26.3	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.9	21.9
1994	10.0	10.0	10.5	10.7	10.8	12.6	13.0	13.6	14.8	15.6	16.9	16.9	17.0	17.2	17.2
1995	10.0	15.4	16.2	18.6	28.6	30.3	30.3	30.3	50.4	50.9	51.0	51.0	51.2	52.8	53.2
1996	9.7	10.0	10.2	10.2	12.9	12.9	12.9	12.9	18.9	19.1	19.2	19.2	20.1	20.1	20.6
1997	10.0	10.0	12.5	13.0	14.4	16.2	16.5	17.9	18.8	20.4	20.8	22.4	24.3	24.3	24.3
1998	10.0	20.0	25.3	30.0	32.1	42.1	42.1	42.1	45.8	45.9	46.1	46.1	47.7	47.7	47.7
1999	6.3	9.3	13.9	14.6	17.7	19.5	21.5	21.8	24.7	26.1	26.2	26.3	27.3	30.1	30.1
2000	10.0	13.3	15.5	20.6	20.9	20.9	21.0	21.9	23.0	23.8	23.8	24.1	25.1	25.3	25.3
2001	7.5	10.0	15.2	15.5	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	18.7	21.3	22.0	24.7	27.9	29.1
2002	10.0	17.9	20.0	21.8	25.0	25.5	25.5	25.5	25.6	25.6	25.6	28.9	29.0	29.0	29.0
2003	10.0	20.2	23.7	25.8	27.4	28.4	29.6	28.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8
2004	10.3	17.3	20.1	23.1	30.3	30.9	31.4	31.6	32.1	32.1	32.1	32.1	32.1	32.1	32.1
2005	8.6	10.1	18.0	19.5	20.6	21.0	21.1	21.1	25.2	27.0	28.3	28.9	28.9	28.9	28.9
2006	7.5	9.6	11.6	13.3	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2
2007	10.0	15.5	19.0	21.2	25.7	26.4	27.3	27.7	28.0	28.4	28.4	32.0	45.2	48.9	48.9
2008	3.5	7.0	9.5	12.5	16.0	17.3	18.7	19.9	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1
2009	12.0	20.0	20.4	20.5	27.2	33.7	37.4	39.5	41.8	41.8	41.8	41.8	41.8	41.8	41.8
2010	11.0	18.0	24.0	25.0	26.1	26.3	26.4	26.5	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4
2011	10.5	16.0	16.2	19.0	25.2	25.7	26.3	26.8	28.6	28.6	30.1	31.0	45.1	61.3	61.3
2012	9.0	11.0	14.0	16.0	17.8	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5
2013	6.0	9.0	12.0	14.0	16.4	18.8	19.2	19.4	19.5	19.9	21.9	21.9	21.9	21.9	21.9
2014	10.0	10.0	13.1	15.2	17.8	18.2	18.2	18.2	18.7	21.5	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0

A.1. 2. Intensidades máximas registradas en la Estación Chapingo, para el periodo 1977-2014 en mm/h.

Año	Duración, minutos														
	5	10	15	20	30	40	50	60	120	180	240	300	600	900	1440
1977	120.0	87.0	80.0	80.1	55.4	41.6	40.9	35.3	18.9	12.8	9.6	7.7	3.9	2.6	1.6
1978	123.6	64.2	68.8	62.1	44.6	46.7	45.6	40.7	20.8	13.8	10.4	8.3	4.2	2.8	1.7
1979	78.0	59.4	61.6	59.4	50.2	44.0	36.1	31.3	18.5	12.6	9.6	7.7	4.4	3.3	2.2
1980	120.0	72.0	56.4	48.6	35.8	31.5	29.6	26.2	14.9	10.5	7.9	6.3	3.2	2.1	1.3
1981	122.4	120.0	124.0	96.6	66.2	60.8	56.4	47.7	24.6	16.6	12.5	10.0	5.0	3.3	2.1
1982	51.6	31.8	35.2	27.6	20.2	16.8	13.9	11.7	6.1	4.1	3.1	2.9	2.3	1.5	1.0
1983	92.4	51.0	43.2	32.4	26.0	21.9	18.0	15.0	9.4	6.2	4.7	3.7	2.1	1.4	0.9
1984	116.4	58.2	40.8	30.6	30.4	28.8	24.0	20.0	11.9	8.3	6.3	5.0	3.8	2.5	1.6
1985	99.6	66.0	44.0	57.0	44.4	46.5	40.8	34.8	18.0	12.0	9.0	7.2	3.6	2.4	1.5
1986	72.0	61.8	42.0	34.8	23.4	17.6	14.0	11.7	5.9	3.9	2.9	2.4	1.3	0.9	0.6
1987	124.8	109.8	106.8	85.5	58.6	44.0	35.2	29.3	14.7	9.8	7.3	5.9	2.9	2.0	1.2
1988	79.2	42.6	38.4	34.8	28.6	23.3	21.6	19.0	10.9	7.3	5.5	5.2	3.8	3.5	2.3
1989	120.0	82.2	55.6	41.7	27.8	22.4	23.5	21.1	11.3	7.6	5.9	4.9	2.5	1.6	1.0
1990	110.4	108.0	92.8	81.0	66.0	54.0	61.2	51.1	26.7	18.0	14.0	11.8	6.6	4.4	2.7
1991	120.0	87.0	72.0	54.9	48.0	36.8	29.8	24.9	14.4	9.6	7.2	5.8	3.0	2.0	1.2
1992	172.8	117.0	106.0	85.5	59.6	44.9	35.9	29.9	15.3	10.9	8.9	7.2	3.6	2.7	1.7
1993	124.8	62.4	44.8	39.9	43.6	35.0	30.0	26.3	10.9	7.2	5.4	4.3	2.2	1.5	0.9
1994	120.0	60.0	42.0	32.1	21.6	18.9	15.6	13.6	7.4	5.2	4.2	3.4	1.7	1.1	0.7
1995	120.0	92.4	64.8	55.8	57.2	45.5	36.4	30.3	25.2	17.0	12.8	10.2	5.1	3.5	2.2
1996	116.4	60.0	40.8	30.6	25.8	19.4	15.5	12.9	9.5	6.4	4.8	3.8	2.0	1.3	0.9
1997	120.0	60.0	50.0	39.0	28.8	24.3	19.8	17.9	9.4	6.8	5.2	4.5	2.4	1.6	1.0
1998	120.0	120.0	101.2	90.0	64.2	63.2	50.5	42.1	22.9	15.3	11.5	9.2	4.8	3.2	2.0
1999	75.6	55.8	55.6	43.8	35.4	29.3	25.8	21.8	12.4	8.7	6.6	5.3	2.7	2.0	1.3
2000	120.0	79.8	62.0	61.8	41.8	31.4	25.2	21.9	11.5	7.9	6.0	4.8	2.5	1.7	1.1
2001	90.0	60.0	60.8	46.5	31.4	23.6	18.8	15.7	7.9	6.2	5.3	4.4	2.5	1.9	1.2
2002	120.0	107.4	80.0	65.4	50.0	38.3	30.6	25.5	12.8	8.5	6.4	5.8	2.9	1.9	1.2
2003	120.0	121.2	94.8	77.4	54.8	42.6	35.5	28.8	14.9	9.9	7.5	6.0	3.0	2.0	1.2
2004	123.6	103.8	80.4	69.3	60.6	46.4	37.7	31.6	16.1	10.7	8.0	6.4	3.2	2.1	1.3
2005	103.2	60.6	72.0	58.5	41.2	31.5	25.3	21.1	12.6	9.0	7.1	5.8	2.9	1.9	1.2
2006	90.0	57.6	46.4	39.9	28.4	21.3	17.0	14.2	7.1	4.7	3.6	2.8	1.4	0.9	0.6
2007	120.0	93.0	76.0	63.6	51.4	39.6	32.8	27.7	14.0	9.5	7.1	6.4	4.5	3.3	2.0
2008	42.0	42.0	38.0	37.5	32.0	26.0	22.4	19.9	10.1	6.7	5.0	4.0	2.0	1.3	0.8
2009	144.0	120.0	81.6	61.5	54.4	50.6	44.9	39.5	20.9	13.9	10.5	8.4	4.2	2.8	1.7
2010	132.0	108.0	96.0	75.0	52.2	39.5	31.7	26.5	13.7	9.1	6.9	5.5	2.7	1.8	1.1
2011	126.0	96.0	64.8	57.0	50.4	38.6	31.6	26.8	14.3	9.5	7.5	6.2	4.5	4.1	2.6
2012	108.0	66.0	56.0	48.0	35.6	27.3	21.8	18.2	9.1	6.1	4.6	3.7	1.9	1.2	0.8
2013	72.0	54.0	48.0	42.0	32.8	28.2	23.0	19.4	9.7	6.6	5.5	4.4	2.2	1.5	0.9
2014	120.0	60.0	52.4	45.6	35.6	27.2	21.8	18.2	9.4	7.2	5.5	4.4	2.2	1.5	0.9



Tormentas diseño para los sitios Chapingo, Ciudad de México, Cuernavaca y Tapachula.



Anexo 2. Intensidades máximas de cada sitio de estudio con sus respectivos períodos de retorno (T).

A.2.1. Intensidades máximas de la Estación Meteorológica Chapingo con sus respectivos periodos de retorno T para los años de 1976-2015.

D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años
5	T	10	T	15	T	20	T
172.8	8992.80	121.2	12.53	124.0	33.85	96.6	21.46
144.0	16.86	120.0	11.90	106.8	14.48	90.0	14.53
132.0	5.67	120.0	11.90	106.0	13.93	85.5	11.18
126.0	3.85	120.0	11.90	101.2	11.04	85.5	11.18
124.8	3.60	117.0	10.47	96.0	8.61	81.0	8.63
124.8	3.60	109.8	7.72	94.8	8.13	80.1	8.20
123.6	3.38	108.0	7.16	92.8	7.40	77.4	7.03
123.6	3.38	108.0	7.16	81.6	4.43	75.0	6.15
122.4	3.18	107.4	6.98	80.4	4.20	71.7	5.13
120.0	2.83	103.8	6.02	80.0	4.13	69.3	4.51
120.0	2.83	96.0	4.40	80.0	4.13	65.4	3.67
120.0	2.83	93.0	3.91	76.0	3.47	63.6	3.35
120.0	2.83	92.4	3.82	73.6	3.14	62.1	3.10
120.0	2.83	87.0	3.12	72.0	2.94	61.8	3.06
120.0	2.83	87.0	3.12	72.0	2.94	61.5	3.01
120.0	2.83	82.2	2.63	68.8	2.59	59.4	2.72
120.0	2.83	81.0	2.52	64.8	2.22	58.5	2.61
120.0	2.83	79.8	2.42	64.8	2.22	57.0	2.43
120.0	2.83	72.0	1.88	62.0	2.01	57.0	2.43
120.0	2.83	66.0	1.59	61.6	1.98	55.8	2.30
120.0	2.83	66.0	1.59	60.8	1.93	54.9	2.21
120.0	2.83	64.2	1.52	56.4	1.67	48.6	1.70
116.4	2.43	62.4	1.45	56.0	1.65	48.0	1.67
116.4	2.43	61.8	1.43	55.6	1.63	46.5	1.58
110.4	1.96	60.6	1.39	55.6	1.63	45.6	1.53
108.0	1.83	60.0	1.38	52.4	1.49	43.8	1.44
103.2	1.61	60.0	1.38	50.0	1.39	42.0	1.36
99.6	1.49	60.0	1.38	48.0	1.33	41.7	1.35
92.4	1.32	60.0	1.38	46.4	1.28	39.9	1.29
90.0	1.28	60.0	1.38	44.8	1.24	39.9	1.29
90.0	1.28	59.4	1.36	44.0	1.22	39.0	1.26
84.0	1.19	58.2	1.32	43.2	1.20	37.5	1.21
79.2	1.14	57.6	1.31	42.0	1.18	34.8	1.15
78.0	1.13	55.8	1.26	42.0	1.18	34.8	1.15
75.6	1.11	54.0	1.22	40.8	1.15	32.4	1.10
72.0	1.09	51.0	1.17	40.8	1.15	32.1	1.10
72.0	1.09	42.6	1.06	38.4	1.12	30.6	1.08
51.6	1.02	42.0	1.06	38.0	1.11	30.6	1.08
42.0	1.01	31.8	1.01	35.2	1.07	27.6	1.04

D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años
30	T	40	T	50	T	60	T
66.2	20.85	63.2	48.42	61.2	32.12	51.1	27.60
66.0	20.25	60.8	33.73	56.4	20.53	48.3	20.41
64.2	15.71	55.7	16.47	53.0	15.06	47.7	19.13
62.0	11.72	54.0	13.26	50.5	11.96	42.1	10.56
60.6	9.83	50.6	8.66	45.6	7.68	40.7	9.12
59.6	8.71	46.7	5.59	44.9	7.21	39.5	8.06
58.6	7.74	46.5	5.50	40.9	5.11	35.3	5.27
57.2	6.61	46.4	5.41	40.8	5.06	34.8	5.01
55.4	5.46	45.5	4.93	37.7	3.90	31.6	3.68
54.8	5.14	44.9	4.64	36.4	3.51	31.3	3.58
54.4	4.93	44.0	4.25	36.1	3.44	30.3	3.27
52.2	4.00	44.0	4.25	35.9	3.37	29.9	3.15
51.4	3.73	42.6	3.74	35.5	3.28	29.3	2.98
50.4	3.42	41.6	3.40	35.2	3.19	28.8	2.86
50.2	3.36	39.6	2.87	32.8	2.65	27.7	2.60
50.0	3.31	39.5	2.84	31.7	2.45	26.8	2.41
48.0	2.82	38.6	2.64	31.6	2.43	26.5	2.35
44.6	2.23	38.3	2.58	30.6	2.27	26.3	2.31
44.4	2.20	36.8	2.30	30.0	2.18	26.2	2.29
43.6	2.09	35.0	2.03	29.8	2.14	25.5	2.16
41.8	1.89	31.5	1.66	29.6	2.12	24.9	2.06
41.2	1.83	31.5	1.66	25.8	1.67	21.9	1.66
35.8	1.44	31.4	1.64	25.3	1.62	21.8	1.65
35.6	1.43	29.3	1.48	25.2	1.61	21.1	1.58
35.6	1.43	28.8	1.45	24.0	1.51	21.1	1.58
35.4	1.42	28.2	1.41	23.5	1.47	20.0	1.47
32.8	1.30	27.3	1.36	23.0	1.44	19.9	1.46
32.0	1.27	27.2	1.36	22.4	1.40	19.4	1.42
31.4	1.25	26.0	1.29	21.8	1.36	19.0	1.39
30.4	1.22	24.3	1.23	21.8	1.36	18.2	1.33
28.8	1.18	23.6	1.20	21.6	1.34	18.2	1.33
28.6	1.17	23.3	1.19	19.8	1.25	17.9	1.31
28.4	1.17	22.4	1.16	18.8	1.20	15.7	1.19
27.8	1.16	21.9	1.15	18.0	1.17	15.0	1.16
26.0	1.12	21.3	1.14	17.0	1.14	14.2	1.13
25.8	1.12	19.4	1.09	15.6	1.10	13.6	1.11
23.4	1.08	18.9	1.09	15.5	1.09	12.9	1.09
21.6	1.06	17.6	1.06	14.0	1.06	11.7	1.06
20.2	1.05	16.8	1.06	13.9	1.06	11.7	1.06

D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años
120	T	180	T	240	T	300	T
33.5	84.12	22.6	88.80	18.1	118.43	14.9	121.57
26.7	23.22	18.0	23.42	14.0	23.28	11.8	27.57
25.2	17.41	17.0	17.34	12.8	14.80	10.2	13.57
24.6	15.51	16.6	15.58	12.5	13.37	10.0	12.31
22.9	11.20	15.3	10.70	11.5	9.44	9.2	8.81
20.9	7.67	13.9	7.24	10.5	6.45	8.4	6.10
20.8	7.46	13.8	7.04	10.4	6.29	8.3	5.95
18.9	5.29	12.8	5.33	9.6	4.86	7.7	4.64
18.5	4.92	12.6	5.04	9.6	4.78	7.7	4.57
18.0	4.49	12.0	4.24	9.0	3.95	7.2	3.85
16.1	3.19	10.9	3.15	8.9	3.86	7.2	3.79
15.3	2.81	10.7	3.02	8.0	2.90	6.4	2.80
14.9	2.64	10.5	2.88	7.9	2.77	6.4	2.78
14.9	2.64	9.9	2.50	7.5	2.50	6.3	2.68
14.7	2.53	9.8	2.41	7.5	2.44	6.2	2.58
14.4	2.43	9.6	2.31	7.3	2.35	6.0	2.37
14.3	2.39	9.5	2.28	7.2	2.27	5.9	2.28
14.0	2.28	9.5	2.24	7.1	2.21	5.8	2.22
13.7	2.18	9.1	2.08	7.1	2.19	5.8	2.22
12.8	1.91	9.0	2.02	6.9	2.06	5.8	2.20
12.6	1.86	8.7	1.89	6.6	1.90	5.5	2.00
12.4	1.79	8.5	1.83	6.4	1.82	5.3	1.86
11.9	1.67	8.3	1.75	6.3	1.75	5.2	1.82
11.5	1.60	7.9	1.62	6.0	1.62	5.0	1.70
11.3	1.56	7.6	1.51	5.9	1.59	4.9	1.66
10.9	1.49	7.3	1.44	5.5	1.46	4.8	1.61
10.9	1.48	7.2	1.43	5.5	1.45	4.5	1.45
10.1	1.35	7.2	1.41	5.5	1.45	4.4	1.42
9.7	1.31	6.8	1.33	5.4	1.44	4.4	1.42
9.5	1.27	6.7	1.31	5.3	1.40	4.4	1.41
9.4	1.27	6.6	1.29	5.2	1.37	4.3	1.40
9.4	1.26	6.4	1.25	5.0	1.32	4.0	1.28
9.4	1.26	6.2	1.23	4.8	1.26	3.8	1.23
9.1	1.23	6.2	1.23	4.7	1.23	3.7	1.20
7.9	1.12	6.1	1.20	4.6	1.22	3.7	1.19
7.4	1.09	5.2	1.10	4.2	1.14	3.4	1.11
7.1	1.07	4.7	1.06	3.6	1.05	2.9	1.03
6.1	1.03	4.1	1.03	3.1	1.01	2.8	1.03
5.9	1.03	3.9	1.02	2.9	1.01	2.4	1.00

D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años
600	T	900	T	1440	T
7.6	106.53	5.1	64.11	3.2	61.63
6.6	39.28	4.4	26.05	2.7	24.82
5.1	10.50	4.1	18.70	2.6	17.91
5.0	9.37	3.5	9.81	2.3	11.60
4.8	7.75	3.5	9.58	2.2	9.56
4.5	6.27	3.3	7.65	2.2	8.79
4.5	6.22	3.3	7.41	2.1	7.43
4.4	5.45	3.3	7.08	2.0	6.88
4.2	4.75	3.2	6.45	2.0	6.28
4.2	4.64	2.8	4.14	1.7	4.06
3.9	3.67	2.8	4.05	1.7	3.97
3.8	3.45	2.7	3.68	1.7	3.62
3.8	3.42	2.6	3.26	1.6	3.21
3.6	3.09	2.5	3.08	1.6	3.04
3.6	3.04	2.4	2.74	1.5	2.71
3.2	2.31	2.1	2.12	1.3	2.10
3.2	2.22	2.1	2.05	1.3	2.03
3.0	1.99	2.0	1.88	1.3	1.87
3.0	1.95	2.0	1.85	1.2	1.83
2.9	1.93	2.0	1.82	1.2	1.80
2.9	1.89	2.0	1.79	1.2	1.78
2.9	1.88	1.9	1.76	1.2	1.76
2.7	1.72	1.9	1.75	1.2	1.75
2.7	1.71	1.9	1.66	1.2	1.74
2.5	1.51	1.8	1.61	1.1	1.61
2.5	1.48	1.7	1.45	1.1	1.45
2.5	1.47	1.6	1.40	1.0	1.40
2.4	1.45	1.6	1.38	1.0	1.38
2.3	1.36	1.5	1.31	1.0	1.31
2.2	1.30	1.5	1.26	0.9	1.25
2.2	1.29	1.5	1.25	0.9	1.25
2.2	1.28	1.5	1.25	0.9	1.25
2.1	1.23	1.4	1.20	0.9	1.20
2.0	1.20	1.3	1.18	0.9	1.19
2.0	1.20	1.3	1.18	0.8	1.17
1.9	1.13	1.2	1.12	0.8	1.12
1.7	1.08	1.1	1.09	0.7	1.09
1.4	1.02	0.9	1.03	0.6	1.03
1.3	1.01	0.9	1.02	0.6	1.02

A.2.2. Intensidades máximas del Observatorio Meteorológico de la Ciudad de México con sus respectivos períodos de retorno T para los años de 1996-2015.

D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años
60	T	120	T	180	T	240	T
70.1	17.80	62.7	234.85	24.0	26.74	24.4	41.55
51.6	5.45	25.9	3.91	21.3	11.92	16.4	6.74
46.7	4.07	25.4	3.71	19.2	6.80	14.8	4.81
44.6	3.60	23.4	2.98	15.6	2.86	14.5	4.47
41.7	3.05	22.3	2.68	15.1	2.62	11.7	2.49
36.8	2.35	19.1	1.96	15.1	2.58	11.4	2.38
26.8	1.51	18.5	1.85	12.8	1.71	9.7	1.70
26.7	1.50	17.8	1.75	12.3	1.59	9.3	1.58
24.9	1.41	14.7	1.38	11.9	1.51	9.2	1.57
24.0	1.37	13.9	1.30	11.0	1.34	9.1	1.53
23.9	1.36	13.0	1.23	10.8	1.30	8.3	1.35
22.3	1.30	12.3	1.19	9.5	1.16	8.1	1.31
21.8	1.28	11.7	1.15	8.3	1.07	6.2	1.02
D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años
300	T	600	T	900	T	1440	T
19.5	41.09	10.6	73.84	7.0	40.00	4.6	41.70
13.7	7.50	6.9	6.57	5.1	8.40	3.2	7.65
11.6	4.55	6.8	6.37	4.6	5.59	2.8	5.19
10.4	4.22	5.9	3.72	4.0	3.53	2.5	3.34
9.5	2.45	4.9	2.11	3.3	2.14	2.4	3.00
9.3	2.34	4.7	1.93	3.2	2.08	2.0	2.00
7.8	1.62	4.2	1.58	3.1	1.90	1.9	1.83
7.7	1.59	4.1	1.52	2.9	1.63	1.8	1.61
7.7	1.58	3.9	1.42	2.9	1.60	1.8	1.58
7.5	1.53	3.9	1.40	2.7	1.46	1.7	1.41
7.3	1.45	3.8	1.39	2.6	1.31	1.6	1.26
7.0	1.37	3.6	1.30	2.5	1.22	1.6	1.26
6.1	1.00	2.6	1.05	2.4	1.20	1.6	1.22

A.2.3. Intensidades máximas del Observatorio Meteorológico de Cuernavaca con sus respectivos períodos de retorno T para los años de 2000-2016.

D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años
5	T	10	T	15	T	20	T
151.2	14.52	151.2	14.52	100.8	9.92	106.2	17.50
109.2	5.05	109.2	5.05	92.8	7.48	75.6	5.38
105.2	4.58	105.18	4.58	90.1	6.81	75.5	5.35
102	4.25	102.0	4.25	73.04	3.84	73.2	4.92
102.0	4.25	102	4.25	72	3.71	58.8	2.98
97.6	3.84	97.6	3.84	70.0	3.48	55.6	2.69
82.3	2.74	82.32	2.74	64	2.89	54.6	2.60
71.64	2.20	71.6	2.20	55.8	2.28	54.1	2.56
71.6	2.20	71.6	2.20	54.9	2.22	50.31	2.28
57.9	1.71	57.9	1.71	40.6	1.56	34.3	1.49
56.4	1.67	56.4	1.67	37.6	1.47	33.5	1.47
45.7	1.42	45.7	1.42	35.44	1.41	32.79	1.44
41.16	1.34	41.2	1.34	34.5	1.38	29.73	1.35
26.4	1.15	26.4	1.15	25.6	1.20	26.4	1.27
19.8	1.09	19.8	1.09	17.2	1.09	17.5	1.12
13.74	1.06	13.7	1.06	13.16	1.06	12.96	1.08
D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años
30	T	40	T	50	T	60	T
85.2	11.41	65.1	7.52	61.2	10.11	53.8	10.01
76.22	7.76	63.9	7.08	52.6	5.98	50.6	7.98
70.8	6.18	63.6	6.99	51.1	5.50	43.2	4.79
58.8	3.81	55.8	4.72	50.9	5.43	42.9	4.72
57.9	3.68	54.9	4.51	48.8	4.79	42.6	4.61
53.2	3.07	48.0	3.27	38.4	2.71	37.4	3.29
49.8	2.71	45.6	2.93	38.1	2.67	33.3	2.57
49.3	2.67	42.3	2.54	37.4	2.58	31.6	2.33
44.7	2.28	40.4	2.34	36.0	2.40	30.2	2.16
31.5	1.53	27.4	1.47	26.2	1.56	26.4	1.78
27.94	1.41	26.4	1.43	24.4	1.47	21.6	1.44
26.4	1.36	24.8	1.37	23.2	1.41	19.6	1.33
22.9	1.26	21.0	1.25	22.2	1.37	19.3	1.32
22.36	1.25	20.6	1.24	17.1	1.19	16.5	1.21
13.72	1.10	12.6	1.08	12.5	1.09	12.2	1.10
12.7	1.09	12.2	1.08	9.8	1.05	9.9	1.06

D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años
120	T	180	T	240	T	300	T
41.3	279.46	28.8	17.23	22.4	68.98	18.2	57.55
28.8	9.15	22.3	6.57	19.4	17.72	15.8	16.32
24.1	4.05	19.9	4.63	14.9	4.20	12.0	3.78
22.9	3.38	19.4	4.33	14.8	4.09	11.9	3.66
21.3	2.77	16.9	3.12	13.0	2.71	11.0	2.84
20.3	2.46	16.3	2.87	12.7	2.57	10.9	2.79
18.7	2.08	15.6	2.63	12.2	2.34	10.2	2.35
17.9	1.93	14.2	2.24	11.7	2.14	10.2	2.33
17.4	1.85	13.7	2.11	10.7	1.83	9.3	1.97
15.4	1.58	12.4	1.85	10.4	1.77	9.2	1.94
14.4	1.48	12.3	1.81	9.2	1.52	8.4	1.67
12.6	1.34	8.4	1.30	9.0	1.48	7.2	1.42
11.9	1.30	8.0	1.27	6.0	1.18	4.8	1.16
9.4	1.18	6.3	1.15	4.9	1.12	4.1	1.11
8.8	1.15	5.8	1.12	4.7	1.11	3.8	1.10
7.1	1.11	5.8	1.12	4.4	1.10	3.5	1.08
D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años		
600	T	900	T	1440	T		
9.1	42.47	6.1	29.41	3.8	31.979		
7.9	12.84	5.3	9.51	3.3	8.136		
6.5	4.28	5.0	6.70	3.2	6.800		
6.2	3.73	4.6	4.74	2.9	4.066		
6.1	3.40	4.3	3.51	2.9	3.732		
6.0	3.32	4.0	2.87	2.7	2.861		
5.6	2.68	3.9	2.53	2.5	2.373		
5.1	2.14	3.7	2.33	2.5	2.364		
4.7	1.84	3.4	1.92	2.3	1.958		
4.7	1.84	3.1	1.68	2.1	1.650		
4.4	1.69	3.1	1.68	2.1	1.648		
4.0	1.50	2.9	1.57	1.9	1.482		
2.6	1.17	1.8	1.15	1.8	1.399		
2.1	1.10	1.4	1.09	0.9	1.076		
1.9	1.08	1.3	1.08	0.9	1.064		
1.8	1.08	1.2	1.07	0.8	1.056		

A.2.4. Intensidades máximas del Observatorio Meteorológico de Tapachula con sus respectivos períodos de retorno T para los años de 2000-2016.

D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años
5	T	10	T	15	T	20	T
248.4	10.75	187.8	5.74	180.0	10.59	185.4	28.55
186.0	4.21	185.4	5.49	140.0	4.42	141.0	7.07
180.0	3.87	180.0	4.98	140.0	4.42	117.6	3.59
176.4	3.68	176.4	4.67	120.0	2.96	106.8	2.68
121.2	1.84	121.2	1.92	100.0	2.06	93.9	1.94
107.4	1.60	107.4	1.61	80.0	1.53	90.6	1.80
106.8	1.59	106.8	1.60	80.0	1.53	80.1	1.43
87.0	1.34	87.0	1.30	71.2	1.37	79.2	1.41
82.2	1.29	82.2	1.25	64.0	1.27	75.6	1.31
69.6	1.19	69.6	1.14	60.0	1.22	63.6	1.09
D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años
30	T	40	T	50	T	60	T
164.8	28.71	123.6	20.58	141.0	12.22	133.8	14.19
123.0	6.97	107.85	10.11	110.88	5.51	92.4	4.52
91.4	2.74	81.8	3.37	84.7	2.92	73.9	2.84
89.2	2.59	73.8	2.51	82.1	2.75	70.6	2.63
85.6	2.36	66.9	1.98	68.6	2.07	62.3	2.19
80.2	2.06	61.7	1.69	49.9	1.48	42.1	1.49
68.4	1.58	57.9	1.52	49.8	1.48	41.7	1.48
65.0	1.48	57.9	1.52	47.6	1.43	40.0	1.44
47.0	1.11	46.7	1.19	41.6	1.32	34.7	1.33
44.6	1.09	36.0	1.05	38.8	1.27	32.6	1.30

D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años
120	T	180	T	240	T	300	T
83.2	24.80	79.7	31.76	62.3	30.30	49.8	28.47
61.75	7.39	43.97	5.13	36.7	5.55	32.2	6.30
53.7	4.86	40.4	4.30	34.825	4.92	29.54	5.05
40.9	2.66	29.5	2.54	22.3	2.28	18.5	2.17
34.1	2.01	29.1	2.48	21.9	2.22	17.9	2.08
25.6	1.49	17.1	1.44	13.6	1.41	13.4	1.55
21.5	1.32	16.1	1.38	13.5	1.40	11.4	1.37
21.2	1.31	15.8	1.36	13.3	1.38	10.8	1.33
20.1	1.27	15.1	1.32	12.6	1.34	10.7	1.32
17.4	1.19	14.7	1.30	12.3	1.31	9.9	1.26
D (min)	Años	D (min)	Años	D (min)	Años		
600	T	900	T	1440	T		
24.9	10.65	19.4	22.09	14.9	28.346		
20.5	6.05	16.6	12.40	10.4	8.921		
14.94	3.07	9.96	3.42	6.2	3.166		
10.7	1.96	7.1	2.10	4.5	2.080		
8.9	1.67	6.0	1.75	3.7	1.757		
7.8	1.53	5.3	1.58	3.7	1.729		
7.2	1.46	4.8	1.48	3.2	1.560		
5.9	1.33	4.4	1.40	3.0	1.503		
5.3	1.29	4.0	1.32	2.5	1.339		
5.3	1.28	3.6	1.26	2.2	1.274		



Tormentas diseño para los sitios Chapingo, Ciudad de México, Cuernavaca y Tapachula.



Anexo 3. Cálculo del parámetro r para cada sitio de estudio.

A.3. 1. Cálculo del parámetro r para las tormentas de 24 horas de la estación meteorológica Chapingo.

Fecha	Lámina total (mm)	Duración al pico (h)	Duración (h)	r
07-08-1990	27.7	21.2	23.5	0.90
26-06-1991	14.2	10.0	22.0	0.45
17-08-1995	51.2	12.0	22.5	0.53
24-09-2001	29.8	4.4	21.5	0.20
22-08-2007 (montecillos)	51.6	13.8	21.0	0.66
30-06-2011 (montecillos)	66.1	12.0	23.0	0.52
06-06-2015	77.3	14.5	20.0	0.73
10-09-1979	52.1	2	18.5	0.11
04-09-1988	55.7	0.7	17	0.04
$\bar{x}$				0.46

A.3. 2. Cálculo del parámetro r para las tormentas de 6 horas de la estación meteorológica Chapingo.

Fecha	Lámina total (mm)	Duración al pico (h)	Duración (h)	r
04-05-1990	11.7	1.0	5.5	0.18
02-07-1990	27.7	0.7	7.0	0.10
12-10-1990	65.5	0.7	7.0	0.10
14-06-1991	29.1	0.7	7.0	0.10
05-06-1992	13.8	0.7	7.7	0.09
14-07-1992	19.4	2.1	7.0	0.30
08-04-1994	12.0	2.4	6.0	0.40
30-08-1994	17.2	3.0	6.0	0.50
18-09-1994	14.5	1.0	5.5	0.18
11-08-1995	12.0	4.8	8.0	0.60
15-08-1995	14.4	1.0	5.5	0.18
16-08-1995	10.6	0.7	7.0	0.10
05-07-1996	19.6	0.6	6.0	0.10
14-09-1996	12.5	0.6	6.0	0.10
19-09-1996	10.5	1.0	5.5	0.18
23-06-1997	24.3	0.7	7.0	0.10
15-07-1997	18.0	4.2	7.0	0.60
29-06-1998	35.1	4.2	7.0	0.60
11-08-1998	47.7	4.2	7.0	0.60
21-08-1998	12.5	1.5	5.5	0.27
08-05-2001	13.6	1.0	5.5	0.18
14-06-2001	20.2	0.8	8.0	0.10
20-07-2001	12.9	4.9	7.0	0.70

Fecha	Lámina total (mm)	Duración al pico (h)	Duración (h)	r
31-08-2002	12.6	0.6	6.0	0.10
30-10-2002	29.3	1.2	6.0	0.20
02-06-2003	21.0	1.4	7.0	0.20
03-06-2003	11.0	0.7	7.0	0.10
16-06-2004	28.9	1.5	5.5	0.27
18-07-2005	19.9	1.6	8.0	0.20
19-07-2005	28.7	3.0	5.5	0.55
09-11-2005	26.8	1.0	5.5	0.18
27-04-2006	13.2	1.0	5.5	0.18
13-05-2006	13.9	4.2	6.0	0.70
08-09-2006	11.9	1.0	5.5	0.18
13-11-2006	17.2	1.8	6.0	0.30
16-06-2007	29.9	0.6	6.0	0.10
25-06-2007	20.9	1.2	6.0	0.20
01-07-2007	32.2	3.0	6.0	0.50
18-09-2007	14.6	0.7	7.0	0.10
19-09-2007	16.6	1.5	5.5	0.27
11-06-2008	17.3	0.6	6.0	0.10
07-07-2008	11.2	0.6	6.0	0.10
28-08-2008	16.3	4.5	5.5	0.82
19-08-2009	22.7	4.8	8.0	0.60
25-07-2011	30.9	0.6	6.0	0.10
04-09-2011	16.4	3.0	5.5	0.55
14-07- 2012	13.9	0.6	6.0	0.10
15-07-2012	14.1	2.4	6.0	0.40
21-08-1998 (montecillos)	47.4	1.5	5.5	0.27
20-08-1999 (montecillos)	25.3	5.4	6.0	0.90
26-08-2013	14.8	0.8	6.5	0.13
17-06-2014	11.5	0.3	7.5	0.04
18-06-2014	16.8	0.2	6.3	0.03
06-07-2014	21.3	0.2	7.0	0.02
09-09-2014	11.0	2.0	5.5	0.36
17-08-2015	13.8	0.7	5.3	0.13
22-07-2015	18.6	1.3	6.5	0.21
27-03-2015	16.2	0.3	6.2	0.05
			$\bar{x}$	0.27

A.3.3. Cálculo del parámetro r para las tormentas de 24 horas del Observatorio Meteorológico de la Ciudad de México.

Fecha	Lámina total (mm)	Duración al pico (h)	Duración (h)	r
05/09/2006	27.70	1.0	22.0	0.05
22/07/2006	29.96	18.0	23	0.78
13/07/2006	26.93	17.0	20	0.85
24/08/2006	42.17	21.0	23	0.91
08/07/2008	26.92	21.0	24	0.88
05/07/2010	51.31	3.0	20	0.15
30/06/2011	57.90	15.0	22	0.68
10/10/2013	63.22	18.7	22.8	0.82
28/05/2014	32.46	14.2	21.8	0.65
31/05/2014	40.1	16.5	19.5	0.85
02/09/2014	34.78	19.0	22.0	0.86
18/06/2014	55.61	19.0	24.0	0.8
17/06/2014	109.97	16.0	19.8	0.8
02/09/2015	38.34	1.0	22.0	0.05
$\bar{x}$				0.65

A.3. 4. Cálculo del parámetro r para las tormentas de 6 horas del Observatorio Meteorológico de la Ciudad de México.

Fecha	Precipitación total (mm)	Duración al pico (h)	Duración (h)	r
10/08/1999	27.40	1.0	7.0	0.14
20/08/1999	27.20	3.0	5.3	0.56
29/08/1999	20.70	3.3	6.7	0.50
02/08/2006	66.04	2.0	6.0	0.33
18/09/2006	68.32	5.0	6.0	0.83
08/06/2007	32.26	1.0	6.3	0.16
24/08/2007	34.04	1.0	5.5	0.18
19/09/2007	34.70	3.0	5.0	0.60
03/09/2008	24.12	1.0	7.0	0.14
28/04/2008	30.49	2.0	5.0	0.40
10/09/2009	39.00	1.0	5.4	0.18
04/07/2010	48.52	3.0	6.0	0.50
04/08/2010	20.10	4.0	5.0	0.80
05/07/2011	41.90	1.0	7.0	0.14
02/07/2012	22.40	1.0	7.0	0.14
16/09/2012	37.90	3.0	6.0	0.50

Fecha	Precipitación total (mm)	Duración al pico (h)	Duración (h)	r
05/09/2013	43.20	5.0	7.0	0.71
09/10/2013	36.60	1.0	6.0	0.17
23/08/2014	35.60	1.0	7.0	0.14
13/05/2014	66.79	6.7	6.7	1.00
04/05/2014	70.34	1.0	5.0	0.20
05/07/2015	23.61	1.0	7.0	0.14
$\bar{x}$				0.39

A.3.5. Cálculo del parámetro r para las tormentas de 24 horas del Observatorio Meteorológico de Cuernavaca.

Fecha	Precipitación total (mm)	Duración al pico (h)	Duración (h)	r
05/06/2000	20.10	0.7	22.0	0.03
09/06/2000	22.60	20.5	23.5	0.87
01/09/2001	23.90	0.0	22.3	0.00
25/08/2001	19.80	5.0	20.5	0.24
27/09/2003	44.20	0.3	23.0	0.01
06/09/2004	15.20	0.7	23.7	0.03
05/07/2005	54.60	22.0	24.0	0.92
23/07/2006	50.80	22.0	24.0	0.92
25/06/2007	69.10	0.3	23.3	0.01
18/07/2007	23.50	19.3	22.3	0.87
08/07/2008	20.50	1.7	20.8	0.08
13/09/2008	39.60	22.0	23.7	0.93
16/06/2009	41.10	0.7	24.0	0.03
04/02/2010	60.70	2.7	22.7	0.12
23/07/2010	37.20	6.7	23.7	0.28
18/09/2010	51.30	21.3	24.0	0.89
01/07/2011	22.30	0.7	23.5	0.03
15/09/2013	31.80	10.0	23.2	0.43
25/06/2014	50.20	23.3	23.8	0.98
28/06/2015	48.20	18.3	23.7	0.77
30/06/2015	47.80	19.2	20.0	0.96
27/09/2015	59.80	3.3	20.7	0.16
$\bar{x}$				0.43

A.3. 6. Cálculo del parámetro r para las tormentas de 6 horas del Observatorio Meteorológico de Cuernavaca.

Fecha	Precipitación total (mm)	Duración al pico (h)	Duración (h)	r
26/08/2001	19.5	5.0	7.0	0.71
07/06/2002	20.50	2.7	5.0	0.53
01/06/2003	15.40	5.5	6.3	0.87
28/08/2008	35.80	1.0	5.0	0.20
11/07/2009	21.60	4.0	7.5	0.53
22/06/2011	46.70	1.7	5.3	0.31
03/08/2011	44.40	3.3	5.7	0.59
15/07/2014	91.20	0.3	5.3	0.06
06/10/2014	50.20	0.3	6.8	0.05
20/06/2015	53.00	1.3	7.2	0.19
05/07/2015	32.20	1.3	5.0	0.27
21/07/2015	51.80	2.7	5.7	0.47
12/07/2016	28.40	3.0	5.5	0.55
10/08/2016	56.00	0.3	5.3	0.06
$\bar{x}$				0.39

A.3.7. Cálculo del parámetro r para las tormentas de 24 horas del Observatorio Meteorológico de Tapachula.

Fecha	Precipitación total (mm)	Duración al pico (h)	Duración (h)	r
02/10/2005	108.00	18.5	18.7	0.99
04/10/2005	356.46	7.5	23.83	0.31
05/10/2005	151.10	13.0	24	0.54
06/10/2005	143.76	19.0	24	0.79
04/09/2005	225.65	8.0	24	0.33
05/09/2005	336.40	15.5	24	0.65
06/09/2005	336.40	12.5	24	0.52
02/06/2008	87.60	19.5	22.8	0.85
21/06/2009	76.50	8.5	19.2	0.44
18/10/2011	123.50	14.9	23.7	0.63
11/10/2011	73.80	10.7	24.0	0.45
$\bar{x}$				0.59

A.3. 8. Cálculo del parámetro r para las tormentas de 6 horas del Observatorio Meteorológico de Tapachula.

Fecha	Precipitación total (mm)	Duración al pico (H)	Duración (H)	r
30/08/1990	55.1	0.2	7.0	0.02
16/09/1990	65.20	1.0	5.2	0.19
25/09/1990	68.90	0.7	6.0	0.11
09/11/1990	70.60	5.0	6.3	0.79
10/11/1990	92.40	2.7	5.0	0.53
21/06/1993	39.30	1.0	6.0	0.17
25/06/1993	50.30	0.7	5.2	0.13
12/08/2005	47.70	5.3	7.0	0.76
15/09/2005	71.80	5.7	6.8	0.83
08/09/2005	41.00	1.7	7.0	0.24
17/10/2006	46.00	2.7	5.2	0.52
24/09/2009	49.00	2.3	5.0	0.47
28/05/2011	49.80	0.8	6.9	0.11
21/06/2011	36.80	3.6	5.1	0.71
19/07/2011	70.90	1.1	6.0	0.18
18/07/2011	120.50	2.1	5.2	0.40
06/07/2011	33.70	3.3	6.0	0.55
19/08/2011	42.50	6.1	6.4	0.95
19/09/2011	131.00	0.6	5.0	0.11
19/09/2011 (Huixtla)	161.60	1.5	6.3	0.24
31/07/2011	57.70	2.4	5.9	0.40
18/07/2011	68.90	1.1	5.4	0.20
14/07/2011	41.30	3.0	6.0	0.49
23/08/2011	33.00	4.7	6.6	0.72
08/06/2011	65.00	2.0	6.0	0.34
07/06/2011	132.10	3.1	6.0	0.52
26/07/2011	65.50	2.4	5.0	0.47
19/07/2011	134.30	1.0	6.1	0.16
10/07/2011	84.50	2.6	5.8	0.45
24/08/2011	60.70	1.0	7.0	0.14
22/08/2011	89.80	1.6	6.1	0.26
14/08/2011	84.00	2.0	6.2	0.32
02/08/2011	54.10	0.4	5.0	0.08
27/09/2011	57.90	1.7	5.3	0.31
25/09/2011	71.20	0.5	6.4	0.08
15/09/2011	76.10	1.1	5.0	0.21
03/09/2011	65.00	4.1	6.5	0.62
24/08/2011	112.90	1.6	5.8	0.28



Tormentas diseño para los sitios Chapingo, Ciudad de México, Cuernavaca y Tapachula.



Fecha	Precipitación total (mm)	Duración al pico (H)	Duración (H)	r
14/08/2011	76.60	2.5	6.4	0.39
07/08/2011	61.30	0.6	5.0	0.11
			$\bar{x}$	0.36



Tormentas diseño para los sitios Chapingo, Ciudad de México, Cuernavaca y Tapachula.



Anexo 4. Distribuciones ajustadas para la serie de datos de intensidad para cada duración propuesta para las ecuaciones IDF en cada sitio de estudio.

A.4. 1. Distribuciones obtenidas mediante la prueba Kolmogorov-Smirnov para los datos de intensidad para las duraciones propuestas para la estación meteorológica Chapingo.

Duración (min)	Distribución
5	Pearson III
10	Gumbel
15	Gumbel
20	Gumbel
30	Logpearson III
40	Pearson III
50	Pearson III
60	Gumbel
120	Lognormal
180	Lognormal
240	Pearson III
300	Pearson III
600	Pearson III
900	Lognormal
1440	Lognormal

A.4. 2. Distribuciones obtenidas mediante la prueba Kolmogorov-Smirnov para los datos de intensidad de las duraciones propuestas para el observatorio meteorológico de la Ciudad de México.

Duración (min)	Distribución
60	Gumbel
120	Lognormal
180	Pearson III
240	Pearson III
300	Pearson III
600	Lognormal
900	Gumbel
1440	Pearson III

A.4. 3. Distribuciones obtenidas mediante la prueba Kolmogorov-Smirnov para los datos de intensidad de varias duraciones propuestas para el observatorio meteorológico de Cuernavaca.

Duración (min)	Distribución
5	Gumbel
10	Gumbel
15	Gumbel
20	Gumbel
30	Gumbel
40	Gumbel
50	Gumbel
60	Gumbel
120	Normal
180	Gumbel
240	Normal
300	Normal
600	Normal
900	Normal
1440	Normal

A.4. 4. Distribuciones obtenidas mediante la prueba Kolmogorov-Smirnov para los datos de intensidad de varias duraciones propuestas para el observatorio meteorológico de Tapachula.

Duración	Distribución
5	Gumbel
10	Gumbel
15	Gumbel
20	Pearson III
30	Pearson III
40	Lognormal
50	Gumbel
60	Gumbel
120	Pearson III
180	Pearson III
240	Pearson III
300	Pearson III
600	Gumbel
900	Pearson III
1440	Pearson III