



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – APROVECHAMIENTOS HIDRÁULICOS

APLICACIÓN DE UN MODELO GENERADOR DE TORMENTAS EN LA CUENCA
DE CHICOASÉN, CHIAPAS.

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
EMILIANO PÉREZ CORTÉS

TUTOR(ES) PRINCIPAL(ES)
DR. RAMÓN DOMINGUEZ MORA, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. ABRIL 2014

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Fuentes Mariles Oscar
Secretario: Dr. Pedrozo Acuña Adrián
Vocal: Dr. Domínguez Mora Ramón
1^{er}. Suplente: M. I. Franco Víctor
2^{do}. Suplente: Dra. Arganis Juárez Maritza Liliana

INSTITUTO DE INGENIERÍA

TUTOR DE TESIS:

Dr. Domínguez Mora Ramón

FIRMA

Contenido

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 5 |
| 1. ANTECEDENTES | 7 |
| 1.1. Tipos de modelos | 7 |
| 2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO | 12 |
| 2.1. Localización | 12 |
| 2.2. Fisiografía | 15 |
| 2.3. Edafología | 15 |
| 2.4. Hidrografía | 15 |
| 2.5. Climatología | 16 |
| 2.6. Lluvia | 16 |
| 3. METODOLOGÍA | 19 |
| 3.1. Modelo de generación de tormentas (basado en la idea de fragmentos del método de Svanidze) | 19 |
| 3.2. Procedimiento de generación de tormentas sintéticas | 19 |
| 3.2.1. Primer procedimiento | 19 |
| 3.2.2. Segundo procedimiento | 22 |
| 4. APLICACIÓN DEL MODELO A LA GENERACIÓN DE TORMENTAS DIARIAS | 25 |
| 4.1. Selección de tormentas históricas | 25 |
| 4.1.1. Periodo de lluvias empleado y selección general de tormentas | 25 |
| 4.1.2. Validación de lluvias | 25 |
| 4.1.3. Interpolación de lluvias faltantes | 25 |
| 4.2. Aplicación del modelo | 26 |
| 4.2.1. Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm | 26 |
| 4.2.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm | 28 |
| 4.2.3. Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm | 32 |

| | |
|--|-----|
| 4.3. Primer procedimiento de generación de tormentas sintéticas | 37 |
| 4.3.1. Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm | 37 |
| 4.3.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm | 43 |
| 4.3.3. Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm | 49 |
| 4.4. Validación del primer procedimiento | 54 |
| 4.4.1. Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm | 54 |
| 4.4.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm | 63 |
| 4.4.3. Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm | 72 |
| 4.5. Segundo procedimiento de generación de tormentas sintéticas | 81 |
| 4.5.1. Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm | 81 |
| 4.5.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm | 89 |
| 4.5.3. Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm | 96 |
| 4.6. Validación del segundo procedimiento | 104 |
| 4.6.1. Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm | 104 |
| 4.6.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm | 112 |
| 4.6.3. Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm | 120 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 129 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 133 |

INTRODUCCIÓN

Cualquiera de los fenómenos relacionados a la generación y distribución de la lluvia en nuestro planeta, y algunas de sus consecuencias directas como son: el escurrimiento superficial, la infiltración y de manera especial el caudal en los ríos, son procesos circunstanciales, y por lo tanto tienen un nivel de incertidumbre o una probabilidad asociada de que sean igualados o excedidos en un número de años. Estos procesos están regidos por las leyes de la probabilidad, se les llama estocásticos.

Una de las dificultades que tienen los hidrólogos se refiere a la escasez y la calidad de datos de precipitación, evaporación, infiltración, caudales, etc. o de cualquier variable meteorológica de interés. En la mayoría de los casos, el hidrólogo supone que el futuro de esta variable de interés es estadísticamente similar al pasado. Este componente del pensamiento del hidrólogo es lo que le da sustento a la hidrología estocástica.

La propiedad básica para un análisis estocástico es que el proceso sea estacionario; es decir, que las propiedades estadísticas del proceso no varían en el tiempo.

Se considera que los datos medidos de una variable hidrológica, por ejemplo el caudal, ordenados en orden cronológico es un registro histórico de ella. Las series deducidas de los registros históricos son las series sintéticas extendidas. Generalmente, de las propiedades de los registros históricos se derivan las series sintéticas extendidas.

Las series sintéticas extendidas deben manifestar propiedades estadísticas similares a aquéllas de la serie histórica que se conoce, de la que se desea generar datos posteriores en el tiempo. Algunas propiedades de las series hidrológicas pueden ser investigadas en un dominio temporal a través del análisis de correlogramas (Zimmermann, E. D. y Silber, M. L. 2002).

El suministro de datos es por lo tanto la serie histórica, y a partir de sus propiedades, se generarán las series sintéticas probables en el futuro. Los métodos estocásticos son tratados en hidrología para resolver el problema de diseño de almacenamientos (presas) y su operación. El volumen de un almacenamiento o embalse depende de la sucesión de escurrimientos superficiales. Los métodos estocásticos proporcionan medios para estimar la probabilidad de secuencia de años secos o avenidas grandes durante cualquier periodo específico en el futuro.

Se requieren muchas propiedades para describir completamente una serie histórica. El análisis estocástico requiere incluir solamente aquéllas que son significativas para el sistema físico que se esté estudiando. Es por ello, que una condición necesaria es identificar el diseño más apropiado para la serie que se esté tratando.

Los métodos de generación artificial de series temporales se basan en el uso de los “registros históricos” como una muestra de la población total. Mientras que los métodos convencionales consideran a los registros como la “población total”. De esto, se concluye que el diseño estaría fundado en estimaciones de lo que “podría pasar”, en vez de lo que “pasó”.

En términos generales, la misma idea básica de generación estocástica es aplicable a caudales, precipitación, evapotranspiración y, como se indicó, a otras variables hidrometeorológicas.

Una serie temporal, puede modelarse matemáticamente. Necesariamente, estos análisis encierran un gran número de cálculos y por ello pueden realizarse con una computadora. El uso de computadoras en todos los aspectos de la ingeniería hidrológica ha llevado a incrementar el énfasis en la modelación de cuencas.

La modelación de cuencas comprende la integración de los procesos hidrológicos en un ente modelo; por ejemplo, un modelo de cuenca, con propósitos ya sea de análisis, diseño, escurrimiento a largo plazo, predicción de volumen, predicción o pronóstico de flujo en tiempo real.

Un modelo es un conjunto de abstracciones matemáticas que representan los cambios relevantes de un ciclo. Dentro de las técnicas de modelación de cuencas son aplicables a cuencas de cualquier tamaño, ya sean pequeñas, de tamaño medio o grandes. En la práctica, sin embargo; las aplicaciones de la modelación son generalmente limitadas al análisis de cuencas en donde la descripción de las variaciones espaciales temporales o variaciones espaciales de precipitación está garantizada. Comúnmente este es el argumento para cuencas de tamaño medio y grande.

La modelación de cuencas radica en lo sucesivo en la elección del tipo, la formulación, construcción, el ensayo, y la aplicación.

Al ingeniero hidrológico le conviene seleccionar un modelo disponible, con conocimiento de su estructura, operación, capacidades, y limitaciones. En ocasiones desarrolla un modelo o modifica uno existente, basándose en necesidades observadas, disponibilidad de datos u otro tipo de restricciones.

En este trabajo se aplicará un modelo generador de tormentas sintéticas para la cuenca de Chicoasén en el estado de Chiapas, México. El tipo de modelo es el método de Svanidze Modificado, para realizar la generación sintética de tormentas de 24 horas que reproduce la distribución espacial y temporal de las precipitaciones históricas.

1. ANTECEDENTES

Una serie temporal es una secuencia ordenada de observaciones cada una de las cuales está asociada a un momento de tiempo. Ejemplos de series temporales se pueden encontrar en cualquier campo de la ciencia. En meteorología, se tienen series temporales de temperatura, cantidad de lluvia en una región, velocidad del viento, etc.

La mayoría de los métodos estadísticos elementales suponen que las observaciones individuales forman un conjunto de datos de variables aleatorias mutuamente independientes. En general, este supuesto de independencia mutua se justifica por la atención prestada a diversos aspectos del fenómeno, incluyendo la extracción aleatoria de la muestra de una población más grande, la asignación aleatoria del tratamiento a cada unidad del fenómeno a estudiar, etc. Además en este tipo de datos el orden de las observaciones no tiene mayor importancia. Sin embargo, en el caso de las series temporales, se debe tener en cuenta, sin embargo, que:

- El orden es fundamental: se tiene un conjunto de datos ordenado
- El supuesto de independencia no se sostiene ya que, en general, las observaciones son dependientes entre sí y la naturaleza de su dependencia es de interés en sí misma

El conjunto de técnicas de estudio de series de observaciones dependientes ordenadas en el tiempo se denomina Análisis de Series Temporales. El instrumento de análisis que se suele utilizar es un modelo que permita reproducir el comportamiento de la variable de interés.

Existen una diversidad de métodos para generar registros sintéticos de precipitación en la literatura, los cuales se distinguen entre ellos por las hipótesis que consideran; esto significa que utilizan conjuntos de parámetros diferentes, igualmente implica que integran diferentes procesos y grados de complejidad. Un parámetro que se considera fundamental en estos métodos es la escala temporal de las precipitaciones generadas, esta escala depende totalmente de los datos históricos disponibles.

1.1. Tipos de modelos

Un primer acercamiento a los modelos de generación sintética de lluvias se puede citar en los trabajos realizados por Delleur y Kavvas, 1978 que utilizaron modelos autorregresivo de promedios móviles integrados (ARIMA) en series de precipitaciones medias mensuales de quince cuencas de Illinois y Kentucky en Estados Unidos, con fines de generación sintética y de pronóstico.

Geng et al, 1986 propusieron un método de generación sintética de datos de precipitación diaria en una estación con un modelo cuyos parámetros se obtienen a partir de datos mensuales en lugar de los datos diarios, considerando por una parte que las probabilidades de transición entre días secos y húmedos, puede estimarse a partir de la fracción de días húmedos por mes y, por otra, la magnitud de la precipitación en un día lluvioso se modela con una distribución gamma, cuyos parámetros pueden relacionarse con la lluvia promedio de los días lluviosos. Sus estudios fueron realizados para aplicarse en modelos de agricultura.

Bogárdi et al, 1988, propusieron un método de generación de tormentas aplicado a registros de precipitaciones diarias de climas semiáridos, usando el concepto de ciclo climático anual, además de generación de números aleatorios con distintas distribuciones de probabilidad.

Se ha prestado atención que algunos autores hacen una clasificación de los métodos de generación de precipitaciones, por ejemplo, Arnaud et al., (1999) y (2007), afrontando este problema concretamente en los modelos de generación horaria, y los agrupan en 5 categorías:

- Modelos de desagregación diaria.
- Modelos basados en la agregación de procesos.
- Modelos basados en la descripción adimensional de los patrones de intensidad de la tormenta.
- Modelos basados en procesos multiplicativos en cascada.
- Otros tipos de modelos estocásticos.

Arnaud et al, 1999 aplicaron un modelo de generación estocástica a datos de la costa francesa consistente en dos pasos para la generación, el primer paso es un proceso descriptivo de la lluvia a partir de variables independientes que la identifican y el ajuste de dichas variable medidas a la mejor función de distribución; en un segundo paso le dan forma a la tormenta con ayuda del método de fragmentos; posteriormente hacen una análisis de sensibilidad de los resultados y al observar que los valores medios cambiaban de una estación a otra. Estos autores realizaron una adecuación del modelo de generación ajustando una distribución exponencial a los valores de la precipitación total inferiores a cuatro veces el valor medio de la precipitación, con base en un estudio regional de las distribuciones de intensidad de precipitación, obtenidas al agrupar a las variables homogeneizadas de 50 estaciones. Ellos posteriormente realizaron una segunda modificación para desarrollar un modelo para la dependencia de las variables intensidad y duración de la tormenta, apoyado en la frecuencia acumulada entre esas dos variables, definieron un parámetro adicional para modelar la dependencia entre dichas variables que caracteriza la curva de frecuencia acumulada de la suma de las probabilidades de las dos variables. Finalmente estudiaron la modelación de la persistencia de la tormenta en un mismo episodio de tormenta para generar láminas de precipitación máxima de 24 horas y

con estas aplicaciones, encontraron mejoras en la calibración de 50 estaciones de medición de la costa del mediterráneo francés.

Otro tipo de categorización de modelos de generación sintética, se funda en el tipo de aplicación; en este último caso se tienen por ejemplo:

- Los modelos generadores de lluvia en un solo sitio, como los propuestos por Chernesson et al, (1996) o Arnaud et al., (1999).
- Los modelos generadores multi-sitio, que generan campos de lluvia en una serie de puntos extendidos en un área dada; Mehrotra et al., (2006) y en Frost et al., (2011).

Wilks, 1998 discutió la extensión de un modelo climático de precipitación de tipo empírico-estadístico y estocástico simple y ampliamente utilizado que también comprende la porción de precipitación de un número más grande de generadores estocásticos de clima, para la simulación simultánea en sitios múltiples; esta extensión la logra manejando cada colección de modelos de sitio individuales, independientes en el tiempo pero con números aleatorios espacialmente correlacionados. Cisneros et al., 1998 desarrolló un modelo que intenta preservar la estructura espacial de las tormentas históricas.

Vischel et al., (2009) presentan una clasificación similar a la de Arnaud (2007) basándose también en las hipótesis que consideran:

- Modelos de celdas de lluvia (e.g. Rodriguez-Iturbe y Eagleson, 1987; Salsón, S. and García-Bartual, R., 2003),
- Modelos invariantes de escala, donde se encuentran los procesos de desagregación en cascada como los propuestos por Molnar y Burlando (2005) y (Linzcar et al., 2011).
- Modelos de lluvia multi-sitio (e.g. Mehrotra et al., 2006)
- Modelos meta-Gaussianos (e.g. Bouvier et al., 2003). Vischel et al., (2009) plantean que cada modelo presenta ventajas y desventajas, que deben ser tomadas en cuenta para definir cuál utilizar finalmente.

Los modelos de celdas de lluvia son complicados para su aplicación, debido al gran número de parámetros que se requieren calcular para su implementación. Los modelos de invariancia en la escala (Scherzer y Lovejoy, 1987) utilizan pocos parámetros, pero requieren información precisa de la variación de la precipitación para varias resoluciones espaciales y temporales. Por otra parte, los modelos meta-Gaussianos son relativamente sencillos de aplicar y requieren pocos parámetros, pero existe un marco teórico que debe ser tomado en cuenta para su implementación. La resolución temporal mínima de los métodos anteriores depende principalmente de la resolución temporal en los datos históricos registrados.

En trabajos creados años atrás como el de, Cole y Sherriff, 1972 ya se enfatizaba que para intervalos de menos de un día, la persistencia en las tormentas hace que el modelado estocástico de precipitación sea muy complejo, estos autores realizaron un resumen de los modelos que se tenían en esa época de precipitación horaria y de duraciones en minutos, la mayoría de los cuales fueron desarrollados para estudios de la hidrología urbana; las cadenas de Markov y los modelos autorregresivos que hoy en día se siguen utilizando.

Existen estudios donde aplicaron métodos de generación horaria que se han usado en las últimas décadas son los de Zimmerman, 1998 quien construyó sintéticamente hietogramas horarios de tormentas para veinte años, englobando 1293 eventos de lluvia; el ajuste de las series reales se realizó con un modelo compuesto por una componente determinística senoidal, con periodo de un año y otra componente aleatoria de "ruido blanco".

Koutsoyiannis y Onof, 2001 utilizaron una metodología para la generación de los datos horarios que se pueden agregar hasta llevarlos a nivel diario; para ello combinaron un modelo de simulación de lluvia basado en el proceso de Bartlet-Lewis, que son técnicas probadas y desarrolladas para el propósito de ajustar valores para la escala más fina (por hora) y obtener los valores necesarios para una escala gruesa (diario): usaron una técnica de agrupación (cluster). La metodología responde directamente a las preguntas de la posible ampliación de la serie horarias para su aplicación a nivel diario en el mismo sitio y proporciona la base teórica para un uso operacional de esta metodología cuando no hay datos horarios disponibles. El algoritmo ha sido validado en modo de prueba plena en el caso de que los datos horarios son disponibles.

Mehrotra y Sharma, 2006 consideran que las tormentas sintéticas generadas pueden ser usadas en los análisis de confiabilidad y riesgo para el diseño y operación de obras hidráulicas.

El análisis de eventos extremos en hidrología, la generación de series de tiempo, que reproduzcan sus características estadísticas, sus autocorrelaciones y posibles correlaciones cruzadas es muy importante porque dichos registros sintéticos pueden posteriormente usarse para simular el comportamiento del sistema hidrológico analizado. Cuando los autores de estos trabajos han analizado la correlación entre las variables características del modelo, por lo general han encontrado que dicha correlación es débil, de tal forma que consideran válida la hipótesis de no dependencia entre esas variables (lo que por lo demás resulta muy conveniente para el desarrollo del modelo).

En este trabajo se propone aplicar con el método de Svanidze Modificado para la generación sintética de tormentas de 24 horas que reproduce la distribución espacial y temporal de las precipitaciones históricas. Este método consiste en dividir en dos partes la generación. La primer parte es un proceso descriptivo de la precipitación a partir de variables independientes que la identifican y el ajuste de dichas variables medidas a la

mejor función de distribución. La segunda parte, se le dan forma a la tormenta con ayuda del método de Svanidze Modificado. Posteriormente se hace un análisis de sensibilidad de los resultados y al observar si los valores medios cambian de una estación a otra se realiza una adecuación del modelo de generación dividiendo las variables en dos grupos y repitiendo el proceso anterior.

Un ejemplo de problema resuelto con el método de Svanidze Modificado es la obtención de registros sintéticos de volúmenes de escurrimiento de series mensuales identificadas por tener una componente invernal, que es característica de las regiones comprendidas en el noroeste de México al ocurrir las llamadas lluvias de invierno (equipatas), en dicho estudio se generaron registros sintéticos para tres presas con propósitos distintos la presa Huites (hidroeléctrica), Josefa Ortiz de Domínguez y Miguel Hidalgo (riego) (Domínguez y Arganis, 2009).

2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO

2.1. Localización

Chiapas se localiza al sureste de México; colinda al norte con el estado de Tabasco, al oeste con Veracruz y Oaxaca, al sur con el Océano Pacífico y al este con la República de Guatemala. Al norte $17^{\circ}59'$, al sur $14^{\circ}32'$ de latitud norte; al este $90^{\circ}22'$, al oeste $94^{\circ}14'$ de longitud oeste. Su superficie territorial es de 74,415 km². Chiapas es el octavo estado más grande en la República Mexicana. El estado de Chiapas representa el 3.8 % de la superficie del país. La extensión de la frontera Sur abarca 658.5 km, que representan el 57.3 por ciento del porcentaje total de la extensión de dicha frontera, su extensión de litoral es de 260 km. El número de municipios que conforma el estado es de 122, mismos que se distribuyen en quince regiones socioeconómicas Figura 1.

- I. Metropolitana
- II. Valles Zoque
- III. Mezcalapa
- IV. De los Llanos
- V. Altos Tsotsil-Tseltal
- VI. Frailesca
- VII. De Los Bosques
- VIII. Norte
- IX. Istmo-Costa
- X. Soconusco
- XI. Sierra Mariscal
- XII. Selva Lacandona
- XIII. Maya
- XIV. Tulijá Tseltal Chol
- XV. Meseta Comiteca Tojolabal

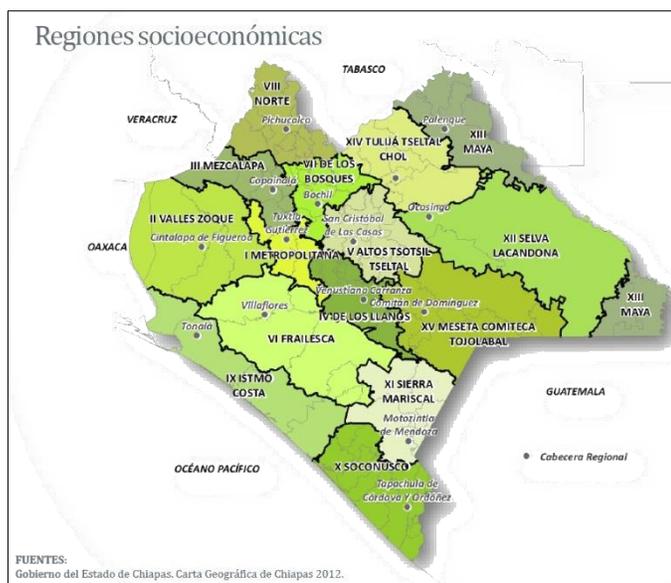


Figura 1. Regiones socioeconómicas

La cuenca en estudio de este trabajo se encuentra en la región socioeconómica VI Frailesca, así mismo se encuentra en la Región Hidrológico-Administrativa XI. Frontera Sur Figura 2 y en la Región Hidrológica 30. Grijalva-Usumacinta Figura 3.

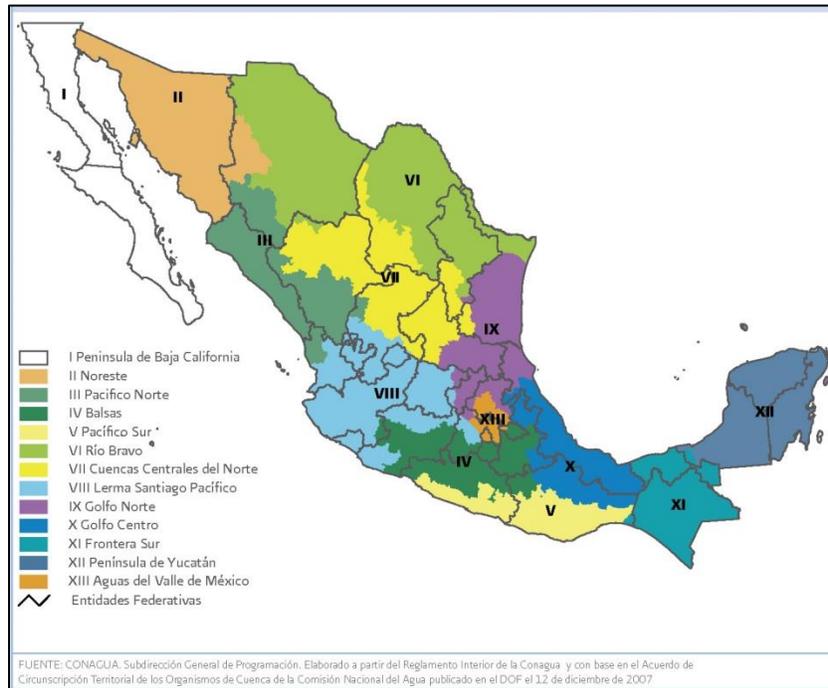


Figura 2. Regiones Hidrológico-Administrativas

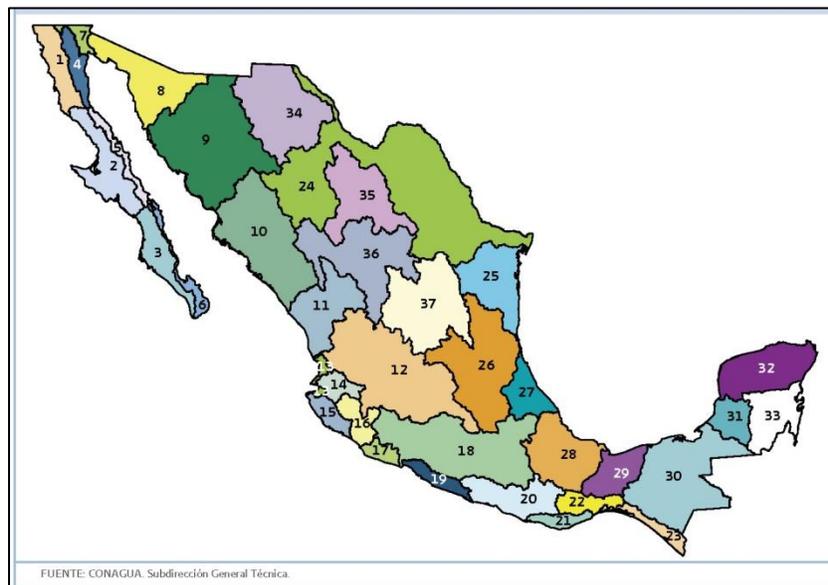


Figura 3. Regiones Hidrológicas

2.2. Fisiografía

El accidente fisiográfico más importante de la cuenca en estudio dentro de la Región Hidrológica 30 está constituido por la Sierra Madre de Chiapas, que se extiende desde la frontera sur con Guatemala hasta la frontera oeste con los estados de Oaxaca y de Veracruz; estos accidentes hacen contacto al sur con la Llanura Costera del Pacífico y al norte con la Depresión Central.

Estas sierras constituyen los sitios en donde ocurren las mayores precipitaciones; en consecuencia en ellas se generan los escurrimientos que fluyen hacia la planicie dando lugar a corrientes generalmente de régimen torrencial, con gastos de consideración aún en el estiaje, además de la formación de grandes avenidas.

2.3. Edafología

El área en que se sitúa la cuenca Chicoasén está ubicada en la porción más oriental de la Sierra Madre de Chiapas y de la Depresión Central. Tomando como base la porción más oriental de la región, se considera que los tipos de suelo que existe principalmente en dicha zona son Litosol y Regosol.

Los litosoles son también llamados suelos no evolucionados, esto como resultado de fenómenos erosivos, que se han formado sobre roca madre dura. También pueden ser resultado de la acumulación reciente de aportes aluviales.

Los regosoles son suelos desarrollados sobre materiales no excesivamente consolidados y que presentan una escasa evolución, fruto generalmente de su reciente formación sobre aportes recientes no aluviales o en zonas con fuertes procesos erosivos que provocan una continua renovación de los suelos.

2.4. Hidrografía

Los principales ríos que se encuentran en la cuenca en estudio son los ríos: El Tablón, Suchiapa, Los Amates, Pando y Santo Domingo, los cuales desembocan al Río Grijalva.

2.5. Climatología

El clima en la región de estudio según Thornthwal se clasifica como Cálido-húmedo a Semicálido-húmedo; en una subclasificación más definida se tiene un clima principalmente Cálido Subhúmedo con lluvias en verano y otros dos tipos de clima en menor proporción, una región Semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano y una región Semicálido subhúmedo con lluvias en verano. La vegetación principal es de bosque de coníferas, bosque de encino y bosque mesófilo de montaña.

2.6. Lluvia

Los datos de precipitación se adquirieron de las estaciones que se encuentran dentro de la cuenca Chicoasén Figura 6, las estaciones que se encuentran en cada cuenca son las siguientes:

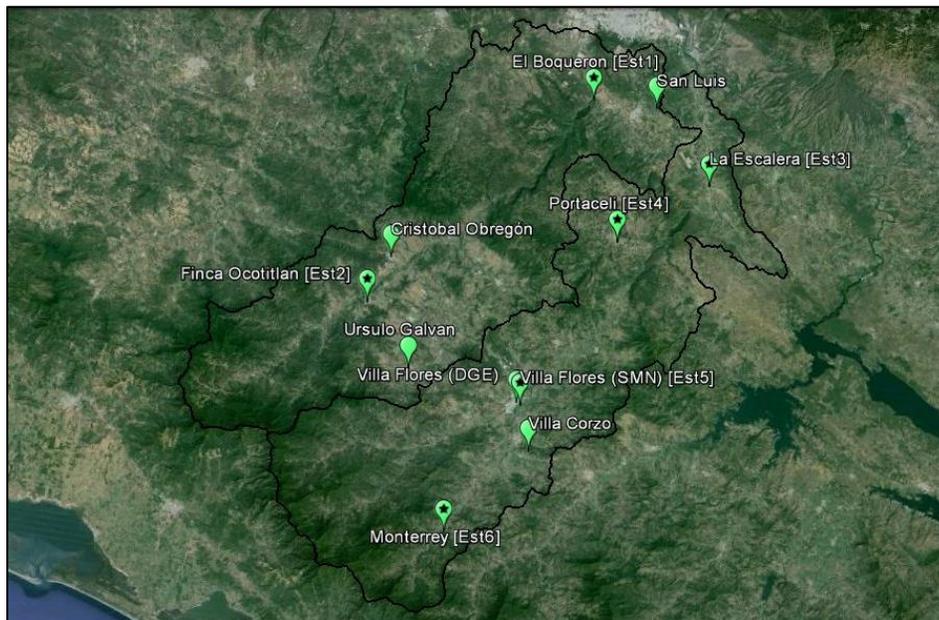


Figura 6. Estaciones pluviométricas en la cuenca de estudio

RH30Ei

| Clave | Nombre | Longitud | Latitud | Alt. |
|-------|---------------------------|----------|---------|------|
| 7039 | EL BOQUERON, SUCHIAPA | -93.157 | 16.644 | 480 |
| 7065 | F. OCOTITLAN, VILLAFLORES | -93.477 | 16.369 | 650 |
| 7327 | URSULO GALVAN, V. FLORES | -93.419 | 16.279 | 700 |
| 7332 | CRISTOBAL OBREGON, V.FLOR | -93.444 | 16.43 | 670 |

RH30EI

| Clave | Nombre | Longitud | Latitud | Alt. |
|-------|---------------------------|----------|---------|------|
| 7091 | LA ESCALERA, CHIAPA DE C. | -92.993 | 16.526 | 485 |
| 7132 | PORTACELI, VILLA FLORES | -93.125 | 16.449 | 780 |
| 7174 | VILLA CORZO, VILLA CORZO | -93.25 | 16.167 | 600 |
| 7175 | VILLA FLORES (SMN) | -93.262 | 16.229 | 857 |
| 7204 | VILLA FLORES (DGE) | -93.267 | 16.233 | 631 |
| 7223 | SAN LUIS, SUCHIAPA | -93.067 | 16.633 | 480 |
| 7349 | MONTERREY, ANGEL A.CORZO | -93.369 | 16.059 | 700 |

Del periodo total de registro de las estaciones, se debe identificar aquellos años que contengan todos los datos completos y posteriormente conocer si ese año registrado, es un año de registro completo simultáneo en al menos 6 de las estaciones dentro de la cuenca, como resultado de estas condiciones se obtienen las tablas siguientes:

RH30Ei

| Clave | Nombre | Años de Registro | Años Completos | Año de Registro Simultáneo | | | |
|-------|---------------------------|------------------|----------------|----------------------------|------|------|------|
| 7039 | EL BOQUERON, SUCHIAPA | 57 | 52 | 1986 | 1991 | 2003 | - |
| 7065 | F. OCOTITLAN, VILLAFLORES | 47 | 20 | 1986 | 1991 | 2003 | 2006 |
| 7327 | URSULO GALVAN, V. FLORES | 28 | 21 | - | - | 2003 | 2006 |
| 7332 | CRISTOBAL OBREGON, V.FLOR | 6 | - | - | - | - | - |

RH30EI

| Clave | Nombre | Años de Registro | Años Completos | Año de Registro Simultáneo | | | |
|-------|---------------------------|------------------|----------------|----------------------------|------|------|------|
| 7091 | LA ESCALERA, CHIAPA DE C. | 54 | 37 | 1986 | 1991 | 2003 | 2006 |
| 7132 | PORTACELI, VILLA FLORES | 45 | 30 | 1986 | 1991 | 2003 | 2006 |
| 7174 | VILLA CORZO, VILLA CORZO | 19 | - | - | - | - | - |
| 7175 | VILLA FLORES (SMN) | 47 | 24 | 1986 | 1991 | - | 2006 |
| 7204 | VILLA FLORES (DGE) | 32 | 26 | - | - | - | - |
| 7223 | SAN LUIS, SUCHIAPA | 6 | - | - | - | - | - |
| 7349 | MONTERREY, ANGEL A.CORZO | 28 | 13 | 1986 | 1991 | 2003 | 2006 |

Se emplearon finalmente las lluvias diarias medidas en los años 1986, 1991, 2003 y 2006, que son los años con mayor registro simultáneo entre dichas estaciones y los registros a usar son de las estaciones: El Boqueron, F. Ocotitlán, La Escalera, Portaceli, Villaflores (SMN) y Monterrey, es decir de la estación 1 a la 6 respectivamente Figura 6 y en lo posterior de este estudio se designarán para su identificación más simple de la siguiente manera:

| Clave | Nombre | Identificación |
|-------|---------------------------|----------------|
| 7039 | EL BOQUERON, SUCHIAPA | Est1 |
| 7065 | F. OCOTITLAN, VILLAFLORES | Est2 |
| 7091 | LA ESCALERA, CHIAPA DE C. | Est3 |
| 7132 | PORTACELI, VILLA FLORES | Est4 |
| 7175 | VILLA FLORES (SMN) | Est5 |
| 7349 | MONTERREY, ANGEL A. CORZO | Est6 |

3. METODOLOGÍA

3.1. Modelo de generación de tormentas

(basado en la idea de fragmentos del método de Svanidze)

Para realizar la aplicación del procedimiento de fragmentos del método de Svanidze, los eventos históricos de precipitación se caracterizan de dos modos, la primera característica es por su pico u evento extremo, por lo tanto, esta característica señala el valor máximo registrado en el centro del evento o tormenta, y la segunda característica, por la forma en que el evento se presenta (extensión espacial), expresada esta característica en términos de una relación (o fragmentos) entre lo que llovió en cada sitio instrumentado (estación) y lo que llovió en el centro de la tormenta.

Si estas características, magnitud del pico y forma de la tormenta, se consideran independientes, el procedimiento de generación sintética, se realiza en dos etapas. La primera etapa es, generando la característica del pico o precipitación máxima del evento aleatorio correspondiente a cada tormenta sintética, y la segunda etapa es, generando la característica forma, por lo que será distribuida espacialmente de acuerdo a los fragmentos correspondientes a una tormenta histórica seleccionada aleatoriamente.

El procedimiento de generación de tormentas sintéticas, se subdivide en dos procedimientos que desarrollan la misma metodología fundamentalmente.

3.2. Procedimiento de generación de tormentas sintéticas

3.2.1. Primer procedimiento

Los puntos a seguir en el primer procedimiento son:

1. Se determinan dos valores como umbrales, un valor de precipitación máxima y un valor de precipitación media, para realizar el procedimiento de selección de las tormentas históricas en cada una de las n estaciones.
2. Para cada tormenta histórica seleccionada, se determina la precipitación registrada en cada una de las n estaciones, el valor máximo correspondiente y la precipitación media de las n estaciones; es decir.

$PH_{i,j}$ Precipitación histórica registrada para la tormenta i en la estación j

$PHMÁX_i$ Precipitación histórica máxima sobre j de $PH_{i,j}$

$PHMED_i$ Precipitación histórica media para cada tormenta i de los valores $PH_{i,j}$

3. Se determina la función de distribución $F(p_m)$ de los valores máximos puntuales $PHMÁX_i$ correspondientes a cada tormenta histórica seleccionada.
4. Se genera un número aleatorio U_k con distribución uniforme $[0,1]$, y se obtiene la inversa de la función de distribución $F(p_m)$ para estimar el valor sintético correspondiente, $PSMÁX_k$ como se muestra en la Figura 7.

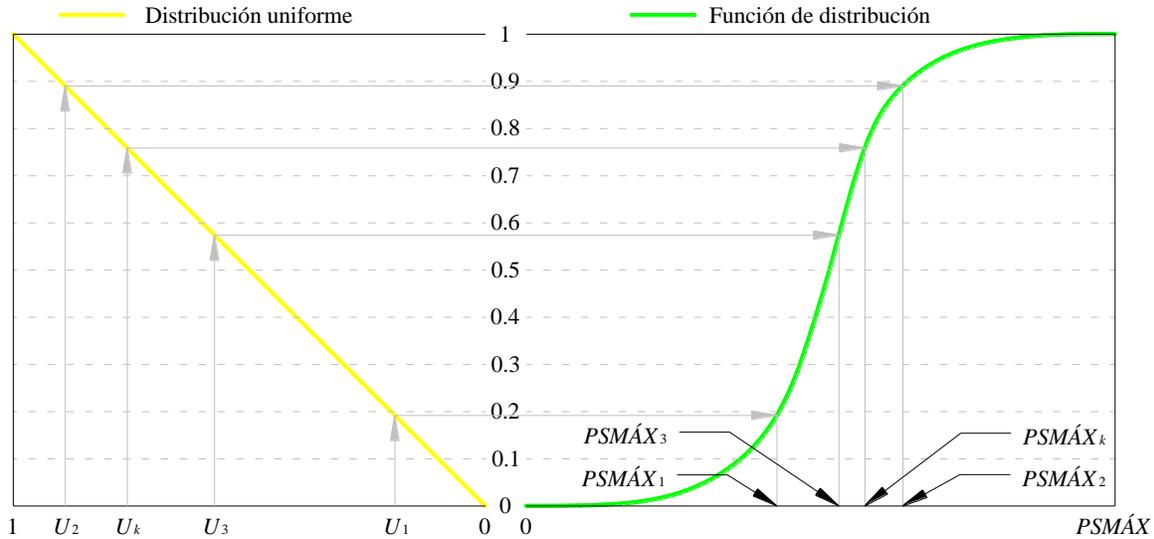


Figura 7. Generación aleatoria de precipitación máxima.

5. Adicionalmente, se selecciona aleatoriamente un número entero, comprendido entre 1 y el número de tormentas del estudio m , para lograr una selección aleatoria de una tormenta histórica, i .
6. La precipitación sintética generada para cada una de las n estaciones j se obtiene al multiplicar los valores registrados en las n estaciones de medición $PH_{i,j}$ para la tormenta i seleccionada en el paso 5, por la relación entre el valor sintético de la precipitación máxima obtenido en el paso 4 y la precipitación histórica máxima correspondiente a la tormenta histórica seleccionada en el paso 5, esto es:

$$PS_{k,j} = \frac{PSMÁX_k}{PHMÁX_i} PH_{i,j}$$

Ecuación 1

Donde $PS_{k,j}$ es la precipitación correspondiente a la tormenta sintética k , en la estación j , escalada de acuerdo con la relación entre la precipitación máxima

sinéctica $PSMÁX_k$ y la precipitación histórica máxima, $PHMÁX_i$ correspondiente a la tormenta seleccionada aleatoriamente en el paso 5.

Los pasos 4, 5 y 6 se repiten para $k = 1, 2, \dots, ns$ (número de tormentas sintéticas que se pretendan generar).

Siguiendo los pasos precedentemente señalados, se busca reproducir la distribución espacial de las tormentas históricas, seleccionadas aleatoriamente, pero escaladas de acuerdo con los valores máximos $PSMÁX_k$, cuya función de distribución pertenece a la de los máximos puntuales históricos.

Por este motivo se define un índice de extensión espacial de las tormentas históricas IEE_i , obtenido como la relación de la precipitación media en la tormenta i entre el valor máximo en dicha tormenta, lo cual equivale a obtener las medias de las tormentas normalizadas mediante una transformación que hace que el valor máximo siempre resulte igual a uno. De acuerdo con lo anterior, el índice de extensión espacial IEE_i se obtiene como:

$$IEE_i = \frac{PHMED_i}{PHMÁX_i}$$

Ecuación 2

Al relacionar la precipitación máxima anual de las tormentas históricas con su índice de extensión espacial, se obtiene una tendencia a que la amplitud espacial de las tormentas, medida mediante el índice de extensión espacial, disminuya conforme la magnitud del valor máximo aumenta, es decir, que las tormentas con mayor precipitación máxima tienden a ser menos extensas.

3.2.1.1. Validación del primer procedimiento

Para certificar el desempeño del procedimiento, se hace un cotejo en primera instancia, de las funciones de distribución de las medias y de los máximos de las tormentas, generadas con las funciones de distribución correspondientes a las tormentas históricas. Una vez que se consiguen representar adecuadamente las funciones de distribución de los valores máximos y medios de las tormentas históricas, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos de las lluvias registradas en cada una de las estaciones climatológicas, es decir que para cada parámetro estadístico media, desviación estándar y coeficiente de asimetría, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente en cada una de las estaciones climatológicas con funciones identidad.

Adicionalmente con el fin de estimar la correlación entre los valores de los parámetros correspondientes a las tormentas históricas y los parámetros obtenidos de las tormentas sintéticas, se calcula un nuevo coeficiente mediante el siguiente procedimiento:

Para cada parámetro estadístico (media, desviación estándar y coeficiente de asimetría) se obtiene un coeficiente de determinación C_{det} , que tiene en cuenta la variación de las diferencias entre los valores obtenidos para la precipitación de los datos históricos y la precipitación de los datos sintéticos:

$$C_{det} = \frac{Var_i - Var_\varepsilon}{Var_i}$$

Ecuación 3

Donde Var_i representa la varianza del parámetro estadístico i sobre las 6 estaciones de registro, para la muestra histórica; Var_ε la varianza de las diferencias entre los parámetros estadísticos i , de los datos históricos y de los datos sintéticos; adicionalmente i de los parámetros media, desviación estándar y asimetría, sucesivamente.

3.2.2.Segundo procedimiento

Con la intención de lograr mejores resultados, se concibe un segundo procedimiento de generación, en el que las tormentas históricas se ordenan en 2 grupos prácticamente del mismo tamaño; en el primero grupo se consideran las m_1 tormentas con mayor valor máximo y en el segundo grupo las restantes m_2 tormentas.

Al relacionar estos dos grupos por separado con los valores correspondientes del índice de extensión espacial se obtiene, que muestran una menor correlación entre la precipitación máxima y el índice de extensión espacial.

El procedimiento de generación de las tormentas sintéticas se modifica entonces, de tal manera que si el valor máximo generado, $PSMÁX_k$ obtenido en el paso 4 es mayor o igual que el umbral correspondiente al primer grupo de los máximos históricos, se selecciona aleatoriamente una de las tormentas del primer grupo (tormentas con valor máximo grande) y en caso contrario, se selecciona una tormenta del segundo grupo (tormentas cuyo valor máximo es chico).

Los puntos a seguir en el segundo procedimiento son:

1. Se determinan dos valores como umbrales, un valor de precipitación máxima y un valor de precipitación media, para realizar el procedimiento de selección de las tormentas históricas en cada una de las n estaciones.

2. Para cada tormenta histórica seleccionada se determina la precipitación registrada en cada una de las n estaciones, el valor máximo correspondiente y la precipitación media de las n estaciones; es decir.

$PH_{i,j}$ Precipitación histórica registrada para la tormenta i en la estación j

$PHMÁX_i$ Precipitación histórica máxima sobre j de $PH_{i,j}$

$PHMED_i$ Precipitación histórica media para cada tormenta i de los valores $PH_{i,j}$

3. Se determina la función de distribución $F(p_m)$ de los valores máximos puntuales $PHMÁX_i$ correspondientes a cada tormenta histórica seleccionada.
4. Se genera un número aleatorio U_k con distribución uniforme $[0,1]$, y se obtiene la inversa de la función de distribución $F(p_m)$ para estimar el valor sintético correspondiente, $PSMÁX_k$ como se muestra en la Figura 7.
5. Adicionalmente, se selecciona aleatoriamente un número entero, comprendido entre 1 y el número de tormentas del estudio m_1 , si corresponde al primer grupo, o se selecciona aleatoriamente un número entero, comprendido entre m_1 y m_2 , si corresponde al segundo grupo, para lograr una selección aleatoria de una tormenta histórica, i .
6. La precipitación sintética generada para cada una de las n estaciones j se obtiene al multiplicar los valores registrados en las n estaciones de medición $PH_{i,j}$ para la tormenta i seleccionada en el paso 5, por la relación entre el valor sintético de la precipitación máxima obtenido en el paso 4 y la precipitación máxima correspondiente a la tormenta histórica seleccionada en el paso 5, Ecuación 1.

Los pasos 4, 5 y 6 se repiten para $k = 1, 2, \dots, ns$ (número de tormentas sintéticas que se pretendan generar).

Siguiendo los pasos precedentemente señalados, se busca reproducir la distribución espacial de las tormentas históricas de ambos grupos, seleccionadas aleatoriamente, pero escaladas de acuerdo con los valores máximos $PSMÁX_k$, cuya función de distribución pertenece a la de los máximos puntales históricos, de cada grupo.

Adicionalmente se define un índice de extensión espacial de las tormentas históricas IEE_i , de ambos grupos, obtenido como se mencionó anteriormente, como la relación de la precipitación media en la tormenta i entre el valor máximo en dicha tormenta, Ecuación 2, lo cual equivale a obtener las medias de las tormentas normalizadas mediante una transformación que hace que el valor máximo siempre resulte igual a uno.

3.2.2.1. Validación del segundo procedimiento

Para ratificar el desempeño del procedimiento, se hace una comparación en primera instancia, de las funciones de distribución de las medias y de los máximos de las tormentas de ambos grupos, generadas con las funciones de distribución correspondientes a las tormentas históricas. Una vez que se consiguen representar adecuadamente las funciones de distribución de los valores máximos y medios de las tormentas históricas, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos de las lluvias registradas en cada una de las estaciones climatológicas.

Adicionalmente con el fin de estimar la correlación entre los valores de los parámetros correspondientes a las tormentas históricas y los parámetros obtenidos de las tormentas sintéticas, se obtiene el coeficiente de determinación para el segundo procedimiento de la misma manera que se calculó en el primer procedimiento.

4. APLICACIÓN DEL MODELO A LA GENERACIÓN DE TORMENTAS DIARIAS

4.1. Selección de tormentas históricas

4.1.1. Periodo de lluvias empleado y selección general de tormentas

Se emplearon las lluvias diarias medidas en los años 1986, 1991, 2003 y 2006, de las estaciones, El Boqueron, F. Ocotitlán, La Escalera, Portaceli, Villaflores (SMN) y Monterrey, es decir de la estación 1 a la 6 respectivamente. Las tormentas seleccionadas cumplen con las siguientes condiciones.

1. La precipitación en alguna de las 6 estaciones es mayor a una variable llamada *umbral*, o, el promedio aritmético de la precipitación en las 6 estaciones es mayor a una variable llamada *umbral promedio*:
 1. *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm.
 2. *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm.
 3. *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm.

4.1.2. Validación de lluvias

Las lluvias seleccionadas correspondientes a los años empleados fueron validadas con la información de los boletines hidrológicos y de la página electrónica de datos meteorológicos en línea, de las cuencas monitoreadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Así también fueron validadas con las bases de datos meteorológicos, ERIC y CLICOM.

El número de tormentas seleccionadas y validadas para cada uno de los casos es:

1. 30 tormentas con valores mayores a 62.9 mm o mayores a 29.3 mm.
2. 58 tormentas con valores mayores a 53.9 mm o mayores a 25.1 mm.
3. 80 tormentas con valores mayores a 44.9 mm o mayores a 20.9 mm.

4.1.3. Interpolación de lluvias faltantes

No se utiliza ninguna variante de interpolación de datos faltantes para las estaciones de este estudio. El motivo principal es, los años empleados en este estudio no contiene un dato faltante diario. De esta forma no fue necesario completar la información en las estaciones para cada una de las fechas seleccionadas.

4.2. Aplicación del modelo

Se calcula la precipitación máxima y media de las tormentas históricas para cada una de las combinaciones de *umbral* y *umbral promedio*.

Se realiza el análisis estadístico de los datos de precipitación máxima de las tormentas históricas. Al ajustar estos valores a distintas funciones de distribución, se determina que la de menor error estándar de ajuste fue la tipo distribución Gumbel, y se obtuvieron sus parámetros con el método de momentos. La función de distribución obtenida es:

$$F(x) = e^{-e^{-t}}$$

Ecuación 4

Donde

$$t = \alpha(x - \beta)$$

4.2.1. Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm

Se calcula la precipitación máxima y media de las tormentas históricas.

| Fecha | Est1 | Est2 | Est3 | Est4 | Est5 | Est6 | PH media | PH máx |
|------------|------|------|------|------|------|------|----------|--------|
| 29/05/1986 | 58 | 30 | 38.6 | 36.2 | 43 | 51 | 42.800 | 58 |
| 30/05/1986 | 29 | 40 | 59.8 | 67.5 | 67.5 | 34 | 49.633 | 67.5 |
| 06/06/1986 | 0 | 64 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10.667 | 64 |
| 28/08/1986 | 0 | 46 | 9.5 | 86.5 | 12.5 | 3 | 26.250 | 86.5 |
| 27/09/1986 | 4.4 | 0 | 0.5 | 1 | 20.1 | 80 | 17.667 | 80 |
| 08/06/1991 | 36 | 0 | 17.8 | 70 | 4 | 36 | 27.300 | 70 |
| 17/06/1991 | 42 | 5 | 2 | 7.5 | 70 | 42 | 28.083 | 70 |
| 06/06/2003 | 64.5 | 5.7 | 21.2 | 1.4 | 0 | 0 | 15.467 | 64.5 |
| 18/06/2003 | 40 | 26 | 17.4 | 17.3 | 10.5 | 75.5 | 31.117 | 75.5 |
| 25/06/2003 | 21.2 | 38 | 21.8 | 19 | 81 | 74.5 | 42.583 | 81 |
| 28/06/2003 | 0 | 90 | 0 | 0 | 10 | 0 | 16.667 | 90 |
| 05/07/2003 | 0 | 70 | 1.7 | 0.7 | 10 | 16.5 | 16.483 | 70 |
| 06/07/2003 | 48.4 | 90 | 13.9 | 9.4 | 19.5 | 38 | 36.533 | 90 |
| 26/07/2003 | 0 | 80.9 | 0 | 0 | 10.5 | 28.5 | 19.983 | 80.9 |
| 07/08/2003 | 0.2 | 90.3 | 1.5 | 8.5 | 20 | 25 | 24.250 | 90.3 |
| 19/08/2003 | 5 | 90.3 | 0 | 3 | 10 | 34 | 23.717 | 90.3 |
| 29/08/2003 | 11 | 72 | 24.2 | 19 | 10 | 14 | 25.033 | 72 |
| 30/08/2003 | 8.3 | 90.2 | 30.2 | 115 | 40 | 0 | 47.283 | 115 |
| 04/09/2003 | 18.7 | 80.7 | 0 | 0 | 25 | 0 | 20.733 | 80.7 |
| 16/09/2003 | 36.5 | 31 | 9.1 | 24 | 32.8 | 61.5 | 32.483 | 61.5 |
| 05/10/2003 | 61 | 42 | 57.6 | 65 | 0 | 70.5 | 49.350 | 70.5 |

| | | | | | | | | |
|------------|----|------|------|------|------|------|--------|------|
| 06/10/2003 | 54 | 72 | 39.7 | 16 | 41.3 | 18.6 | 40.267 | 72 |
| 13/05/2006 | 0 | 21.8 | 0 | 0 | 0 | 88 | 18.300 | 88 |
| 28/05/2006 | 7 | 75.5 | 46.5 | 4 | 10.5 | 0 | 23.917 | 75.5 |
| 30/05/2006 | 5 | 52.6 | 58.8 | 39.5 | 40.5 | 14.5 | 35.150 | 58.8 |
| 01/06/2006 | 0 | 2.3 | 2 | 87.5 | 20.5 | 0 | 18.717 | 87.5 |
| 07/06/2006 | 47 | 59.8 | 17.3 | 43.4 | 40 | 34 | 40.250 | 59.8 |
| 19/07/2006 | 10 | 11.5 | 0 | 69.3 | 60.5 | 12 | 27.217 | 69.3 |
| 25/08/2006 | 0 | 0 | 16 | 66.5 | 40 | 12 | 22.417 | 66.5 |
| 11/09/2006 | 20 | 74.4 | 11.5 | 41 | 20 | 4 | 28.483 | 74.4 |

El análisis estadístico de los datos de precipitación máxima de las 30 tormentas históricas, con $\alpha = 0.1024$, $\beta = 70.3664$ y sustituyendo los valores en la Ecuación 4 se tiene:

$$F(x) = e^{-e^{-0.1024(x-70.3664)}}$$

Ecuación 5

| Ordenados | Tr | F(x) | Calculados | Escala gumbel |
|-----------|--------|-------|------------|---------------|
| 115 | 31.000 | 0.968 | 103.726 | 3.418 |
| 90.3 | 15.500 | 0.935 | 96.796 | 2.708 |
| 90.3 | 10.333 | 0.903 | 92.670 | 2.285 |
| 90 | 7.750 | 0.871 | 89.688 | 1.979 |
| 90 | 6.200 | 0.839 | 87.330 | 1.738 |
| 88 | 5.167 | 0.806 | 85.365 | 1.537 |
| 87.5 | 4.429 | 0.774 | 83.669 | 1.363 |
| 86.5 | 3.875 | 0.742 | 82.168 | 1.209 |
| 81 | 3.444 | 0.710 | 80.813 | 1.070 |
| 80.9 | 3.100 | 0.677 | 79.571 | 0.943 |
| 80.7 | 2.818 | 0.645 | 78.419 | 0.825 |
| 80 | 2.583 | 0.613 | 77.338 | 0.714 |
| 75.5 | 2.385 | 0.581 | 76.316 | 0.610 |
| 75.5 | 2.214 | 0.548 | 75.340 | 0.510 |
| 74.4 | 2.067 | 0.516 | 74.402 | 0.413 |
| 72 | 1.938 | 0.484 | 73.493 | 0.320 |
| 72 | 1.824 | 0.452 | 72.607 | 0.230 |
| 70.5 | 1.722 | 0.419 | 71.737 | 0.140 |
| 70 | 1.632 | 0.387 | 70.877 | 0.052 |
| 70 | 1.550 | 0.355 | 70.020 | -0.035 |
| 70 | 1.476 | 0.323 | 69.161 | -0.123 |
| 69.3 | 1.409 | 0.290 | 68.292 | -0.212 |
| 67.5 | 1.348 | 0.258 | 67.404 | -0.303 |
| 66.5 | 1.292 | 0.226 | 66.487 | -0.397 |
| 64.5 | 1.240 | 0.194 | 65.524 | -0.496 |
| 64 | 1.192 | 0.161 | 64.497 | -0.601 |

| | | | | |
|------|-------|-------|--------|--------|
| 61.5 | 1.148 | 0.129 | 63.371 | -0.717 |
| 59.8 | 1.107 | 0.097 | 62.087 | -0.848 |
| 58.8 | 1.069 | 0.065 | 60.525 | -1.008 |
| 58 | 1.033 | 0.032 | 58.324 | -1.234 |

En la Figura 8 se muestra la función de distribución obtenida, con la escala Gumbel en el eje horizontal.

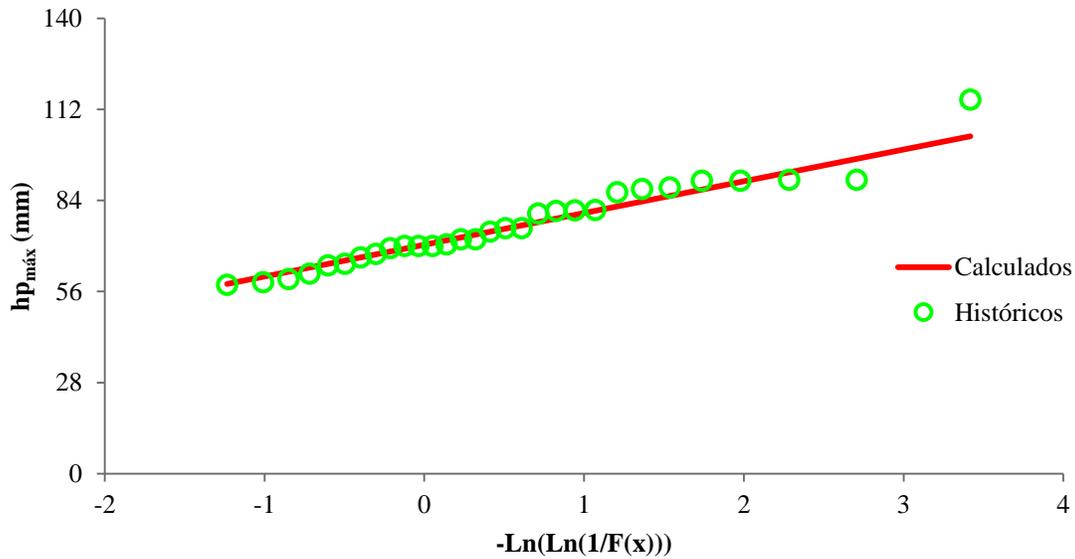


Figura 8. Función de distribución calculada para valores máximos históricos.

Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm

4.2.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

Se calcula la precipitación máxima y media de las tormentas históricas.

| Fecha | Est1 | Est2 | Est3 | Est4 | Est5 | Est6 | PH media | PH máx |
|------------|------|------|------|------|------|------|----------|--------|
| 29/05/1986 | 58 | 30 | 38.6 | 36.2 | 43 | 51 | 42.800 | 58 |
| 30/05/1986 | 29 | 40 | 59.8 | 67.5 | 67.5 | 34 | 49.633 | 67.5 |
| 06/06/1986 | 0 | 64 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10.667 | 64 |
| 01/07/1986 | 24 | 40 | 3.5 | 19 | 42.5 | 30 | 26.500 | 42.5 |
| 06/07/1986 | 26.5 | 36 | 33.3 | 28 | 28 | 20 | 28.633 | 36 |
| 04/08/1986 | 12.8 | 31 | 30.5 | 26.6 | 47.2 | 22 | 28.350 | 47.2 |
| 20/08/1986 | 0 | 15.5 | 0 | 0 | 41.5 | 60 | 19.500 | 60 |
| 28/08/1986 | 0 | 46 | 9.5 | 86.5 | 12.5 | 3 | 26.250 | 86.5 |
| 27/09/1986 | 4.4 | 0 | 0.5 | 1 | 20.1 | 80 | 17.667 | 80 |

| | | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|--------|------|
| 01/10/1986 | 0 | 0 | 10 | 1.8 | 0 | 57 | 11.467 | 57 |
| 04/10/1986 | 8 | 0 | 36 | 57.8 | 0 | 23 | 20.800 | 57.8 |
| 05/05/1991 | 20 | 0 | 0 | 54 | 0 | 20 | 15.667 | 54 |
| 10/05/1991 | 55 | 3 | 0 | 2.4 | 9.6 | 55 | 20.833 | 55 |
| 27/05/1991 | 43 | 55 | 0 | 0 | 5 | 43 | 24.333 | 55 |
| 08/06/1991 | 36 | 0 | 17.8 | 70 | 4 | 36 | 27.300 | 70 |
| 11/06/1991 | 4 | 55 | 27.2 | 33.2 | 0 | 4 | 20.567 | 55 |
| 17/06/1991 | 42 | 5 | 2 | 7.5 | 70 | 42 | 28.083 | 70 |
| 07/07/1991 | 7 | 55 | 0 | 10 | 13 | 7 | 15.333 | 55 |
| 02/09/1991 | 6 | 40 | 55 | 20 | 15.7 | 6 | 23.783 | 55 |
| 17/09/1991 | 20 | 0 | 0 | 57 | 0 | 20 | 16.167 | 57 |
| 04/10/1991 | 6 | 32 | 58 | 30 | 10.9 | 6 | 23.817 | 58 |
| 06/06/2003 | 64.5 | 5.7 | 21.2 | 1.4 | 0 | 0 | 15.467 | 64.5 |
| 08/06/2003 | 48.3 | 11 | 4.7 | 19 | 40 | 29.2 | 25.367 | 48.3 |
| 18/06/2003 | 40 | 26 | 17.4 | 17.3 | 10.5 | 75.5 | 31.117 | 75.5 |
| 25/06/2003 | 21.2 | 38 | 21.8 | 19 | 81 | 74.5 | 42.583 | 81 |
| 26/06/2003 | 1.7 | 60.3 | 1.4 | 1.6 | 31.5 | 5.5 | 17.000 | 60.3 |
| 28/06/2003 | 0 | 90 | 0 | 0 | 10 | 0 | 16.667 | 90 |
| 05/07/2003 | 0 | 70 | 1.7 | 0.7 | 10 | 16.5 | 16.483 | 70 |
| 06/07/2003 | 48.4 | 90 | 13.9 | 9.4 | 19.5 | 38 | 36.533 | 90 |
| 14/07/2003 | 28.1 | 60.3 | 22.3 | 33.5 | 10 | 8.5 | 27.117 | 60.3 |
| 17/07/2003 | 0 | 0 | 12.7 | 62 | 10.5 | 0 | 14.200 | 62 |
| 26/07/2003 | 0 | 80.9 | 0 | 0 | 10.5 | 28.5 | 19.983 | 80.9 |
| 07/08/2003 | 0.2 | 90.3 | 1.5 | 8.5 | 20 | 25 | 24.250 | 90.3 |
| 17/08/2003 | 16.1 | 60.9 | 7.4 | 12 | 15 | 1.5 | 18.817 | 60.9 |
| 19/08/2003 | 5 | 90.3 | 0 | 3 | 10 | 34 | 23.717 | 90.3 |
| 29/08/2003 | 11 | 72 | 24.2 | 19 | 10 | 14 | 25.033 | 72 |
| 30/08/2003 | 8.3 | 90.2 | 30.2 | 115 | 40 | 0 | 47.283 | 115 |
| 01/09/2003 | 0 | 60.2 | 8.1 | 2.3 | 0 | 42 | 18.767 | 60.2 |
| 04/09/2003 | 18.7 | 80.7 | 0 | 0 | 25 | 0 | 20.733 | 80.7 |
| 06/09/2003 | 13.5 | 10.9 | 55.1 | 6.4 | 32.5 | 22.4 | 23.467 | 55.1 |
| 13/09/2003 | 8 | 60.8 | 30.8 | 13 | 10 | 16 | 23.100 | 60.8 |
| 16/09/2003 | 36.5 | 31 | 9.1 | 24 | 32.8 | 61.5 | 32.483 | 61.5 |
| 20/09/2003 | 5.6 | 60.9 | 10 | 3 | 0 | 8 | 14.583 | 60.9 |
| 22/09/2003 | 18.3 | 60.2 | 0 | 36 | 0 | 38 | 25.417 | 60.2 |
| 05/10/2003 | 61 | 42 | 57.6 | 65 | 0 | 70.5 | 49.350 | 70.5 |
| 06/10/2003 | 54 | 72 | 39.7 | 16 | 41.3 | 18.6 | 40.267 | 72 |
| 01/05/2006 | 20 | 8.8 | 6.3 | 21.5 | 0 | 54.5 | 18.517 | 54.5 |
| 13/05/2006 | 0 | 21.8 | 0 | 0 | 0 | 88 | 18.300 | 88 |
| 20/05/2006 | 0 | 56.2 | 0 | 12 | 10.5 | 37 | 19.283 | 56.2 |
| 28/05/2006 | 7 | 75.5 | 46.5 | 4 | 10.5 | 0 | 23.917 | 75.5 |
| 30/05/2006 | 5 | 52.6 | 58.8 | 39.5 | 40.5 | 14.5 | 35.150 | 58.8 |

| | | | | | | | | |
|------------|----|------|------|------|------|----|--------|------|
| 01/06/2006 | 0 | 2.3 | 2 | 87.5 | 20.5 | 0 | 18.717 | 87.5 |
| 07/06/2006 | 47 | 59.8 | 17.3 | 43.4 | 40 | 34 | 40.250 | 59.8 |
| 14/06/2006 | 6 | 49.3 | 0.5 | 14 | 60.5 | 40 | 28.383 | 60.5 |
| 19/07/2006 | 10 | 11.5 | 0 | 69.3 | 60.5 | 12 | 27.217 | 69.3 |
| 25/08/2006 | 0 | 0 | 16 | 66.5 | 40 | 12 | 22.417 | 66.5 |
| 11/09/2006 | 20 | 74.4 | 11.5 | 41 | 20 | 4 | 28.483 | 74.4 |
| 18/09/2006 | 9 | 0 | 1 | 55.5 | 0 | 0 | 10.917 | 55.5 |

El análisis estadístico de los datos de precipitación máxima de las 58 tormentas históricas, con $\alpha = 0.0905$, $\beta = 59.8312$ y sustituyendo los valores en la Ecuación 4 se tiene:

$$F(x) = e^{-e^{-0.0905(x-59.8312)}}$$

Ecuación 6

| Ordenados | Tr | F(x) | Calculados | Escala gumbel |
|-----------|--------|-------|------------|---------------|
| 115 | 59.000 | 0.983 | 104.806 | 4.069 |
| 90.3 | 29.500 | 0.966 | 97.049 | 3.367 |
| 90.3 | 19.667 | 0.949 | 92.470 | 2.953 |
| 90 | 14.750 | 0.932 | 89.192 | 2.656 |
| 90 | 11.800 | 0.915 | 86.625 | 2.424 |
| 88 | 9.833 | 0.898 | 84.508 | 2.233 |
| 87.5 | 8.429 | 0.881 | 82.701 | 2.069 |
| 86.5 | 7.375 | 0.864 | 81.121 | 1.926 |
| 81 | 6.556 | 0.847 | 79.712 | 1.799 |
| 80.9 | 5.900 | 0.831 | 78.439 | 1.684 |
| 80.7 | 5.364 | 0.814 | 77.275 | 1.578 |
| 80 | 4.917 | 0.797 | 76.202 | 1.481 |
| 75.5 | 4.538 | 0.780 | 75.203 | 1.391 |
| 75.5 | 4.214 | 0.763 | 74.267 | 1.306 |
| 74.4 | 3.933 | 0.746 | 73.386 | 1.226 |
| 72 | 3.688 | 0.729 | 72.553 | 1.151 |
| 72 | 3.471 | 0.712 | 71.759 | 1.079 |
| 70.5 | 3.278 | 0.695 | 71.002 | 1.011 |
| 70 | 3.105 | 0.678 | 70.277 | 0.945 |
| 70 | 2.950 | 0.661 | 69.579 | 0.882 |
| 70 | 2.810 | 0.644 | 68.907 | 0.821 |
| 69.3 | 2.682 | 0.627 | 68.256 | 0.762 |
| 67.5 | 2.565 | 0.610 | 67.626 | 0.705 |
| 66.5 | 2.458 | 0.593 | 67.013 | 0.650 |
| 64.5 | 2.360 | 0.576 | 66.415 | 0.596 |
| 64 | 2.269 | 0.559 | 65.832 | 0.543 |
| 62 | 2.185 | 0.542 | 65.262 | 0.491 |
| 61.5 | 2.107 | 0.525 | 64.703 | 0.441 |

| | | | | |
|------|-------|-------|--------|--------|
| 60.9 | 2.034 | 0.508 | 64.154 | 0.391 |
| 60.9 | 1.967 | 0.492 | 63.613 | 0.342 |
| 60.8 | 1.903 | 0.475 | 63.080 | 0.294 |
| 60.5 | 1.844 | 0.458 | 62.553 | 0.246 |
| 60.3 | 1.788 | 0.441 | 62.032 | 0.199 |
| 60.3 | 1.735 | 0.424 | 61.515 | 0.152 |
| 60.2 | 1.686 | 0.407 | 61.002 | 0.106 |
| 60.2 | 1.639 | 0.390 | 60.491 | 0.060 |
| 60 | 1.595 | 0.373 | 59.981 | 0.014 |
| 59.8 | 1.553 | 0.356 | 59.472 | -0.032 |
| 58.8 | 1.513 | 0.339 | 58.962 | -0.079 |
| 58 | 1.475 | 0.322 | 58.450 | -0.125 |
| 58 | 1.439 | 0.305 | 57.935 | -0.172 |
| 57.8 | 1.405 | 0.288 | 57.415 | -0.219 |
| 57 | 1.372 | 0.271 | 56.889 | -0.266 |
| 57 | 1.341 | 0.254 | 56.356 | -0.314 |
| 56.2 | 1.311 | 0.237 | 55.812 | -0.364 |
| 55.5 | 1.283 | 0.220 | 55.257 | -0.414 |
| 55.1 | 1.255 | 0.203 | 54.687 | -0.465 |
| 55 | 1.229 | 0.186 | 54.099 | -0.519 |
| 55 | 1.204 | 0.169 | 53.489 | -0.574 |
| 55 | 1.180 | 0.153 | 52.852 | -0.631 |
| 55 | 1.157 | 0.136 | 52.180 | -0.692 |
| 55 | 1.135 | 0.119 | 51.465 | -0.757 |
| 54.5 | 1.113 | 0.102 | 50.694 | -0.827 |
| 54 | 1.093 | 0.085 | 49.845 | -0.903 |
| 48.3 | 1.073 | 0.068 | 48.889 | -0.990 |
| 47.2 | 1.054 | 0.051 | 47.766 | -1.092 |
| 42.5 | 1.035 | 0.034 | 46.356 | -1.219 |
| 36 | 1.017 | 0.017 | 44.296 | -1.405 |

En la Figura 9 se muestra la función de distribución obtenida, con la escala Gumbel en el eje horizontal.

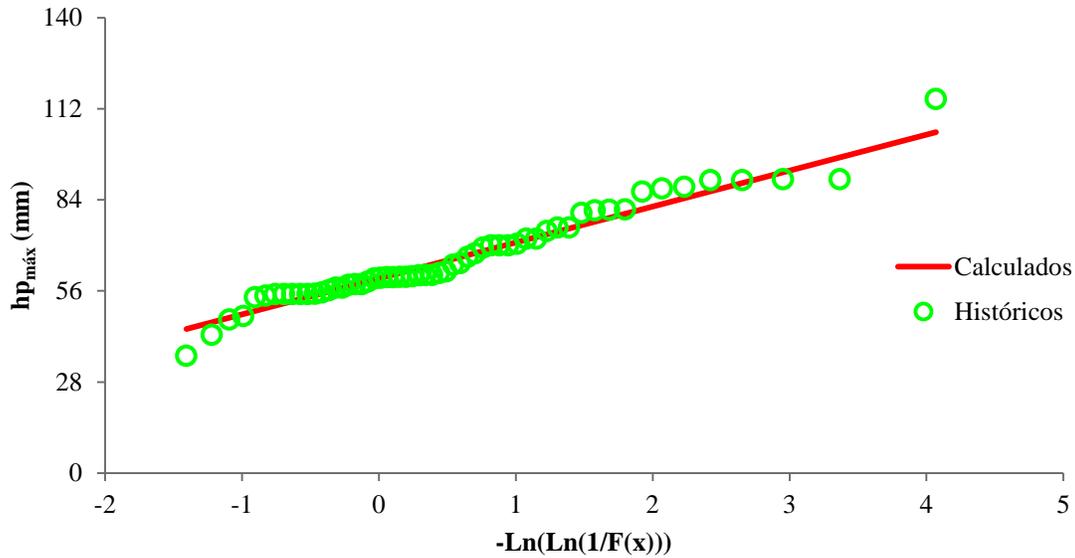


Figura 9. Función de distribución calculada para valores máximos históricos.

Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

4.2.3. Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm

Se calcula la precipitación máxima y media de las tormentas históricas.

| Fecha | Est1 | Est2 | Est3 | Est4 | Est5 | Est6 | PH media | PH máx |
|------------|------|------|------|------|------|------|----------|--------|
| 29/05/1986 | 58 | 30 | 38.6 | 36.2 | 43 | 51 | 42.800 | 58 |
| 30/05/1986 | 29 | 40 | 59.8 | 67.5 | 67.5 | 34 | 49.633 | 67.5 |
| 06/06/1986 | 0 | 64 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10.667 | 64 |
| 26/06/1986 | 3.5 | 34 | 1.5 | 53.5 | 40 | 17 | 24.917 | 53.5 |
| 28/06/1986 | 0 | 38.5 | 0 | 0.1 | 11.1 | 47 | 16.117 | 47 |
| 01/07/1986 | 24 | 40 | 3.5 | 19 | 42.5 | 30 | 26.500 | 42.5 |
| 06/07/1986 | 26.5 | 36 | 33.3 | 28 | 28 | 20 | 28.633 | 36 |
| 04/08/1986 | 12.8 | 31 | 30.5 | 26.6 | 47.2 | 22 | 28.350 | 47.2 |
| 15/08/1986 | 0 | 49.5 | 2.5 | 33 | 1.5 | 17 | 17.250 | 49.5 |
| 16/08/1986 | 6.5 | 39.5 | 2 | 4.7 | 26.5 | 50 | 21.533 | 50 |
| 20/08/1986 | 0 | 15.5 | 0 | 0 | 41.5 | 60 | 19.500 | 60 |
| 21/08/1986 | 4.1 | 49.5 | 8.5 | 7.4 | 26 | 20 | 19.250 | 49.5 |
| 28/08/1986 | 0 | 46 | 9.5 | 86.5 | 12.5 | 3 | 26.250 | 86.5 |
| 24/09/1986 | 0 | 49 | 0 | 0 | 0 | 2 | 8.500 | 49 |
| 27/09/1986 | 4.4 | 0 | 0.5 | 1 | 20.1 | 80 | 17.667 | 80 |
| 28/09/1986 | 19.2 | 0 | 29.7 | 48.1 | 29 | 10 | 22.667 | 48.1 |
| 01/10/1986 | 0 | 0 | 10 | 1.8 | 0 | 57 | 11.467 | 57 |
| 04/10/1986 | 8 | 0 | 36 | 57.8 | 0 | 23 | 20.800 | 57.8 |

| | | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|--------|------|
| 05/05/1991 | 20 | 0 | 0 | 54 | 0 | 20 | 15.667 | 54 |
| 10/05/1991 | 55 | 3 | 0 | 2.4 | 9.6 | 55 | 20.833 | 55 |
| 26/05/1991 | 0 | 10 | 2.5 | 46.5 | 1 | 0 | 10.000 | 46.5 |
| 27/05/1991 | 43 | 55 | 0 | 0 | 5 | 43 | 24.333 | 55 |
| 08/06/1991 | 36 | 0 | 17.8 | 70 | 4 | 36 | 27.300 | 70 |
| 11/06/1991 | 4 | 55 | 27.2 | 33.2 | 0 | 4 | 20.567 | 55 |
| 17/06/1991 | 42 | 5 | 2 | 7.5 | 70 | 42 | 28.083 | 70 |
| 24/06/1991 | 5 | 2 | 44.9 | 29.4 | 25 | 5 | 18.550 | 44.9 |
| 25/06/1991 | 42 | 2 | 28.5 | 18.7 | 14 | 42 | 24.533 | 42 |
| 03/07/1991 | 2 | 10 | 0 | 47 | 0 | 2 | 10.167 | 47 |
| 07/07/1991 | 7 | 55 | 0 | 10 | 13 | 7 | 15.333 | 55 |
| 22/08/1991 | 22 | 40 | 3.2 | 7.8 | 34.2 | 22 | 21.533 | 40 |
| 02/09/1991 | 6 | 40 | 55 | 20 | 15.7 | 6 | 23.783 | 55 |
| 17/09/1991 | 20 | 0 | 0 | 57 | 0 | 20 | 16.167 | 57 |
| 04/10/1991 | 6 | 32 | 58 | 30 | 10.9 | 6 | 23.817 | 58 |
| 16/05/2003 | 23 | 0 | 2.8 | 51 | 0 | 0 | 12.800 | 51 |
| 06/06/2003 | 64.5 | 5.7 | 21.2 | 1.4 | 0 | 0 | 15.467 | 64.5 |
| 08/06/2003 | 48.3 | 11 | 4.7 | 19 | 40 | 29.2 | 25.367 | 48.3 |
| 18/06/2003 | 40 | 26 | 17.4 | 17.3 | 10.5 | 75.5 | 31.117 | 75.5 |
| 19/06/2003 | 6.2 | 24 | 11.7 | 10 | 0 | 46 | 16.317 | 46 |
| 25/06/2003 | 21.2 | 38 | 21.8 | 19 | 81 | 74.5 | 42.583 | 81 |
| 26/06/2003 | 1.7 | 60.3 | 1.4 | 1.6 | 31.5 | 5.5 | 17.000 | 60.3 |
| 28/06/2003 | 0 | 90 | 0 | 0 | 10 | 0 | 16.667 | 90 |
| 05/07/2003 | 0 | 70 | 1.7 | 0.7 | 10 | 16.5 | 16.483 | 70 |
| 06/07/2003 | 48.4 | 90 | 13.9 | 9.4 | 19.5 | 38 | 36.533 | 90 |
| 14/07/2003 | 28.1 | 60.3 | 22.3 | 33.5 | 10 | 8.5 | 27.117 | 60.3 |
| 17/07/2003 | 0 | 0 | 12.7 | 62 | 10.5 | 0 | 14.200 | 62 |
| 25/07/2003 | 3 | 10.8 | 20.7 | 2.2 | 0 | 49.5 | 14.367 | 49.5 |
| 26/07/2003 | 0 | 80.9 | 0 | 0 | 10.5 | 28.5 | 19.983 | 80.9 |
| 07/08/2003 | 0.2 | 90.3 | 1.5 | 8.5 | 20 | 25 | 24.250 | 90.3 |
| 17/08/2003 | 16.1 | 60.9 | 7.4 | 12 | 15 | 1.5 | 18.817 | 60.9 |
| 19/08/2003 | 5 | 90.3 | 0 | 3 | 10 | 34 | 23.717 | 90.3 |
| 24/08/2003 | 4 | 50.8 | 2.4 | 8 | 0 | 0 | 10.867 | 50.8 |
| 29/08/2003 | 11 | 72 | 24.2 | 19 | 10 | 14 | 25.033 | 72 |
| 30/08/2003 | 8.3 | 90.2 | 30.2 | 115 | 40 | 0 | 47.283 | 115 |
| 01/09/2003 | 0 | 60.2 | 8.1 | 2.3 | 0 | 42 | 18.767 | 60.2 |
| 04/09/2003 | 18.7 | 80.7 | 0 | 0 | 25 | 0 | 20.733 | 80.7 |
| 06/09/2003 | 13.5 | 10.9 | 55.1 | 6.4 | 32.5 | 22.4 | 23.467 | 55.1 |
| 13/09/2003 | 8 | 60.8 | 30.8 | 13 | 10 | 16 | 23.100 | 60.8 |
| 14/09/2003 | 46.3 | 32 | 24.9 | 28.5 | 0 | 14 | 24.283 | 46.3 |
| 16/09/2003 | 36.5 | 31 | 9.1 | 24 | 32.8 | 61.5 | 32.483 | 61.5 |
| 20/09/2003 | 5.6 | 60.9 | 10 | 3 | 0 | 8 | 14.583 | 60.9 |
| 22/09/2003 | 18.3 | 60.2 | 0 | 36 | 0 | 38 | 25.417 | 60.2 |

| | | | | | | | | |
|------------|----|------|------|------|------|------|--------|------|
| 05/10/2003 | 61 | 42 | 57.6 | 65 | 0 | 70.5 | 49.350 | 70.5 |
| 06/10/2003 | 54 | 72 | 39.7 | 16 | 41.3 | 18.6 | 40.267 | 72 |
| 01/05/2006 | 20 | 8.8 | 6.3 | 21.5 | 0 | 54.5 | 18.517 | 54.5 |
| 13/05/2006 | 0 | 21.8 | 0 | 0 | 0 | 88 | 18.300 | 88 |
| 20/05/2006 | 0 | 56.2 | 0 | 12 | 10.5 | 37 | 19.283 | 56.2 |
| 24/05/2006 | 32 | 22.8 | 13 | 5 | 40.5 | 20 | 22.217 | 40.5 |
| 28/05/2006 | 7 | 75.5 | 46.5 | 4 | 10.5 | 0 | 23.917 | 75.5 |
| 30/05/2006 | 5 | 52.6 | 58.8 | 39.5 | 40.5 | 14.5 | 35.150 | 58.8 |
| 01/06/2006 | 0 | 2.3 | 2 | 87.5 | 20.5 | 0 | 18.717 | 87.5 |
| 04/06/2006 | 0 | 25.8 | 45.7 | 0 | 0 | 7.5 | 13.167 | 45.7 |
| 07/06/2006 | 47 | 59.8 | 17.3 | 43.4 | 40 | 34 | 40.250 | 59.8 |
| 14/06/2006 | 6 | 49.3 | 0.5 | 14 | 60.5 | 40 | 28.383 | 60.5 |
| 19/07/2006 | 10 | 11.5 | 0 | 69.3 | 60.5 | 12 | 27.217 | 69.3 |
| 25/08/2006 | 0 | 0 | 16 | 66.5 | 40 | 12 | 22.417 | 66.5 |
| 02/09/2006 | 19 | 17.4 | 42 | 26 | 20 | 20 | 24.067 | 42 |
| 03/09/2006 | 10 | 48.8 | 14 | 12 | 20 | 9.5 | 19.050 | 48.8 |
| 11/09/2006 | 20 | 74.4 | 11.5 | 41 | 20 | 4 | 28.483 | 74.4 |
| 15/09/2006 | 0 | 5.7 | 49 | 0 | 0 | 0 | 9.117 | 49 |
| 18/09/2006 | 9 | 0 | 1 | 55.5 | 0 | 0 | 10.917 | 55.5 |

El análisis estadístico de los datos de precipitación máxima de las 80 tormentas históricas, con $\alpha = 0.0861$, $\beta = 54.2566$ y sustituyendo los valores en la Ecuación 4 se tiene:

$$F(x) = e^{-e^{-0.0861(x-54.2566)}}$$

Ecuación 7

| Ordenados | Tr | F(x) | Calculados | Escala gumbel |
|-----------|--------|-------|------------|---------------|
| 115 | 81.000 | 0.988 | 105.225 | 4.388 |
| 90.3 | 40.500 | 0.975 | 97.101 | 3.689 |
| 90.3 | 27.000 | 0.963 | 92.318 | 3.277 |
| 90 | 20.250 | 0.951 | 88.902 | 2.983 |
| 90 | 16.200 | 0.938 | 86.236 | 2.753 |
| 88 | 13.500 | 0.926 | 84.042 | 2.564 |
| 87.5 | 11.571 | 0.914 | 82.175 | 2.404 |
| 86.5 | 10.125 | 0.901 | 80.546 | 2.263 |
| 81 | 9.000 | 0.889 | 79.099 | 2.139 |
| 80.9 | 8.100 | 0.877 | 77.796 | 2.027 |
| 80.7 | 7.364 | 0.864 | 76.609 | 1.924 |
| 80 | 6.750 | 0.852 | 75.517 | 1.830 |
| 75.5 | 6.231 | 0.840 | 74.505 | 1.743 |
| 75.5 | 5.786 | 0.827 | 73.560 | 1.662 |

| | | | | |
|------|-------|-------|--------|--------|
| 74.4 | 5.400 | 0.815 | 72.675 | 1.586 |
| 72 | 5.063 | 0.802 | 71.839 | 1.514 |
| 72 | 4.765 | 0.790 | 71.049 | 1.446 |
| 70.5 | 4.500 | 0.778 | 70.297 | 1.381 |
| 70 | 4.263 | 0.765 | 69.580 | 1.319 |
| 70 | 4.050 | 0.753 | 68.894 | 1.260 |
| 70 | 3.857 | 0.741 | 68.236 | 1.204 |
| 69.3 | 3.682 | 0.728 | 67.603 | 1.149 |
| 67.5 | 3.522 | 0.716 | 66.993 | 1.097 |
| 66.5 | 3.375 | 0.704 | 66.404 | 1.046 |
| 64.5 | 3.240 | 0.691 | 65.833 | 0.997 |
| 64 | 3.115 | 0.679 | 65.279 | 0.949 |
| 62 | 3.000 | 0.667 | 64.741 | 0.903 |
| 61.5 | 2.893 | 0.654 | 64.218 | 0.858 |
| 60.9 | 2.793 | 0.642 | 63.708 | 0.814 |
| 60.9 | 2.700 | 0.630 | 63.210 | 0.771 |
| 60.8 | 2.613 | 0.617 | 62.723 | 0.729 |
| 60.5 | 2.531 | 0.605 | 62.246 | 0.688 |
| 60.3 | 2.455 | 0.593 | 61.779 | 0.648 |
| 60.3 | 2.382 | 0.580 | 61.321 | 0.608 |
| 60.2 | 2.314 | 0.568 | 60.871 | 0.570 |
| 60.2 | 2.250 | 0.556 | 60.429 | 0.531 |
| 60 | 2.189 | 0.543 | 59.993 | 0.494 |
| 59.8 | 2.132 | 0.531 | 59.563 | 0.457 |
| 58.8 | 2.077 | 0.519 | 59.140 | 0.420 |
| 58 | 2.025 | 0.506 | 58.721 | 0.384 |
| 58 | 1.976 | 0.494 | 58.307 | 0.349 |
| 57.8 | 1.929 | 0.481 | 57.898 | 0.313 |
| 57 | 1.884 | 0.469 | 57.492 | 0.279 |
| 57 | 1.841 | 0.457 | 57.090 | 0.244 |
| 56.2 | 1.800 | 0.444 | 56.691 | 0.210 |
| 55.5 | 1.761 | 0.432 | 56.294 | 0.175 |
| 55.1 | 1.723 | 0.420 | 55.900 | 0.141 |
| 55 | 1.688 | 0.407 | 55.507 | 0.108 |
| 55 | 1.653 | 0.395 | 55.116 | 0.074 |
| 55 | 1.620 | 0.383 | 54.725 | 0.040 |
| 55 | 1.588 | 0.370 | 54.335 | 0.007 |
| 55 | 1.558 | 0.358 | 53.945 | -0.027 |
| 54.5 | 1.528 | 0.346 | 53.555 | -0.060 |
| 54 | 1.500 | 0.333 | 53.164 | -0.094 |
| 53.5 | 1.473 | 0.321 | 52.772 | -0.128 |
| 51 | 1.446 | 0.309 | 52.378 | -0.162 |
| 50.8 | 1.421 | 0.296 | 51.981 | -0.196 |

| | | | | |
|------|-------|-------|--------|--------|
| 50 | 1.397 | 0.284 | 51.582 | -0.230 |
| 49.5 | 1.373 | 0.272 | 51.179 | -0.265 |
| 49.5 | 1.350 | 0.259 | 50.772 | -0.300 |
| 49.5 | 1.328 | 0.247 | 50.359 | -0.336 |
| 49 | 1.306 | 0.235 | 49.941 | -0.372 |
| 49 | 1.286 | 0.222 | 49.516 | -0.408 |
| 48.8 | 1.266 | 0.210 | 49.083 | -0.445 |
| 48.3 | 1.246 | 0.198 | 48.640 | -0.484 |
| 48.1 | 1.227 | 0.185 | 48.187 | -0.523 |
| 47.2 | 1.209 | 0.173 | 47.721 | -0.563 |
| 47 | 1.191 | 0.160 | 47.241 | -0.604 |
| 47 | 1.174 | 0.148 | 46.744 | -0.647 |
| 46.5 | 1.157 | 0.136 | 46.226 | -0.691 |
| 46.3 | 1.141 | 0.123 | 45.684 | -0.738 |
| 46 | 1.125 | 0.111 | 45.114 | -0.787 |
| 45.7 | 1.110 | 0.099 | 44.507 | -0.839 |
| 44.9 | 1.095 | 0.086 | 43.856 | -0.895 |
| 42.5 | 1.080 | 0.074 | 43.147 | -0.957 |
| 42 | 1.066 | 0.062 | 42.360 | -1.024 |
| 42 | 1.052 | 0.049 | 41.465 | -1.101 |
| 40.5 | 1.038 | 0.037 | 40.404 | -1.193 |
| 40 | 1.025 | 0.025 | 39.057 | -1.309 |
| 36 | 1.013 | 0.012 | 37.063 | -1.480 |

En la Figura 10 se muestra la función de distribución obtenida, con la escala Gumbel en el eje horizontal.

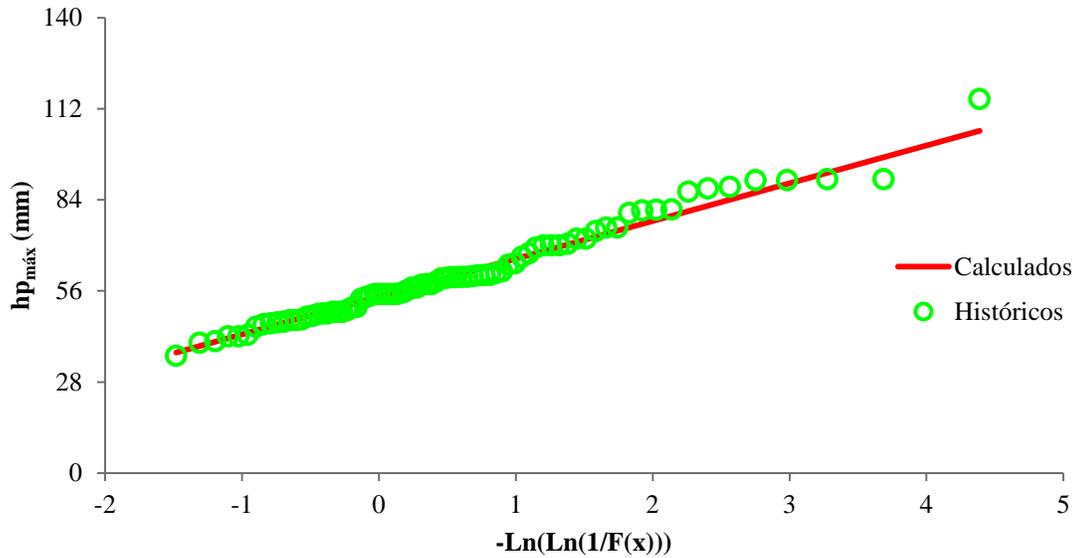


Figura 10. Función de distribución calculada para valores máximos históricos.

Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm

4.3. Primer procedimiento de generación de tormentas sintéticas

4.3.1. Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm

Se generaron 100 números aleatorios con la función de distribución dada por la Ecuación 5 y otros 100 números para seleccionar aleatoriamente (con remplazo) alguna de las 30 tormentas históricas.

| U_k | $F(p_m)$ | Tormenta histórica seleccionada |
|-------|----------|---------------------------------|
| 0.564 | 75.819 | 11 |
| 0.386 | 70.845 | 20 |
| 0.595 | 76.780 | 9 |
| 0.685 | 79.853 | 6 |
| 0.553 | 75.470 | 24 |
| 0.300 | 68.567 | 19 |
| 0.561 | 75.712 | 18 |
| 0.232 | 66.675 | 30 |
| 0.151 | 64.147 | 26 |
| 0.215 | 66.170 | 19 |
| 0.792 | 84.566 | 14 |

| | | |
|-------|---------|----|
| 0.514 | 74.343 | 5 |
| 0.749 | 82.485 | 29 |
| 0.130 | 63.390 | 19 |
| 0.023 | 57.377 | 11 |
| 0.061 | 60.351 | 29 |
| 0.347 | 69.818 | 2 |
| 0.044 | 59.256 | 18 |
| 0.254 | 67.282 | 7 |
| 0.343 | 69.710 | 5 |
| 0.211 | 66.050 | 22 |
| 0.959 | 101.256 | 18 |
| 0.219 | 66.289 | 16 |
| 0.625 | 77.734 | 10 |
| 0.809 | 85.516 | 25 |
| 0.873 | 89.870 | 18 |
| 0.450 | 72.562 | 13 |
| 0.172 | 64.856 | 4 |
| 0.407 | 71.413 | 27 |
| 0.788 | 84.354 | 17 |
| 0.681 | 79.701 | 9 |
| 0.454 | 72.672 | 10 |
| 0.005 | 54.240 | 30 |
| 0.702 | 80.519 | 17 |
| 0.646 | 78.458 | 18 |
| 0.001 | 51.959 | 3 |
| 0.604 | 77.037 | 3 |
| 0.617 | 77.467 | 16 |
| 0.877 | 90.208 | 15 |
| 0.283 | 68.096 | 9 |
| 0.467 | 73.035 | 23 |
| 0.531 | 74.842 | 16 |
| 0.108 | 62.565 | 11 |
| 0.830 | 86.797 | 2 |
| 0.065 | 60.577 | 26 |
| 0.446 | 72.453 | 16 |
| 0.339 | 69.603 | 8 |
| 0.112 | 62.727 | 8 |
| 0.664 | 79.068 | 29 |
| 0.360 | 70.170 | 15 |
| 0.304 | 68.676 | 16 |
| 0.660 | 78.924 | 2 |
| 0.262 | 67.508 | 1 |

| | | |
|-------|---------|----|
| 0.275 | 67.875 | 15 |
| 0.535 | 74.959 | 13 |
| 0.941 | 97.753 | 7 |
| 0.126 | 63.239 | 22 |
| 0.190 | 65.402 | 15 |
| 0.766 | 83.290 | 10 |
| 0.489 | 73.626 | 1 |
| 0.724 | 81.384 | 24 |
| 0.104 | 62.399 | 14 |
| 0.997 | 128.182 | 6 |
| 0.770 | 83.485 | 7 |
| 0.322 | 69.141 | 27 |
| 0.019 | 56.884 | 14 |
| 0.963 | 102.281 | 15 |
| 0.318 | 69.032 | 30 |
| 0.920 | 94.612 | 30 |
| 0.668 | 79.214 | 26 |
| 0.194 | 65.527 | 11 |
| 0.600 | 76.908 | 6 |
| 0.518 | 74.459 | 2 |
| 0.582 | 76.364 | 25 |
| 0.425 | 71.877 | 8 |
| 0.147 | 64.008 | 29 |
| 0.382 | 70.737 | 23 |
| 0.497 | 73.853 | 25 |
| 0.390 | 70.952 | 17 |
| 0.429 | 71.985 | 5 |
| 0.980 | 108.458 | 26 |
| 0.411 | 71.521 | 24 |
| 0.621 | 77.600 | 13 |
| 0.976 | 106.639 | 29 |
| 0.578 | 76.239 | 28 |
| 0.326 | 69.249 | 24 |
| 0.852 | 88.232 | 10 |
| 0.258 | 67.395 | 4 |
| 0.176 | 64.985 | 1 |
| 0.240 | 66.906 | 24 |
| 0.083 | 61.455 | 7 |
| 0.539 | 75.078 | 10 |
| 0.040 | 58.959 | 21 |
| 0.155 | 64.285 | 23 |
| 0.048 | 59.534 | 15 |

| | | |
|-------|--------|----|
| 0.087 | 61.644 | 4 |
| 0.638 | 78.180 | 24 |
| 0.070 | 60.794 | 23 |
| 0.279 | 67.986 | 12 |
| 0.369 | 70.385 | 9 |

Se identificaron los máximos de dichas tormentas para escalarlas de acuerdo con la Ecuación 1.

| Fecha | Est1 | Est2 | Est3 | Est4 | Est5 | Est6 |
|------------|------|------|------|-------|------|------|
| 28/06/2003 | 0.0 | 75.8 | 0.0 | 0.0 | 8.4 | 0.0 |
| 16/09/2003 | 42.0 | 35.7 | 10.5 | 27.6 | 37.8 | 70.8 |
| 18/06/2003 | 40.7 | 26.4 | 17.7 | 17.6 | 10.7 | 76.8 |
| 08/06/1991 | 41.1 | 0.0 | 20.3 | 79.9 | 4.6 | 41.1 |
| 28/05/2006 | 7.0 | 75.5 | 46.5 | 4.0 | 10.5 | 0.0 |
| 04/09/2003 | 15.9 | 68.6 | 0.0 | 0.0 | 21.2 | 0.0 |
| 30/08/2003 | 5.5 | 59.4 | 19.9 | 75.7 | 26.3 | 0.0 |
| 11/09/2006 | 17.9 | 66.7 | 10.3 | 36.7 | 17.9 | 3.6 |
| 01/06/2006 | 0.0 | 1.7 | 1.5 | 64.1 | 15.0 | 0.0 |
| 04/09/2003 | 15.3 | 66.2 | 0.0 | 0.0 | 20.5 | 0.0 |
| 26/07/2003 | 0.0 | 84.6 | 0.0 | 0.0 | 11.0 | 29.8 |
| 27/09/1986 | 4.1 | 0.0 | 0.5 | 0.9 | 18.7 | 74.3 |
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 19.8 | 82.5 | 49.6 | 14.9 |
| 04/09/2003 | 14.7 | 63.4 | 0.0 | 0.0 | 19.6 | 0.0 |
| 28/06/2003 | 0.0 | 57.4 | 0.0 | 0.0 | 6.4 | 0.0 |
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 14.5 | 60.4 | 36.3 | 10.9 |
| 30/05/1986 | 30.0 | 41.4 | 61.9 | 69.8 | 69.8 | 35.2 |
| 30/08/2003 | 4.3 | 46.5 | 15.6 | 59.3 | 20.6 | 0.0 |
| 17/06/1991 | 40.4 | 4.8 | 1.9 | 7.2 | 67.3 | 40.4 |
| 27/09/1986 | 3.8 | 0.0 | 0.4 | 0.9 | 17.5 | 69.7 |
| 06/10/2003 | 49.5 | 66.1 | 36.4 | 14.7 | 37.9 | 17.1 |
| 30/08/2003 | 7.3 | 79.4 | 26.6 | 101.3 | 35.2 | 0.0 |
| 19/08/2003 | 3.7 | 66.3 | 0.0 | 2.2 | 7.3 | 25.0 |
| 25/06/2003 | 20.3 | 36.5 | 20.9 | 18.2 | 77.7 | 71.5 |
| 30/05/2006 | 7.3 | 76.5 | 85.5 | 57.4 | 58.9 | 21.1 |
| 30/08/2003 | 6.5 | 70.5 | 23.6 | 89.9 | 31.3 | 0.0 |
| 06/07/2003 | 39.0 | 72.6 | 11.2 | 7.6 | 15.7 | 30.6 |
| 28/08/1986 | 0.0 | 34.5 | 7.1 | 64.9 | 9.4 | 2.2 |
| 07/06/2006 | 56.1 | 71.4 | 20.7 | 51.8 | 47.8 | 40.6 |
| 29/08/2003 | 12.9 | 84.4 | 28.4 | 22.3 | 11.7 | 16.4 |
| 18/06/2003 | 42.2 | 27.4 | 18.4 | 18.3 | 11.1 | 79.7 |
| 25/06/2003 | 19.0 | 34.1 | 19.6 | 17.0 | 72.7 | 66.8 |

| | | | | | | |
|------------|------|-------|------|-------|------|------|
| 11/09/2006 | 14.6 | 54.2 | 8.4 | 29.9 | 14.6 | 2.9 |
| 29/08/2003 | 12.3 | 80.5 | 27.1 | 21.2 | 11.2 | 15.7 |
| 30/08/2003 | 5.7 | 61.5 | 20.6 | 78.5 | 27.3 | 0.0 |
| 06/06/1986 | 0.0 | 52.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 06/06/1986 | 0.0 | 77.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 19/08/2003 | 4.3 | 77.5 | 0.0 | 2.6 | 8.6 | 29.2 |
| 07/08/2003 | 0.2 | 90.2 | 1.5 | 8.5 | 20.0 | 25.0 |
| 18/06/2003 | 36.1 | 23.5 | 15.7 | 15.6 | 9.5 | 68.1 |
| 13/05/2006 | 0.0 | 18.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 73.0 |
| 19/08/2003 | 4.1 | 74.8 | 0.0 | 2.5 | 8.3 | 28.2 |
| 28/06/2003 | 0.0 | 62.6 | 0.0 | 0.0 | 7.0 | 0.0 |
| 30/05/1986 | 37.3 | 51.4 | 76.9 | 86.8 | 86.8 | 43.7 |
| 01/06/2006 | 0.0 | 1.6 | 1.4 | 60.6 | 14.2 | 0.0 |
| 19/08/2003 | 4.0 | 72.5 | 0.0 | 2.4 | 8.0 | 27.3 |
| 06/06/2003 | 69.6 | 6.2 | 22.9 | 1.5 | 0.0 | 0.0 |
| 06/06/2003 | 62.7 | 5.5 | 20.6 | 1.4 | 0.0 | 0.0 |
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 19.0 | 79.1 | 47.6 | 14.3 |
| 07/08/2003 | 0.2 | 70.2 | 1.2 | 6.6 | 15.5 | 19.4 |
| 19/08/2003 | 3.8 | 68.7 | 0.0 | 2.3 | 7.6 | 25.9 |
| 30/05/1986 | 33.9 | 46.8 | 69.9 | 78.9 | 78.9 | 39.8 |
| 29/05/1986 | 67.5 | 34.9 | 44.9 | 42.1 | 50.0 | 59.4 |
| 07/08/2003 | 0.2 | 67.9 | 1.1 | 6.4 | 15.0 | 18.8 |
| 06/07/2003 | 40.3 | 75.0 | 11.6 | 7.8 | 16.2 | 31.6 |
| 17/06/1991 | 58.7 | 7.0 | 2.8 | 10.5 | 97.8 | 58.7 |
| 06/10/2003 | 47.4 | 63.2 | 34.9 | 14.1 | 36.3 | 16.3 |
| 07/08/2003 | 0.1 | 65.4 | 1.1 | 6.2 | 14.5 | 18.1 |
| 25/06/2003 | 21.8 | 39.1 | 22.4 | 19.5 | 83.3 | 76.6 |
| 29/05/1986 | 73.6 | 38.1 | 49.0 | 46.0 | 54.6 | 64.7 |
| 28/05/2006 | 7.5 | 81.4 | 50.1 | 4.3 | 11.3 | 0.0 |
| 26/07/2003 | 0.0 | 62.4 | 0.0 | 0.0 | 8.1 | 22.0 |
| 08/06/1991 | 65.9 | 0.0 | 32.6 | 128.2 | 7.3 | 65.9 |
| 17/06/1991 | 50.1 | 6.0 | 2.4 | 8.9 | 83.5 | 50.1 |
| 07/06/2006 | 54.3 | 69.1 | 20.0 | 50.2 | 46.2 | 39.3 |
| 26/07/2003 | 0.0 | 56.9 | 0.0 | 0.0 | 7.4 | 20.0 |
| 07/08/2003 | 0.2 | 102.3 | 1.7 | 9.6 | 22.7 | 28.3 |
| 11/09/2006 | 18.6 | 69.0 | 10.7 | 38.0 | 18.6 | 3.7 |
| 11/09/2006 | 25.4 | 94.6 | 14.6 | 52.1 | 25.4 | 5.1 |
| 01/06/2006 | 0.0 | 2.1 | 1.8 | 79.2 | 18.6 | 0.0 |
| 28/06/2003 | 0.0 | 65.5 | 0.0 | 0.0 | 7.3 | 0.0 |
| 08/06/1991 | 39.6 | 0.0 | 19.6 | 76.9 | 4.4 | 39.6 |
| 30/05/1986 | 32.0 | 44.1 | 66.0 | 74.5 | 74.5 | 37.5 |
| 30/05/2006 | 6.5 | 68.3 | 76.4 | 51.3 | 52.6 | 18.8 |
| 06/06/2003 | 71.9 | 6.4 | 23.6 | 1.6 | 0.0 | 0.0 |

| | | | | | | |
|------------|------|------|------|-------|------|------|
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 15.4 | 64.0 | 38.5 | 11.6 |
| 13/05/2006 | 0.0 | 17.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 70.7 |
| 30/05/2006 | 6.3 | 66.1 | 73.9 | 49.6 | 50.9 | 18.2 |
| 29/08/2003 | 10.8 | 71.0 | 23.8 | 18.7 | 9.9 | 13.8 |
| 27/09/1986 | 4.0 | 0.0 | 0.4 | 0.9 | 18.1 | 72.0 |
| 01/06/2006 | 0.0 | 2.9 | 2.5 | 108.5 | 25.4 | 0.0 |
| 28/05/2006 | 6.6 | 71.5 | 44.0 | 3.8 | 9.9 | 0.0 |
| 06/07/2003 | 41.7 | 77.6 | 12.0 | 8.1 | 16.8 | 32.8 |
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 25.7 | 106.6 | 64.1 | 19.2 |
| 19/07/2006 | 11.0 | 12.7 | 0.0 | 76.2 | 66.6 | 13.2 |
| 28/05/2006 | 6.4 | 69.2 | 42.7 | 3.7 | 9.6 | 0.0 |
| 25/06/2003 | 23.1 | 41.4 | 23.7 | 20.7 | 88.2 | 81.2 |
| 28/08/1986 | 0.0 | 35.8 | 7.4 | 67.4 | 9.7 | 2.3 |
| 29/05/1986 | 65.0 | 33.6 | 43.2 | 40.6 | 48.2 | 57.1 |
| 28/05/2006 | 6.2 | 66.9 | 41.2 | 3.5 | 9.3 | 0.0 |
| 17/06/1991 | 36.9 | 4.4 | 1.8 | 6.6 | 61.5 | 36.9 |
| 25/06/2003 | 19.6 | 35.2 | 20.2 | 17.6 | 75.1 | 69.1 |
| 05/10/2003 | 51.0 | 35.1 | 48.2 | 54.4 | 0.0 | 59.0 |
| 13/05/2006 | 0.0 | 15.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 64.3 |
| 07/08/2003 | 0.1 | 59.5 | 1.0 | 5.6 | 13.2 | 16.5 |
| 28/08/1986 | 0.0 | 32.8 | 6.8 | 61.6 | 8.9 | 2.1 |
| 28/05/2006 | 7.2 | 78.2 | 48.2 | 4.1 | 10.9 | 0.0 |
| 13/05/2006 | 0.0 | 15.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 60.8 |
| 05/07/2003 | 0.0 | 68.0 | 1.7 | 0.7 | 9.7 | 16.0 |
| 18/06/2003 | 37.3 | 24.2 | 16.2 | 16.1 | 9.8 | 70.4 |

En la Figura 11 se presenta un ejemplo del escalamiento de una tormenta generada, para la cual el máximo sintético obtenido fue de 70.8 mm y la fecha de la tormenta histórica seleccionada 16/09/2003 en este caso la número 20 cuyo máximo registrado fue de 61.5 mm.

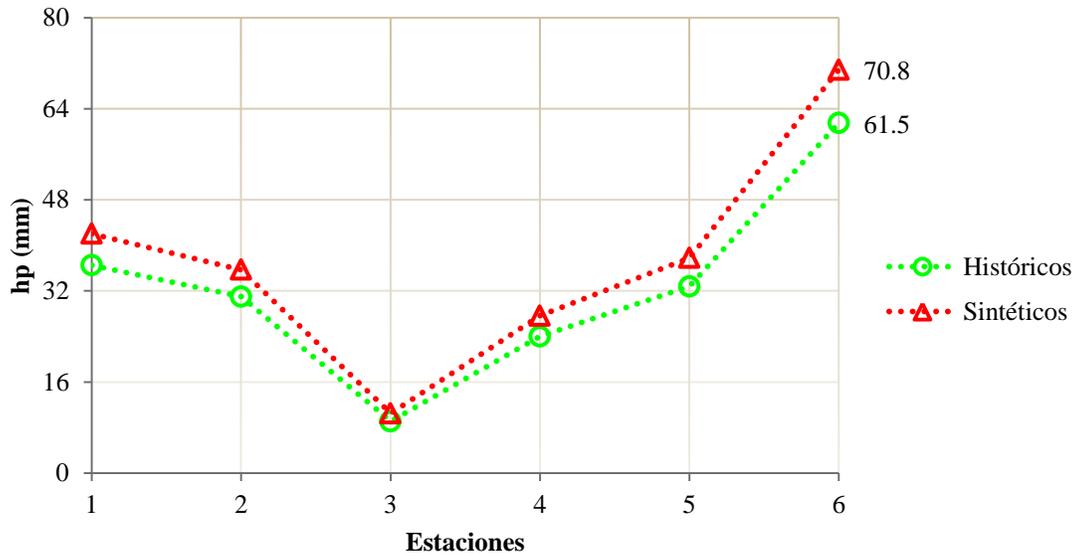


Figura 11. Ejemplo de escalamiento de una tormenta.

Primer procedimiento de generación, *umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm*

4.3.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

Se generaron 100 números aleatorios con la función de distribución dada por la Ecuación 6 y otros 100 números para seleccionar aleatoriamente (con remplazo) alguna de las 58 tormentas históricas.

| U_k | $F(p_m)$ | Tormenta histórica seleccionada |
|-------|----------|---------------------------------|
| 0.123 | 51.656 | 56 |
| 0.820 | 77.701 | 30 |
| 0.030 | 45.911 | 9 |
| 0.119 | 51.481 | 4 |
| 0.987 | 107.571 | 37 |
| 0.734 | 72.826 | 29 |
| 0.995 | 118.075 | 26 |
| 0.666 | 69.795 | 49 |
| 0.585 | 66.719 | 43 |
| 0.649 | 69.101 | 29 |
| 0.226 | 55.438 | 19 |
| 0.948 | 92.237 | 2 |
| 0.183 | 53.980 | 48 |
| 0.564 | 65.977 | 28 |
| 0.457 | 62.526 | 12 |
| 0.495 | 63.737 | 48 |

| | | |
|-------|--------|----|
| 0.781 | 75.293 | 53 |
| 0.478 | 63.191 | 27 |
| 0.688 | 70.690 | 6 |
| 0.777 | 75.063 | 1 |
| 0.645 | 68.942 | 34 |
| 0.393 | 60.576 | 26 |
| 0.653 | 69.261 | 23 |
| 0.059 | 48.329 | 12 |
| 0.243 | 56.001 | 40 |
| 0.307 | 58.000 | 26 |
| 0.884 | 82.968 | 16 |
| 0.606 | 67.484 | 57 |
| 0.841 | 79.234 | 45 |
| 0.222 | 55.304 | 25 |
| 0.115 | 51.303 | 9 |
| 0.888 | 83.385 | 10 |
| 0.439 | 61.994 | 50 |
| 0.136 | 52.210 | 24 |
| 0.080 | 49.608 | 26 |
| 0.435 | 61.871 | 56 |
| 0.038 | 46.699 | 55 |
| 0.051 | 47.767 | 23 |
| 0.311 | 58.123 | 20 |
| 0.717 | 72.003 | 9 |
| 0.901 | 84.860 | 37 |
| 0.965 | 96.823 | 23 |
| 0.542 | 65.256 | 13 |
| 0.264 | 56.680 | 54 |
| 0.499 | 63.866 | 42 |
| 0.880 | 82.564 | 22 |
| 0.773 | 74.836 | 7 |
| 0.546 | 65.391 | 7 |
| 0.098 | 50.498 | 47 |
| 0.795 | 76.074 | 21 |
| 0.739 | 73.025 | 23 |
| 0.094 | 50.299 | 53 |
| 0.696 | 71.041 | 52 |
| 0.709 | 71.632 | 20 |
| 0.969 | 98.221 | 17 |
| 0.375 | 60.056 | 6 |
| 0.560 | 65.839 | 34 |
| 0.624 | 68.124 | 20 |
| 0.200 | 54.585 | 10 |

| | | |
|-------|--------|----|
| 0.923 | 87.684 | 51 |
| 0.158 | 53.048 | 39 |
| 0.538 | 65.122 | 19 |
| 0.431 | 61.747 | 4 |
| 0.204 | 54.723 | 4 |
| 0.756 | 73.904 | 44 |
| 0.453 | 62.402 | 18 |
| 0.397 | 60.698 | 21 |
| 0.752 | 73.694 | 50 |
| 0.354 | 59.414 | 49 |
| 0.102 | 50.693 | 41 |
| 0.628 | 68.277 | 14 |
| 0.034 | 46.322 | 3 |
| 0.952 | 93.157 | 54 |
| 0.016 | 44.179 | 40 |
| 0.859 | 80.621 | 7 |
| 0.581 | 66.577 | 48 |
| 0.816 | 77.429 | 36 |
| 0.931 | 88.954 | 40 |
| 0.824 | 77.978 | 24 |
| 0.863 | 80.967 | 1 |
| 0.414 | 61.221 | 41 |
| 0.845 | 79.545 | 39 |
| 0.055 | 48.055 | 18 |
| 0.410 | 61.099 | 47 |
| 0.012 | 43.436 | 46 |
| 0.760 | 74.117 | 38 |
| 0.286 | 57.345 | 11 |
| 0.692 | 70.864 | 58 |
| 0.610 | 67.632 | 51 |
| 0.674 | 70.129 | 37 |
| 0.517 | 64.422 | 4 |
| 0.974 | 99.814 | 11 |
| 0.474 | 63.064 | 33 |
| 0.589 | 66.862 | 37 |
| 0.482 | 63.318 | 21 |
| 0.521 | 64.553 | 56 |
| 0.072 | 49.152 | 38 |
| 0.504 | 63.995 | 36 |
| 0.713 | 71.816 | 15 |
| 0.803 | 76.572 | 10 |

Se identificaron los máximos de dichas tormentas para escalarlas de acuerdo con la Ecuación 1.

| Fecha | Est1 | Est2 | Est3 | Est4 | Est5 | Est6 |
|------------|------|-------|------|-------|------|------|
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 12.4 | 51.7 | 31.1 | 9.3 |
| 14/07/2003 | 36.2 | 77.7 | 28.7 | 43.2 | 12.9 | 11.0 |
| 27/09/1986 | 2.5 | 0.0 | 0.3 | 0.6 | 11.5 | 45.9 |
| 01/07/1986 | 29.1 | 48.5 | 4.2 | 23.0 | 51.5 | 36.3 |
| 30/08/2003 | 7.8 | 84.4 | 28.2 | 107.6 | 37.4 | 0.0 |
| 06/07/2003 | 39.2 | 72.8 | 11.2 | 7.6 | 15.8 | 30.7 |
| 26/06/2003 | 3.3 | 118.1 | 2.7 | 3.1 | 61.7 | 10.8 |
| 20/05/2006 | 0.0 | 69.8 | 0.0 | 14.9 | 13.0 | 46.0 |
| 20/09/2003 | 6.1 | 66.7 | 11.0 | 3.3 | 0.0 | 8.8 |
| 06/07/2003 | 37.2 | 69.1 | 10.7 | 7.2 | 15.0 | 29.2 |
| 02/09/1991 | 6.0 | 40.3 | 55.4 | 20.2 | 15.8 | 6.0 |
| 30/05/1986 | 39.6 | 54.7 | 81.7 | 92.2 | 92.2 | 46.5 |
| 13/05/2006 | 0.0 | 13.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 54.0 |
| 05/07/2003 | 0.0 | 66.0 | 1.6 | 0.7 | 9.4 | 15.6 |
| 05/05/1991 | 23.2 | 0.0 | 0.0 | 62.5 | 0.0 | 23.2 |
| 13/05/2006 | 0.0 | 15.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 63.7 |
| 07/06/2006 | 59.2 | 75.3 | 21.8 | 54.6 | 50.4 | 42.8 |
| 28/06/2003 | 0.0 | 63.2 | 0.0 | 0.0 | 7.0 | 0.0 |
| 04/08/1986 | 19.2 | 46.4 | 45.7 | 39.8 | 70.7 | 32.9 |
| 29/05/1986 | 75.1 | 38.8 | 50.0 | 46.8 | 55.7 | 66.0 |
| 17/08/2003 | 18.2 | 68.9 | 8.4 | 13.6 | 17.0 | 1.7 |
| 26/06/2003 | 1.7 | 60.6 | 1.4 | 1.6 | 31.6 | 5.5 |
| 08/06/2003 | 69.3 | 15.8 | 6.7 | 27.2 | 57.4 | 41.9 |
| 05/05/1991 | 17.9 | 0.0 | 0.0 | 48.3 | 0.0 | 17.9 |
| 06/09/2003 | 13.7 | 11.1 | 56.0 | 6.5 | 33.0 | 22.8 |
| 26/06/2003 | 1.6 | 58.0 | 1.3 | 1.5 | 30.3 | 5.3 |
| 11/06/1991 | 6.0 | 83.0 | 41.0 | 50.1 | 0.0 | 6.0 |
| 11/09/2006 | 18.1 | 67.5 | 10.4 | 37.2 | 18.1 | 3.6 |
| 05/10/2003 | 68.6 | 47.2 | 64.7 | 73.1 | 0.0 | 79.2 |
| 25/06/2003 | 14.5 | 25.9 | 14.9 | 13.0 | 55.3 | 50.9 |
| 27/09/1986 | 2.8 | 0.0 | 0.3 | 0.6 | 12.9 | 51.3 |
| 01/10/1986 | 0.0 | 0.0 | 14.6 | 2.6 | 0.0 | 83.4 |
| 28/05/2006 | 5.7 | 62.0 | 38.2 | 3.3 | 8.6 | 0.0 |
| 18/06/2003 | 27.7 | 18.0 | 12.0 | 12.0 | 7.3 | 52.2 |
| 26/06/2003 | 1.4 | 49.6 | 1.2 | 1.3 | 25.9 | 4.5 |
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 14.9 | 61.9 | 37.2 | 11.2 |
| 19/07/2006 | 6.7 | 7.7 | 0.0 | 46.7 | 40.8 | 8.1 |
| 08/06/2003 | 47.8 | 10.9 | 4.6 | 18.8 | 39.6 | 28.9 |
| 17/09/1991 | 20.4 | 0.0 | 0.0 | 58.1 | 0.0 | 20.4 |

| | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| 27/09/1986 | 4.0 | 0.0 | 0.5 | 0.9 | 18.1 | 72.0 |
| 30/08/2003 | 6.1 | 66.6 | 22.3 | 84.9 | 29.5 | 0.0 |
| 08/06/2003 | 96.8 | 22.1 | 9.4 | 38.1 | 80.2 | 58.5 |
| 10/05/1991 | 65.3 | 3.6 | 0.0 | 2.8 | 11.4 | 65.3 |
| 14/06/2006 | 5.6 | 46.2 | 0.5 | 13.1 | 56.7 | 37.5 |
| 16/09/2003 | 37.9 | 32.2 | 9.5 | 24.9 | 34.1 | 63.9 |
| 06/06/2003 | 82.6 | 7.3 | 27.1 | 1.8 | 0.0 | 0.0 |
| 20/08/1986 | 0.0 | 19.3 | 0.0 | 0.0 | 51.8 | 74.8 |
| 20/08/1986 | 0.0 | 16.9 | 0.0 | 0.0 | 45.2 | 65.4 |
| 01/05/2006 | 18.5 | 8.2 | 5.8 | 19.9 | 0.0 | 50.5 |
| 04/10/1991 | 7.9 | 42.0 | 76.1 | 39.3 | 14.3 | 7.9 |
| 08/06/2003 | 73.0 | 16.6 | 7.1 | 28.7 | 60.5 | 44.1 |
| 07/06/2006 | 39.5 | 50.3 | 14.6 | 36.5 | 33.6 | 28.6 |
| 01/06/2006 | 0.0 | 1.9 | 1.6 | 71.0 | 16.6 | 0.0 |
| 17/09/1991 | 25.1 | 0.0 | 0.0 | 71.6 | 0.0 | 25.1 |
| 17/06/1991 | 58.9 | 7.0 | 2.8 | 10.5 | 98.2 | 58.9 |
| 04/08/1986 | 16.3 | 39.4 | 38.8 | 33.8 | 60.1 | 28.0 |
| 17/08/2003 | 17.4 | 65.8 | 8.0 | 13.0 | 16.2 | 1.6 |
| 17/09/1991 | 23.9 | 0.0 | 0.0 | 68.1 | 0.0 | 23.9 |
| 01/10/1986 | 0.0 | 0.0 | 9.6 | 1.7 | 0.0 | 54.6 |
| 30/05/2006 | 7.5 | 78.4 | 87.7 | 58.9 | 60.4 | 21.6 |
| 04/09/2003 | 12.3 | 53.0 | 0.0 | 0.0 | 16.4 | 0.0 |
| 02/09/1991 | 7.1 | 47.4 | 65.1 | 23.7 | 18.6 | 7.1 |
| 01/07/1986 | 34.9 | 58.1 | 5.1 | 27.6 | 61.7 | 43.6 |
| 01/07/1986 | 30.9 | 51.5 | 4.5 | 24.5 | 54.7 | 38.6 |
| 22/09/2003 | 22.5 | 73.9 | 0.0 | 44.2 | 0.0 | 46.7 |
| 07/07/1991 | 7.9 | 62.4 | 0.0 | 11.3 | 14.7 | 7.9 |
| 04/10/1991 | 6.3 | 33.5 | 60.7 | 31.4 | 11.4 | 6.3 |
| 28/05/2006 | 6.8 | 73.7 | 45.4 | 3.9 | 10.2 | 0.0 |
| 20/05/2006 | 0.0 | 59.4 | 0.0 | 12.7 | 11.1 | 39.1 |
| 13/09/2003 | 6.7 | 50.7 | 25.7 | 10.8 | 8.3 | 13.3 |
| 27/05/1991 | 53.4 | 68.3 | 0.0 | 0.0 | 6.2 | 53.4 |
| 06/06/1986 | 0.0 | 46.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 14/06/2006 | 9.2 | 75.9 | 0.8 | 21.6 | 93.2 | 61.6 |
| 06/09/2003 | 10.8 | 8.7 | 44.2 | 5.1 | 26.1 | 18.0 |
| 20/08/1986 | 0.0 | 20.8 | 0.0 | 0.0 | 55.8 | 80.6 |
| 13/05/2006 | 0.0 | 16.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 66.6 |
| 29/08/2003 | 11.8 | 77.4 | 26.0 | 20.4 | 10.8 | 15.1 |
| 06/09/2003 | 21.8 | 17.6 | 89.0 | 10.3 | 52.5 | 36.2 |
| 18/06/2003 | 41.3 | 26.9 | 18.0 | 17.9 | 10.8 | 78.0 |
| 29/05/1986 | 81.0 | 41.9 | 53.9 | 50.5 | 60.0 | 71.2 |
| 13/09/2003 | 8.1 | 61.2 | 31.0 | 13.1 | 10.1 | 16.1 |

| | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| 04/09/2003 | 18.4 | 79.5 | 0.0 | 0.0 | 24.6 | 0.0 |
| 07/07/1991 | 6.1 | 48.1 | 0.0 | 8.7 | 11.4 | 6.1 |
| 01/05/2006 | 22.4 | 9.9 | 7.1 | 24.1 | 0.0 | 61.1 |
| 06/10/2003 | 32.6 | 43.4 | 24.0 | 9.7 | 24.9 | 11.2 |
| 01/09/2003 | 0.0 | 74.1 | 10.0 | 2.8 | 0.0 | 51.7 |
| 04/10/1986 | 7.9 | 0.0 | 35.7 | 57.3 | 0.0 | 22.8 |
| 18/09/2006 | 11.5 | 0.0 | 1.3 | 70.9 | 0.0 | 0.0 |
| 30/05/2006 | 5.8 | 60.5 | 67.6 | 45.4 | 46.6 | 16.7 |
| 30/08/2003 | 5.1 | 55.0 | 18.4 | 70.1 | 24.4 | 0.0 |
| 01/07/1986 | 36.4 | 60.6 | 5.3 | 28.8 | 64.4 | 45.5 |
| 04/10/1986 | 13.8 | 0.0 | 62.2 | 99.8 | 0.0 | 39.7 |
| 07/08/2003 | 0.1 | 63.1 | 1.0 | 5.9 | 14.0 | 17.5 |
| 30/08/2003 | 4.8 | 52.4 | 17.6 | 66.9 | 23.3 | 0.0 |
| 04/10/1991 | 6.6 | 34.9 | 63.3 | 32.8 | 11.9 | 6.6 |
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 15.5 | 64.6 | 38.8 | 11.6 |
| 01/09/2003 | 0.0 | 49.2 | 6.6 | 1.9 | 0.0 | 34.3 |
| 29/08/2003 | 9.8 | 64.0 | 21.5 | 16.9 | 8.9 | 12.4 |
| 08/06/1991 | 36.9 | 0.0 | 18.3 | 71.8 | 4.1 | 36.9 |
| 01/10/1986 | 0.0 | 0.0 | 13.4 | 2.4 | 0.0 | 76.6 |

En la Figura 12 se presenta un ejemplo del escalamiento de una tormenta generada, para la cual el máximo sintético obtenido fue de 58.1 mm y la fecha de la tormenta histórica seleccionada 17/09/1991 en este caso la número 20 cuyo máximo registrado fue de 57 mm.

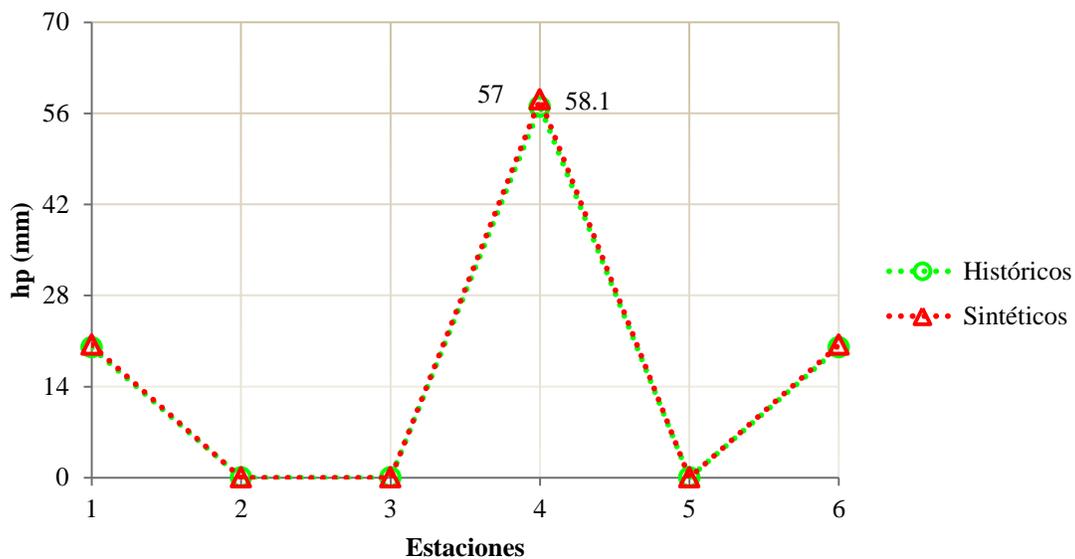


Figura 12. Ejemplo de escalamiento de una tormenta.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

4.3.3. Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm

Se generaron 100 números aleatorios con la función de distribución dada por la Ecuación 7 y otros 100 números para seleccionar aleatoriamente (con remplazo) alguna de las 80 tormentas históricas.

| U_k | $F(p_m)$ | Tormenta histórica seleccionada |
|-------|----------|---------------------------------|
| 0.144 | 46.586 | 38 |
| 0.841 | 74.640 | 3 |
| 0.051 | 41.574 | 53 |
| 0.140 | 46.416 | 46 |
| 0.008 | 35.988 | 13 |
| 0.756 | 69.040 | 2 |
| 0.016 | 37.796 | 77 |
| 0.688 | 65.664 | 29 |
| 0.606 | 62.295 | 20 |
| 0.670 | 64.898 | 1 |
| 0.247 | 50.365 | 67 |
| 0.969 | 94.567 | 44 |
| 0.204 | 48.887 | 27 |
| 0.585 | 61.491 | 80 |
| 0.478 | 57.784 | 58 |
| 0.517 | 59.078 | 27 |
| 0.803 | 71.843 | 34 |
| 0.499 | 58.494 | 79 |
| 0.709 | 66.653 | 49 |
| 0.798 | 71.579 | 42 |
| 0.666 | 64.724 | 9 |
| 0.414 | 55.715 | 78 |
| 0.674 | 65.074 | 73 |
| 0.080 | 43.509 | 57 |
| 0.264 | 50.942 | 16 |
| 0.329 | 53.011 | 77 |
| 0.905 | 81.059 | 63 |
| 0.628 | 63.128 | 40 |
| 0.863 | 76.460 | 23 |
| 0.243 | 50.229 | 76 |
| 0.136 | 46.245 | 54 |
| 0.909 | 81.592 | 55 |
| 0.461 | 57.218 | 30 |
| 0.158 | 47.126 | 75 |
| 0.102 | 44.650 | 78 |
| 0.457 | 57.086 | 38 |

| | | |
|-------|---------|----|
| 0.059 | 42.165 | 37 |
| 0.072 | 43.030 | 73 |
| 0.333 | 53.139 | 68 |
| 0.738 | 68.116 | 53 |
| 0.923 | 83.513 | 12 |
| 0.987 | 104.354 | 72 |
| 0.563 | 60.712 | 59 |
| 0.286 | 51.641 | 36 |
| 0.521 | 59.216 | 19 |
| 0.901 | 80.548 | 71 |
| 0.794 | 71.320 | 50 |
| 0.568 | 60.858 | 51 |
| 0.119 | 45.478 | 26 |
| 0.816 | 72.743 | 70 |
| 0.760 | 69.264 | 74 |
| 0.115 | 45.291 | 34 |
| 0.717 | 67.043 | 33 |
| 0.730 | 67.702 | 69 |
| 0.991 | 108.590 | 64 |
| 0.397 | 55.165 | 49 |
| 0.581 | 61.342 | 8 |
| 0.645 | 63.827 | 68 |
| 0.222 | 49.497 | 55 |
| 0.944 | 87.396 | 32 |
| 0.179 | 47.954 | 15 |
| 0.559 | 60.567 | 67 |
| 0.453 | 56.955 | 46 |
| 0.226 | 49.638 | 47 |
| 0.777 | 70.258 | 22 |
| 0.474 | 57.651 | 66 |
| 0.418 | 55.844 | 69 |
| 0.773 | 70.020 | 30 |
| 0.375 | 54.490 | 29 |
| 0.123 | 45.662 | 18 |
| 0.649 | 63.994 | 60 |
| 0.055 | 41.877 | 45 |
| 0.973 | 96.237 | 36 |
| 0.038 | 40.450 | 17 |
| 0.880 | 78.137 | 51 |
| 0.602 | 62.141 | 28 |
| 0.837 | 74.320 | 11 |
| 0.952 | 89.257 | 16 |
| 0.845 | 74.966 | 75 |

| | | |
|-------|---------|----|
| 0.884 | 78.561 | 43 |
| 0.435 | 56.397 | 18 |
| 0.867 | 76.833 | 15 |
| 0.076 | 43.273 | 65 |
| 0.431 | 56.268 | 26 |
| 0.033 | 40.053 | 25 |
| 0.781 | 70.500 | 14 |
| 0.307 | 52.330 | 56 |
| 0.713 | 66.847 | 41 |
| 0.632 | 63.289 | 32 |
| 0.696 | 66.032 | 13 |
| 0.538 | 59.814 | 47 |
| 0.995 | 115.288 | 56 |
| 0.495 | 58.358 | 7 |
| 0.610 | 62.451 | 12 |
| 0.503 | 58.629 | 71 |
| 0.542 | 59.955 | 39 |
| 0.094 | 44.236 | 14 |
| 0.525 | 59.355 | 11 |
| 0.734 | 67.908 | 61 |
| 0.824 | 73.320 | 54 |

Se identificaron los máximos de dichas tormentas para escalarlas de acuerdo con la Ecuación 1.

| Fecha | Est1 | Est2 | Est3 | Est4 | Est5 | Est6 |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| 19/06/2003 | 6.3 | 24.3 | 11.8 | 10.1 | 0.0 | 46.6 |
| 06/06/1986 | 0.0 | 74.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 30/08/2003 | 3.0 | 32.6 | 10.9 | 41.6 | 14.5 | 0.0 |
| 25/07/2003 | 2.8 | 10.1 | 19.4 | 2.1 | 0.0 | 46.4 |
| 28/08/1986 | 0.0 | 19.1 | 4.0 | 36.0 | 5.2 | 1.2 |
| 30/05/1986 | 29.7 | 40.9 | 61.2 | 69.0 | 69.0 | 34.8 |
| 03/09/2006 | 7.7 | 37.8 | 10.8 | 9.3 | 15.5 | 7.4 |
| 07/07/1991 | 8.4 | 65.7 | 0.0 | 11.9 | 15.5 | 8.4 |
| 10/05/1991 | 62.3 | 3.4 | 0.0 | 2.7 | 10.9 | 62.3 |
| 29/05/1986 | 64.9 | 33.6 | 43.2 | 40.5 | 48.1 | 57.1 |
| 24/05/2006 | 39.8 | 28.4 | 16.2 | 6.2 | 50.4 | 24.9 |
| 14/07/2003 | 44.1 | 94.6 | 35.0 | 52.5 | 15.7 | 13.3 |
| 25/06/1991 | 48.9 | 2.3 | 33.2 | 21.8 | 16.3 | 48.9 |
| 18/09/2006 | 10.0 | 0.0 | 1.1 | 61.5 | 0.0 | 0.0 |
| 14/09/2003 | 57.8 | 39.9 | 31.1 | 35.6 | 0.0 | 17.5 |
| 25/06/1991 | 59.1 | 2.8 | 40.1 | 26.3 | 19.7 | 59.1 |
| 16/05/2003 | 32.4 | 0.0 | 3.9 | 71.8 | 0.0 | 0.0 |

| | | | | | | |
|------------|------|-------|------|------|------|-------|
| 15/09/2006 | 0.0 | 6.8 | 58.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 17/08/2003 | 17.6 | 66.7 | 8.1 | 13.1 | 16.4 | 1.6 |
| 05/07/2003 | 0.0 | 71.6 | 1.7 | 0.7 | 10.2 | 16.9 |
| 15/08/1986 | 0.0 | 64.7 | 3.3 | 43.1 | 2.0 | 22.2 |
| 11/09/2006 | 15.0 | 55.7 | 8.6 | 30.7 | 15.0 | 3.0 |
| 14/06/2006 | 6.5 | 53.0 | 0.5 | 15.1 | 65.1 | 43.0 |
| 13/09/2003 | 5.7 | 43.5 | 22.0 | 9.3 | 7.2 | 11.4 |
| 28/09/1986 | 20.3 | 0.0 | 31.5 | 50.9 | 30.7 | 10.6 |
| 03/09/2006 | 10.9 | 53.0 | 15.2 | 13.0 | 21.7 | 10.3 |
| 06/10/2003 | 60.8 | 81.1 | 44.7 | 18.0 | 46.5 | 20.9 |
| 26/06/2003 | 1.8 | 63.1 | 1.5 | 1.7 | 33.0 | 5.8 |
| 08/06/1991 | 39.3 | 0.0 | 19.4 | 76.5 | 4.4 | 39.3 |
| 02/09/2006 | 22.7 | 20.8 | 50.2 | 31.1 | 23.9 | 23.9 |
| 01/09/2003 | 0.0 | 46.2 | 6.2 | 1.8 | 0.0 | 32.3 |
| 04/09/2003 | 18.9 | 81.6 | 0.0 | 0.0 | 25.3 | 0.0 |
| 22/08/1991 | 31.5 | 57.2 | 4.6 | 11.2 | 48.9 | 31.5 |
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 11.3 | 47.1 | 28.3 | 8.5 |
| 11/09/2006 | 12.0 | 44.7 | 6.9 | 24.6 | 12.0 | 2.4 |
| 19/06/2003 | 7.7 | 29.8 | 14.5 | 12.4 | 0.0 | 57.1 |
| 18/06/2003 | 22.3 | 14.5 | 9.7 | 9.7 | 5.9 | 42.2 |
| 14/06/2006 | 4.3 | 35.1 | 0.4 | 10.0 | 43.0 | 28.4 |
| 28/05/2006 | 4.9 | 53.1 | 32.7 | 2.8 | 7.4 | 0.0 |
| 30/08/2003 | 4.9 | 53.4 | 17.9 | 68.1 | 23.7 | 0.0 |
| 21/08/1986 | 6.9 | 83.5 | 14.3 | 12.5 | 43.9 | 33.7 |
| 07/06/2006 | 82.0 | 104.4 | 30.2 | 75.7 | 69.8 | 59.3 |
| 16/09/2003 | 36.0 | 30.6 | 9.0 | 23.7 | 32.4 | 60.7 |
| 08/06/2003 | 51.6 | 11.8 | 5.0 | 20.3 | 42.8 | 31.2 |
| 05/05/1991 | 21.9 | 0.0 | 0.0 | 59.2 | 0.0 | 21.9 |
| 04/06/2006 | 0.0 | 45.5 | 80.5 | 0.0 | 0.0 | 13.2 |
| 19/08/2003 | 3.9 | 71.3 | 0.0 | 2.4 | 7.9 | 26.9 |
| 24/08/2003 | 4.8 | 60.9 | 2.9 | 9.6 | 0.0 | 0.0 |
| 24/06/1991 | 5.1 | 2.0 | 45.5 | 29.8 | 25.3 | 5.1 |
| 01/06/2006 | 0.0 | 1.9 | 1.7 | 72.7 | 17.0 | 0.0 |
| 19/07/2006 | 10.0 | 11.5 | 0.0 | 69.3 | 60.5 | 12.0 |
| 16/05/2003 | 20.4 | 0.0 | 2.5 | 45.3 | 0.0 | 0.0 |
| 04/10/1991 | 6.9 | 37.0 | 67.0 | 34.7 | 12.6 | 6.9 |
| 30/05/2006 | 5.8 | 60.6 | 67.7 | 45.5 | 46.6 | 16.7 |
| 01/05/2006 | 39.8 | 17.5 | 12.6 | 42.8 | 0.0 | 108.6 |
| 17/08/2003 | 14.6 | 55.2 | 6.7 | 10.9 | 13.6 | 1.4 |
| 04/08/1986 | 16.6 | 40.3 | 39.6 | 34.6 | 61.3 | 28.6 |
| 28/05/2006 | 5.9 | 63.8 | 39.3 | 3.4 | 8.9 | 0.0 |
| 04/09/2003 | 11.5 | 49.5 | 0.0 | 0.0 | 15.3 | 0.0 |

| | | | | | | |
|------------|------|------|-------|------|------|------|
| 17/09/1991 | 30.7 | 0.0 | 0.0 | 87.4 | 0.0 | 30.7 |
| 27/09/1986 | 2.6 | 0.0 | 0.3 | 0.6 | 12.0 | 48.0 |
| 24/05/2006 | 47.9 | 34.1 | 19.4 | 7.5 | 60.6 | 29.9 |
| 25/07/2003 | 3.5 | 12.4 | 23.8 | 2.5 | 0.0 | 57.0 |
| 26/07/2003 | 0.0 | 49.6 | 0.0 | 0.0 | 6.4 | 17.5 |
| 27/05/1991 | 54.9 | 70.3 | 0.0 | 0.0 | 6.4 | 54.9 |
| 20/05/2006 | 0.0 | 57.7 | 0.0 | 12.3 | 10.8 | 38.0 |
| 30/05/2006 | 4.7 | 50.0 | 55.8 | 37.5 | 38.5 | 13.8 |
| 22/08/1991 | 38.5 | 70.0 | 5.6 | 13.7 | 59.9 | 38.5 |
| 07/07/1991 | 6.9 | 54.5 | 0.0 | 9.9 | 12.9 | 6.9 |
| 04/10/1986 | 6.3 | 0.0 | 28.4 | 45.7 | 0.0 | 18.2 |
| 20/09/2003 | 5.9 | 64.0 | 10.5 | 3.2 | 0.0 | 8.4 |
| 17/07/2003 | 0.0 | 0.0 | 8.6 | 41.9 | 7.1 | 0.0 |
| 08/06/2003 | 96.2 | 21.9 | 9.4 | 37.9 | 79.7 | 58.2 |
| 01/10/1986 | 0.0 | 0.0 | 7.1 | 1.3 | 0.0 | 40.4 |
| 24/08/2003 | 6.2 | 78.1 | 3.7 | 12.3 | 0.0 | 0.0 |
| 03/07/1991 | 2.6 | 13.2 | 0.0 | 62.1 | 0.0 | 2.6 |
| 20/08/1986 | 0.0 | 19.2 | 0.0 | 0.0 | 51.4 | 74.3 |
| 28/09/1986 | 35.6 | 0.0 | 55.1 | 89.3 | 53.8 | 18.6 |
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 18.0 | 75.0 | 45.1 | 13.5 |
| 06/07/2003 | 42.2 | 78.6 | 12.1 | 8.2 | 17.0 | 33.2 |
| 04/10/1986 | 7.8 | 0.0 | 35.1 | 56.4 | 0.0 | 22.4 |
| 27/09/1986 | 4.2 | 0.0 | 0.5 | 1.0 | 19.3 | 76.8 |
| 13/05/2006 | 0.0 | 10.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 43.3 |
| 24/06/1991 | 6.3 | 2.5 | 56.3 | 36.8 | 31.3 | 6.3 |
| 17/06/1991 | 24.0 | 2.9 | 1.1 | 4.3 | 40.1 | 24.0 |
| 24/09/1986 | 0.0 | 70.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.9 |
| 06/09/2003 | 12.8 | 10.4 | 52.3 | 6.1 | 30.9 | 21.3 |
| 28/06/2003 | 0.0 | 66.8 | 0.0 | 0.0 | 7.4 | 0.0 |
| 17/09/1991 | 22.2 | 0.0 | 0.0 | 63.3 | 0.0 | 22.2 |
| 28/08/1986 | 0.0 | 35.1 | 7.3 | 66.0 | 9.5 | 2.3 |
| 26/07/2003 | 0.0 | 59.8 | 0.0 | 0.0 | 7.8 | 21.1 |
| 06/09/2003 | 28.2 | 22.8 | 115.3 | 13.4 | 68.0 | 46.9 |
| 06/07/1986 | 43.0 | 58.4 | 54.0 | 45.4 | 45.4 | 32.4 |
| 21/08/1986 | 5.2 | 62.5 | 10.7 | 9.3 | 32.8 | 25.2 |
| 04/06/2006 | 0.0 | 33.1 | 58.6 | 0.0 | 0.0 | 9.6 |
| 25/06/2003 | 15.7 | 28.1 | 16.1 | 14.1 | 60.0 | 55.1 |
| 24/09/1986 | 0.0 | 44.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.8 |
| 20/08/1986 | 0.0 | 15.3 | 0.0 | 0.0 | 41.1 | 59.4 |
| 22/09/2003 | 20.6 | 67.9 | 0.0 | 40.6 | 0.0 | 42.9 |
| 01/09/2003 | 0.0 | 73.3 | 9.9 | 2.8 | 0.0 | 51.2 |

En la Figura 13 se presenta un ejemplo del escalamiento de una tormenta generada, para la cual el máximo sintético obtenido fue de 46.6 mm y la fecha de la tormenta histórica seleccionada 19/06/2003 en este caso la número 38 cuyo máximo registrado fue de 46 mm.

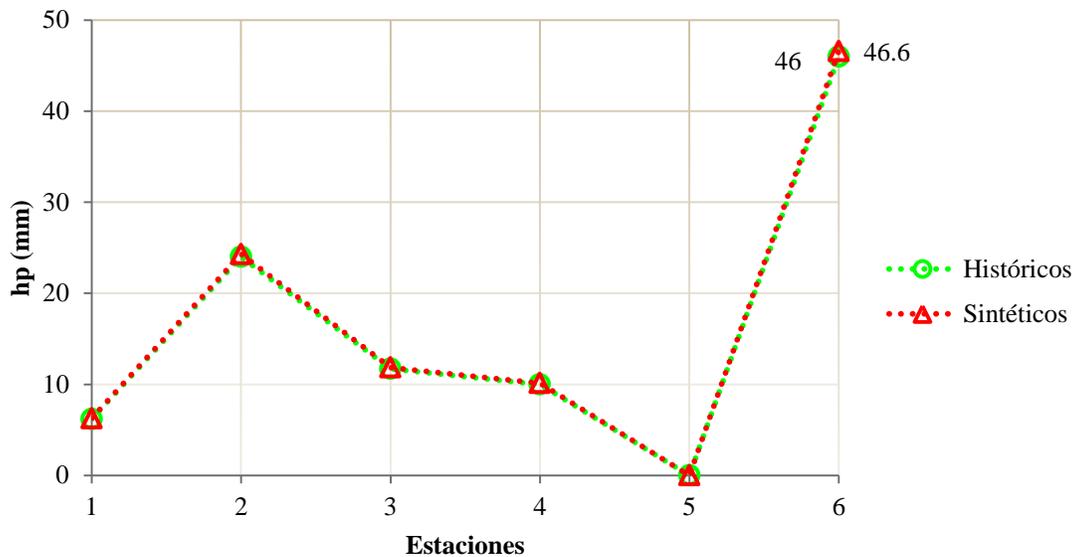


Figura 13. Ejemplo de escalamiento de una tormenta.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

4.4. Validación del primer procedimiento

4.4.1. *Umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

En primera instancia se verifica la eficacia del procedimiento propuesto comparando las funciones de distribución de los máximos y las medias de las tormentas históricas con las de las tormentas generadas. De acuerdo con la propuesta, se obtuvieron los valores empíricos de las probabilidades de no excedencia para las precipitaciones máximas y medias; en la Figura 14 y la Figura 15 se muestra la comparación entre los valores obtenidos para las tormentas históricas y para las sintéticas.

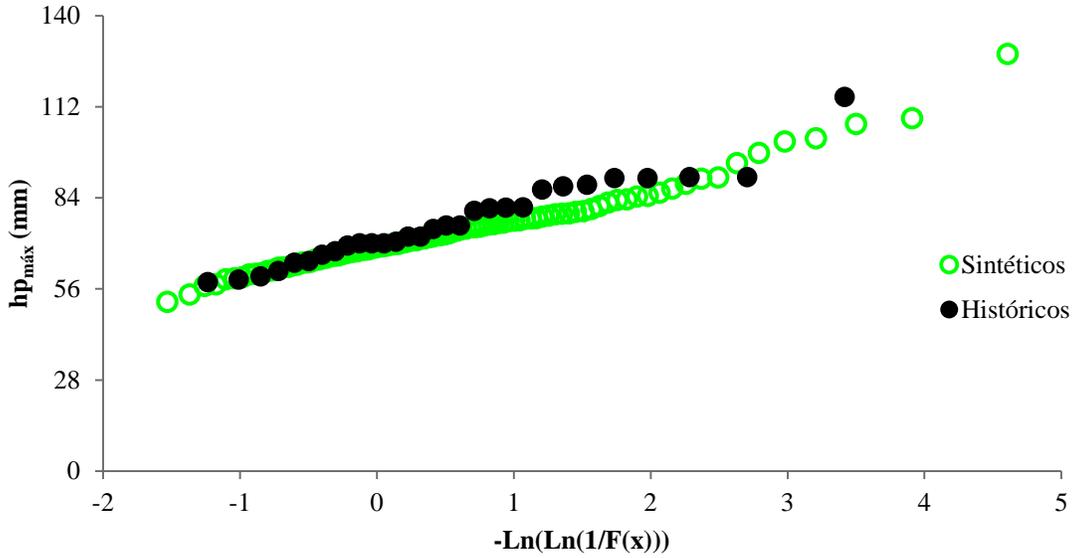


Figura 14. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones máximas.

Primer procedimiento de generación, *umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm*

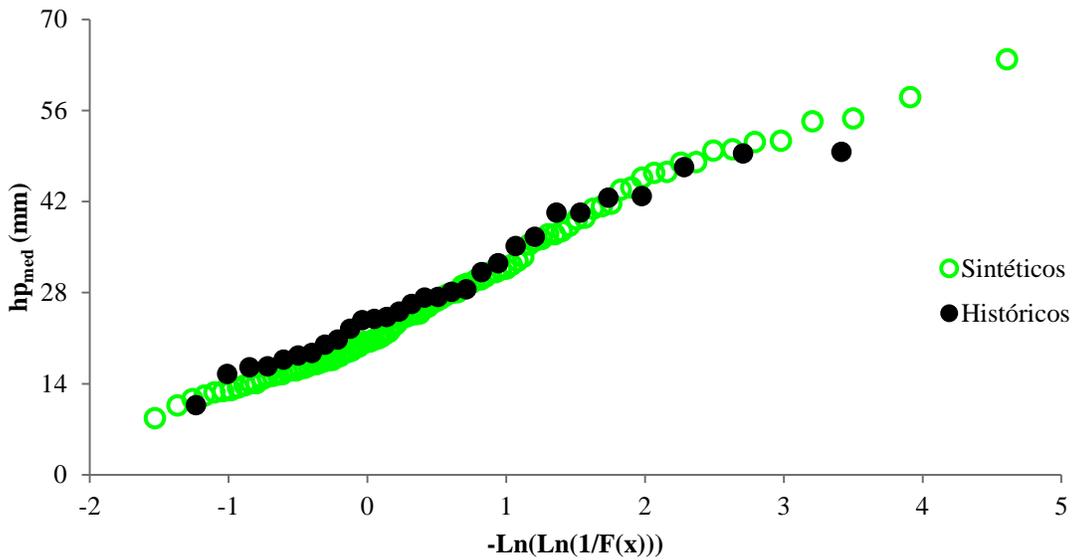


Figura 15. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones medias.

Primer procedimiento de generación, *umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm*

En la Figura 15 se aprecia que la función de distribución de las precipitaciones medias se logra reproducir adecuadamente, mientras que en el caso de las precipitaciones máximas Figura 14, los valores correspondientes a las tormentas generadas resulta menor o mayor que los de las históricas en una zona de la figura.

Para identificar las causas que motivan las diferencias encontradas entre las precipitaciones máximas sintéticas y las históricas, se construyen la Figura 16 y la Figura 17, en las que se relacionan las precipitaciones máximas con las medias, para las tormentas históricas y para las sintéticas respectivamente. Al comparar las gráficas se observa que la muestra sintética produce una mayor correlación entre medias y máximos que la correspondiente a los valores históricos.

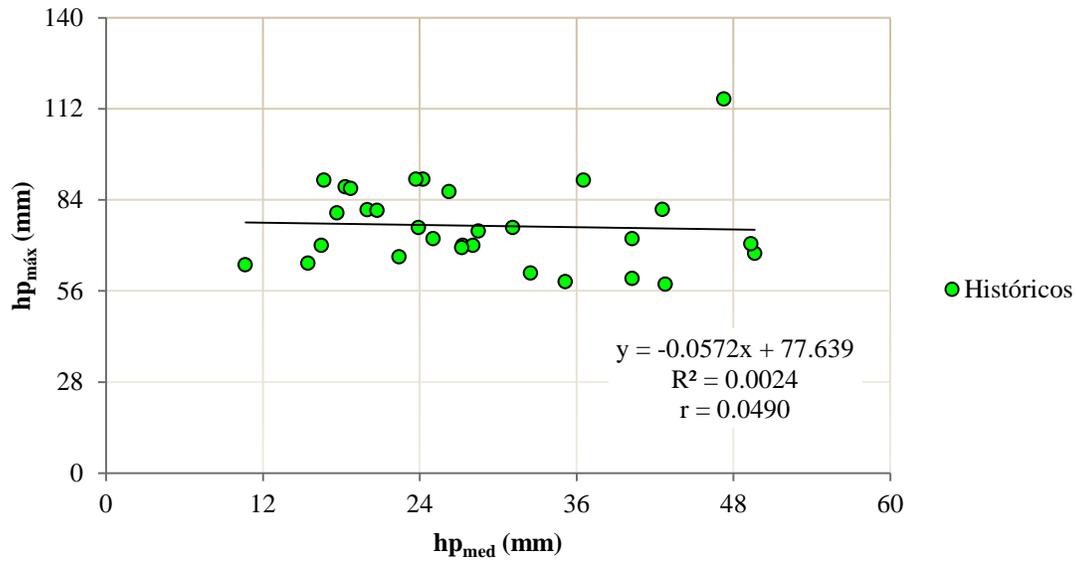


Figura 16. Relación entre la precipitación media y precipitación máxima de 30 datos históricos

Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm

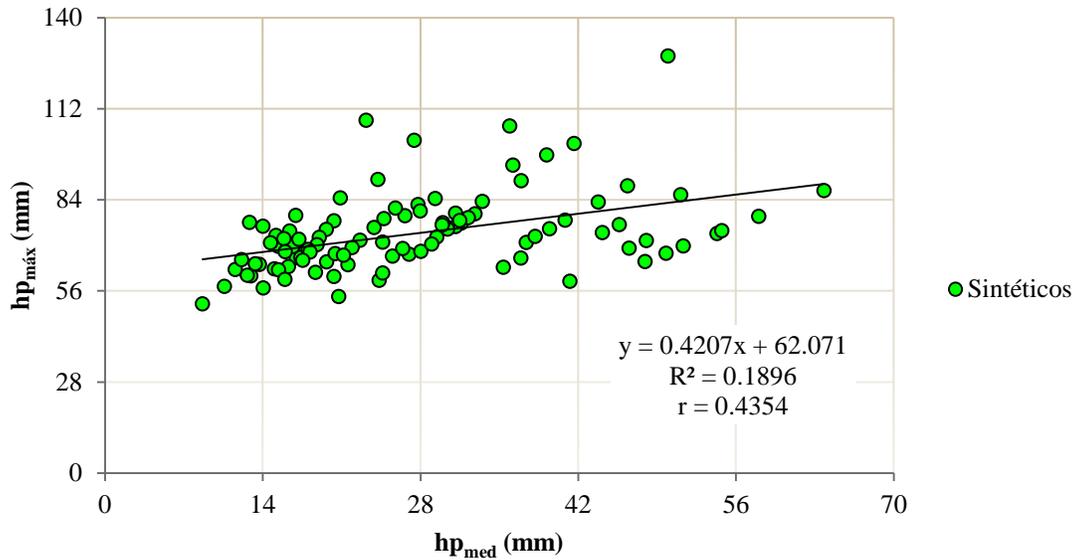


Figura 17. Relación entre la precipitación media y máxima datos sintéticos

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

Realizando un análisis más a fondo se descubre que la correlación tan pequeña que se observa en la Figura 16 se debe a que los valores medios están determinados en parte por el máximo, en otras palabras, la correlación que se obtiene puede considerarse espuria (un análisis de la correlación espuria entre variables se encuentra en Echávez y Arrijoja, 2006).

Por este motivo se define un índice de extensión espacial de las tormentas históricas (IEE), Ecuación 2. Al relacionar la precipitación máxima anual de las tormentas históricas con su índice de extensión espacial, se obtiene la Figura 18 que muestra una tendencia a que la amplitud espacial de las tormentas, medida mediante el índice de extensión espacial, disminuya conforme la magnitud del valor máximo aumenta, es decir, que las tormentas con mayor precipitación máxima tienden a ser menos extensas.

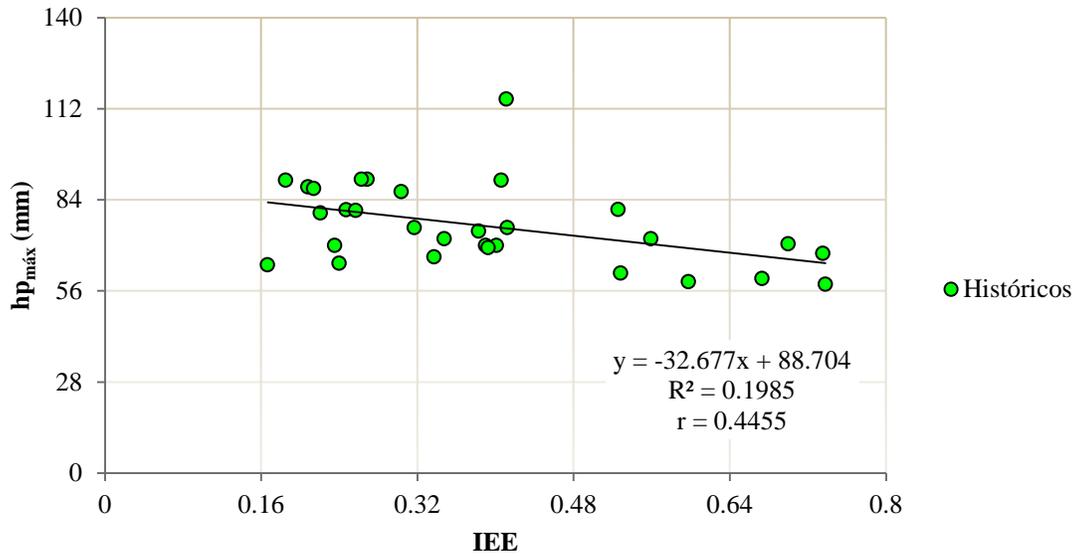


Figura 18. Relación entre el índice de la extensión espacial (IEE) y precipitación máxima datos históricos.

Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm

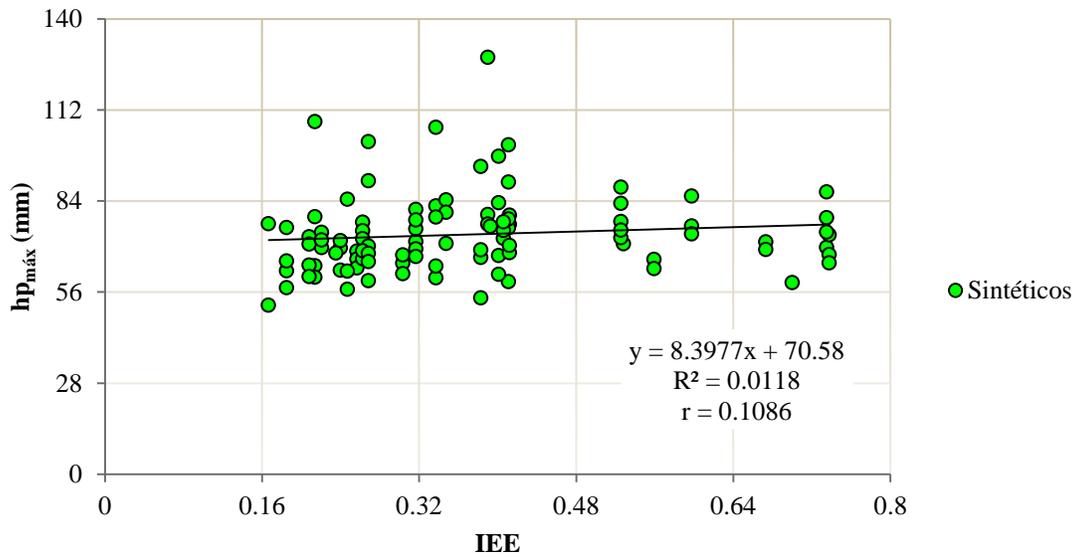


Figura 19. Relación entre el índice de la extensión espacial (IEE) y precipitación máxima datos sintéticos

Primer procedimiento de generación, umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm

Una vez que se consiguen representar adecuadamente las funciones de distribución de los valores máximos y medios de las tormentas históricas, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos de las lluvias registradas en cada una de las estaciones climatológicas.

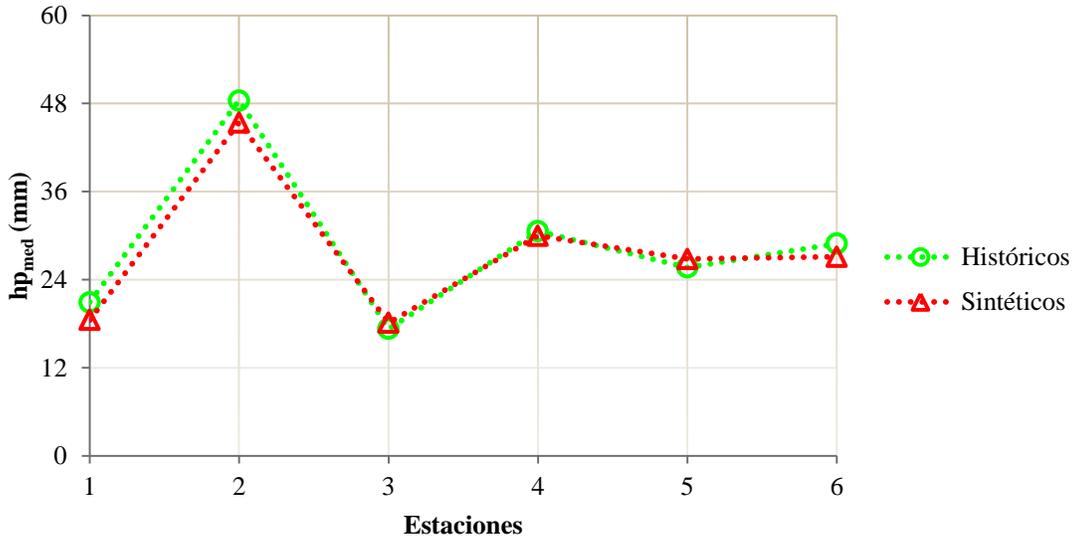


Figura 20. Comportamiento de la media para cada estación.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

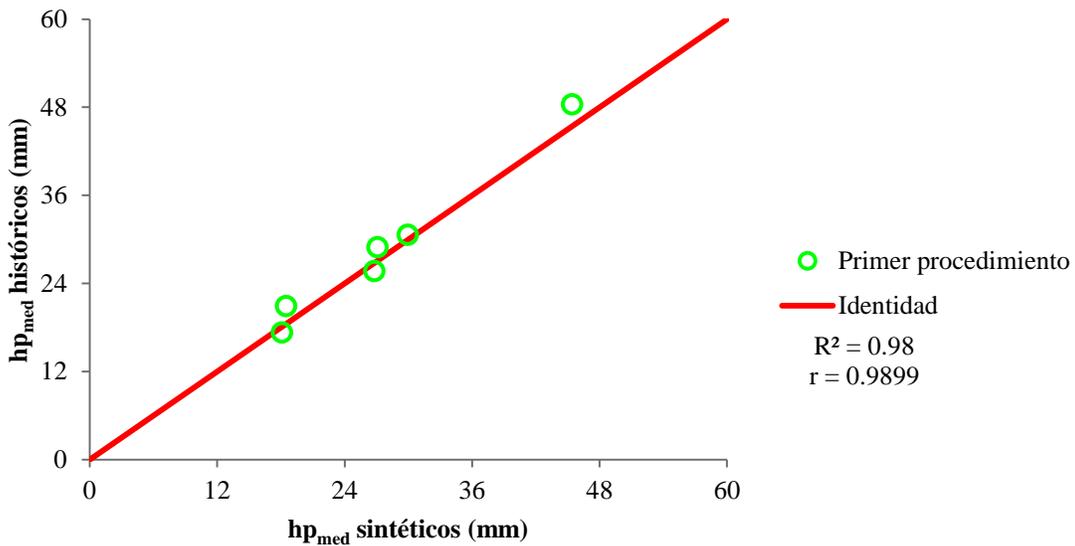


Figura 21. Comportamiento de la media para cada estación, identidad.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

En la Figura 20 se muestra la representación lograda de los valores medios estación por estación entre los históricos y los sintéticos, adicionalmente muestra que para la estación 1, 2, 4 y 6 el valor medio de los datos generados sintéticamente es menor al valor medio de los históricos empleados, finalmente para las estaciones restantes la representación se considera adecuada.

De lo anterior, se decide construir la Figura 21, la cual muestra una función identidad y por lo tanto es quien indica el grado de representación que se logra entre los datos históricos y los datos sintéticos, considerándose nuevamente bien representados.

Así mismo, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos restantes, es decir, para la desviación estándar y para el coeficiente de asimetría.

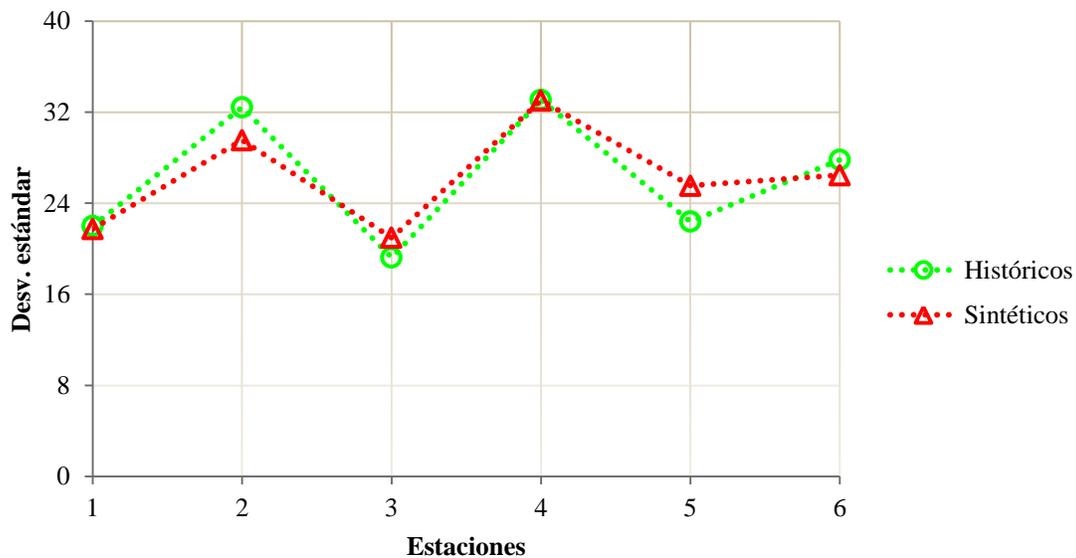


Figura 22. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

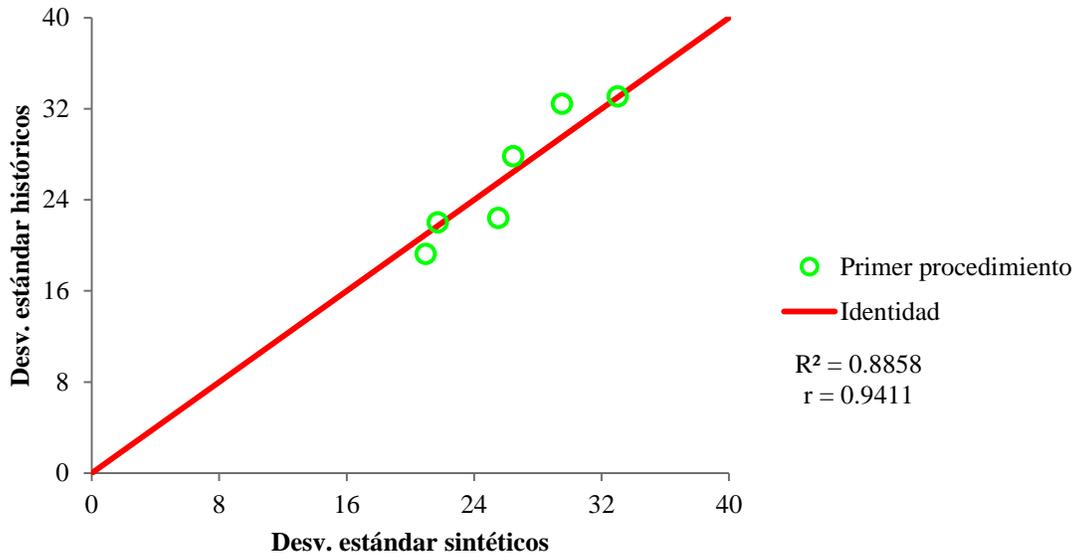


Figura 23. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación, identidad.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

El análisis de la Figura 22 presenta que en las estaciones 1, 2, 4 y 6, el parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador, está por debajo de los históricos y en las estaciones 3 y 5 está por encima de los históricos, pero se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 23 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que se acepta la representación de este estadístico con los valores generados con el modelo.

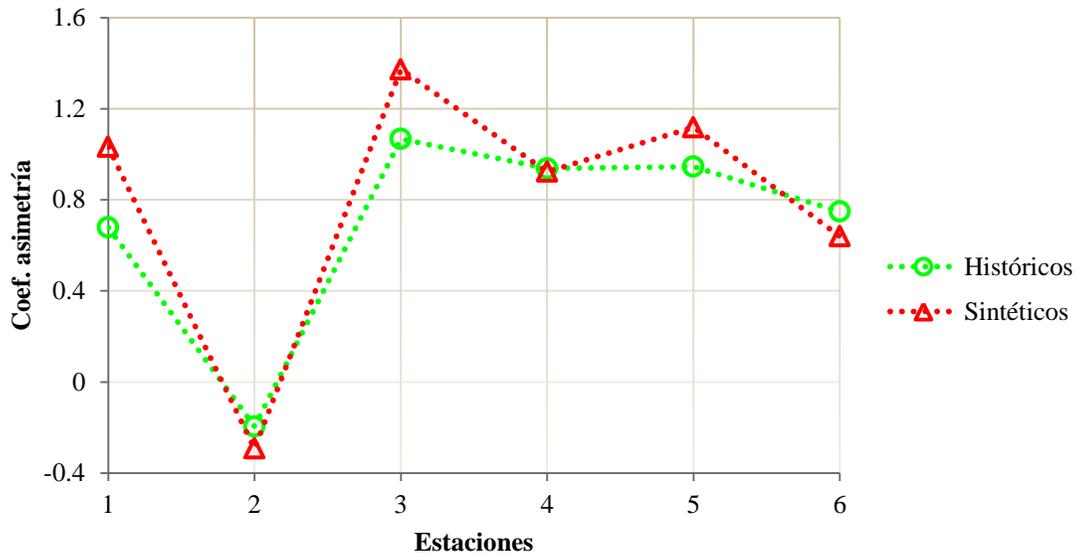


Figura 24. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

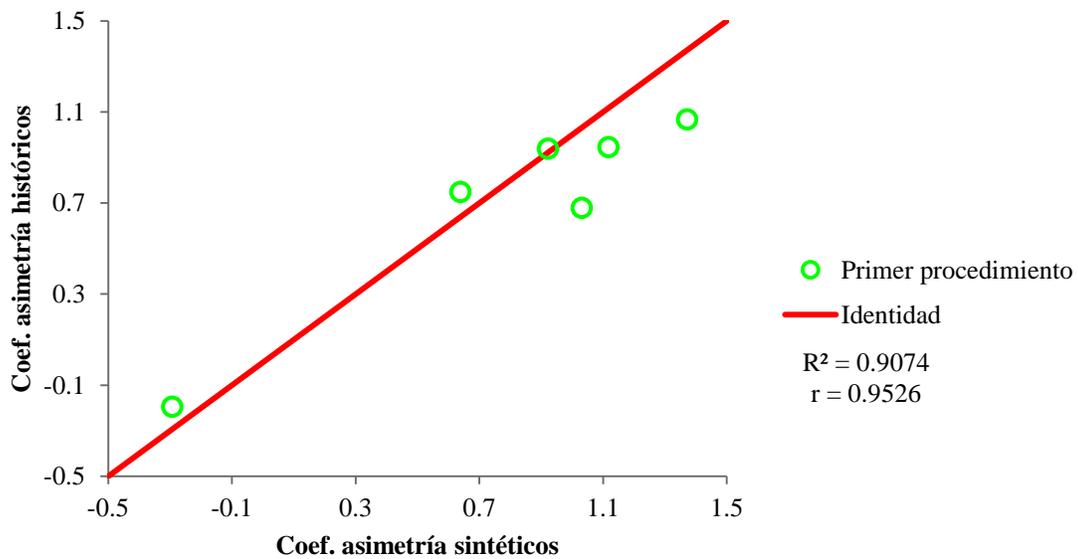


Figura 25. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación, identidad.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

El análisis de la Figura 24 presenta que en las estaciones 2, 4 y 6, el parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador, está por debajo de los históricos y en las estaciones 1, 3 y 5 está por encima de los históricos, pero se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 25 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que se acepta la representación de este estadístico con los valores generados con el modelo.

Con el fin de estimar la correlación entre los valores de los parámetros correspondientes a las tormentas históricas y los parámetros obtenidos de las tormentas sintéticas, se calcula el coeficiente de determinación para cada parámetro estadístico con la Ecuación 3, los coeficientes de determinación obtenidos para este caso son:

| | Var_i | Var_ε | C_{det} |
|-----------------|---------|-------------------|-----------|
| Media | 118.399 | 2.928 | 0.9753 |
| Desv. estándar | 33.844 | 4.646 | 0.8627 |
| Coef. asimetría | 0.211 | 0.042 | 0.8031 |

4.4.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

Como ya fue expuesto, en primera instancia se verifica la pertinencia del procedimiento propuesto comparando las funciones de distribución de los máximos y las medias de las tormentas históricas con las de las tormentas generadas. De acuerdo con la propuesta, se obtuvieron los valores empíricos de las probabilidades de no excedencia para las precipitaciones máximas y medias; en la Figura 26 y la Figura 27 se muestra la comparación entre los valores obtenidos para las tormentas históricas y para las sintéticas.

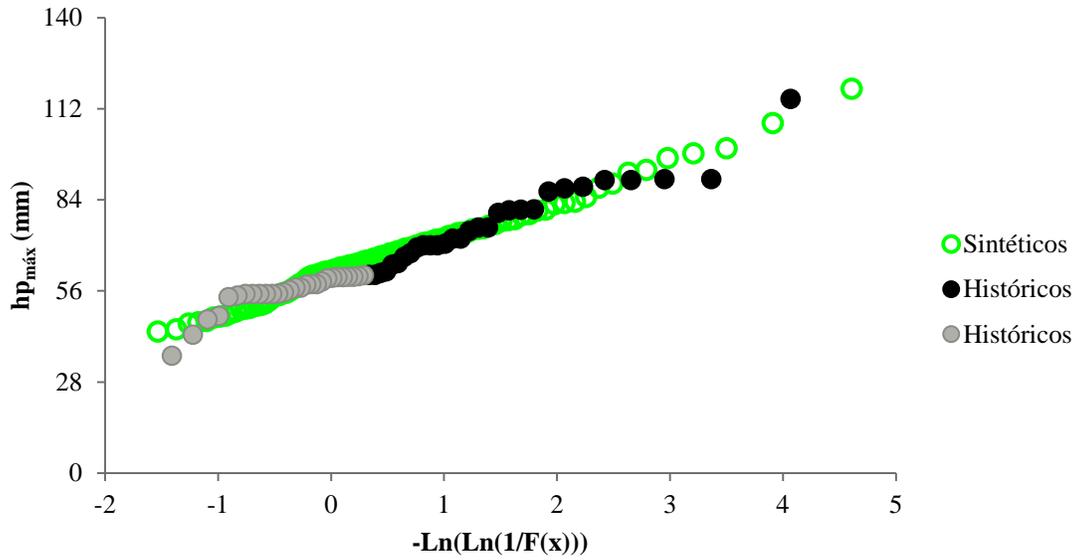


Figura 26. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones máximas.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

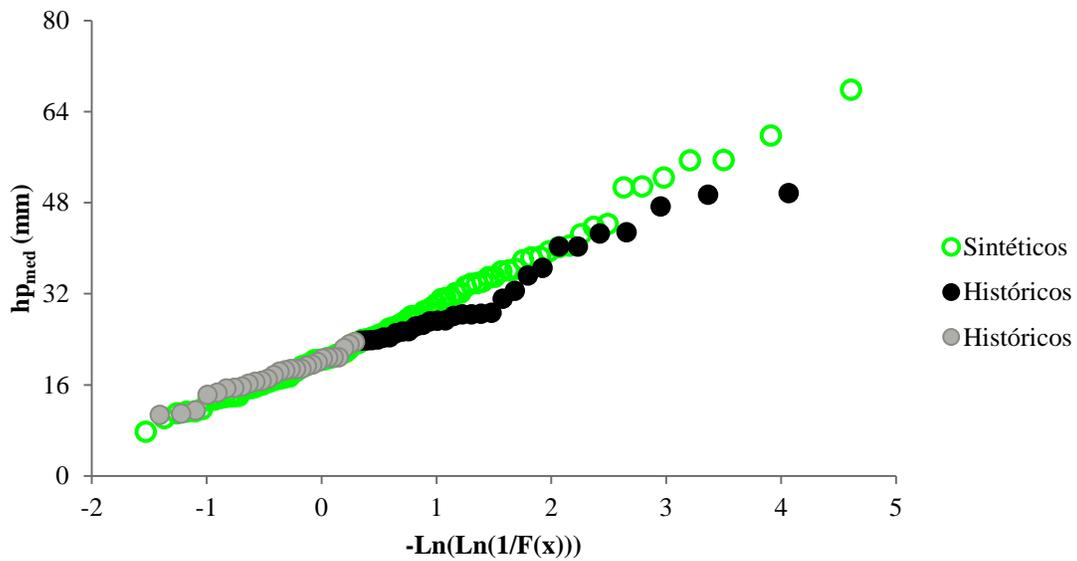


Figura 27. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones medias.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

En la Figura 26 se aprecia que la función de distribución de las precipitaciones máximas puntuales se logra reproducir adecuadamente, mientras que en el caso de las precipitaciones medias Figura 27, los valores correspondientes a las tormentas generadas resultan mayores que los de las históricas en una zona de la figura.

Como fue expuesto anteriormente, para identificar las causas que motivan la diferencia encontrada entre las precipitaciones medias sintéticas y las históricas, se construyen la Figura 28 y la Figura 29, en las que se relacionan las precipitaciones máximas con las medias, para las tormentas históricas y para las sintéticas respectivamente. Al comparar las gráficas se observa que la muestra sintética produce una mayor correlación entre medias y máximos que la correspondiente a los valores históricos.

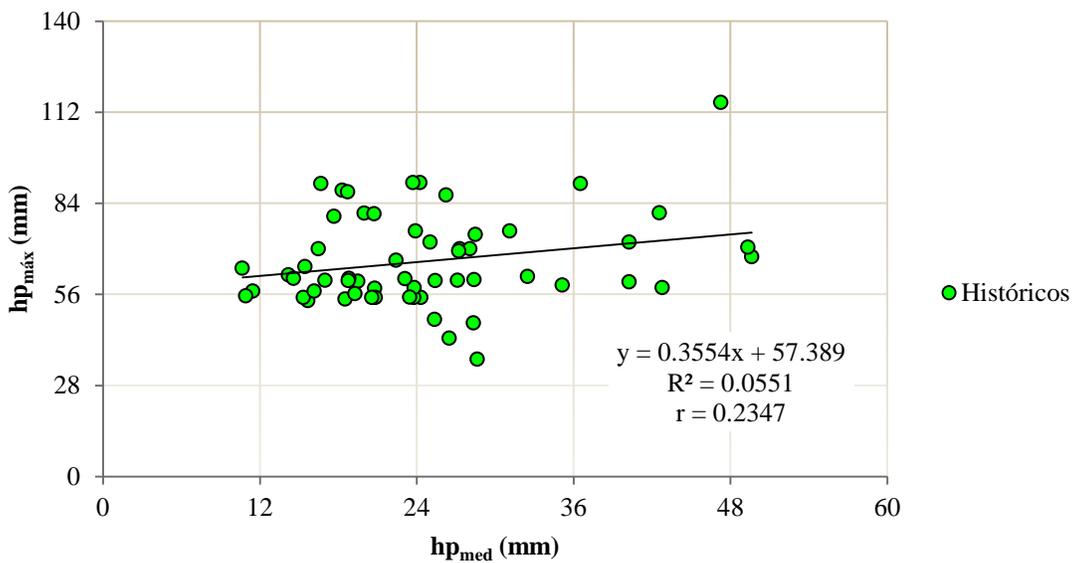


Figura 28. Relación entre la precipitación media y precipitación máxima de 58 datos históricos

Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

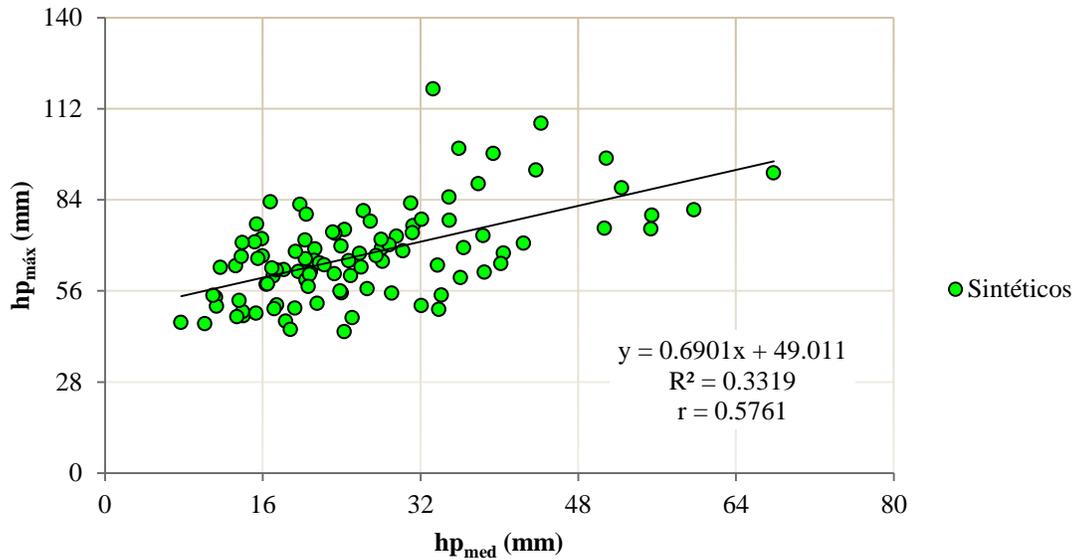


Figura 29. Relación entre la precipitación media y máxima datos sintéticos

Primer procedimiento de generación, *umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm*

De nueva cuenta, el análisis muestra que la correlación muy pequeña que se observa en la Figura 28 se debe a que los valores medios están determinados en parte por el máximo.

Al relacionar la precipitación máxima anual de las tormentas históricas con su índice de extensión espacial, se obtiene la Figura 30 que muestra una tendencia a que la amplitud espacial de las tormentas, medida mediante el índice de extensión espacial, disminuya conforme la magnitud del valor máximo aumenta, es decir, que las tormentas con mayor precipitación máxima tienden a ser menos extensas.

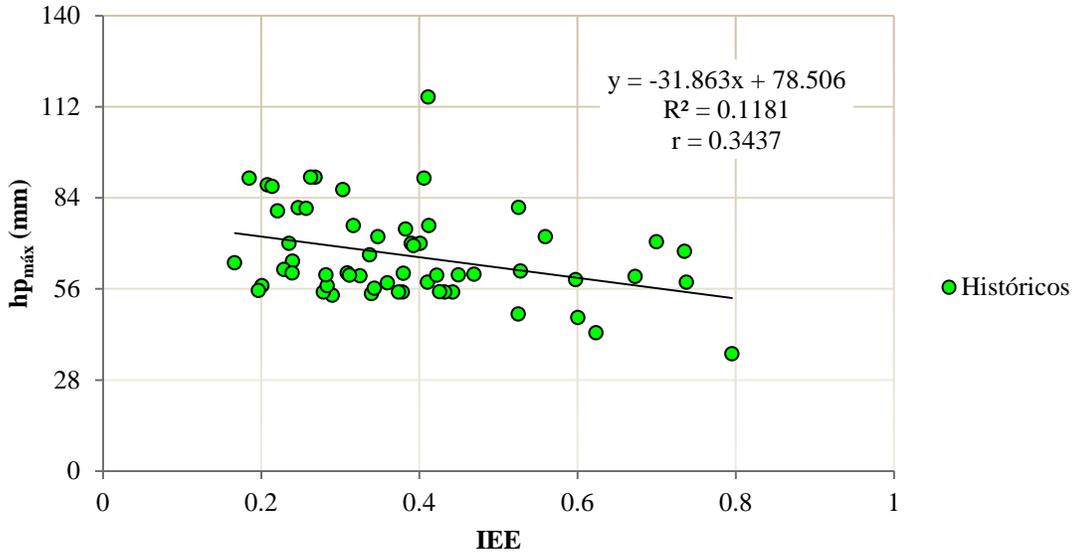


Figura 30. Relación entre el índice de la extensión espacial (IEE) y precipitación máxima datos históricos.

Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

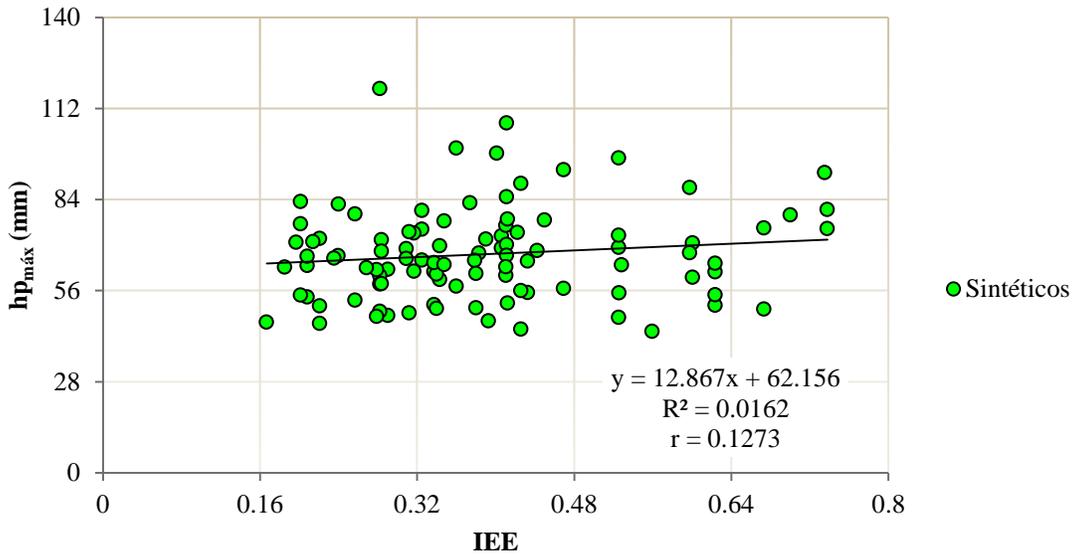


Figura 31. Relación entre el índice de la extensión espacial (IEE) y precipitación máxima datos sintéticos

Primer procedimiento de generación, umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

De nueva cuenta, una vez que se consiguen representar adecuadamente las funciones de distribución de los valores máximos y medios de las tormentas históricas, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos de las lluvias registradas en cada una de las estaciones climatológicas.

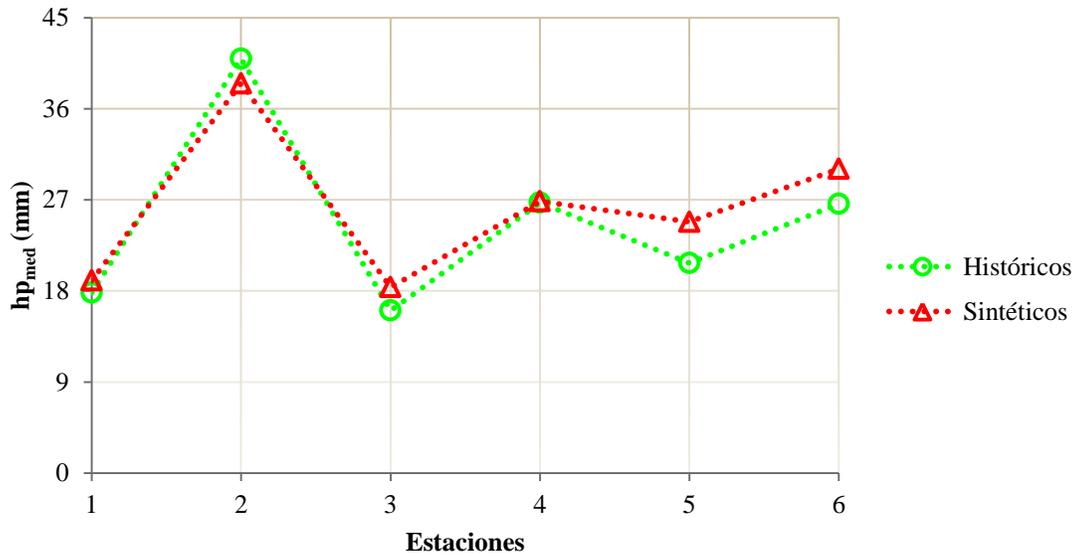


Figura 32. Comportamiento de la media para cada estación.

Primer procedimiento de generación, umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

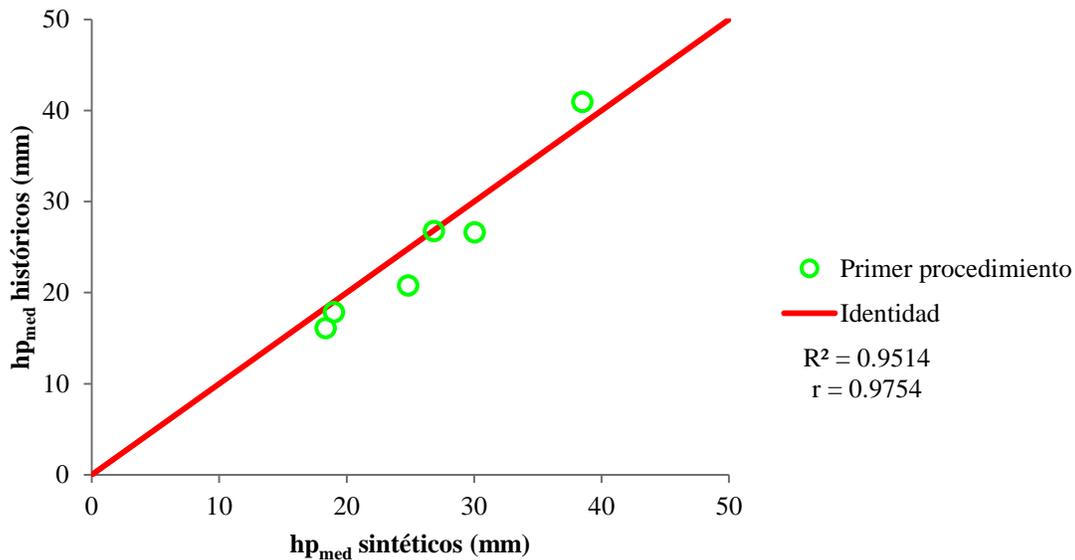


Figura 33. Comportamiento de la media para cada estación, identidad.

Primer procedimiento de generación, umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

En la Figura 32 se exhibe la representación lograda de los valores medios estación por estación entre los históricos y los sintéticos, adicionalmente presenta que sólo en una estación, el valor medio de los datos generados sintéticamente es menor al valor medio de los históricos empleados, finalmente la representación de este parámetro estadístico se considera adecuada.

De lo anterior, se decide construir la Figura 33, la cual presenta una función identidad y es quien indica el grado de representación que se logra entre los datos históricos y los datos sintéticos, considerándose nuevamente bien representados y se debe agregar que este grupo de umbrales no mejora con respecto al grupo de umbrales anterior.

Así mismo, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos restantes, es decir, para la desviación estándar y para el coeficiente de asimetría.

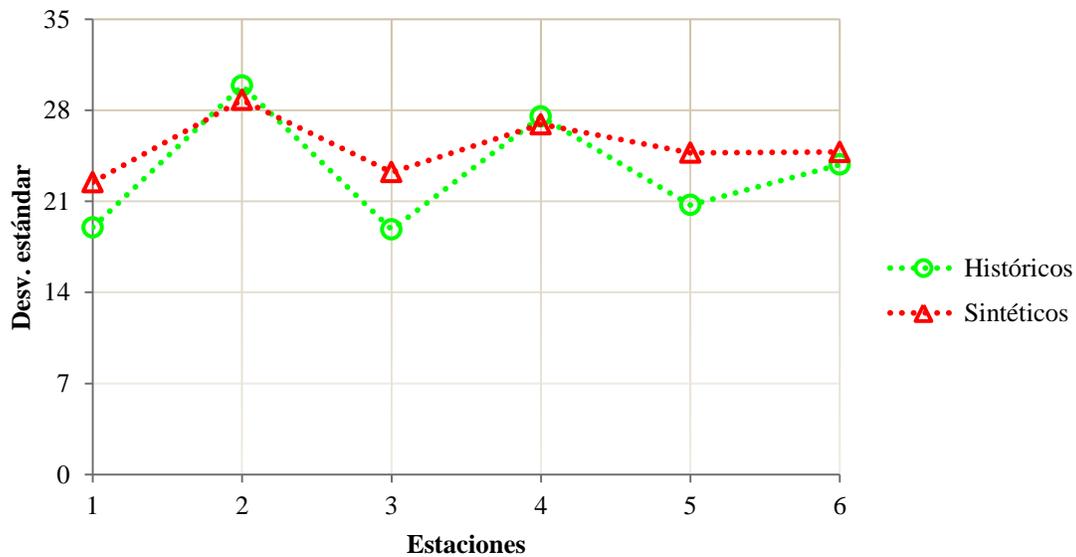


Figura 34. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

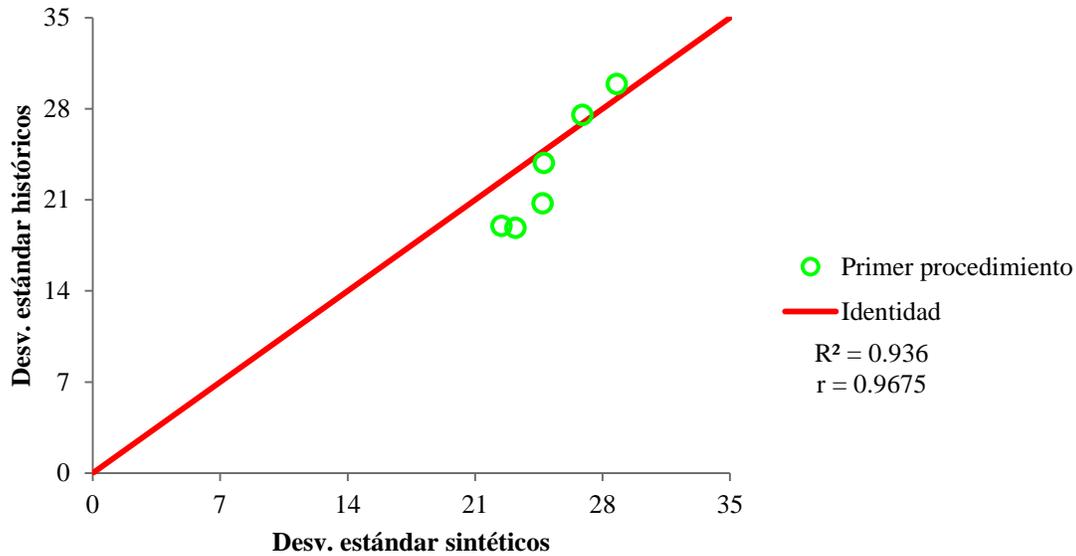


Figura 35. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación, identidad.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

El análisis de la Figura 34 presenta que en las estaciones 2 y 4, el parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador, está por debajo de los históricos y en las estaciones 1, 3, 5 y 6 está por encima de los históricos, pero se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 35 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que se acepta la representación de este estadístico con los valores generados con el modelo.

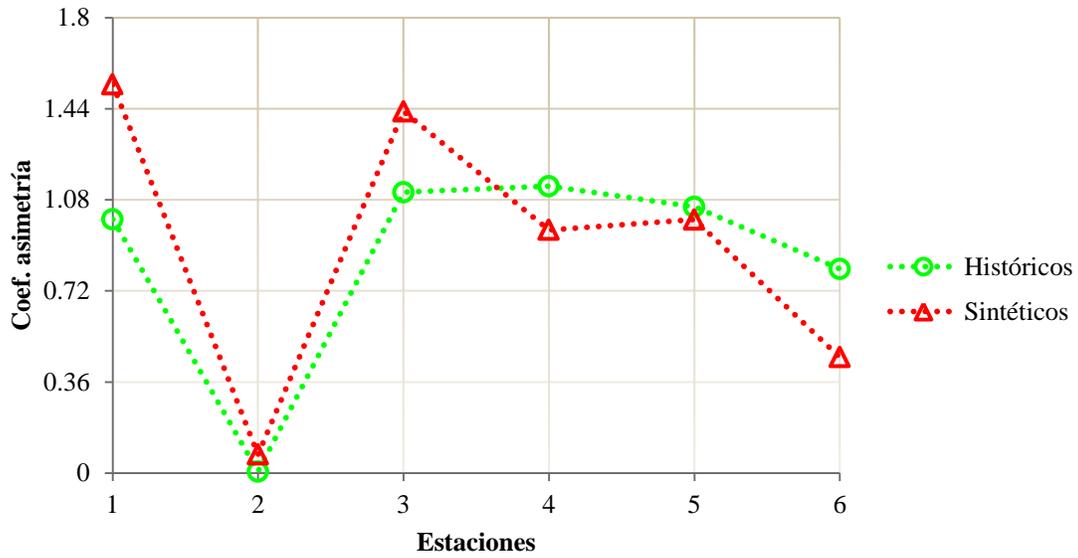


Figura 36. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación.

Primer procedimiento de generación, *umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm*

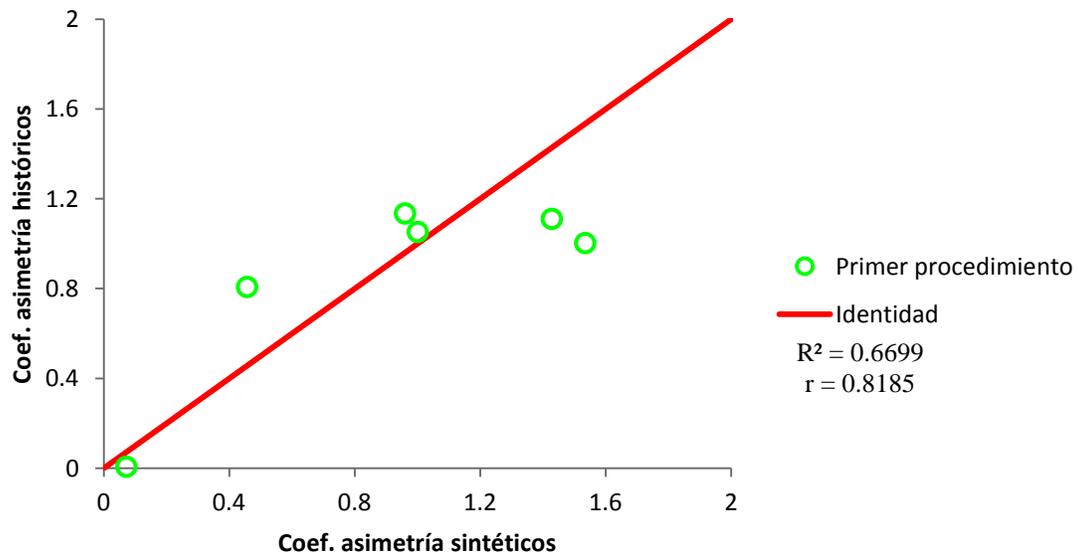


Figura 37. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación, identidad.

Primer procedimiento de generación, *umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm*

El análisis de la Figura 36 presenta que en las estaciones 4, 5 y 6, el parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador, está por debajo de los históricos y en las estaciones 1, 2 y 3 está por encima de los históricos, pero se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 37 presenta, como los puntos no son cercanos a la función identidad, por lo que se no se acepta del todo la representación de este estadístico con los valores generados con el modelo.

Con el fin de estimar la correlación entre los valores de los parámetros correspondientes a las tormentas históricas y los parámetros obtenidos de las tormentas sintéticas, se calcula el coeficiente de determinación para cada parámetro estadístico con la Ecuación 3, los coeficientes de determinación obtenidos para este caso son:

| | Var_i | Var_ε | C_{det} |
|-----------------|---------|-------------------|-----------|
| Media | 81.678 | 5.690 | 0.9303 |
| Desv. estándar | 21.351 | 5.879 | 0.7247 |
| Coef. asimetría | 0.185 | 0.105 | 0.4330 |

4.4.3. Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm

Como suceso iterativo, en primera instancia se verifica la eficacia del procedimiento propuesto comparando las funciones de distribución de los máximos y las medias de las tormentas históricas con las de las tormentas generadas. De acuerdo con la propuesta, se obtuvieron los valores empíricos de las probabilidades de no excedencia para las precipitaciones máximas y medias; en la Figura 38 y la Figura 39 se muestra la comparación entre los valores obtenidos para las tormentas históricas y para las sintéticas.

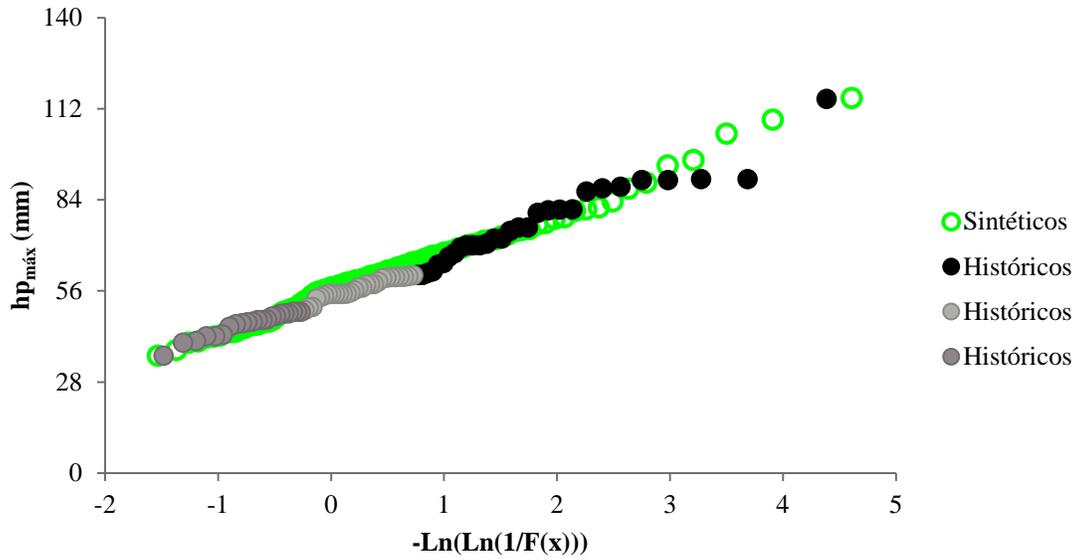


Figura 38. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones máximas.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

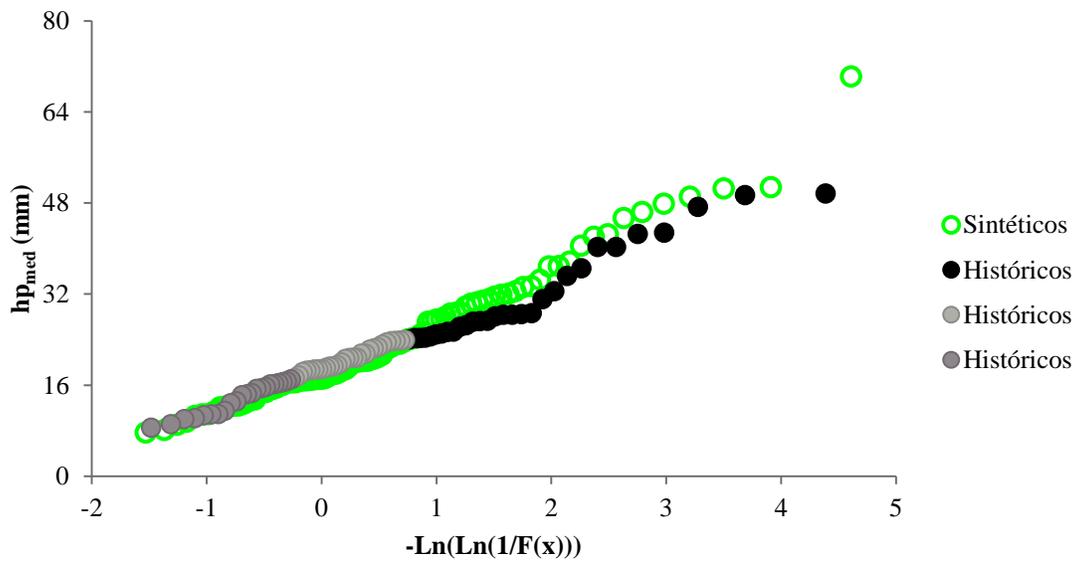


Figura 39. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones medias.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

En la Figura 38 se aprecia que la función de distribución de las precipitaciones máximas puntuales se logra reproducir adecuadamente, mientras que en el caso de las precipitaciones

medias Figura 39, los valores correspondientes a las tormentas generadas resultan mayores que los de las históricas en una zona de la figura.

Como suceso iterativo, para identificar las causas que motivan las diferencias encontradas entre las precipitaciones medias sintéticas y las históricas, se construyen la Figura 40 y la Figura 41, en las que se relacionan las precipitaciones máximas con las medias, para las tormentas históricas y para las sintéticas respectivamente. Al comparar las gráficas se observa que la muestra sintética produce una mayor correlación entre medias y máximos que la correspondiente a los valores históricos.

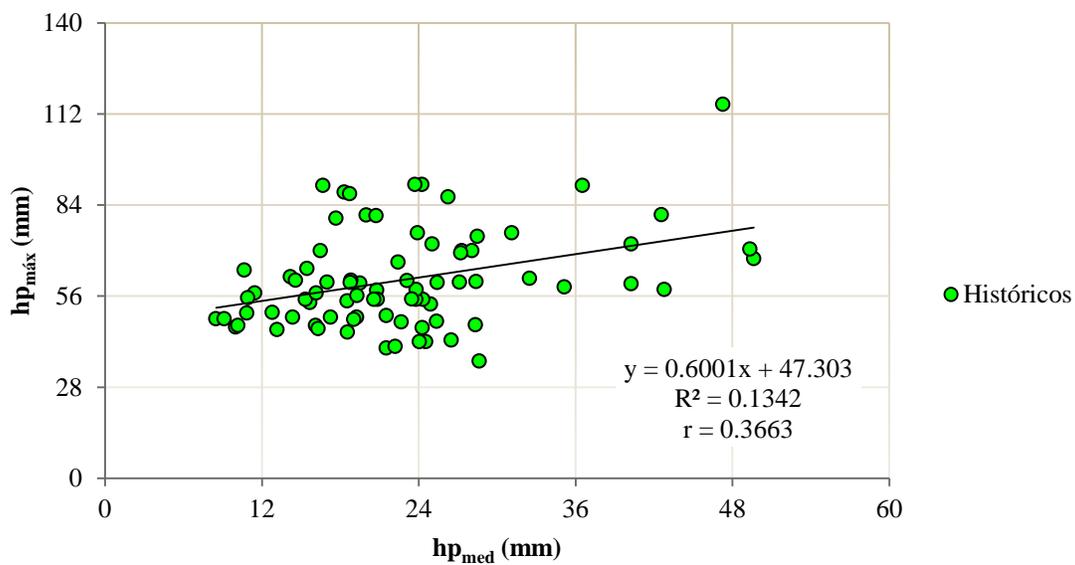


Figura 40. Relación entre la precipitación media y precipitación máxima de 80 datos históricos

Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm

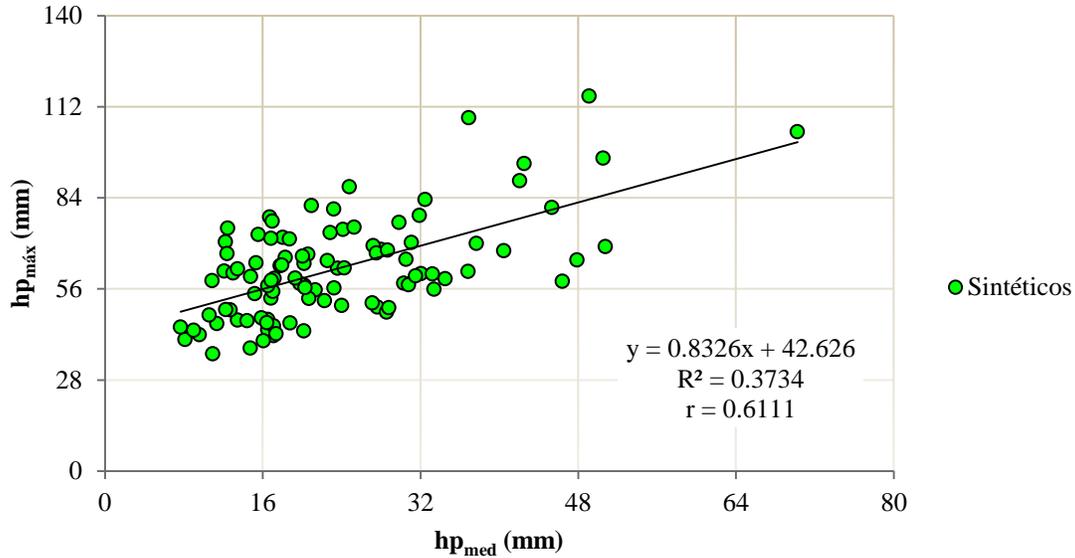


Figura 41. Relación entre la precipitación media y máxima datos sintéticos

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

Como suceso iterativo, el análisis muestra que la correlación tan pequeña que se observa en la Figura 40 se debe a que los valores medios están determinados en parte por el máximo.

Al relacionar la precipitación máxima anual de las tormentas históricas con su índice de extensión espacial, se obtiene la Figura 42 que muestra una tendencia a que la amplitud espacial de las tormentas, medida mediante el índice de extensión espacial, disminuya conforme la magnitud del valor máximo aumenta, es decir, que las tormentas con mayor precipitación máxima tienden a ser menos extensas.

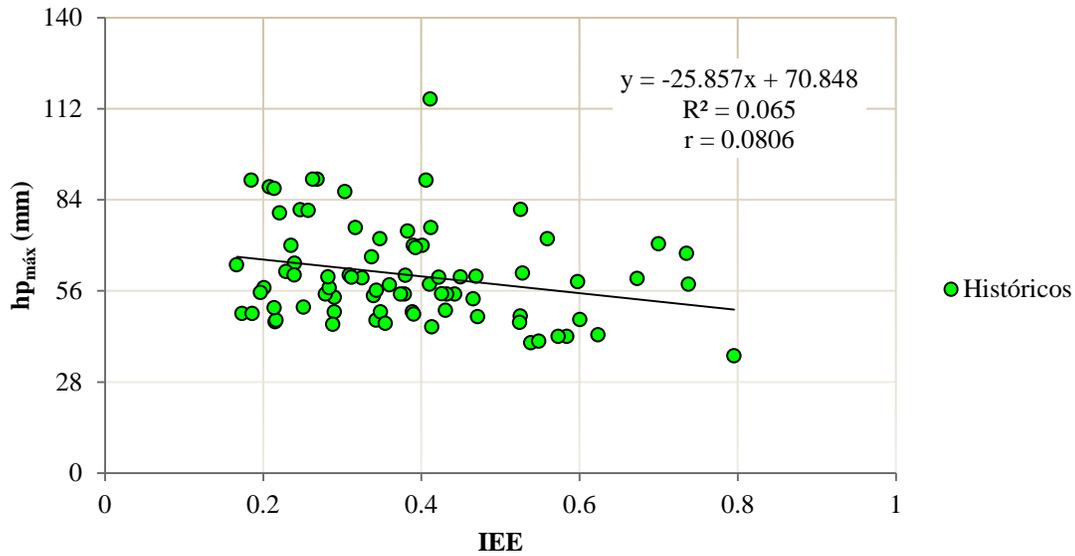


Figura 42. Relación entre el índice de la extensión espacial (IEE) y precipitación máxima datos históricos.

Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm

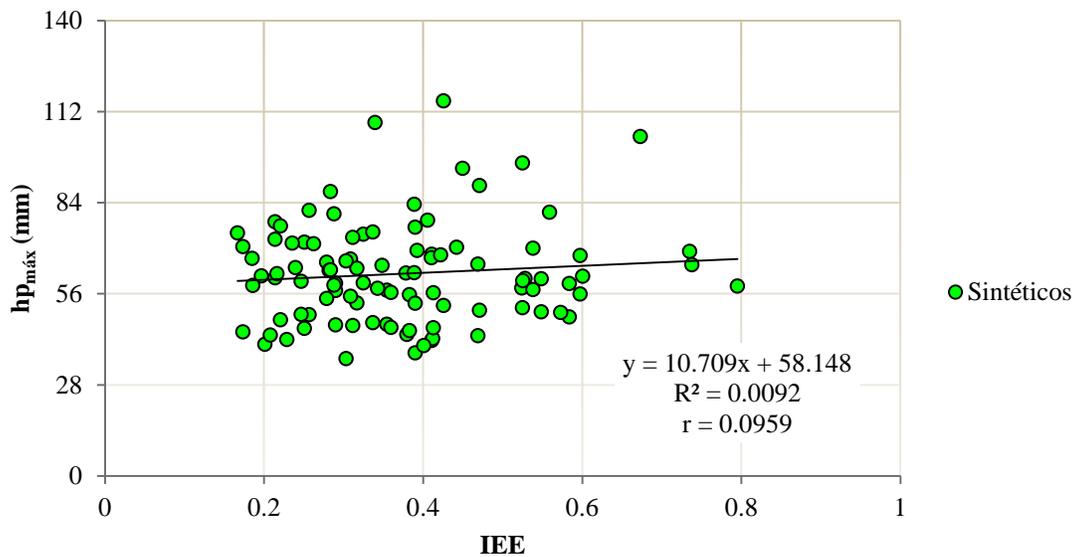


Figura 43. Relación entre el índice de la extensión espacial (IEE) y precipitación máxima datos sintéticos.

Primer procedimiento de generación, umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm

Una vez que se consiguen representar adecuadamente las funciones de distribución de los valores máximos y medios de las tormentas históricas, se prueba, si también se consiguen

representar adecuadamente, los parámetros estadísticos de las lluvias registradas en cada una de las estaciones climatológicas.

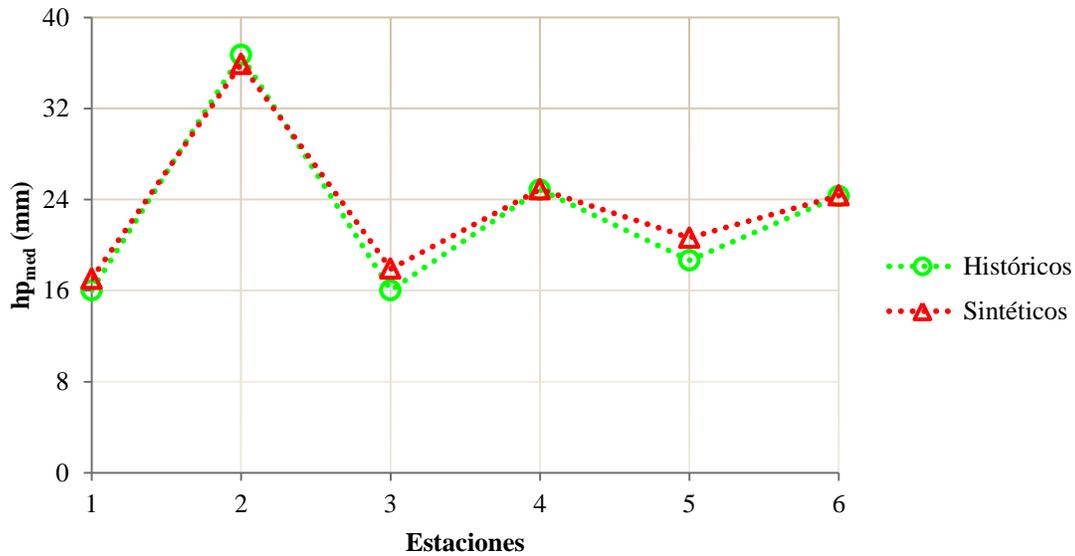


Figura 44. Comportamiento de la media para cada estación.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

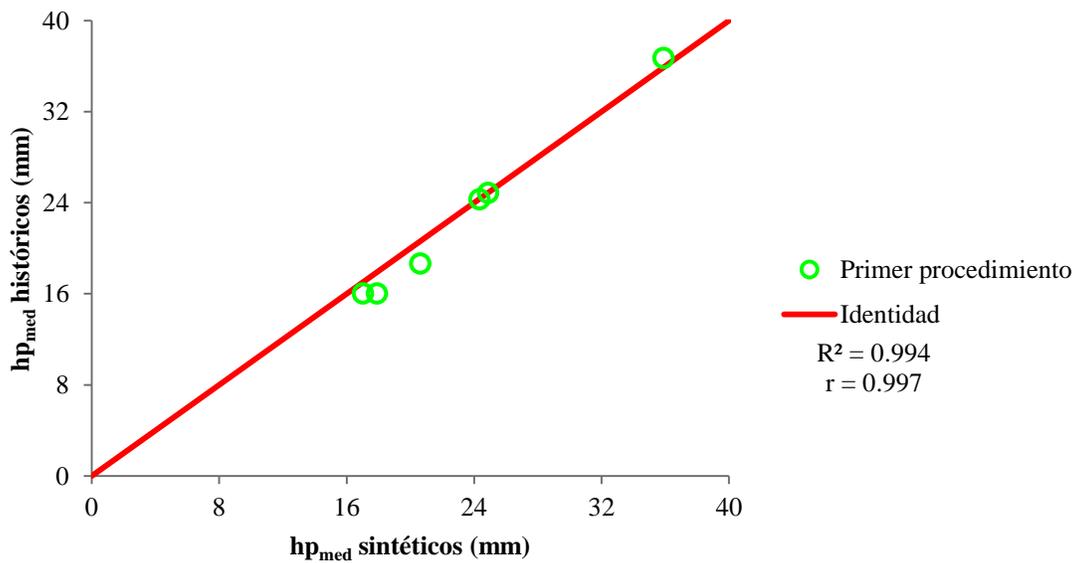


Figura 45. Comportamiento de la media para cada estación, identidad.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

Repitiendo, en la Figura 44 se exhibe la representación lograda de los valores medios estación por estación entre los históricos y los sintéticos, adicionalmente presenta que en las estaciones 1, 3 y 5, el valor medio de los datos generados sintéticamente es mayor al valor medio de los históricos empleados, sólo en la estación 2 es menor, y en las estaciones 4 y 6 son iguales, con esto finalmente se considera la representación de este parámetro estadístico adecuada.

De lo anterior, se decide construir la Figura 45, la cual presenta una función identidad y es quien indica el grado de representación que se logra entre los datos históricos y los datos sintéticos, considerándose nuevamente bien representados y se debe agregar que este grupo de umbrales mejora con respecto al grupo de umbrales anterior.

Así mismo, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos restantes, es decir, para la desviación estándar y para el coeficiente de asimetría.

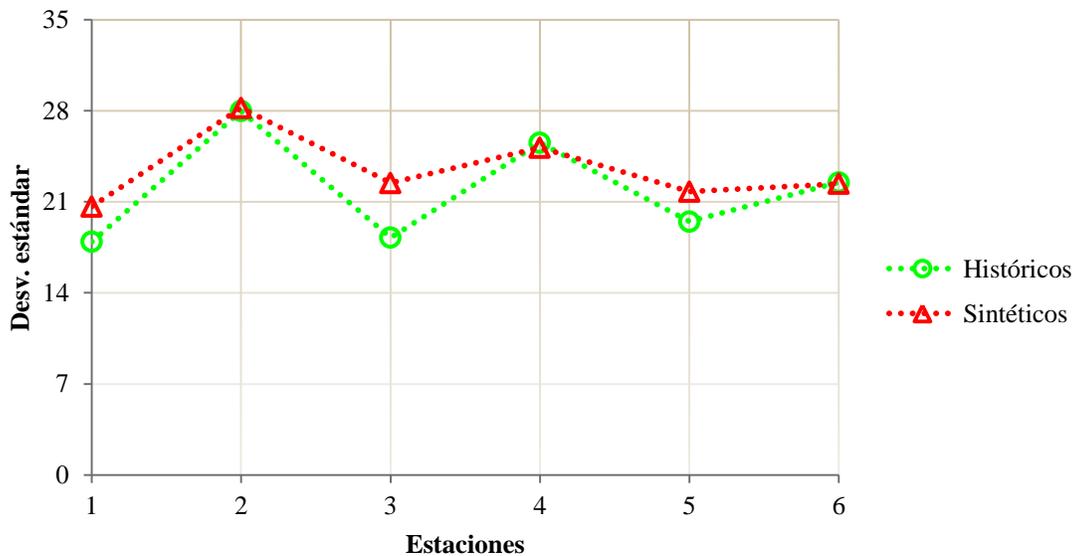


Figura 46. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

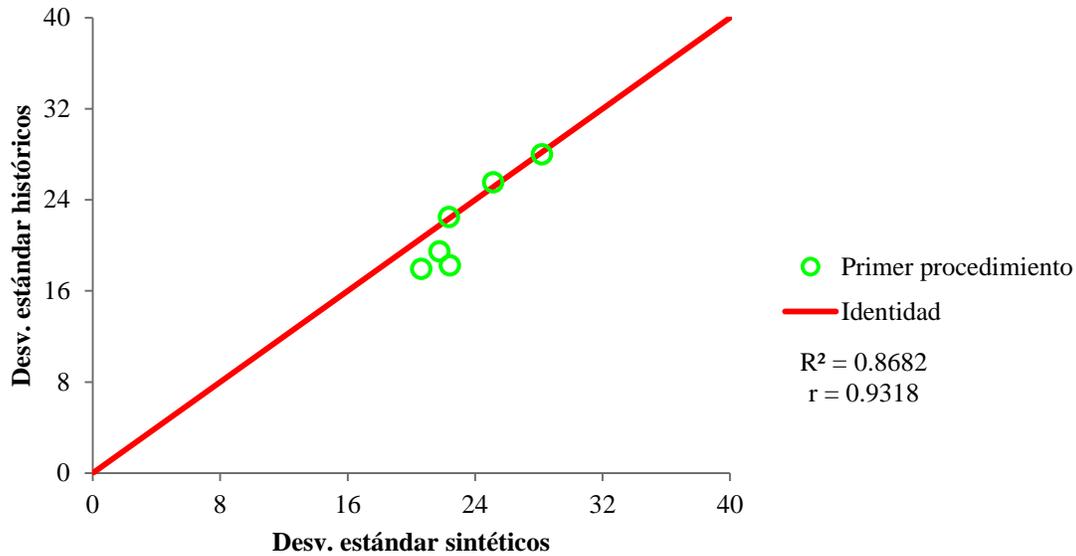


Figura 47. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación, identidad.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

Repitiendo los análisis, la Figura 46 presenta que en las estaciones 2, 4 y 6 el parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador, está por debajo de los históricos y en las estaciones 1, 3 y 5 está por encima de los históricos, pero se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 47 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que se acepta la representación de este estadístico con los valores generados con el modelo.

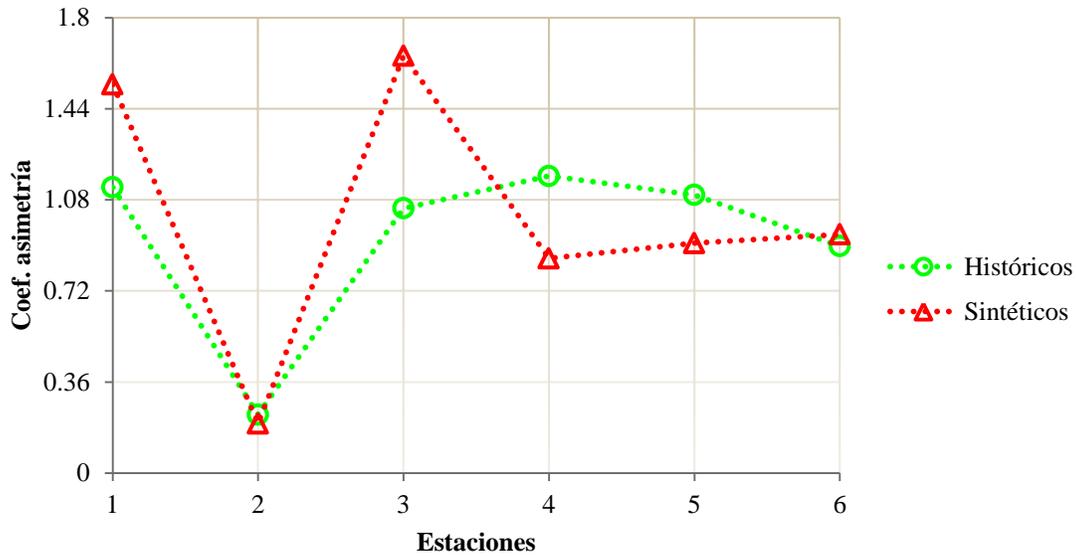


Figura 48. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

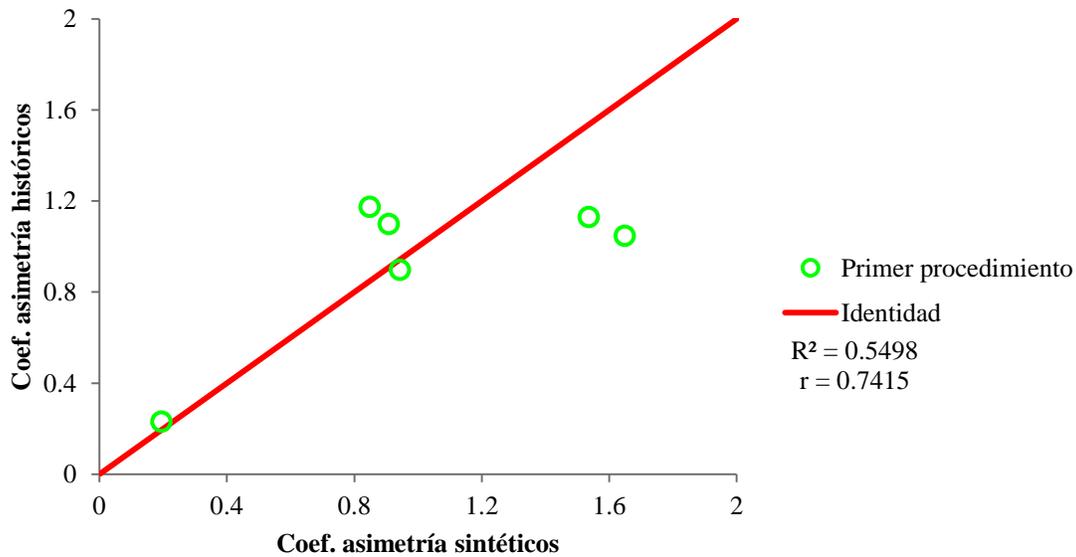


Figura 49. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación, identidad.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

Repitiendo los análisis, la Figura 48 presenta que en las estaciones 2, 4 y 5, el parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador, está por debajo de los históricos y en

las estaciones 1, 3 y 6 está por encima de los históricos, pero se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 49 presenta, como más de la mitad de los puntos no son cercanos a la función identidad, no se acepta del todo la representación de este estadístico con los valores generados con el modelo.

Con el fin de estimar la correlación entre los valores de los parámetros correspondientes a las tormentas históricas y los parámetros obtenidos de las tormentas sintéticas, se calcula el coeficiente de determinación para cada parámetro estadístico con la Ecuación 3, los coeficientes de determinación obtenidos para este caso son:

| | Var_i | Var_e | C_{det} |
|-----------------|---------|---------|-----------|
| Media | 61.763 | 1.249 | 0.9798 |
| Desv. estándar | 17.127 | 3.427 | 0.7999 |
| Coef. asimetría | 0.126 | 0.126 | -0.0010 |

4.5. Segundo procedimiento de generación de tormentas sintéticas

Con la finalidad lograr mejores resultados se propone un segundo procedimiento de generación en el que las tormentas históricas se clasificaron en 2 grupos prácticamente del mismo tamaño.

4.5.1. Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm

Las tormentas históricas se ordenaron de mayor a menor de acuerdo con su precipitación máxima, y se dividieron en dos grupos, las primeras 14 formaron el grupo de tormentas grandes mayores a 75 mm y las 16 restantes formaron el grupo de tormentas pequeñas menores a 75 mm.

En el primero grupo se consideraron las 14 tormentas con mayor valor máximo y en el segundo grupo las restantes 16 tormentas. Al relacionar estos dos grupos por separado con los valores correspondientes del índice de extensión espacial se obtiene la Figura 50 y la Figura 51, que muestran una menor correlación entre la precipitación máxima y el índice de extensión espacial, particularmente para el grupo de las tormentas con mayor precipitación máxima.

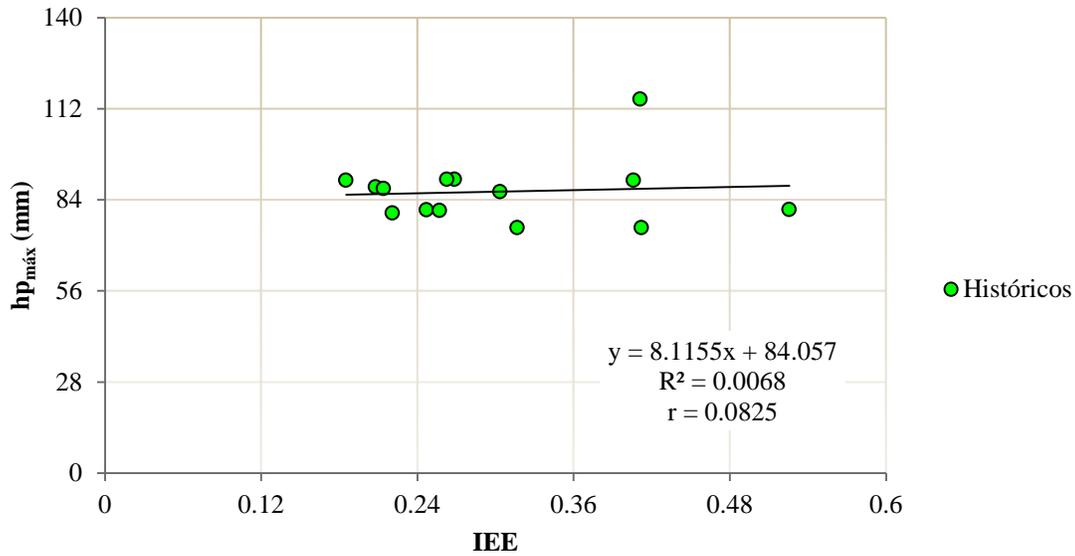


Figura 50. Relación entre el IEE y precipitación máxima primer grupo, datos históricos.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

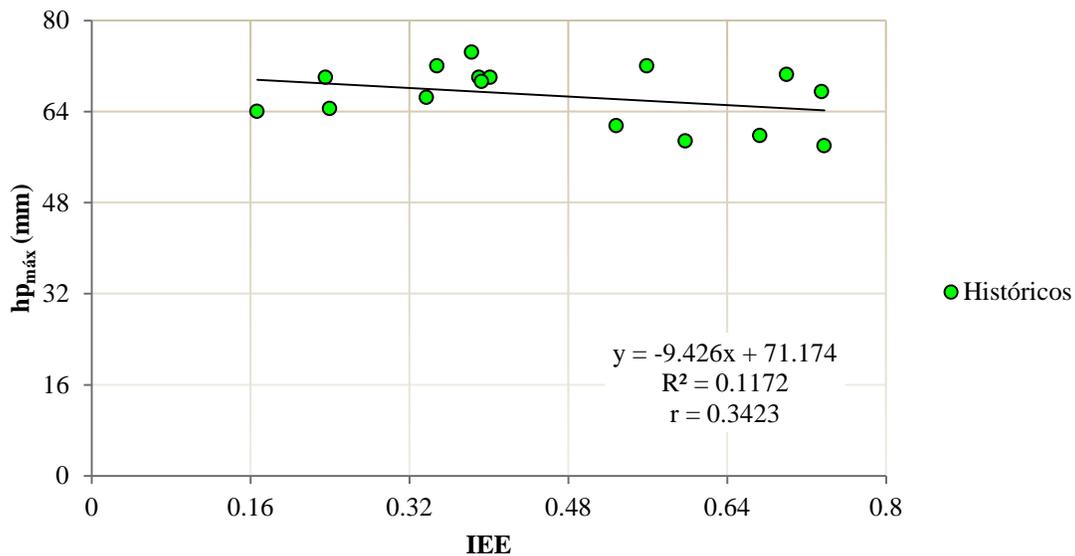


Figura 51. Relación entre el IEE y precipitación máxima segundo grupo, datos históricos.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

El procedimiento de generación de las tormentas sintéticas se modifica entonces, de tal manera que si el valor máximo generado, $PSMÁX_k$ obtenido en el paso 4 de la metodología es mayor o igual que el umbral correspondiente a las 14 primeras tormentas de los máximos históricos, se selecciona aleatoriamente una de las tormentas del primer grupo (tormentas

con valor máximo grande) y en caso contrario, se selecciona una tormenta del segundo grupo (tormentas cuyo valor máximo es chico).

Se generaron 100 números aleatorios con distribución uniforme [0,1] que se tomaron como el valor de la probabilidad de no excedencia de la función de distribución Gumbel de ajuste de los datos históricos Ecuación 5 y con ella se generaron 100 datos de la precipitación máxima sintética $PSMÁX_k$; $k = 1,2,\dots, 100$.

Para la selección de las tormentas que deberían escalarse, se consideró que si la precipitación máxima sintética $PSMÁX_k$ era mayor o igual que la el umbral correspondiente a las 14 primeras tormentas de los máximos históricos, se seleccionaba aleatoriamente una tormenta del grupo de las tormentas grandes y en caso contrario, del grupo de las tormentas chicas. Al igual que en el primer procedimiento de generación la tormenta seleccionada se escaló multiplicando el valor medido en cada estación por la relación entre el valor máximo generado y el valor máximo correspondiente a la tormenta histórica seleccionada Ecuación 1.

| U_k | $F(p_m)$ | Tormenta histórica seleccionada |
|-------|----------|---------------------------------|
| 0.475 | 73.252 | 29 |
| 0.172 | 64.849 | 22 |
| 0.382 | 70.732 | 16 |
| 0.471 | 73.141 | 15 |
| 0.339 | 69.597 | 24 |
| 0.087 | 61.634 | 22 |
| 0.347 | 69.812 | 21 |
| 0.018 | 56.856 | 27 |
| 0.937 | 97.048 | 10 |
| 0.001 | 51.716 | 22 |
| 0.578 | 76.233 | 4 |
| 0.300 | 68.561 | 30 |
| 0.535 | 74.953 | 27 |
| 0.916 | 94.084 | 7 |
| 0.809 | 85.504 | 3 |
| 0.848 | 87.932 | 11 |
| 0.133 | 63.530 | 28 |
| 0.830 | 86.784 | 6 |
| 0.040 | 58.943 | 15 |
| 0.129 | 63.382 | 30 |
| 0.997 | 127.443 | 8 |
| 0.745 | 82.295 | 6 |

| | | |
|-------|---------|----|
| 0.005 | 54.166 | 20 |
| 0.411 | 71.516 | 17 |
| 0.595 | 76.773 | 9 |
| 0.659 | 78.916 | 6 |
| 0.236 | 66.785 | 18 |
| 0.958 | 101.205 | 14 |
| 0.193 | 65.521 | 26 |
| 0.574 | 76.109 | 6 |
| 0.467 | 73.030 | 16 |
| 0.240 | 66.900 | 17 |
| 0.792 | 84.555 | 12 |
| 0.488 | 73.621 | 20 |
| 0.432 | 72.088 | 21 |
| 0.788 | 84.344 | 13 |
| 0.390 | 70.947 | 29 |
| 0.403 | 71.300 | 20 |
| 0.663 | 79.061 | 5 |
| 0.069 | 60.783 | 16 |
| 0.253 | 67.276 | 24 |
| 0.318 | 69.027 | 20 |
| 0.894 | 91.766 | 3 |
| 0.617 | 77.460 | 13 |
| 0.852 | 88.217 | 10 |
| 0.232 | 66.669 | 20 |
| 0.125 | 63.231 | 16 |
| 0.898 | 92.168 | 2 |
| 0.450 | 72.557 | 27 |
| 0.147 | 64.001 | 20 |
| 0.091 | 61.818 | 20 |
| 0.446 | 72.447 | 28 |
| 0.048 | 59.520 | 28 |
| 0.061 | 60.339 | 19 |
| 0.322 | 69.135 | 18 |
| 0.727 | 81.545 | 1 |
| 0.912 | 93.605 | 8 |
| 0.976 | 106.553 | 5 |
| 0.553 | 75.464 | 2 |
| 0.275 | 67.869 | 28 |
| 0.510 | 74.222 | 24 |
| 0.890 | 91.377 | 4 |
| 0.783 | 84.135 | 1 |
| 0.557 | 75.584 | 1 |
| 0.108 | 62.556 | 26 |

| | | |
|-------|---------|----|
| 0.805 | 85.276 | 4 |
| 0.749 | 82.476 | 5 |
| 0.104 | 62.390 | 28 |
| 0.706 | 80.671 | 12 |
| 0.454 | 72.667 | 25 |
| 0.980 | 108.355 | 3 |
| 0.386 | 70.839 | 15 |
| 0.304 | 68.670 | 29 |
| 0.368 | 70.380 | 25 |
| 0.211 | 66.044 | 16 |
| 0.933 | 96.419 | 12 |
| 0.168 | 64.718 | 24 |
| 0.283 | 68.091 | 25 |
| 0.176 | 64.979 | 20 |
| 0.215 | 66.164 | 30 |
| 0.766 | 83.280 | 10 |
| 0.197 | 65.644 | 24 |
| 0.407 | 71.408 | 19 |
| 0.762 | 83.088 | 11 |
| 0.364 | 70.272 | 27 |
| 0.112 | 62.719 | 24 |
| 0.638 | 78.173 | 3 |
| 0.044 | 59.241 | 30 |
| 0.962 | 102.225 | 12 |
| 0.027 | 57.788 | 24 |
| 0.869 | 89.524 | 1 |
| 0.326 | 69.243 | 17 |
| 0.826 | 86.531 | 8 |
| 0.941 | 97.717 | 9 |
| 0.834 | 87.042 | 5 |
| 0.873 | 89.852 | 13 |
| 0.424 | 71.871 | 24 |
| 0.856 | 88.509 | 9 |
| 0.065 | 60.565 | 18 |
| 0.155 | 64.278 | 16 |

| Fecha | Est1 | Est2 | Est3 | Est4 | Est5 | Est6 |
|------------|------|-------|------|-------|------|------|
| 30/05/2006 | 6.2 | 65.5 | 73.3 | 49.2 | 50.5 | 18.1 |
| 19/07/2006 | 9.4 | 10.8 | 0.0 | 64.8 | 56.6 | 11.2 |
| 29/08/2003 | 10.8 | 70.7 | 23.8 | 18.7 | 9.8 | 13.8 |
| 11/09/2006 | 19.7 | 73.1 | 11.3 | 40.3 | 19.7 | 3.9 |
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 16.7 | 69.6 | 41.9 | 12.6 |
| 19/07/2006 | 8.9 | 10.2 | 0.0 | 61.6 | 53.8 | 10.7 |
| 05/07/2003 | 0.0 | 69.8 | 1.7 | 0.7 | 10.0 | 16.5 |
| 16/09/2003 | 33.7 | 28.7 | 8.4 | 22.2 | 30.3 | 56.9 |
| 26/07/2003 | 0.0 | 97.0 | 0.0 | 0.0 | 12.6 | 34.2 |
| 19/07/2006 | 7.5 | 8.6 | 0.0 | 51.7 | 45.1 | 9.0 |
| 28/06/2003 | 0.0 | 76.2 | 0.0 | 0.0 | 8.5 | 0.0 |
| 29/05/1986 | 68.6 | 35.5 | 45.6 | 42.8 | 50.8 | 60.3 |
| 16/09/2003 | 44.5 | 37.8 | 11.1 | 29.3 | 40.0 | 75.0 |
| 01/06/2006 | 0.0 | 2.5 | 2.2 | 94.1 | 22.0 | 0.0 |
| 19/08/2003 | 4.7 | 85.5 | 0.0 | 2.8 | 9.5 | 32.2 |
| 04/09/2003 | 20.4 | 87.9 | 0.0 | 0.0 | 27.2 | 0.0 |
| 07/06/2006 | 49.9 | 63.5 | 18.4 | 46.1 | 42.5 | 36.1 |
| 13/05/2006 | 0.0 | 21.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 86.8 |
| 11/09/2006 | 15.8 | 58.9 | 9.1 | 32.5 | 15.8 | 3.2 |
| 29/05/1986 | 63.4 | 32.8 | 42.2 | 39.6 | 47.0 | 55.7 |
| 28/08/1986 | 0.0 | 67.8 | 14.0 | 127.4 | 18.4 | 4.4 |
| 13/05/2006 | 0.0 | 20.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 82.3 |
| 17/06/1991 | 32.5 | 3.9 | 1.5 | 5.8 | 54.2 | 32.5 |
| 06/10/2003 | 53.6 | 71.5 | 39.4 | 15.9 | 41.0 | 18.5 |
| 25/06/2003 | 20.1 | 36.0 | 20.7 | 18.0 | 76.8 | 70.6 |
| 13/05/2006 | 0.0 | 19.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 78.9 |
| 05/10/2003 | 57.8 | 39.8 | 54.6 | 61.6 | 0.0 | 66.8 |
| 28/05/2006 | 9.4 | 101.2 | 62.3 | 5.4 | 14.1 | 0.0 |
| 06/06/1986 | 0.0 | 65.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 13/05/2006 | 0.0 | 18.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 76.1 |
| 29/08/2003 | 11.2 | 73.0 | 24.5 | 19.3 | 10.1 | 14.2 |
| 06/10/2003 | 50.2 | 66.9 | 36.9 | 14.9 | 38.4 | 17.3 |
| 27/09/1986 | 4.7 | 0.0 | 0.5 | 1.1 | 21.2 | 84.6 |
| 17/06/1991 | 44.2 | 5.3 | 2.1 | 7.9 | 73.6 | 44.2 |
| 05/07/2003 | 0.0 | 72.1 | 1.8 | 0.7 | 10.3 | 17.0 |
| 18/06/2003 | 44.7 | 29.0 | 19.4 | 19.3 | 11.7 | 84.3 |
| 30/05/2006 | 6.0 | 63.5 | 70.9 | 47.7 | 48.9 | 17.5 |
| 17/06/1991 | 42.8 | 5.1 | 2.0 | 7.6 | 71.3 | 42.8 |
| 06/07/2003 | 42.5 | 79.1 | 12.2 | 8.3 | 17.1 | 33.4 |
| 29/08/2003 | 9.3 | 60.8 | 20.4 | 16.0 | 8.4 | 11.8 |

| | | | | | | |
|------------|------|-------|------|------|------|------|
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 16.2 | 67.3 | 40.5 | 12.1 |
| 17/06/1991 | 41.4 | 4.9 | 2.0 | 7.4 | 69.0 | 41.4 |
| 19/08/2003 | 5.1 | 91.8 | 0.0 | 3.0 | 10.2 | 34.6 |
| 18/06/2003 | 41.0 | 26.7 | 17.9 | 17.7 | 10.8 | 77.5 |
| 26/07/2003 | 0.0 | 88.2 | 0.0 | 0.0 | 11.4 | 31.1 |
| 17/06/1991 | 40.0 | 4.8 | 1.9 | 7.1 | 66.7 | 40.0 |
| 29/08/2003 | 9.7 | 63.2 | 21.3 | 16.7 | 8.8 | 12.3 |
| 07/08/2003 | 0.2 | 92.2 | 1.5 | 8.7 | 20.4 | 25.5 |
| 16/09/2003 | 43.1 | 36.6 | 10.7 | 28.3 | 38.7 | 72.6 |
| 17/06/1991 | 38.4 | 4.6 | 1.8 | 6.9 | 64.0 | 38.4 |
| 17/06/1991 | 37.1 | 4.4 | 1.8 | 6.6 | 61.8 | 37.1 |
| 07/06/2006 | 56.9 | 72.4 | 21.0 | 52.6 | 48.5 | 41.2 |
| 07/06/2006 | 46.8 | 59.5 | 17.2 | 43.2 | 39.8 | 33.8 |
| 08/06/1991 | 31.0 | 0.0 | 15.3 | 60.3 | 3.4 | 31.0 |
| 05/10/2003 | 59.8 | 41.2 | 56.5 | 63.7 | 0.0 | 69.1 |
| 30/08/2003 | 5.9 | 64.0 | 21.4 | 81.5 | 28.4 | 0.0 |
| 28/08/1986 | 0.0 | 49.8 | 10.3 | 93.6 | 13.5 | 3.2 |
| 06/07/2003 | 57.3 | 106.6 | 16.5 | 11.1 | 23.1 | 45.0 |
| 07/08/2003 | 0.2 | 75.5 | 1.3 | 7.1 | 16.7 | 20.9 |
| 07/06/2006 | 53.3 | 67.9 | 19.6 | 49.3 | 45.4 | 38.6 |
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 17.9 | 74.2 | 44.6 | 13.4 |
| 28/06/2003 | 0.0 | 91.4 | 0.0 | 0.0 | 10.2 | 0.0 |
| 30/08/2003 | 6.1 | 66.0 | 22.1 | 84.1 | 29.3 | 0.0 |
| 30/08/2003 | 5.5 | 59.3 | 19.8 | 75.6 | 26.3 | 0.0 |
| 06/06/1986 | 0.0 | 62.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 28/06/2003 | 0.0 | 85.3 | 0.0 | 0.0 | 9.5 | 0.0 |
| 06/07/2003 | 44.4 | 82.5 | 12.7 | 8.6 | 17.9 | 34.8 |
| 07/06/2006 | 49.0 | 62.4 | 18.0 | 45.3 | 41.7 | 35.5 |
| 27/09/1986 | 4.4 | 0.0 | 0.5 | 1.0 | 20.3 | 80.7 |
| 06/06/2003 | 72.7 | 6.4 | 23.9 | 1.6 | 0.0 | 0.0 |
| 19/08/2003 | 6.0 | 108.4 | 0.0 | 3.6 | 12.0 | 40.8 |
| 11/09/2006 | 19.0 | 70.8 | 10.9 | 39.0 | 19.0 | 3.8 |
| 30/05/2006 | 5.8 | 61.4 | 68.7 | 46.1 | 47.3 | 16.9 |
| 06/06/2003 | 70.4 | 6.2 | 23.1 | 1.5 | 0.0 | 0.0 |
| 29/08/2003 | 10.1 | 66.0 | 22.2 | 17.4 | 9.2 | 12.8 |
| 27/09/1986 | 5.3 | 0.0 | 0.6 | 1.2 | 24.2 | 96.4 |
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 15.6 | 64.7 | 38.9 | 11.7 |
| 06/06/2003 | 68.1 | 6.0 | 22.4 | 1.5 | 0.0 | 0.0 |
| 17/06/1991 | 39.0 | 4.6 | 1.9 | 7.0 | 65.0 | 39.0 |
| 29/05/1986 | 66.2 | 34.2 | 44.0 | 41.3 | 49.1 | 58.2 |
| 26/07/2003 | 0.0 | 83.3 | 0.0 | 0.0 | 10.8 | 29.3 |
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 15.8 | 65.6 | 39.5 | 11.8 |
| 08/06/1991 | 36.7 | 0.0 | 18.2 | 71.4 | 4.1 | 36.7 |

| | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|-------|
| 04/09/2003 | 19.3 | 83.1 | 0.0 | 0.0 | 25.7 | 0.0 |
| 16/09/2003 | 41.7 | 35.4 | 10.4 | 27.4 | 37.5 | 70.3 |
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 15.1 | 62.7 | 37.7 | 11.3 |
| 19/08/2003 | 4.3 | 78.2 | 0.0 | 2.6 | 8.7 | 29.4 |
| 29/05/1986 | 59.2 | 30.6 | 39.4 | 37.0 | 43.9 | 52.1 |
| 27/09/1986 | 5.6 | 0.0 | 0.6 | 1.3 | 25.7 | 102.2 |
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 13.9 | 57.8 | 34.8 | 10.4 |
| 30/08/2003 | 6.5 | 70.2 | 23.5 | 89.5 | 31.1 | 0.0 |
| 06/10/2003 | 51.9 | 69.2 | 38.2 | 15.4 | 39.7 | 17.9 |
| 28/08/1986 | 0.0 | 46.0 | 9.5 | 86.5 | 12.5 | 3.0 |
| 25/06/2003 | 25.6 | 45.8 | 26.3 | 22.9 | 97.7 | 89.9 |
| 06/07/2003 | 46.8 | 87.0 | 13.4 | 9.1 | 18.9 | 36.8 |
| 18/06/2003 | 47.6 | 30.9 | 20.7 | 20.6 | 12.5 | 89.9 |
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 17.3 | 71.9 | 43.2 | 13.0 |
| 25/06/2003 | 23.2 | 41.5 | 23.8 | 20.8 | 88.5 | 81.4 |
| 05/10/2003 | 52.4 | 36.1 | 49.5 | 55.8 | 0.0 | 60.6 |
| 29/08/2003 | 9.8 | 64.3 | 21.6 | 17.0 | 8.9 | 12.5 |

En la Figura 52 se presenta un ejemplo del escalamiento de una tormenta generada con el segundo procedimiento, para la cual el máximo sintético obtenido fue de 56.9 mm y la fecha de la tormenta histórica seleccionada 16/09/2003 en este caso la misma tormenta utilizada en el primer procedimiento, cuyo máximo registrado fue de 61.5 mm, este ejemplo de escalamiento presenta la mejora en la generación de tormentas con el segundo procedimiento del modelo generador.

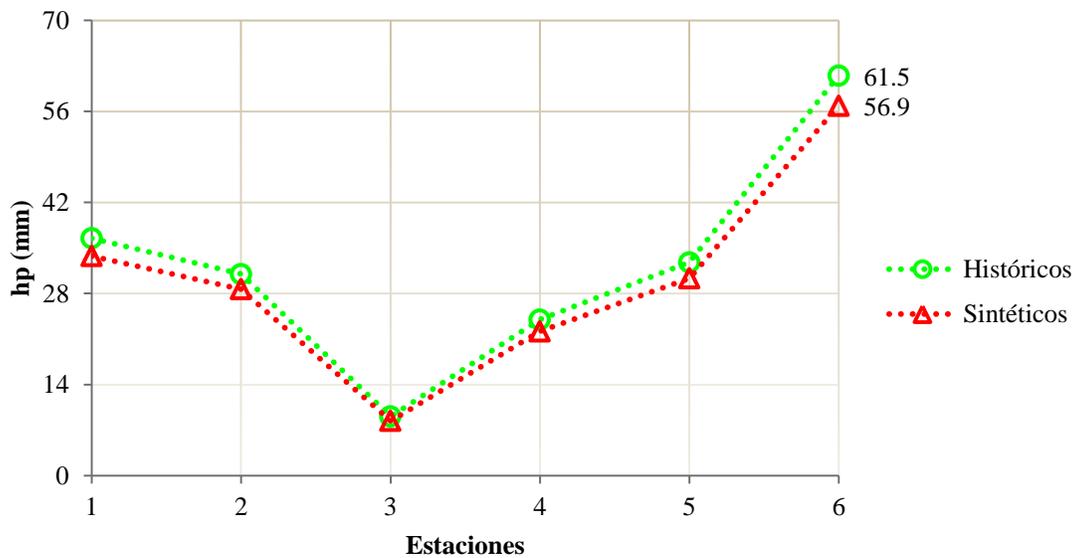


Figura 52. Ejemplo de escalamiento de una tormenta.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

4.5.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

Las tormentas históricas se ordenaron de mayor a menor de acuerdo con su precipitación máxima, y se dividieron en dos grupos, las primeras 30 formaron el grupo de tormentas grandes mayores a 70 mm y las 28 restantes formaron el grupo de tormentas pequeñas menores a 70 mm.

En el primero grupo se consideraron las 30 tormentas con mayor valor máximo y en el segundo grupo las restantes 28 tormentas. Al relacionar estos dos grupos por separado con los valores correspondientes del índice de extensión espacial se obtiene la Figura 53 y la Figura 54, que muestran una menor correlación entre la precipitación máxima y el índice de extensión espacial, particularmente para el grupo de las tormentas con mayor precipitación máxima.

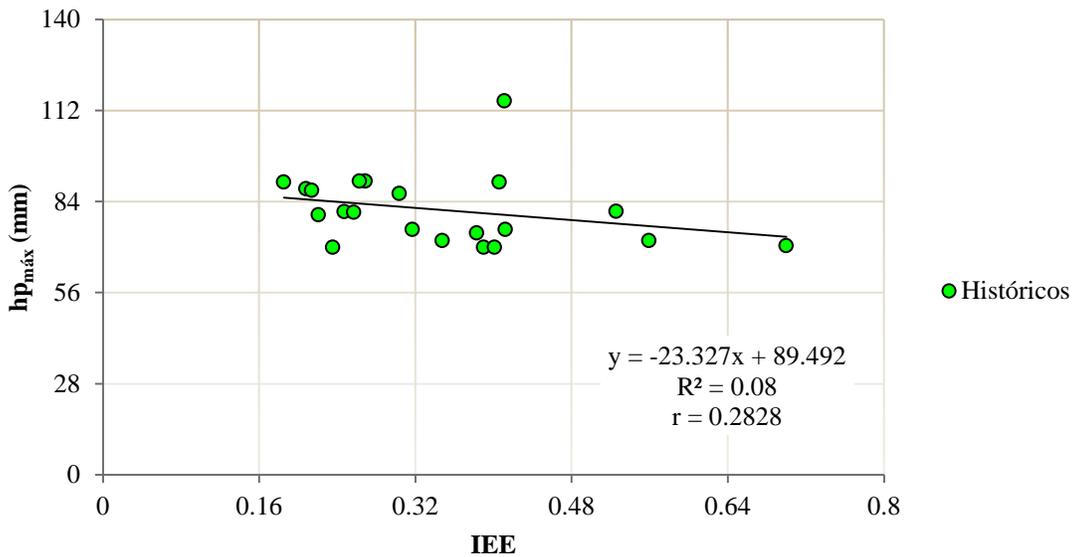


Figura 53. Relación entre el IEE y precipitación máxima primer grupo, datos históricos.

Segundo procedimiento de generación, *umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm*

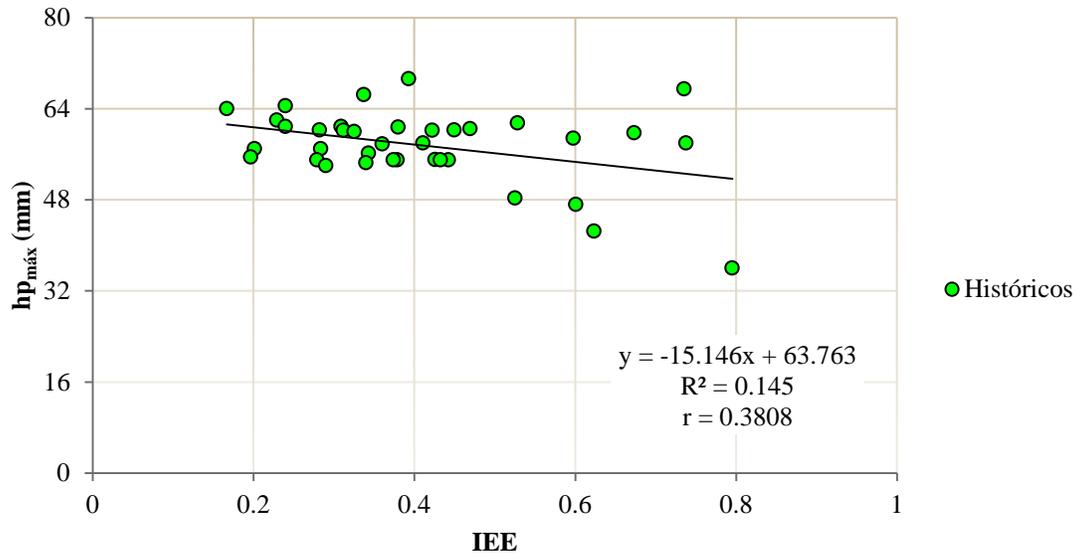


Figura 54. Relación entre el IEE y precipitación máxima segundo grupo, datos históricos.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

El procedimiento de generación de las tormentas sintéticas se modifica entonces, de tal manera que si el valor máximo generado, $PSMÁX_k$ obtenido en el paso 4 de la metodología es mayor o igual que el umbral correspondiente a las 30 primeras tormentas de los máximos históricos, se selecciona aleatoriamente una de las tormentas del primer grupo (tormentas con valor máximo grande) y en caso contrario, se selecciona una tormenta del segundo grupo (tormentas cuyo valor máximo es chico).

Se generaron 100 números aleatorios con distribución uniforme [0,1] que se tomaron como el valor de la probabilidad de no excedencia de la función de distribución Gumbel de ajuste de los datos históricos Ecuación 6 y con ella se generaron 100 datos de la precipitación máxima sintética $PSMÁX_k$; $k = 1, 2, \dots, 100$.

Para la selección de las tormentas que deberían escalarse, se consideró que si la precipitación máxima sintética $PSMÁX_k$ era mayor o igual que la el umbral correspondiente a las 30 primeras tormentas de los máximos históricos, se seleccionaba aleatoriamente una tormenta del grupo de las tormentas grandes y en caso contrario, del grupo de las tormentas chicas. Al igual que en el primer procedimiento de generación la tormenta seleccionada se escaló multiplicando el valor medido en cada estación por la relación entre el valor máximo generado y el valor máximo correspondiente a la tormenta histórica seleccionada Ecuación 1.

| U_k | $F(p_m)$ | Tormenta histórica seleccionada |
|-------|----------|---------------------------------|
| 0.424 | 61.522 | 58 |
| 0.121 | 51.559 | 48 |
| 0.330 | 58.703 | 40 |
| 0.420 | 61.399 | 38 |
| 0.288 | 57.401 | 51 |
| 0.035 | 46.494 | 48 |
| 0.296 | 57.649 | 46 |
| 0.967 | 97.428 | 19 |
| 0.886 | 83.153 | 17 |
| 0.950 | 92.640 | 12 |
| 0.527 | 64.745 | 44 |
| 0.249 | 56.188 | 37 |
| 0.484 | 63.375 | 55 |
| 0.864 | 81.125 | 11 |
| 0.758 | 73.999 | 6 |
| 0.796 | 76.184 | 18 |
| 0.082 | 49.706 | 57 |
| 0.779 | 75.165 | 11 |
| 0.989 | 109.209 | 3 |
| 0.078 | 49.485 | 37 |
| 0.946 | 91.758 | 14 |
| 0.694 | 70.943 | 11 |
| 0.954 | 93.594 | 9 |
| 0.360 | 59.590 | 41 |
| 0.544 | 65.317 | 52 |
| 0.608 | 67.550 | 46 |
| 0.185 | 54.045 | 43 |
| 0.907 | 85.571 | 1 |
| 0.142 | 52.446 | 54 |
| 0.523 | 64.612 | 46 |
| 0.416 | 61.276 | 40 |
| 0.189 | 54.187 | 40 |
| 0.740 | 73.114 | 19 |
| 0.437 | 61.926 | 46 |
| 0.381 | 60.232 | 47 |
| 0.736 | 72.915 | 21 |
| 0.338 | 58.947 | 58 |
| 0.352 | 59.346 | 46 |
| 0.612 | 67.698 | 44 |
| 0.018 | 44.467 | 40 |

| | | |
|-------|---------|----|
| 0.202 | 54.647 | 51 |
| 0.266 | 56.736 | 45 |
| 0.843 | 79.373 | 6 |
| 0.565 | 66.039 | 58 |
| 0.800 | 76.433 | 16 |
| 0.181 | 53.901 | 45 |
| 0.074 | 49.256 | 39 |
| 0.847 | 79.687 | 4 |
| 0.399 | 60.753 | 55 |
| 0.095 | 50.389 | 45 |
| 0.039 | 46.858 | 46 |
| 0.394 | 60.631 | 57 |
| 0.997 | 122.894 | 20 |
| 0.010 | 42.939 | 44 |
| 0.270 | 56.863 | 43 |
| 0.676 | 70.204 | 3 |
| 0.860 | 80.775 | 13 |
| 0.924 | 87.957 | 8 |
| 0.501 | 63.923 | 40 |
| 0.224 | 55.364 | 57 |
| 0.459 | 62.582 | 52 |
| 0.839 | 79.065 | 8 |
| 0.732 | 72.717 | 3 |
| 0.505 | 64.053 | 38 |
| 0.057 | 48.179 | 54 |
| 0.754 | 73.787 | 8 |
| 0.698 | 71.120 | 9 |
| 0.053 | 47.898 | 56 |
| 0.655 | 69.333 | 56 |
| 0.403 | 60.875 | 53 |
| 0.929 | 88.589 | 6 |
| 0.334 | 58.825 | 37 |
| 0.253 | 56.317 | 58 |
| 0.317 | 58.301 | 52 |
| 0.159 | 53.117 | 39 |
| 0.882 | 82.743 | 19 |
| 0.117 | 51.383 | 51 |
| 0.232 | 55.630 | 52 |
| 0.125 | 51.733 | 46 |
| 0.164 | 53.269 | 37 |
| 0.715 | 71.900 | 16 |
| 0.146 | 52.606 | 52 |
| 0.356 | 59.468 | 43 |

| | | |
|-------|---------|----|
| 0.711 | 71.714 | 18 |
| 0.313 | 58.178 | 55 |
| 0.061 | 48.448 | 51 |
| 0.587 | 66.783 | 41 |
| 0.993 | 114.069 | 1 |
| 0.911 | 86.088 | 20 |
| 0.975 | 100.607 | 15 |
| 0.818 | 77.550 | 3 |
| 0.274 | 56.989 | 41 |
| 0.775 | 74.937 | 13 |
| 0.890 | 83.576 | 15 |
| 0.783 | 75.397 | 9 |
| 0.822 | 77.824 | 1 |
| 0.373 | 59.988 | 51 |
| 0.804 | 76.686 | 14 |
| 0.014 | 43.789 | 42 |
| 0.103 | 50.779 | 40 |

| Fecha | Est1 | Est2 | Est3 | Est4 | Est5 | Est6 |
|------------|------|-------|------|------|------|------|
| 06/07/1986 | 45.3 | 61.5 | 56.9 | 47.9 | 47.9 | 34.2 |
| 10/05/1991 | 51.6 | 2.8 | 0.0 | 2.2 | 9.0 | 51.6 |
| 29/05/1986 | 58.7 | 30.4 | 39.1 | 36.6 | 43.5 | 51.6 |
| 07/06/2006 | 48.3 | 61.4 | 17.8 | 44.6 | 41.1 | 34.9 |
| 07/07/1991 | 7.3 | 57.4 | 0.0 | 10.4 | 13.6 | 7.3 |
| 10/05/1991 | 46.5 | 2.5 | 0.0 | 2.0 | 8.1 | 46.5 |
| 18/09/2006 | 9.3 | 0.0 | 1.0 | 57.6 | 0.0 | 0.0 |
| 08/06/1991 | 50.1 | 0.0 | 24.8 | 97.4 | 5.6 | 50.1 |
| 06/10/2003 | 62.4 | 83.2 | 45.8 | 18.5 | 47.7 | 21.5 |
| 27/09/1986 | 5.1 | 0.0 | 0.6 | 1.2 | 23.3 | 92.6 |
| 17/09/1991 | 22.7 | 0.0 | 0.0 | 64.7 | 0.0 | 22.7 |
| 20/08/1986 | 0.0 | 14.5 | 0.0 | 0.0 | 38.9 | 56.2 |
| 08/06/2003 | 63.4 | 14.4 | 6.2 | 24.9 | 52.5 | 38.3 |
| 04/09/2003 | 18.8 | 81.1 | 0.0 | 0.0 | 25.1 | 0.0 |
| 13/05/2006 | 0.0 | 18.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 74.0 |
| 05/10/2003 | 65.9 | 45.4 | 62.2 | 70.2 | 0.0 | 76.2 |
| 01/07/1986 | 28.1 | 46.8 | 4.1 | 22.2 | 49.7 | 35.1 |
| 04/09/2003 | 17.4 | 75.2 | 0.0 | 0.0 | 23.3 | 0.0 |
| 19/08/2003 | 6.0 | 109.2 | 0.0 | 3.6 | 12.1 | 41.1 |
| 20/08/1986 | 0.0 | 12.8 | 0.0 | 0.0 | 34.2 | 49.5 |
| 28/05/2006 | 8.5 | 91.8 | 56.5 | 4.9 | 12.8 | 0.0 |
| 04/09/2003 | 16.4 | 70.9 | 0.0 | 0.0 | 22.0 | 0.0 |

| | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|-------|------|
| 25/06/2003 | 24.5 | 43.9 | 25.2 | 22.0 | 93.6 | 86.1 |
| 04/10/1991 | 6.2 | 32.9 | 59.6 | 30.8 | 11.2 | 6.2 |
| 02/09/1991 | 7.1 | 47.5 | 65.3 | 23.8 | 18.6 | 7.1 |
| 18/09/2006 | 11.0 | 0.0 | 1.2 | 67.5 | 0.0 | 0.0 |
| 01/10/1986 | 0.0 | 0.0 | 9.5 | 1.7 | 0.0 | 54.0 |
| 30/08/2003 | 6.2 | 67.1 | 22.5 | 85.6 | 29.8 | 0.0 |
| 05/05/1991 | 19.4 | 0.0 | 0.0 | 52.4 | 0.0 | 19.4 |
| 18/09/2006 | 10.5 | 0.0 | 1.2 | 64.6 | 0.0 | 0.0 |
| 29/05/1986 | 61.3 | 31.7 | 40.8 | 38.2 | 45.4 | 53.9 |
| 29/05/1986 | 54.2 | 28.0 | 36.1 | 33.8 | 40.2 | 47.6 |
| 08/06/1991 | 37.6 | 0.0 | 18.6 | 73.1 | 4.2 | 37.6 |
| 18/09/2006 | 10.0 | 0.0 | 1.1 | 61.9 | 0.0 | 0.0 |
| 06/09/2003 | 14.8 | 11.9 | 60.2 | 7.0 | 35.5 | 24.5 |
| 05/07/2003 | 0.0 | 72.9 | 1.8 | 0.7 | 10.4 | 17.2 |
| 06/07/1986 | 43.4 | 58.9 | 54.5 | 45.8 | 45.8 | 32.7 |
| 18/09/2006 | 9.6 | 0.0 | 1.1 | 59.3 | 0.0 | 0.0 |
| 17/09/1991 | 23.8 | 0.0 | 0.0 | 67.7 | 0.0 | 23.8 |
| 29/05/1986 | 44.5 | 23.0 | 29.6 | 27.8 | 33.0 | 39.1 |
| 07/07/1991 | 7.0 | 54.6 | 0.0 | 9.9 | 12.9 | 7.0 |
| 20/05/2006 | 0.0 | 56.7 | 0.0 | 12.1 | 10.6 | 37.4 |
| 13/05/2006 | 0.0 | 19.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 79.4 |
| 06/07/1986 | 48.6 | 66.0 | 61.1 | 51.4 | 51.4 | 36.7 |
| 29/08/2003 | 11.7 | 76.4 | 25.7 | 20.2 | 10.6 | 14.9 |
| 20/05/2006 | 0.0 | 53.9 | 0.0 | 11.5 | 10.1 | 35.5 |
| 30/05/2006 | 4.2 | 44.1 | 49.3 | 33.1 | 33.9 | 12.1 |
| 28/06/2003 | 0.0 | 79.7 | 0.0 | 0.0 | 8.9 | 0.0 |
| 08/06/2003 | 60.8 | 13.8 | 5.9 | 23.9 | 50.3 | 36.7 |
| 20/05/2006 | 0.0 | 50.4 | 0.0 | 10.8 | 9.4 | 33.2 |
| 18/09/2006 | 7.6 | 0.0 | 0.8 | 46.9 | 0.0 | 0.0 |
| 01/07/1986 | 34.2 | 57.1 | 5.0 | 27.1 | 60.6 | 42.8 |
| 17/06/1991 | 73.7 | 8.8 | 3.5 | 13.2 | 122.9 | 73.7 |
| 17/09/1991 | 15.1 | 0.0 | 0.0 | 42.9 | 0.0 | 15.1 |
| 01/10/1986 | 0.0 | 0.0 | 10.0 | 1.8 | 0.0 | 56.9 |
| 19/08/2003 | 3.9 | 70.2 | 0.0 | 2.3 | 7.8 | 26.4 |
| 18/06/2003 | 42.8 | 27.8 | 18.6 | 18.5 | 11.2 | 80.8 |
| 28/08/1986 | 0.0 | 46.8 | 9.7 | 88.0 | 12.7 | 3.1 |
| 29/05/1986 | 63.9 | 33.1 | 42.5 | 39.9 | 47.4 | 56.2 |
| 01/07/1986 | 31.3 | 52.1 | 4.6 | 24.8 | 55.4 | 39.1 |
| 02/09/1991 | 6.8 | 45.5 | 62.6 | 22.8 | 17.9 | 6.8 |
| 28/08/1986 | 0.0 | 42.0 | 8.7 | 79.1 | 11.4 | 2.7 |
| 19/08/2003 | 4.0 | 72.7 | 0.0 | 2.4 | 8.1 | 27.4 |
| 07/06/2006 | 50.3 | 64.1 | 18.5 | 46.5 | 42.8 | 36.4 |
| 05/05/1991 | 17.8 | 0.0 | 0.0 | 48.2 | 0.0 | 17.8 |

| | | | | | | |
|------------|------|-------|------|-------|------|------|
| 28/08/1986 | 0.0 | 39.2 | 8.1 | 73.8 | 10.7 | 2.6 |
| 25/06/2003 | 18.6 | 33.4 | 19.1 | 16.7 | 71.1 | 65.4 |
| 04/08/1986 | 13.0 | 31.5 | 31.0 | 27.0 | 47.9 | 22.3 |
| 04/08/1986 | 18.8 | 45.5 | 44.8 | 39.1 | 69.3 | 32.3 |
| 01/05/2006 | 22.3 | 9.8 | 7.0 | 24.0 | 0.0 | 60.9 |
| 13/05/2006 | 0.0 | 21.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 88.6 |
| 20/08/1986 | 0.0 | 15.2 | 0.0 | 0.0 | 40.7 | 58.8 |
| 06/07/1986 | 41.5 | 56.3 | 52.1 | 43.8 | 43.8 | 31.3 |
| 02/09/1991 | 6.4 | 42.4 | 58.3 | 21.2 | 16.6 | 6.4 |
| 30/05/2006 | 4.5 | 47.5 | 53.1 | 35.7 | 36.6 | 13.1 |
| 08/06/1991 | 42.6 | 0.0 | 21.0 | 82.7 | 4.7 | 42.6 |
| 07/07/1991 | 6.5 | 51.4 | 0.0 | 9.3 | 12.1 | 6.5 |
| 02/09/1991 | 6.1 | 40.5 | 55.6 | 20.2 | 15.9 | 6.1 |
| 18/09/2006 | 8.4 | 0.0 | 0.9 | 51.7 | 0.0 | 0.0 |
| 20/08/1986 | 0.0 | 13.8 | 0.0 | 0.0 | 36.8 | 53.3 |
| 29/08/2003 | 11.0 | 71.9 | 24.2 | 19.0 | 10.0 | 14.0 |
| 02/09/1991 | 5.7 | 38.3 | 52.6 | 19.1 | 15.0 | 5.7 |
| 01/10/1986 | 0.0 | 0.0 | 10.4 | 1.9 | 0.0 | 59.5 |
| 05/10/2003 | 62.1 | 42.7 | 58.6 | 66.1 | 0.0 | 71.7 |
| 08/06/2003 | 58.2 | 13.2 | 5.7 | 22.9 | 48.2 | 35.2 |
| 07/07/1991 | 6.2 | 48.4 | 0.0 | 8.8 | 11.5 | 6.2 |
| 04/10/1991 | 6.9 | 36.8 | 66.8 | 34.5 | 12.6 | 6.9 |
| 30/08/2003 | 8.2 | 89.5 | 30.0 | 114.1 | 39.7 | 0.0 |
| 17/06/1991 | 51.7 | 6.1 | 2.5 | 9.2 | 86.1 | 51.7 |
| 11/09/2006 | 27.0 | 100.6 | 15.6 | 55.4 | 27.0 | 5.4 |
| 19/08/2003 | 4.3 | 77.5 | 0.0 | 2.6 | 8.6 | 29.2 |
| 04/10/1991 | 5.9 | 31.4 | 57.0 | 29.5 | 10.7 | 5.9 |
| 18/06/2003 | 39.7 | 25.8 | 17.3 | 17.2 | 10.4 | 74.9 |
| 11/09/2006 | 22.5 | 83.6 | 12.9 | 46.1 | 22.5 | 4.5 |
| 25/06/2003 | 19.7 | 35.4 | 20.3 | 17.7 | 75.4 | 69.3 |
| 30/08/2003 | 5.6 | 61.0 | 20.4 | 77.8 | 27.1 | 0.0 |
| 07/07/1991 | 7.6 | 60.0 | 0.0 | 10.9 | 14.2 | 7.6 |
| 28/05/2006 | 7.1 | 76.7 | 47.2 | 4.1 | 10.7 | 0.0 |
| 04/10/1986 | 6.1 | 0.0 | 27.3 | 43.8 | 0.0 | 17.4 |
| 29/05/1986 | 50.8 | 26.3 | 33.8 | 31.7 | 37.6 | 44.7 |

En la Figura 55 se presenta un ejemplo del escalamiento de una tormenta generada con el segundo procedimiento, para la cual el máximo sintético obtenido fue de 64.7 mm y la fecha de la tormenta histórica seleccionada 17/09/1991 en este caso la misma tormenta utilizada en el primer procedimiento, cuyo máximo registrado fue de 57 mm.

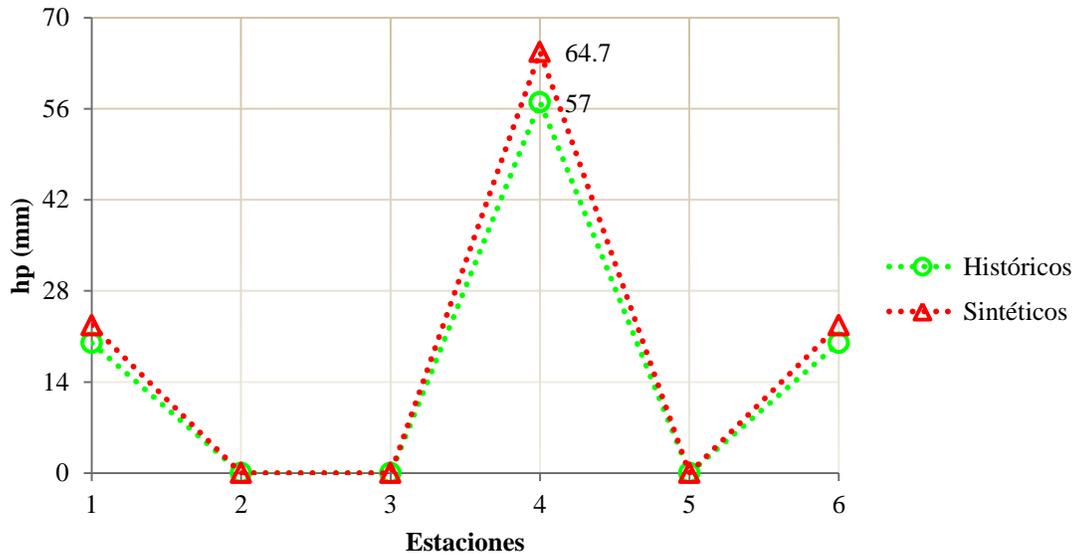


Figura 55. Ejemplo de escalamiento de una tormenta.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

4.5.3. *Umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

Las tormentas históricas se ordenaron de mayor a menor de acuerdo con su precipitación máxima, y se dividieron en dos grupos, las primeras 40 formaron el grupo de tormentas grandes mayores a 60 mm y las 40 restantes formaron el grupo de tormentas pequeñas menores a 60 mm.

En el primero grupo se consideraron las 40 tormentas con mayor valor máximo y en el segundo grupo las restantes 40 tormentas. Al relacionar estos dos grupos por separado con los valores correspondientes del índice de extensión espacial se obtiene la Figura 56 y la Figura 57, que muestran una menor correlación entre la precipitación máxima y el índice de extensión espacial, particularmente para el grupo de las tormentas con mayor precipitación máxima.

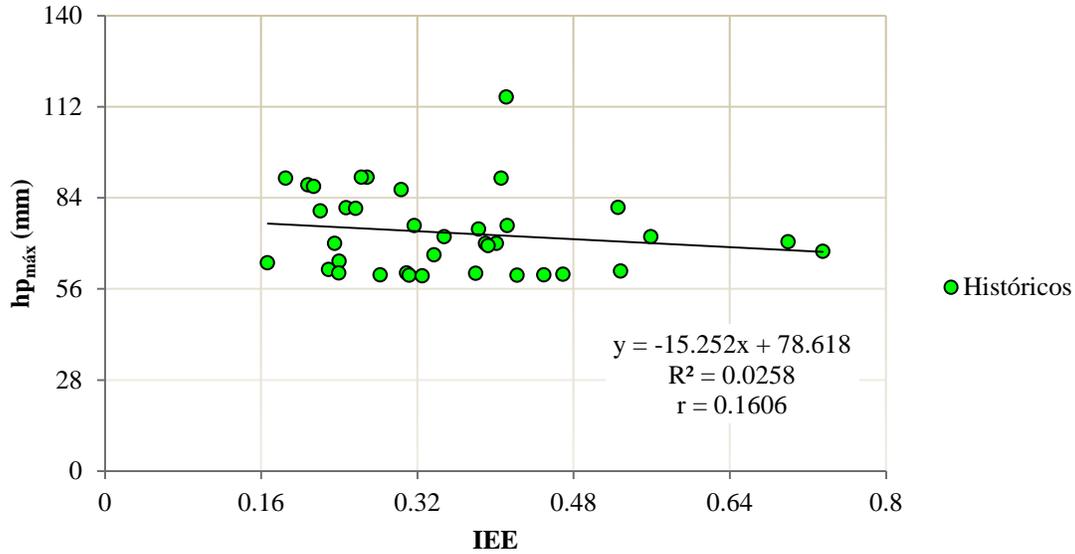


Figura 56. Relación entre el IEE y precipitación máxima primer grupo, datos históricos.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

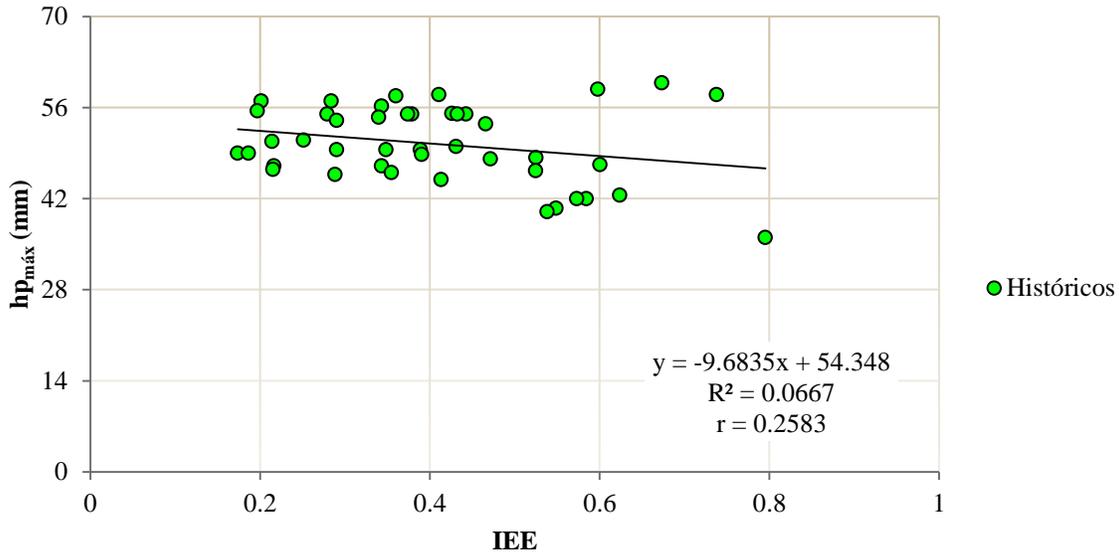


Figura 57. Relación entre el IEE y precipitación máxima segundo grupo, datos históricos.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

El procedimiento de generación de las tormentas sintéticas se modifica entonces, de tal manera que si el valor máximo generado, $PSM\acute{A}X_k$ obtenido en el paso 4 de la metodología es mayor o igual que el umbral correspondiente a las 40 primeras tormentas de los máximos históricos, se selecciona aleatoriamente una de las tormentas del primer grupo (tormentas

con valor máximo grande) y en caso contrario, se selecciona una tormenta del segundo grupo (tormentas cuyo valor máximo es chico).

Se generaron 100 números aleatorios con distribución uniforme [0,1] que se tomaron como el valor de la probabilidad de no excedencia de la función de distribución Gumbel de ajuste de los datos históricos Ecuación 7 y con ella se generaron 100 datos de la precipitación máxima sintética $PSM\acute{A}X_k$; $k = 1,2,\dots, 100$.

Para la selección de las tormentas que deberían escalarse, se consideró que si la precipitación máxima sintética $PSM\acute{A}X_k$ era mayor o igual que la el umbral correspondiente a las 40 primeras tormentas de los máximos históricos, se seleccionaba aleatoriamente una tormenta del grupo de las tormentas grandes y en caso contrario, del grupo de las tormentas chicas. Al igual que en el primer procedimiento de generación la tormenta seleccionada se escaló multiplicando el valor medido en cada estación por la relación entre el valor máximo generado y el valor máximo correspondiente a la tormenta histórica seleccionada Ecuación 1.

| U_k | $F(p_m)$ | Tormenta histórica seleccionada |
|-------|----------|---------------------------------|
| 0.640 | 63.628 | 5 |
| 0.337 | 53.277 | 68 |
| 0.546 | 60.107 | 12 |
| 0.636 | 63.464 | 9 |
| 0.504 | 58.639 | 73 |
| 0.251 | 50.511 | 68 |
| 0.512 | 58.912 | 65 |
| 0.183 | 48.117 | 42 |
| 0.102 | 44.665 | 77 |
| 0.166 | 47.457 | 67 |
| 0.743 | 68.343 | 19 |
| 0.465 | 57.359 | 49 |
| 0.700 | 66.233 | 37 |
| 0.081 | 43.526 | 67 |
| 0.974 | 96.369 | 15 |
| 0.012 | 37.075 | 80 |
| 0.298 | 52.043 | 45 |
| 0.995 | 115.968 | 24 |
| 0.205 | 48.897 | 52 |
| 0.294 | 51.913 | 48 |
| 0.162 | 47.298 | 71 |

| | | |
|-------|--------|----|
| 0.910 | 81.631 | 24 |
| 0.170 | 47.613 | 63 |
| 0.576 | 61.163 | 14 |
| 0.760 | 69.280 | 32 |
| 0.824 | 73.342 | 23 |
| 0.401 | 55.303 | 59 |
| 0.123 | 45.676 | 48 |
| 0.358 | 53.953 | 78 |
| 0.739 | 68.132 | 23 |
| 0.632 | 63.301 | 13 |
| 0.405 | 55.431 | 55 |
| 0.956 | 90.385 | 2 |
| 0.653 | 64.175 | 22 |
| 0.597 | 61.956 | 24 |
| 0.952 | 89.330 | 5 |
| 0.555 | 60.393 | 5 |
| 0.568 | 60.869 | 22 |
| 0.828 | 73.640 | 19 |
| 0.234 | 49.926 | 54 |
| 0.418 | 55.853 | 73 |
| 0.482 | 57.928 | 63 |
| 0.059 | 42.185 | 57 |
| 0.781 | 70.517 | 4 |
| 0.016 | 37.847 | 76 |
| 0.397 | 55.175 | 63 |
| 0.290 | 51.782 | 52 |
| 0.063 | 42.460 | 53 |
| 0.615 | 62.619 | 37 |
| 0.311 | 52.469 | 62 |
| 0.255 | 50.646 | 64 |
| 0.611 | 62.462 | 3 |
| 0.213 | 49.184 | 44 |
| 0.226 | 49.648 | 62 |
| 0.486 | 58.061 | 59 |
| 0.892 | 79.485 | 10 |
| 0.076 | 43.291 | 71 |
| 0.141 | 46.429 | 61 |
| 0.717 | 67.058 | 13 |
| 0.440 | 56.537 | 44 |
| 0.675 | 65.087 | 31 |
| 0.055 | 41.898 | 61 |
| 0.948 | 88.359 | 9 |

| | | |
|-------|---------|----|
| 0.721 | 67.256 | 9 |
| 0.273 | 51.218 | 78 |
| 0.970 | 94.682 | 18 |
| 0.914 | 82.189 | 20 |
| 0.269 | 51.085 | 43 |
| 0.871 | 77.246 | 1 |
| 0.619 | 62.776 | 33 |
| 0.145 | 46.598 | 57 |
| 0.551 | 60.250 | 9 |
| 0.469 | 57.491 | 46 |
| 0.533 | 59.644 | 75 |
| 0.376 | 54.499 | 53 |
| 0.098 | 44.461 | 42 |
| 0.333 | 53.149 | 72 |
| 0.448 | 56.797 | 75 |
| 0.341 | 53.405 | 64 |
| 0.380 | 54.627 | 49 |
| 0.931 | 84.897 | 33 |
| 0.362 | 54.080 | 74 |
| 0.572 | 61.015 | 18 |
| 0.927 | 84.210 | 37 |
| 0.529 | 59.504 | 79 |
| 0.277 | 51.351 | 74 |
| 0.803 | 71.863 | 14 |
| 0.209 | 49.041 | 48 |
| 0.127 | 45.856 | 44 |
| 0.191 | 48.416 | 73 |
| 0.034 | 40.083 | 51 |
| 0.490 | 58.196 | 55 |
| 0.991 | 108.968 | 28 |
| 0.106 | 44.865 | 73 |
| 0.999 | 136.116 | 20 |
| 0.038 | 40.477 | 47 |
| 0.589 | 61.653 | 31 |
| 0.020 | 38.486 | 72 |
| 0.230 | 49.787 | 58 |
| 0.320 | 52.727 | 54 |

| Fecha | Est1 | Est2 | Est3 | Est4 | Est5 | Est6 |
|------------|------|------|------|-------|------|------|
| 06/07/2003 | 34.2 | 63.6 | 9.8 | 6.6 | 13.8 | 26.9 |
| 28/06/1986 | 0.0 | 43.6 | 0.0 | 0.1 | 12.6 | 53.3 |
| 27/09/1986 | 3.3 | 0.0 | 0.4 | 0.8 | 15.1 | 60.1 |
| 25/06/2003 | 16.6 | 29.8 | 17.1 | 14.9 | 63.5 | 58.4 |
| 04/06/2006 | 0.0 | 33.1 | 58.6 | 0.0 | 0.0 | 9.6 |
| 28/06/1986 | 0.0 | 41.4 | 0.0 | 0.1 | 11.9 | 50.5 |
| 08/06/2003 | 58.9 | 13.4 | 5.7 | 23.2 | 48.8 | 35.6 |
| 04/10/1986 | 6.7 | 0.0 | 30.0 | 48.1 | 0.0 | 19.1 |
| 02/09/2006 | 20.2 | 18.5 | 44.7 | 27.6 | 21.3 | 21.3 |
| 04/08/1986 | 12.9 | 31.2 | 30.7 | 26.7 | 47.5 | 22.1 |
| 08/06/1991 | 35.1 | 0.0 | 17.4 | 68.3 | 3.9 | 35.1 |
| 27/05/1991 | 44.8 | 57.4 | 0.0 | 0.0 | 5.2 | 44.8 |
| 20/08/1986 | 0.0 | 17.1 | 0.0 | 0.0 | 45.8 | 66.2 |
| 04/08/1986 | 11.8 | 28.6 | 28.1 | 24.5 | 43.5 | 20.3 |
| 11/09/2006 | 25.9 | 96.4 | 14.9 | 53.1 | 25.9 | 5.2 |
| 06/07/1986 | 27.3 | 37.1 | 34.3 | 28.8 | 28.8 | 20.6 |
| 20/05/2006 | 0.0 | 52.0 | 0.0 | 11.1 | 9.7 | 34.3 |
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 27.9 | 116.0 | 69.8 | 20.9 |
| 02/09/1991 | 5.3 | 35.6 | 48.9 | 17.8 | 14.0 | 5.3 |
| 10/05/1991 | 51.9 | 2.8 | 0.0 | 2.3 | 9.1 | 51.9 |
| 14/09/2003 | 47.3 | 32.7 | 25.4 | 29.1 | 0.0 | 14.3 |
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 19.6 | 81.6 | 49.1 | 14.7 |
| 15/09/2006 | 0.0 | 5.5 | 47.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 28/05/2006 | 5.7 | 61.2 | 37.7 | 3.2 | 8.5 | 0.0 |
| 14/06/2006 | 6.9 | 56.5 | 0.6 | 16.0 | 69.3 | 45.8 |
| 30/05/1986 | 31.5 | 43.5 | 65.0 | 73.3 | 73.3 | 36.9 |
| 15/08/1986 | 0.0 | 55.3 | 2.8 | 36.9 | 1.7 | 19.0 |
| 10/05/1991 | 45.7 | 2.5 | 0.0 | 2.0 | 8.0 | 45.7 |
| 24/05/2006 | 42.6 | 30.4 | 17.3 | 6.7 | 54.0 | 26.6 |
| 30/05/1986 | 29.3 | 40.4 | 60.4 | 68.1 | 68.1 | 34.3 |
| 18/06/2003 | 33.5 | 21.8 | 14.6 | 14.5 | 8.8 | 63.3 |
| 26/06/1986 | 3.6 | 35.2 | 1.6 | 55.4 | 41.4 | 17.6 |
| 07/08/2003 | 0.2 | 90.4 | 1.5 | 8.5 | 20.0 | 25.0 |
| 19/07/2006 | 9.3 | 10.6 | 0.0 | 64.2 | 56.0 | 11.1 |
| 25/08/2006 | 0.0 | 0.0 | 14.9 | 62.0 | 37.3 | 11.2 |
| 06/07/2003 | 48.0 | 89.3 | 13.8 | 9.3 | 19.4 | 37.7 |
| 06/07/2003 | 32.5 | 60.4 | 9.3 | 6.3 | 13.1 | 25.5 |
| 19/07/2006 | 8.8 | 10.1 | 0.0 | 60.9 | 53.1 | 10.5 |
| 08/06/1991 | 37.9 | 0.0 | 18.7 | 73.6 | 4.2 | 37.9 |
| 05/05/1991 | 18.5 | 0.0 | 0.0 | 49.9 | 0.0 | 18.5 |

| | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| 04/06/2006 | 0.0 | 31.5 | 55.9 | 0.0 | 0.0 | 9.2 |
| 15/09/2006 | 0.0 | 6.7 | 57.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 24/08/2003 | 3.3 | 42.2 | 2.0 | 6.6 | 0.0 | 0.0 |
| 28/06/2003 | 0.0 | 70.5 | 0.0 | 0.0 | 7.8 | 0.0 |
| 25/06/1991 | 37.8 | 1.8 | 25.7 | 16.9 | 12.6 | 37.8 |
| 15/09/2006 | 0.0 | 6.4 | 55.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 02/09/1991 | 5.6 | 37.7 | 51.8 | 18.8 | 14.8 | 5.6 |
| 01/05/2006 | 15.6 | 6.9 | 4.9 | 16.8 | 0.0 | 42.5 |
| 20/08/1986 | 0.0 | 16.2 | 0.0 | 0.0 | 43.3 | 62.6 |
| 24/09/1986 | 0.0 | 52.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.1 |
| 03/09/2006 | 10.4 | 50.6 | 14.5 | 12.5 | 20.8 | 9.9 |
| 19/08/2003 | 3.5 | 62.5 | 0.0 | 2.1 | 6.9 | 23.5 |
| 17/09/1991 | 17.3 | 0.0 | 0.0 | 49.2 | 0.0 | 17.3 |
| 24/09/1986 | 0.0 | 49.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.0 |
| 15/08/1986 | 0.0 | 58.1 | 2.9 | 38.7 | 1.8 | 19.9 |
| 26/07/2003 | 0.0 | 79.5 | 0.0 | 0.0 | 10.3 | 28.0 |
| 14/09/2003 | 43.3 | 29.9 | 23.3 | 26.6 | 0.0 | 13.1 |
| 25/07/2003 | 2.8 | 10.1 | 19.4 | 2.1 | 0.0 | 46.4 |
| 18/06/2003 | 35.5 | 23.1 | 15.5 | 15.4 | 9.3 | 67.1 |
| 17/09/1991 | 19.8 | 0.0 | 0.0 | 56.5 | 0.0 | 19.8 |
| 13/09/2003 | 8.6 | 65.1 | 33.0 | 13.9 | 10.7 | 17.1 |
| 25/07/2003 | 2.5 | 9.1 | 17.5 | 1.9 | 0.0 | 41.9 |
| 25/06/2003 | 23.1 | 41.5 | 23.8 | 20.7 | 88.4 | 81.3 |
| 25/06/2003 | 17.6 | 31.6 | 18.1 | 15.8 | 67.3 | 61.9 |
| 24/05/2006 | 40.5 | 28.8 | 16.4 | 6.3 | 51.2 | 25.3 |
| 05/10/2003 | 81.9 | 56.4 | 77.4 | 87.3 | 0.0 | 94.7 |
| 17/06/1991 | 49.3 | 5.9 | 2.3 | 8.8 | 82.2 | 49.3 |
| 01/10/1986 | 0.0 | 0.0 | 9.0 | 1.6 | 0.0 | 51.1 |
| 30/08/2003 | 5.6 | 60.6 | 20.3 | 77.2 | 26.9 | 0.0 |
| 26/06/2003 | 1.8 | 62.8 | 1.5 | 1.7 | 32.8 | 5.7 |
| 24/08/2003 | 3.7 | 46.6 | 2.2 | 7.3 | 0.0 | 0.0 |
| 25/06/2003 | 15.8 | 28.3 | 16.2 | 14.1 | 60.2 | 55.4 |
| 18/09/2006 | 9.3 | 0.0 | 1.0 | 57.5 | 0.0 | 0.0 |
| 01/07/1986 | 33.7 | 56.1 | 4.9 | 26.7 | 59.6 | 42.1 |
| 01/05/2006 | 20.0 | 8.8 | 6.3 | 21.5 | 0.0 | 54.5 |
| 04/10/1986 | 6.2 | 0.0 | 27.7 | 44.5 | 0.0 | 17.7 |
| 19/06/2003 | 7.2 | 27.7 | 13.5 | 11.6 | 0.0 | 53.1 |
| 01/07/1986 | 32.1 | 53.5 | 4.7 | 25.4 | 56.8 | 40.1 |
| 03/09/2006 | 10.9 | 53.4 | 15.3 | 13.1 | 21.9 | 10.4 |
| 27/05/1991 | 42.7 | 54.6 | 0.0 | 0.0 | 5.0 | 42.7 |
| 26/06/2003 | 2.4 | 84.9 | 2.0 | 2.3 | 44.3 | 7.7 |
| 24/06/1991 | 6.0 | 2.4 | 54.1 | 35.4 | 30.1 | 6.0 |
| 05/10/2003 | 52.8 | 36.3 | 49.9 | 56.3 | 0.0 | 61.0 |

| | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|-------|-------|
| 20/08/1986 | 0.0 | 21.8 | 0.0 | 0.0 | 58.2 | 84.2 |
| 22/08/1991 | 32.7 | 59.5 | 4.8 | 11.6 | 50.9 | 32.7 |
| 24/06/1991 | 5.7 | 2.3 | 51.4 | 33.6 | 28.6 | 5.7 |
| 28/05/2006 | 6.7 | 71.9 | 44.3 | 3.8 | 10.0 | 0.0 |
| 10/05/1991 | 49.0 | 2.7 | 0.0 | 2.1 | 8.6 | 49.0 |
| 17/09/1991 | 16.1 | 0.0 | 0.0 | 45.9 | 0.0 | 16.1 |
| 04/06/2006 | 0.0 | 27.3 | 48.4 | 0.0 | 0.0 | 7.9 |
| 07/07/1991 | 5.1 | 40.1 | 0.0 | 7.3 | 9.5 | 5.1 |
| 26/06/1986 | 3.8 | 37.0 | 1.6 | 58.2 | 43.5 | 18.5 |
| 16/09/2003 | 64.7 | 54.9 | 16.1 | 42.5 | 58.1 | 109.0 |
| 04/06/2006 | 0.0 | 25.3 | 44.9 | 0.0 | 0.0 | 7.4 |
| 17/06/1991 | 81.7 | 9.7 | 3.9 | 14.6 | 136.1 | 81.7 |
| 06/09/2003 | 9.9 | 8.0 | 40.5 | 4.7 | 23.9 | 16.5 |
| 13/09/2003 | 8.1 | 61.7 | 31.2 | 13.2 | 10.1 | 16.2 |
| 19/06/2003 | 5.2 | 20.1 | 9.8 | 8.4 | 0.0 | 38.5 |
| 16/08/1986 | 6.5 | 39.3 | 2.0 | 4.7 | 26.4 | 49.8 |
| 05/05/1991 | 19.5 | 0.0 | 0.0 | 52.7 | 0.0 | 19.5 |

En la Figura 58 se presenta un ejemplo del escalamiento de una tormenta generada con el segundo procedimiento, para la cual el máximo sintético obtenido fue de 53.1 mm y la fecha de la tormenta histórica seleccionada 19/06/2003 en este caso la misma tormenta utilizada en el primer procedimiento, cuyo máximo registrado fue de 46 mm.

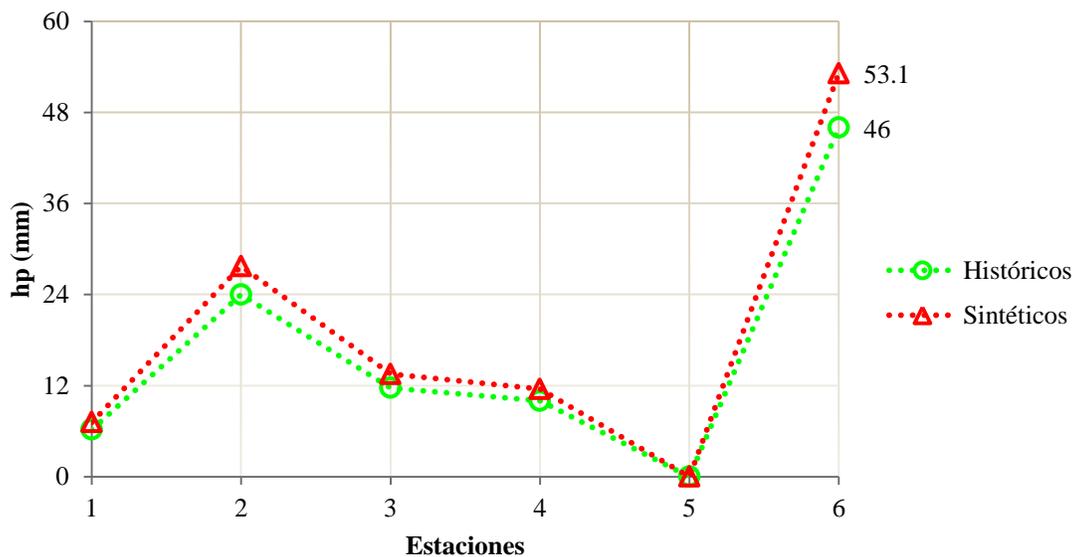


Figura 58. Ejemplo de escalamiento de una tormenta.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

4.6. Validación del segundo procedimiento

4.6.1. Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm

Como ya fue expuesto, en primera instancia se verifica la eficacia del procedimiento propuesto comparando las funciones de distribución de los máximos y las medias de las tormentas históricas con las de las tormentas generadas ahora con el segundo procedimiento. De acuerdo con la propuesta, se obtuvieron los valores empíricos de las probabilidades de no excedencia para las precipitaciones máximas y medias; en la Figura 59 y la Figura 60 se muestra la comparación entre los valores obtenidos para las tormentas históricas y para las sintéticas.

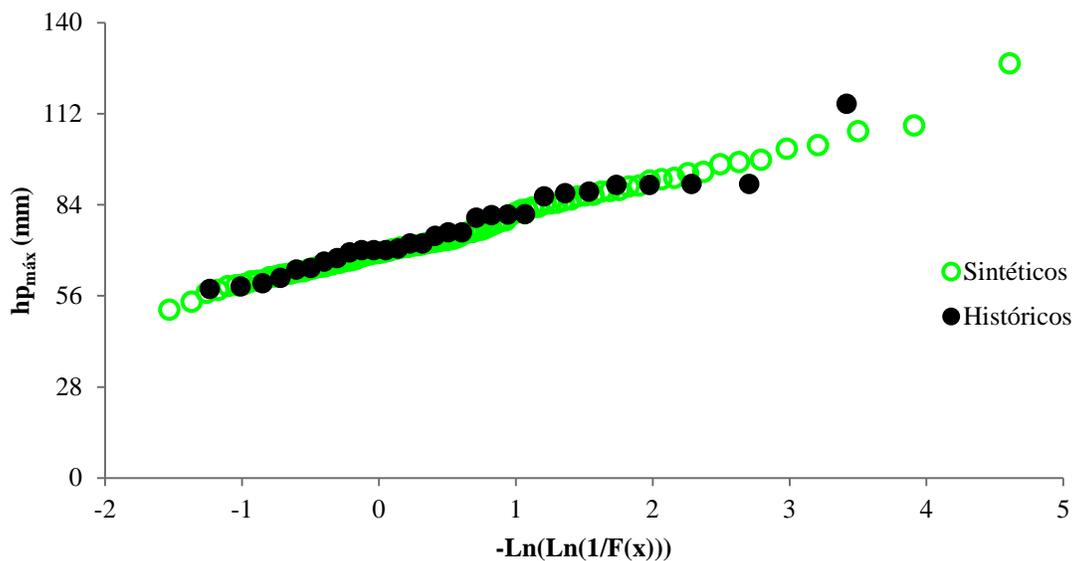


Figura 59. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones máximas.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

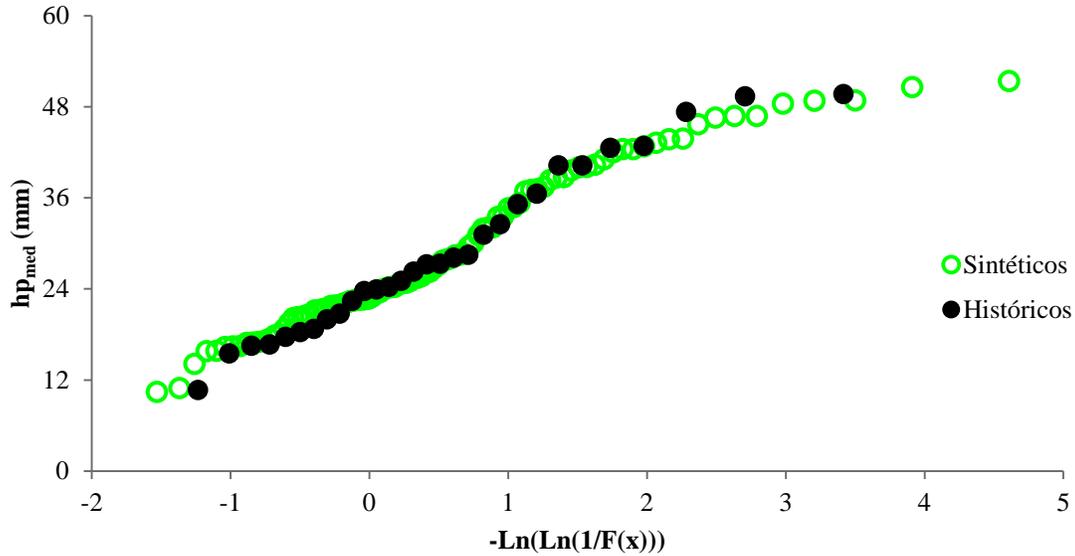


Figura 60. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones medias.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

En la Figura 60 se aprecia que la función de distribución de las precipitaciones medias se logra reproducir adecuadamente, mientras que en el caso de las precipitaciones máximas Figura 59, los valores correspondientes a las tormentas generadas resulta menor o mayor que los de los históricos en una zona de la figura.

Para identificar las causas que motivan las diferencias encontradas entre las precipitaciones máximas sintéticas y las históricas, se construyen dos figuras a comparar, una es la Figura 16 (anteriormente generada) que es para las tormentas históricas y la Figura 61 que es para las tormentas sintéticas generadas con el segundo procedimiento, en las que se relacionan las precipitaciones máximas con las medias respectivamente. Al comparar las gráficas se observa que la muestra sintética produce una mayor correlación entre medias y máximos que la correspondiente a los valores históricos y adicionalmente produce una mayor correlación que las tormentas generadas con el primer procedimiento, esto no necesariamente es un primer indicio que se mejoraron los datos sintéticos con el segundo procedimiento con respecto del primero.

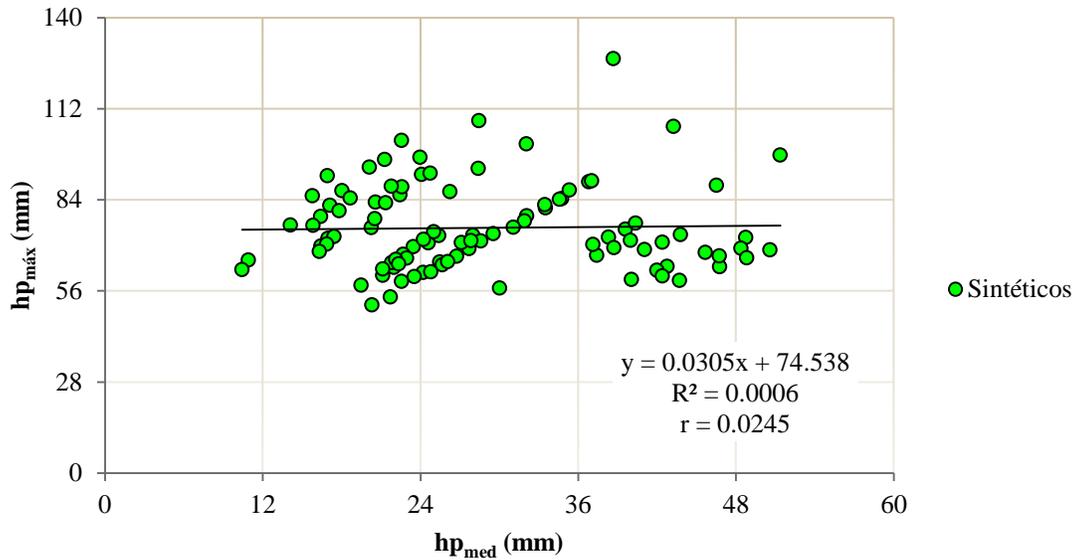


Figura 61. Relación entre la precipitación media y máxima datos sintéticos

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

Realizando un análisis más a fondo se descubre que la correlación tan pequeña que se observa en la Figura 61 se debe a que los valores medios están determinados en parte por el máximo, en otras palabras, la correlación que se obtiene puede considerarse espuria por lo que mantiene parte de las propiedades estadísticas de las tormentas históricas.

Anteriormente en la Figura 18 se relacionó la precipitación máxima anual de las tormentas históricas con su índice de extensión espacial, de dicha figura, se consigue mostrar una tendencia a que la amplitud espacial de las tormentas, medida mediante el índice de extensión espacial, disminuya conforme la magnitud del valor máximo aumenta, es decir, que las tormentas con mayor precipitación máxima tienden a ser menos extensas, este mismo comportamiento se replica en la Figura 62 para las tormentas generadas con el segundo procedimiento y se señala nuevamente que se mejora esta propiedad con respecto a las tormentas generadas en el primer procedimiento.

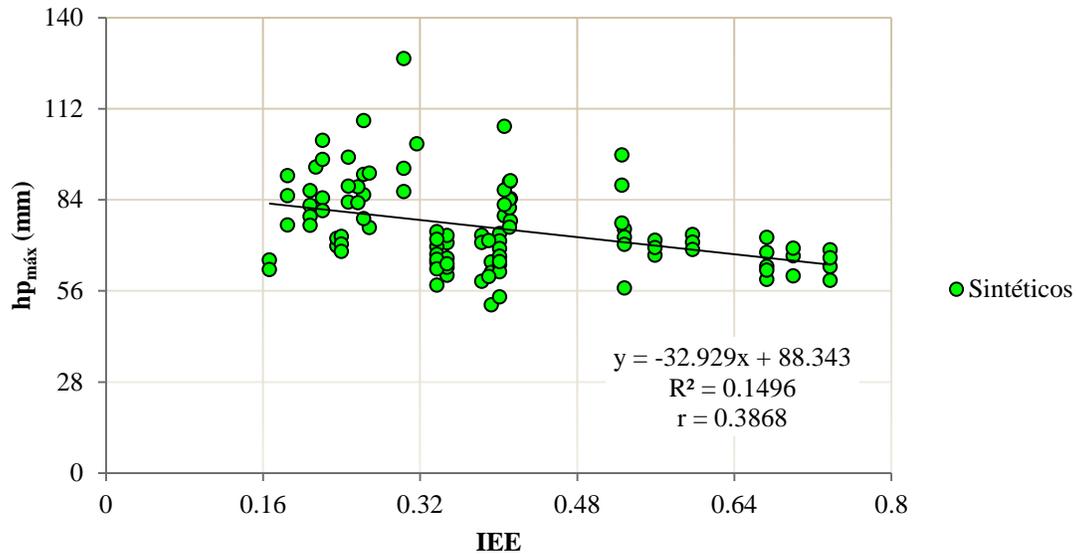


Figura 62. Relación entre el índice de la extensión espacial (IEE) y precipitación máxima datos sintéticos

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

Una vez que se consiguen representar adecuadamente las funciones de distribución de los valores máximos y medios de las tormentas históricas, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos de las lluvias registradas en cada una de las estaciones climatológicas.

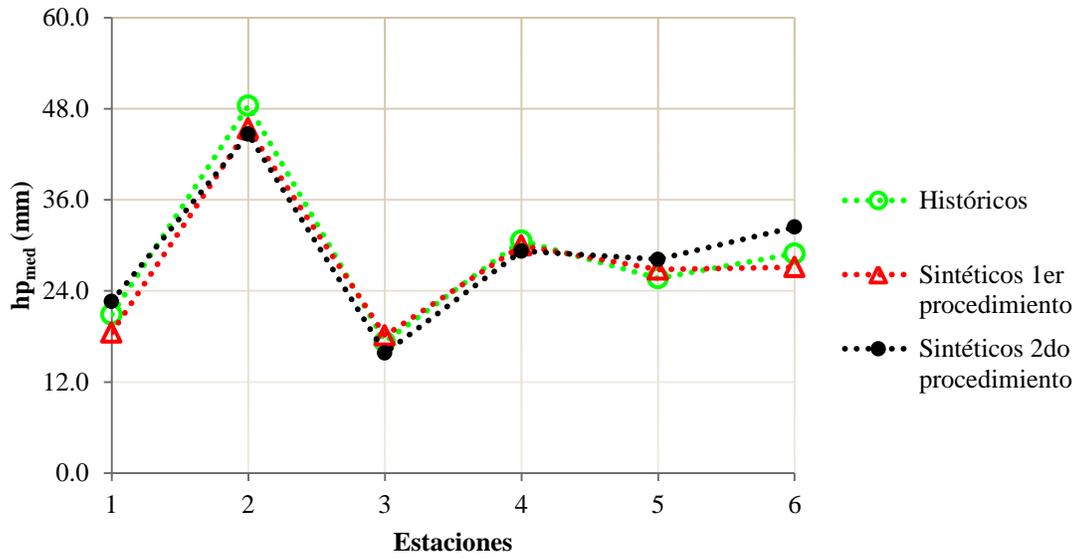


Figura 63. Comportamiento de la media para cada estación.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

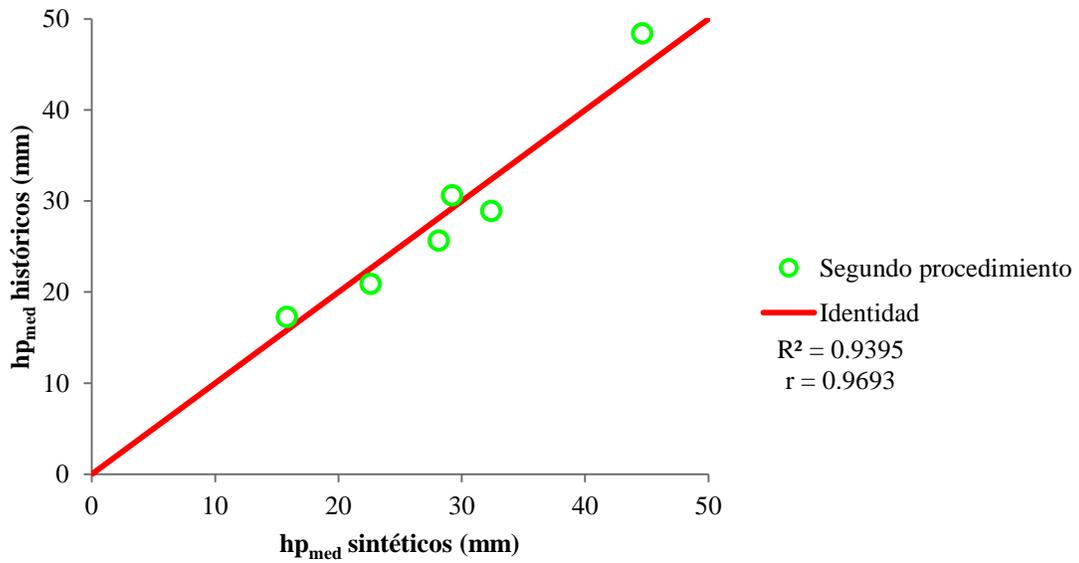


Figura 64. Comportamiento de la media para cada estación, identidad.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

En la Figura 63 se muestra la representación lograda de los valores medios, estación por estación entre los históricos y los sintéticos para ambos procedimientos, adicionalmente muestra que para ambos procedimientos hay similitud estación por estación de las tormentas generadas, finalmente para las estaciones la representación se considera adecuada.

De lo anterior, se decide construir la Figura 64, la cual muestra una función identidad y por lo tanto es quien indica el grado de representación que se logra entre los datos históricos y los datos sintéticos, considerándose nuevamente bien representados y es ligeramente igual a la del primer procedimiento.

Así mismo, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos restantes, es decir, para la desviación estándar y para el coeficiente de asimetría.

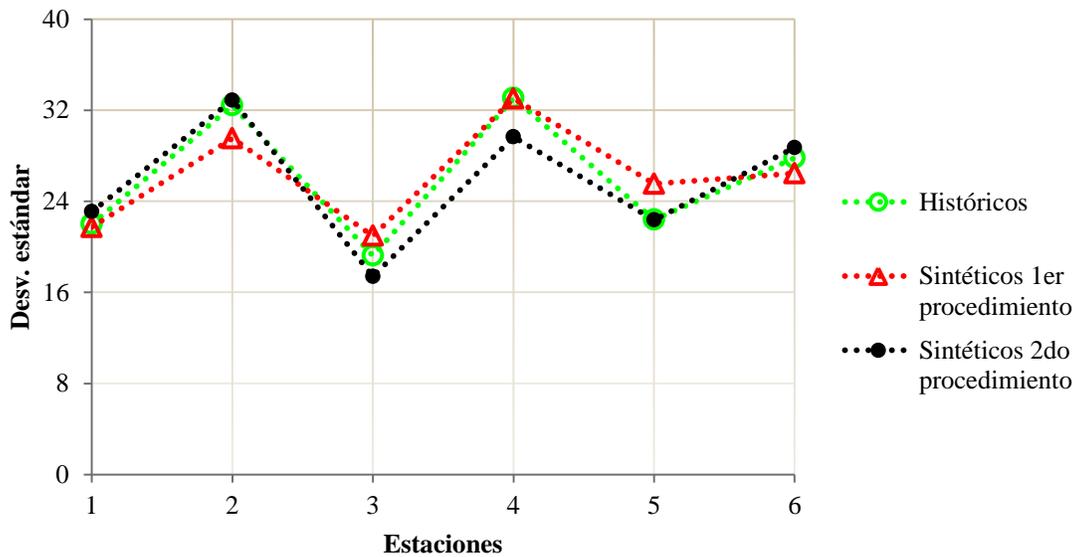


Figura 65. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

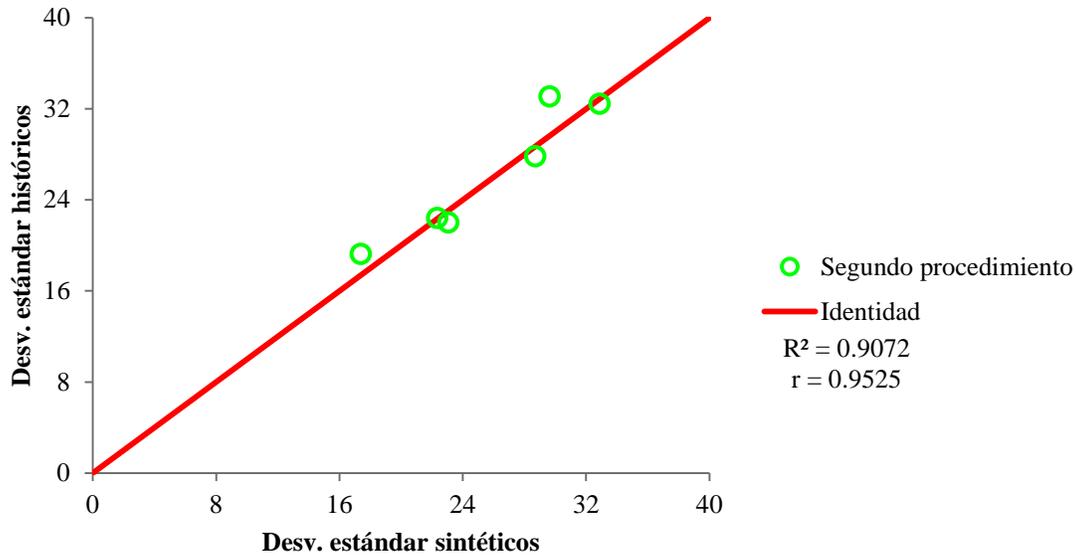


Figura 66. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación, identidad.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

El análisis de la Figura 65 presenta que para ambos procedimientos, hay similitud estación por estación del parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador de las tormentas y por lo tanto se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 66 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que este estadístico, calculado con los valores generados en el segundo procedimiento, son considerados nuevamente bien representados y son mejorados con respecto al primer procedimiento.

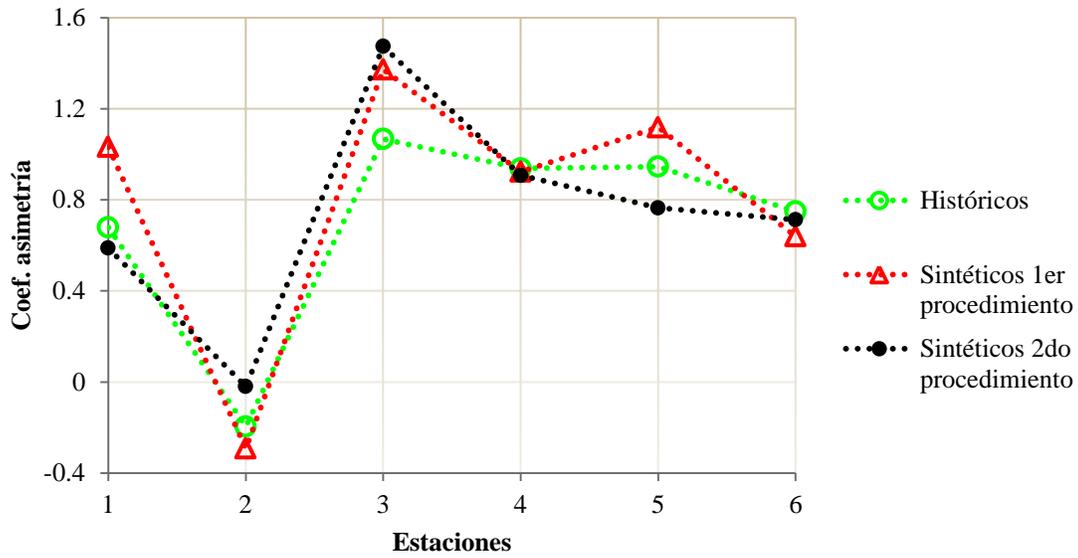


Figura 67. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

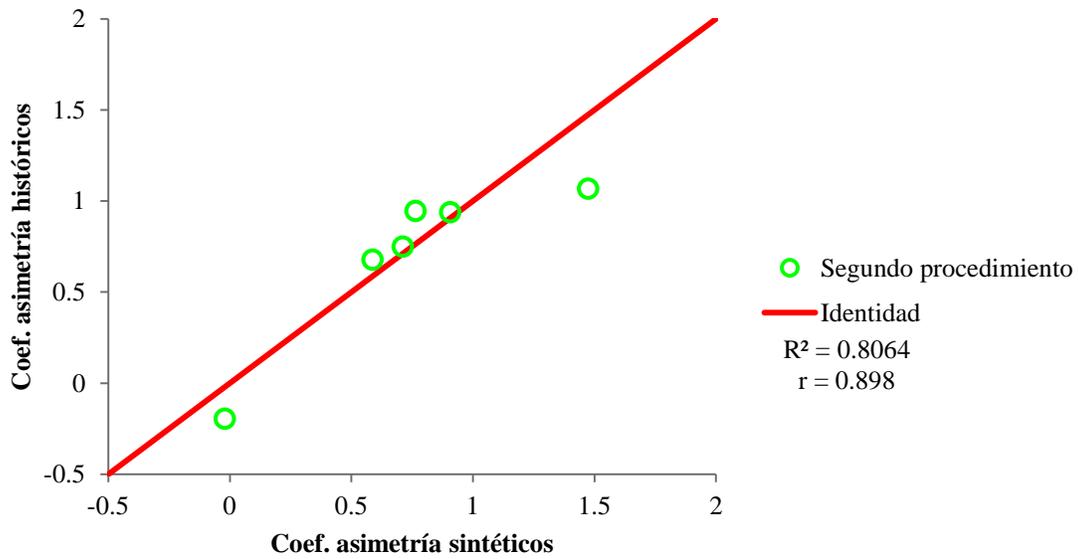


Figura 68. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación, identidad.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

El análisis de la Figura 67 presenta que para ambos procedimientos, hay cierta similitud estación por estación del parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador de las tormentas y por lo tanto se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 68 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que este estadístico, calculado con los valores generados en el segundo procedimiento, son considerados nuevamente bien representados y son muy parecidos con respecto al primer procedimiento.

Con el fin de estimar la correlación entre los valores de los parámetros correspondientes a las tormentas históricas y los parámetros obtenidos de las tormentas sintéticas, se calcula el coeficiente de determinación para cada parámetro estadístico con la Ecuación 3, los coeficientes de determinación obtenidos para este caso son:

| | Var_i | Var_ε | C_{det} |
|-----------------|---------|-------------------|-----------|
| Media | 118.399 | 7.863 | 0.9336 |
| Desv. estándar | 33.844 | 3.170 | 0.9063 |
| Coef. asimetría | 0.211 | 0.046 | 0.7826 |

4.6.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

Como ya fue expuesto, en primera instancia se verifica la eficacia del procedimiento propuesto comparando las funciones de distribución de los máximos y las medias de las tormentas históricas con las de las tormentas generadas ahora con el segundo procedimiento. De acuerdo con la propuesta, se obtuvieron los valores empíricos de las probabilidades de no excedencia para las precipitaciones máximas y medias; en la Figura 69 y la Figura 70 se muestra la comparación entre los valores obtenidos para las tormentas históricas y para las sintéticas.

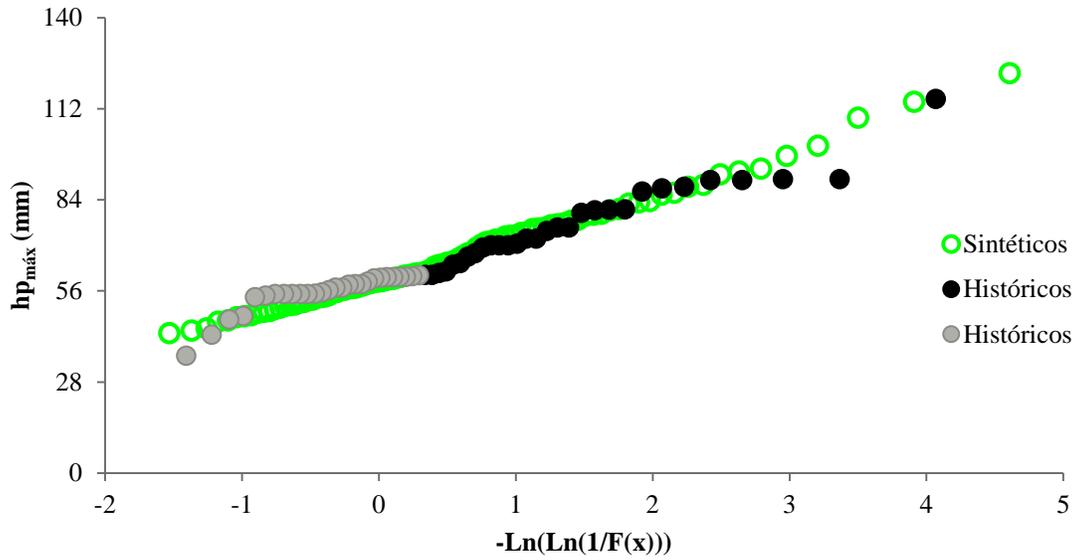


Figura 69. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones máximas.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

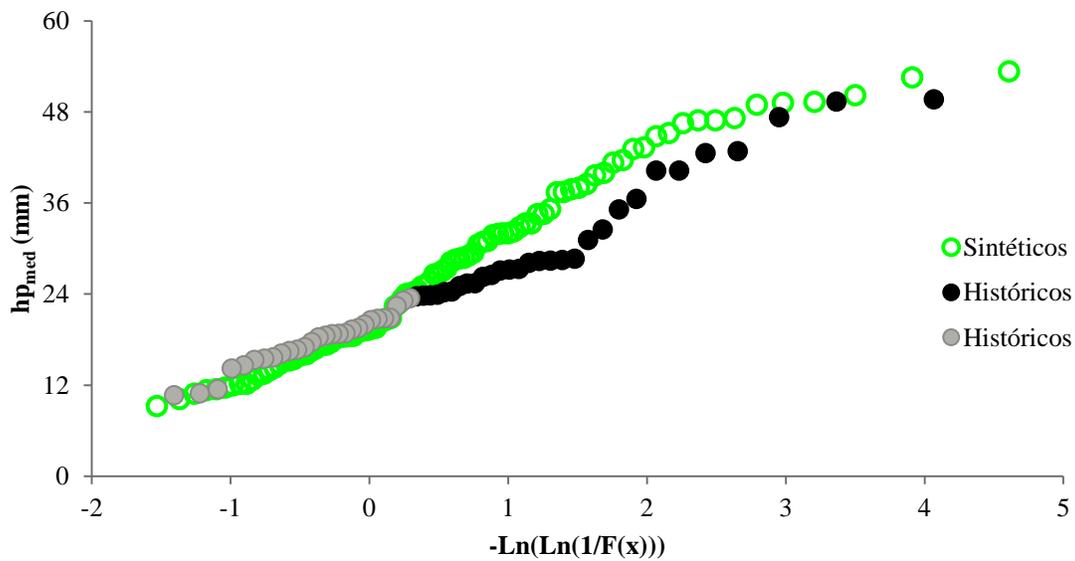


Figura 70. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones medias.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

En la Figura 69 se aprecia que la función de distribución de las precipitaciones máximas se logra reproducir adecuadamente, mientras que en el caso de las precipitaciones medias Figura 70, los valores correspondientes a las tormentas generadas resulta menor o mayor que los de los históricos en una zona de la figura.

Para identificar las causas que motivan las diferencias encontradas entre las precipitaciones máximas sintéticas y las históricas, se construyen dos figuras a comparar, una es la Figura 28 (anteriormente generada) que es para las tormentas históricas y la Figura 71 que es para las tormentas sintéticas generadas con el segundo procedimiento, en las que se relacionan las precipitaciones máximas con las medias respectivamente. Al comparar las gráficas se observa que la muestra sintética produce una mayor correlación entre medias y máximos que la correspondiente a los valores históricos y adicionalmente produce una menor correlación que las tormentas generadas con el primer procedimiento, esto no necesariamente es un indicador de una mejora en los datos sintéticos con el segundo procedimiento respecto del primer procedimiento.

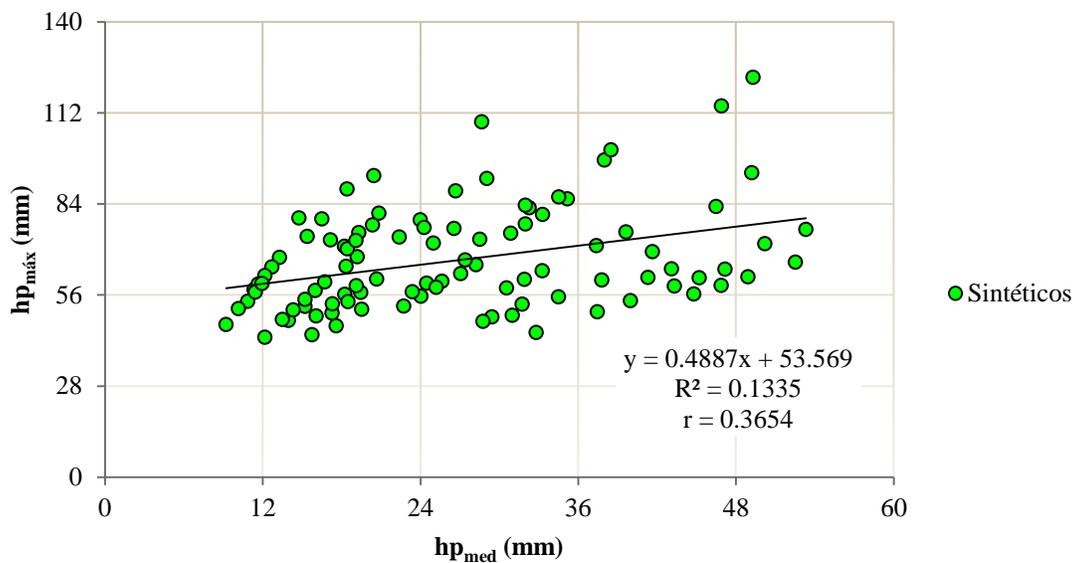


Figura 71. Relación entre la precipitación media y máxima datos sintéticos

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

Realizando un análisis más a fondo se descubre que la correlación que se observa en la Figura 71 se debe a que los valores medios están determinados en parte por el máximo, en otras palabras, la correlación que se obtiene puede considerarse espuria por lo que mantiene parte de las propiedades estadísticas de las tormentas históricas.

Anteriormente en la Figura 30 se relacionó la precipitación máxima anual de las tormentas históricas con su índice de extensión espacial, de dicha figura, se consigue mostrar una tendencia a que la amplitud espacial de las tormentas, medida mediante el índice de extensión espacial, disminuya conforme la magnitud del valor máximo aumenta, es decir, que las tormentas con mayor precipitación máxima tienden a ser menos extensas, este mismo comportamiento se replica en la Figura 72 para las tormentas generadas con el segundo procedimiento y se señala nuevamente que se mejora esta propiedad con respecto a las tormentas generadas en el primer procedimiento.

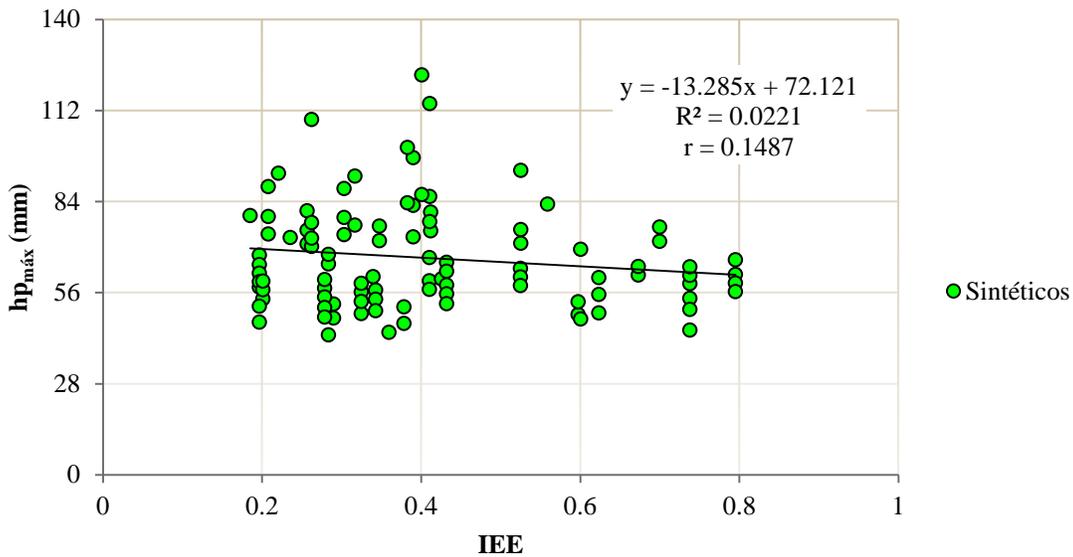


Figura 72. Relación entre el índice de la extensión espacial (IEE) y precipitación máxima datos sintéticos

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

Una vez que se consiguen representar adecuadamente las funciones de distribución de los valores máximos y medios de las tormentas históricas, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos de las lluvias registradas en cada una de las estaciones climatológicas.

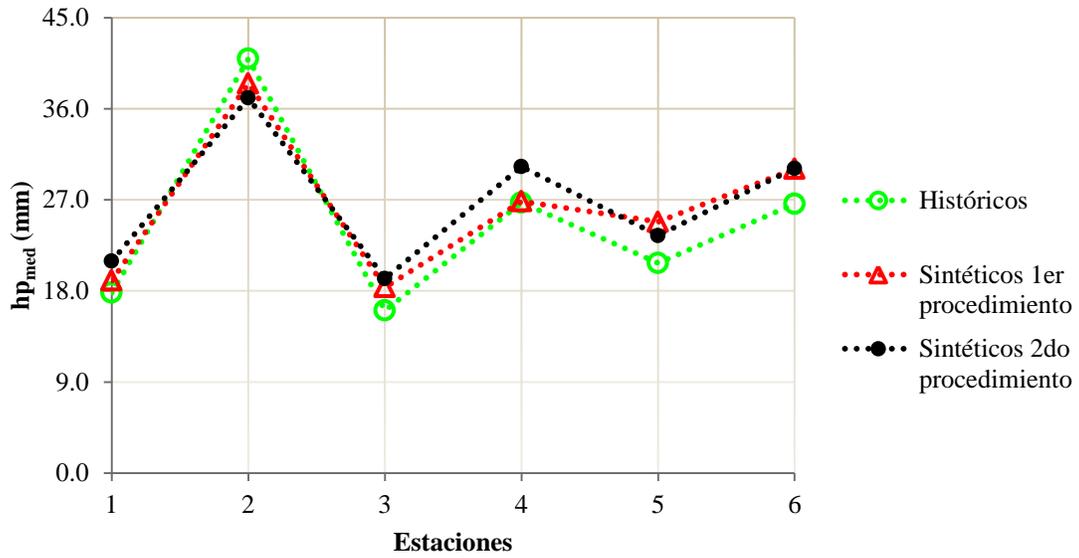


Figura 73. Comportamiento de la media para cada estación.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

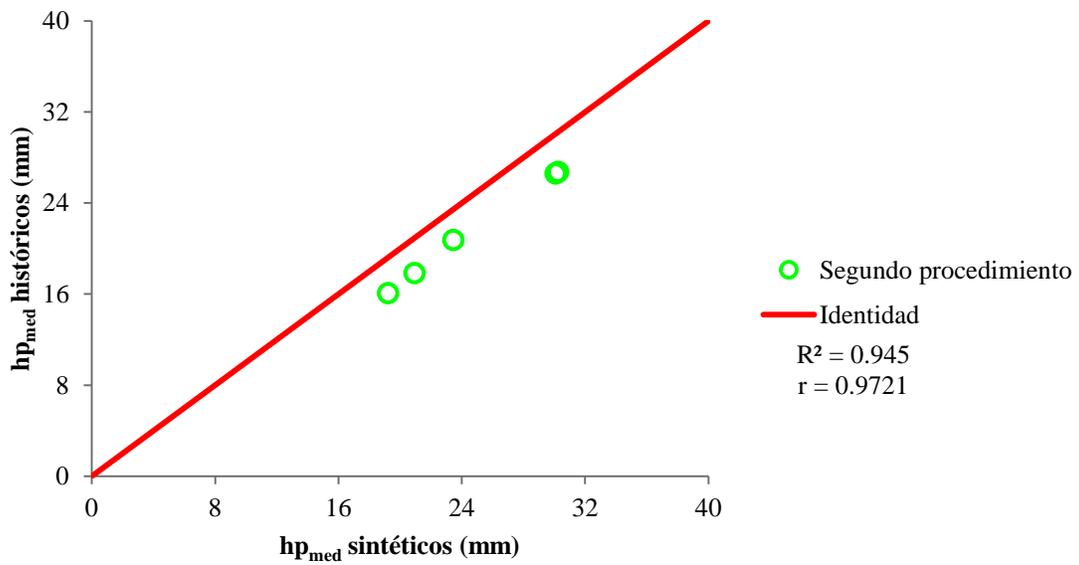


Figura 74. Comportamiento de la media para cada estación, identidad.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

En la Figura 73 se muestra la representación lograda de los valores medios, estación por estación entre los históricos y los sintéticos para ambos procedimientos, adicionalmente muestra que para ambos procedimientos hay similitud estación por estación de las tormentas generadas, finalmente para las estaciones la representación se considera adecuada.

De lo anterior, se decide construir la Figura 74, la cual muestra una función identidad y por lo tanto es quien indica el grado de representación que se logra entre los datos históricos y los datos sintéticos, considerándose nuevamente bien representados y es ligeramente igual a la del primer procedimiento.

Así mismo, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos restantes, es decir, para la desviación estándar y para el coeficiente de asimetría

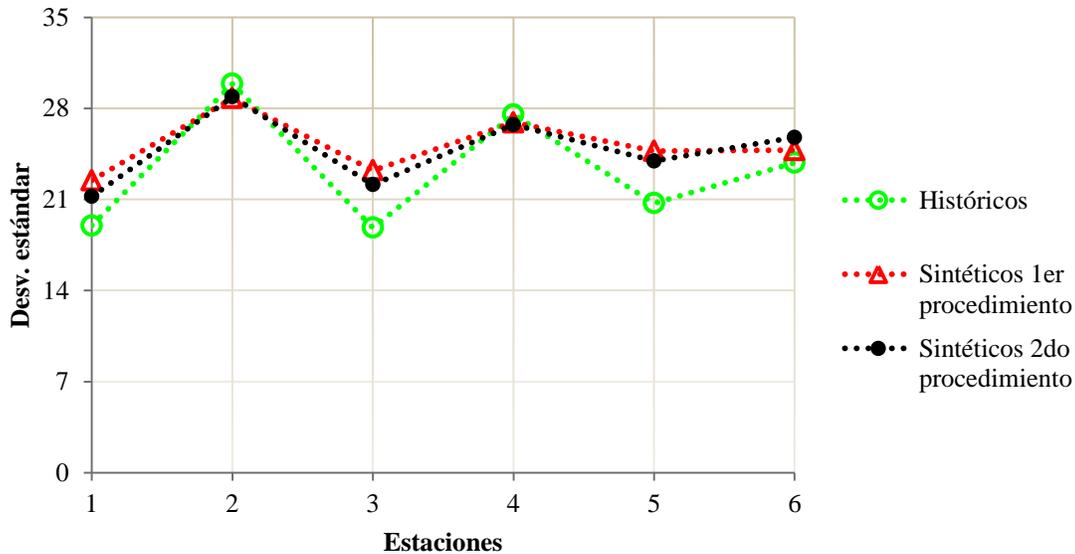


Figura 75. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

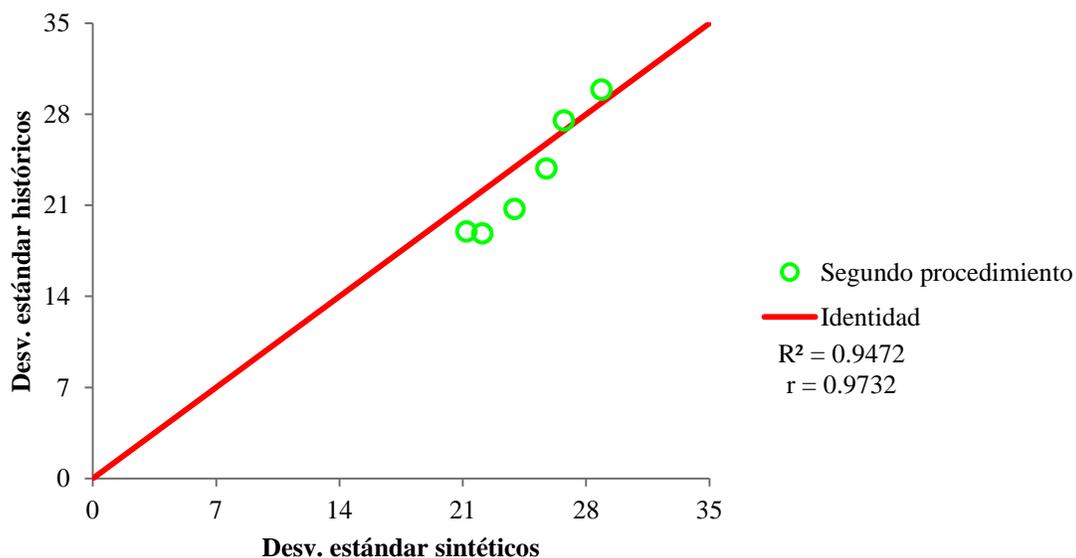


Figura 76. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación, identidad.

Segundo procedimiento de generación, *umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm*

El análisis de la Figura 75 presenta que para ambos procedimientos, hay similitud estación por estación del parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador de las tormentas y por lo tanto se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 76 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que este estadístico, calculado con los valores generados en el segundo procedimiento, son considerados nuevamente bien representados sin embargo son mejorados con respecto al primer procedimiento.

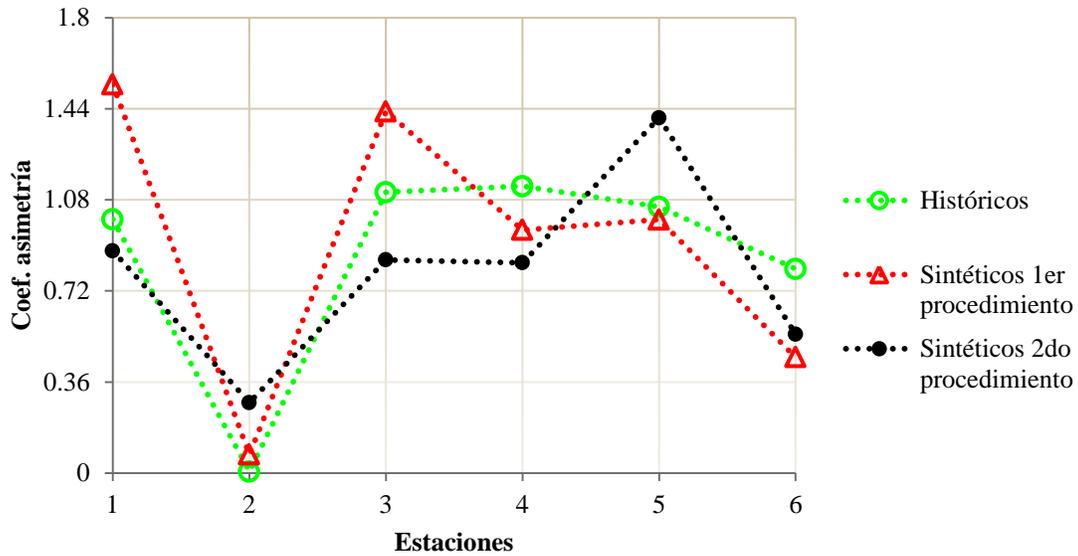


Figura 77. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

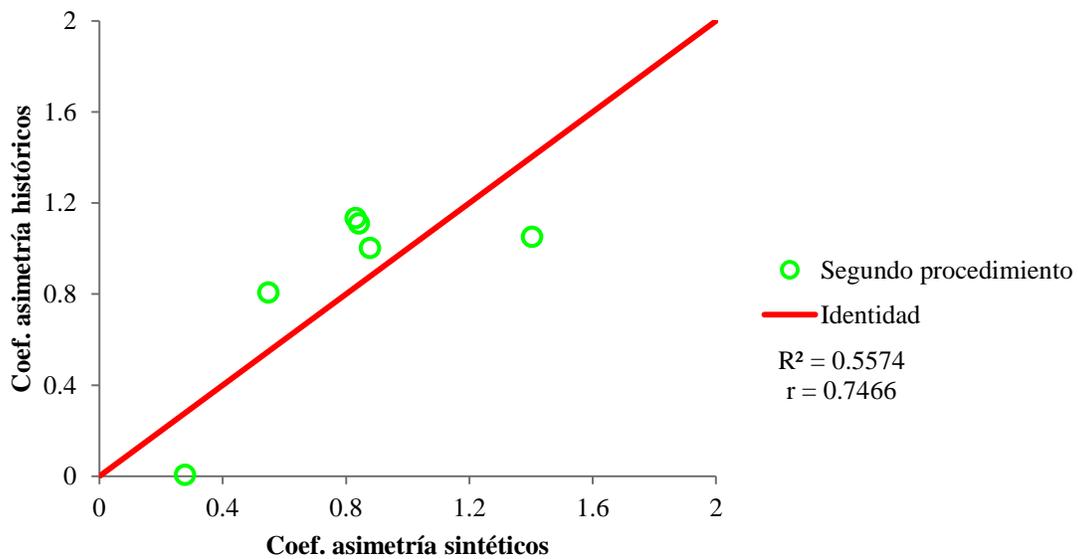


Figura 78. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación, identidad.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

El análisis de la Figura 77 presenta que para ambos procedimientos, hay cierta similitud estación por estación del parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador de las tormentas y por lo tanto se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 78 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que este estadístico, calculado con los valores generados en el segundo procedimiento, son considerados nuevamente bien representados y son ligeramente parecidos con respecto al primer procedimiento.

Con el fin de estimar la correlación entre los valores de los parámetros correspondientes a las tormentas históricas y los parámetros obtenidos de las tormentas sintéticas, se calcula el coeficiente de determinación para cada parámetro estadístico con la Ecuación 3, los coeficientes de determinación obtenidos para este caso son:

| | Var_i | Var_ϵ | C_{det} |
|-----------------|---------|----------------|-----------|
| Media | 81.678 | 8.444 | 0.8966 |
| Desv. estándar | 21.351 | 3.684 | 0.8274 |
| Coef. asimetría | 0.185 | 0.085 | 0.5411 |

4.6.3. Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm

Como ya fue expuesto, en primera instancia se verifica la eficacia del procedimiento propuesto comparando las funciones de distribución de los máximos y las medias de las tormentas históricas con las de las tormentas generadas ahora con el segundo procedimiento. De acuerdo con la propuesta, se obtuvieron los valores empíricos de las probabilidades de no excedencia para las precipitaciones máximas y medias; en la Figura 79 y la Figura 80 se muestra la comparación entre los valores obtenidos para las tormentas históricas y para las sintéticas.

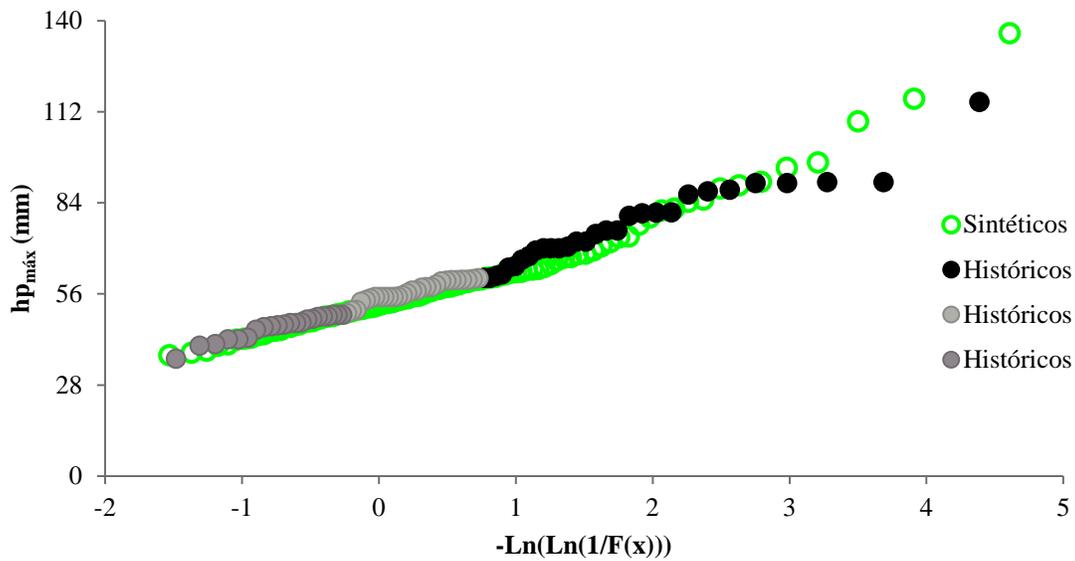


Figura 79. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones máximas.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

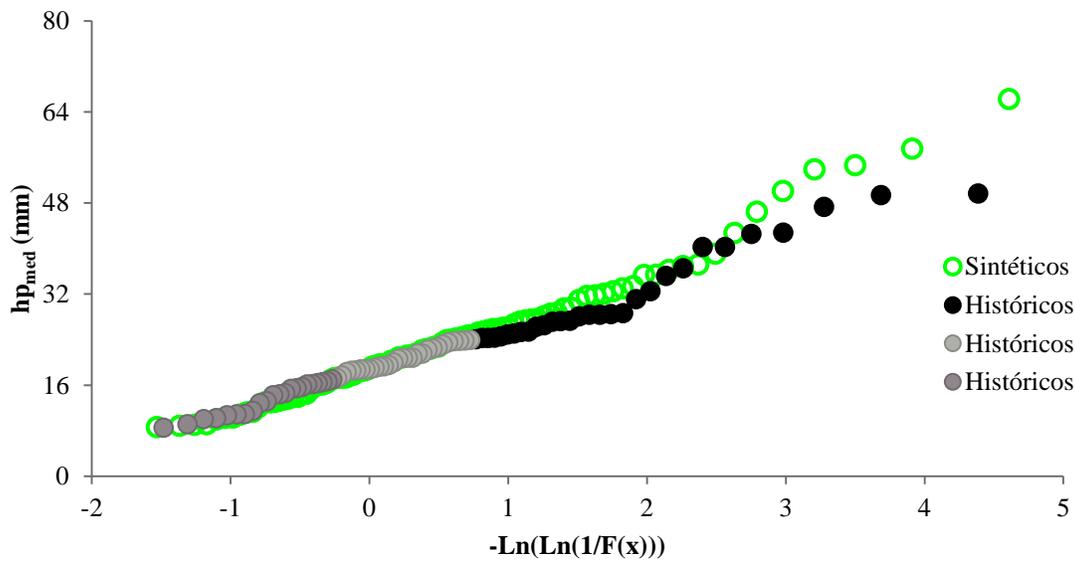


Figura 80. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones medias.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

En la Figura 79 se aprecia que la función de distribución de las precipitaciones máximas se logra reproducir adecuadamente, mientras que en el caso de las precipitaciones medias Figura 80, los valores correspondientes a las tormentas generadas resulta menor o mayor que los de los históricos en una zona de la figura.

Para identificar las causas que motivan las diferencias encontradas entre las precipitaciones máximas sintéticas y las históricas, se construyen dos figuras a comparar, una es la Figura 40 (anteriormente generada) que es para las tormentas históricas y la Figura 81 que es para las tormentas sintéticas generadas con el segundo procedimiento, en las que se relacionan las precipitaciones máximas con las medias respectivamente. Al comparar las gráficas se observa que la muestra sintética produce una mayor correlación entre medias y máximos que la correspondiente a los valores históricos y adicionalmente produce una mayor correlación que las tormentas generadas con el primer procedimiento, esto no necesariamente es un indicador de una mejora en los datos sintéticos con el segundo procedimiento respecto del primer procedimiento.

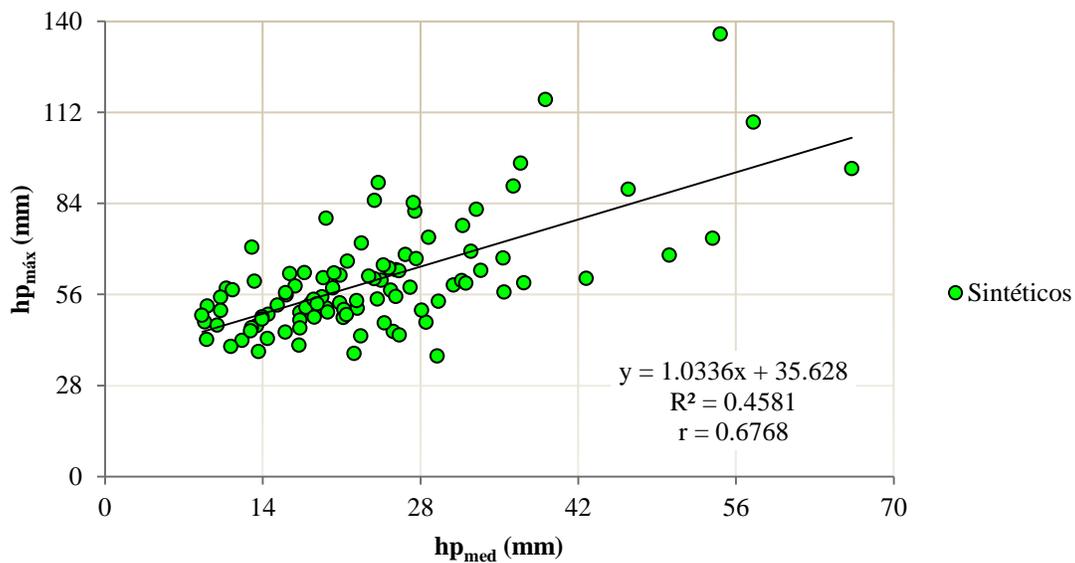


Figura 81. Relación entre la precipitación media y máxima datos sintéticos

Segundo procedimiento de generación, umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm

Realizando un análisis más a fondo se descubre que la correlación que se observa en la Figura 81 se debe a que los valores medios están determinados en parte por el máximo, en otras palabras, la correlación que se obtiene puede considerarse espuria por lo que mantiene parte de las propiedades estadísticas de las tormentas históricas.

Anteriormente en la Figura 42 se relacionó la precipitación máxima anual de las tormentas históricas con su índice de extensión espacial, de dicha figura, se consigue mostrar una tendencia a que la amplitud espacial de las tormentas, medida mediante el índice de extensión espacial, disminuya conforme la magnitud del valor máximo aumenta, es decir, que las tormentas con mayor precipitación máxima tienden a ser menos extensas, este comportamiento no se replica rotundamente en la Figura 82 para las tormentas generadas con el segundo procedimiento y se señala nuevamente que se mejora esta propiedad con respecto a las tormentas generadas en el primer procedimiento.

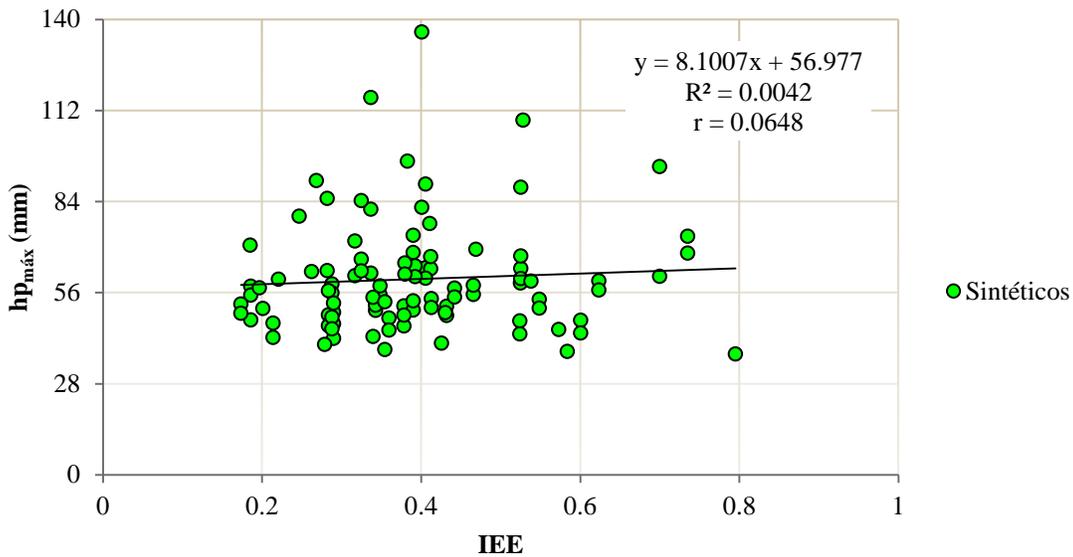


Figura 82. Relación entre el índice de la extensión espacial (IEE) y precipitación máxima datos sintéticos.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

Una vez que se consiguen representar adecuadamente las funciones de distribución de los valores máximos y medios de las tormentas históricas, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos de las lluvias registradas en cada una de las estaciones climatológicas.

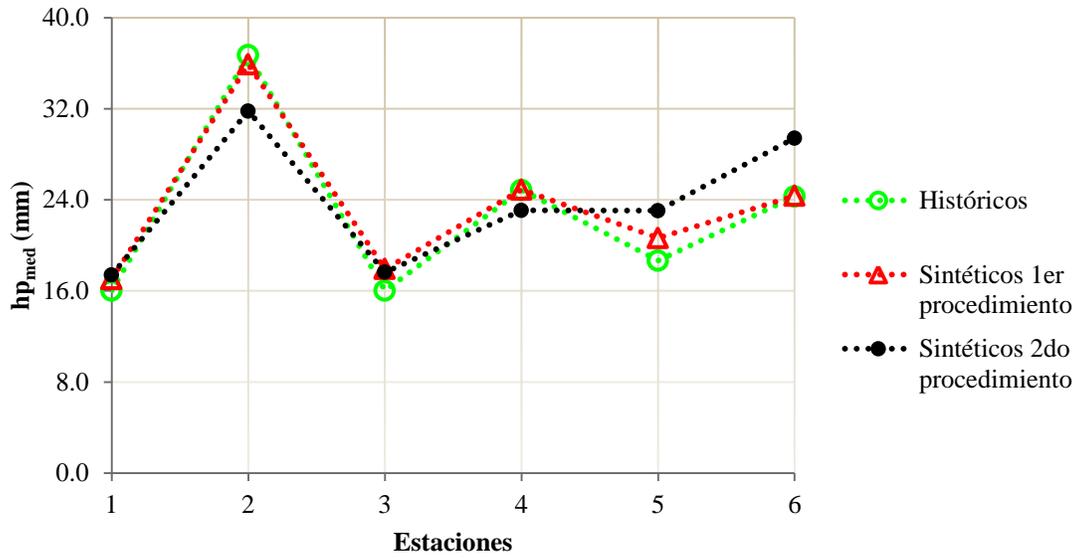


Figura 83. Comportamiento de la media para cada estación.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

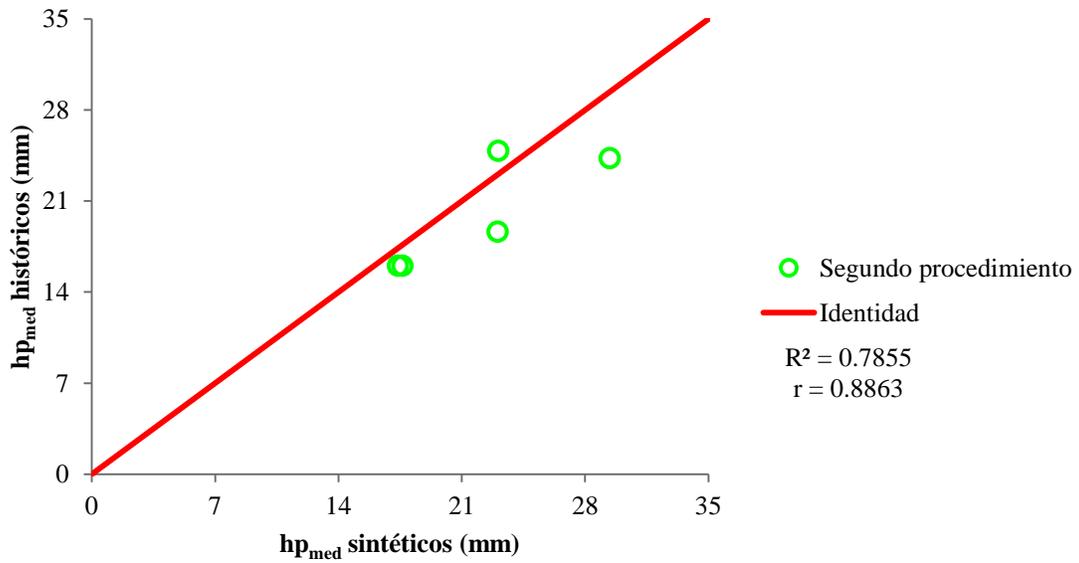


Figura 84. Comportamiento de la media para cada estación, identidad.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

En la Figura 83 se muestra la representación lograda de los valores medios, estación por estación entre los históricos y los sintéticos para ambos procedimientos, adicionalmente muestra que para ambos procedimientos hay similitud estación por estación de las tormentas generadas, finalmente para las estaciones la representación se considera adecuada.

De lo anterior, se decide construir la Figura 84, la cual muestra una función identidad y por lo tanto es quien indica el grado de representación que se logra entre los datos históricos y los datos sintéticos, considerándose nuevamente bien representados y no mejora a la del primer procedimiento.

Así mismo, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos restantes, es decir, para la desviación estándar y para el coeficiente de asimetría.

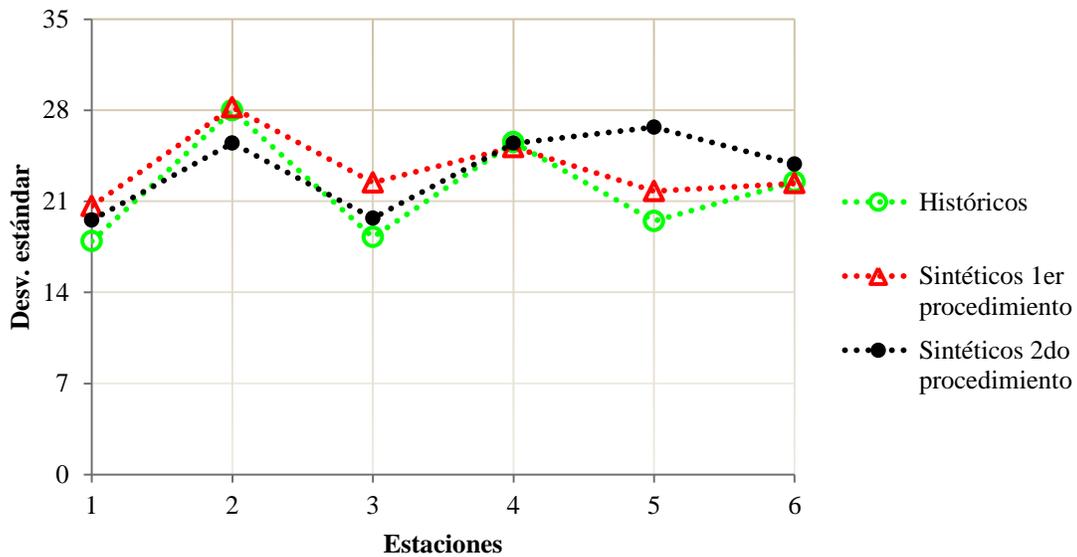


Figura 85. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

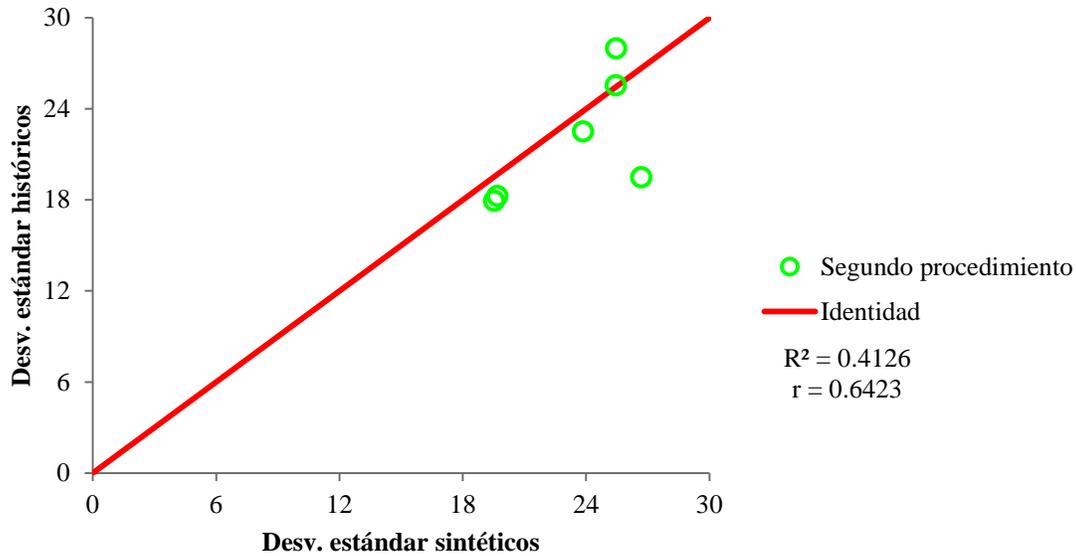


Figura 86. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación, identidad.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

El análisis de la Figura 85 presenta que para ambos procedimientos, hay similitud estación por estación del parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador de las tormentas y por lo tanto se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 86 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que este estadístico, calculado con los valores generados en el segundo procedimiento, son considerados nuevamente bien representados sin embargo no son mejorados con respecto al primer procedimiento.

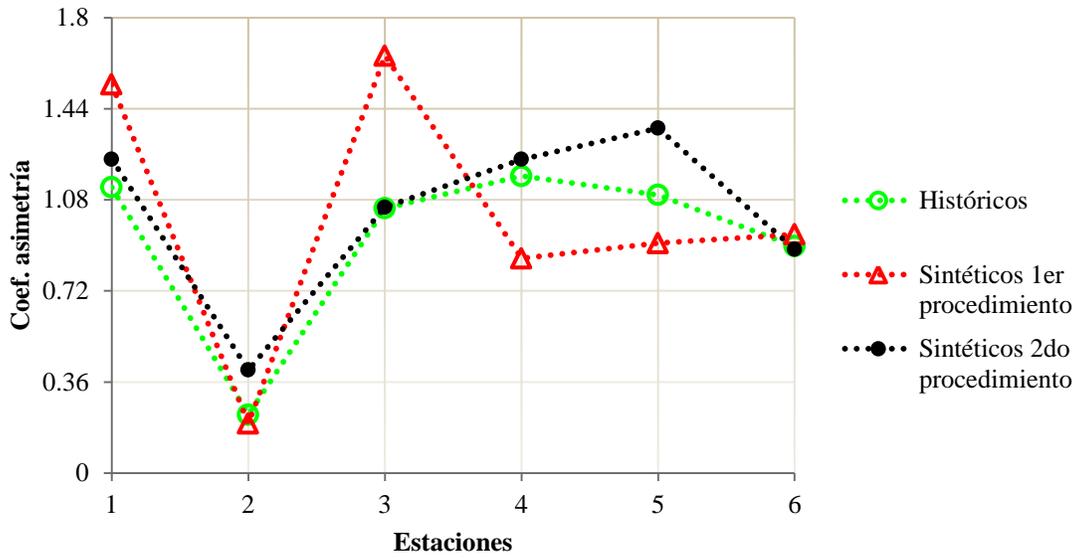


Figura 87. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

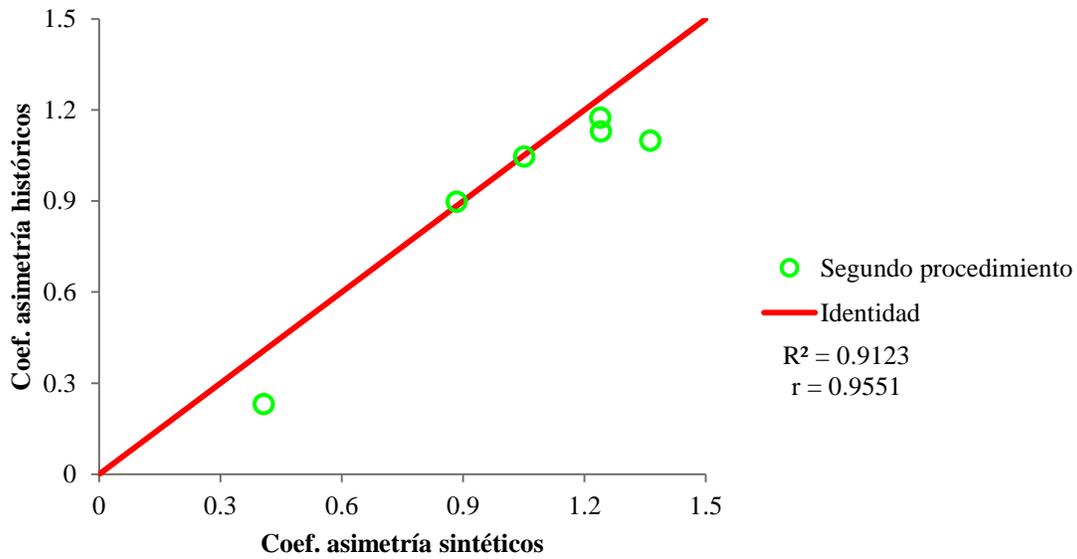


Figura 88. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación, identidad.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

El análisis de la Figura 87 presenta que para ambos procedimientos, hay cierta similitud estación por estación del parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador de las tormentas y por lo tanto se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 88 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que este estadístico, calculado con los valores generados en el segundo procedimiento, son considerados nuevamente bien representados y son mejorados considerablemente con respecto al primer procedimiento.

Con el fin de estimar la correlación entre los valores de los parámetros correspondientes a las tormentas históricas y los parámetros obtenidos de las tormentas sintéticas, se calcula el coeficiente de determinación para cada parámetro estadístico con la Ecuación 3, los coeficientes de determinación obtenidos para este caso son:

| | Var_i | Var_ϵ | C_{det} |
|-----------------|---------|----------------|-----------|
| Media | 61.763 | 14.337 | 0.7679 |
| Desv. estándar | 17.127 | 10.256 | 0.4012 |
| Coef. asimetría | 0.126 | 0.011 | 0.9115 |

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La aplicación del primer procedimiento para generar sintéticamente tormentas en la cuenca de Chicoasén en el estado de Chiapas, México, no logró reproducir adecuadamente la función de distribución de los máximos y de las medias de las tormentas históricas. Además la correlación entre la máxima precipitación registrada en la región para una tormenta dada y la extensión espacial de la misma tormenta fue débil.

Los resultados anteriores hicieron necesario realizar cambios importantes en las características de los eventos generados sintéticamente, por lo que se modificó la metodología de generación sintética y se propuso un segundo procedimiento de generación que preserve las características estadísticas generales de las series históricas, es decir, que las funciones de distribución de los máximos y de las medias así como la correlación entre las precipitaciones máximas y medias generadas sintéticamente se aproximen más a su correspondiente tormenta histórica.

Al aplicar el primer procedimiento para generar 100 tormentas sintéticas, a partir de 30, 58 y 80 tormentas registradas en 6 estaciones pluviométricas en la cuenca de Chicoasén, la tabla siguiente presenta si se reprodujo adecuadamente la función de distribución de las medias espaciales de las tormentas históricas máximas y medias.

| Reproducción Tormentas Históricas | Umbral 1 | Umbral 2 | Umbral 3 |
|-----------------------------------|----------|----------|----------|
| Máximas | Buena | Regular | Buena |
| Medias | Buena | Regular | Buena |

Como se muestra claramente en la Figura 14, Figura 15, Figura 26, Figura 27, Figura 38 y Figura 39.

La tabla siguiente presenta si se reprodujo adecuadamente la correlación entre los valores máximos y los medios.

| Reproducción | Correlación Máx vs Med | Umbral 1 | Umbral 2 | Umbral 3 |
|--------------|------------------------|----------|----------|----------|
| Históricos | Baja | 0.0024 | 0.0551 | 0.1342 |
| | Alta | 0.1896 | 0.3319 | 0.3734 |
| Sintéticos | | Regular | Mala | Regular |

Para las tormentas históricas resultó baja y para los sintéticos resultó alta como se muestra en la Figura 16, Figura 17, Figura 28, Figura 29, Figura 40, y Figura 41 respectivamente.

La baja correlación que se observa en la Figura 16, Figura 28 y Figura 40 se debe a que en el cálculo de la precipitación media está considerado el máximo; es decir, que la correlación que se obtiene es espuria, como se ha mencionado reiteradamente en este trabajo.

Debido a la baja correlación que se observa, se define el índice de extensión espacial, con lo que se demuestra que la magnitud de las precipitaciones máximas está correlacionada con la extensión espacial de las tormentas, de tal manera que las tormentas con precipitaciones máximas grandes tienden a ser menos extensas.

La tabla siguiente presenta si se reprodujeron adecuadamente los estadísticos de la generación sintética.

| Reproducción de estadísticos | Umbral 1 | Umbral 2 | Umbral 3 |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Media | Muy buena | Muy buena | Muy buena |
| Desv. Estándar | Muy buena | Muy buena | Muy buena |
| Coef. Asimetría | Muy buena | Regular | Regular |

En el caso de las asimetrías, se logró una buena correspondencia entre los valores generados y los históricos, aunque en este caso la correlación entre ambos fue menor, lo que parece lógico si se considera que se trata de un estadístico que depende del tercer momento de la función de distribución de probabilidades, usualmente difícil de reproducir.

Esto indica que el primer procedimiento puede reproducir adecuadamente las distribuciones de probabilidad de las tormentas históricas, las correlaciones de precipitaciones y los estadísticos, siempre que se utilicen umbrales con extremos en los valores mayor y promedio.

Se concluye que el método en su primer procedimiento se puede aplicar, para cada uno de los casos estudiados y se obtendrán valores generados sintéticamente que representarán de manera adecuada a los históricos.

Por lo anterior, se propone la modificación del procedimiento de generación de tormentas sintéticas, de manera que la selección de la tormenta que debía escalarse dependiera del valor máximo que se generara aleatoriamente. Al utilizar este segundo procedimiento de generación se buscó lograr la mejora respecto del primer procedimiento.

Al igual que en el anterior procedimiento, se estudian las precipitaciones obtenidas para cada una de las 6 estaciones en la muestra generada sintéticamente, la tabla siguiente presenta si se reprodujo adecuadamente la función de distribución de las medias espaciales de las tormentas históricas máximas y medias.

Segundo Procedimiento

| Reproducción Tormentas Históricas | Umbral 1 | Umbral 2 | Umbral 3 |
|-----------------------------------|-----------|----------|-----------|
| Máximas | Muy buena | Buena | Muy buena |
| Medias | Muy buena | Regular | Muy buena |

Como se muestra claramente en la Figura 59, Figura 60, Figura 69, Figura 70, Figura 79, Figura 80.

La tabla siguiente presenta si se reprodujo adecuadamente la correlación entre los valores máximos y los medios.

Segundo Procedimiento

| Reproducción Correlación Máx vs Med | Umbral 1 | Umbral 2 | Umbral 3 | |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|--------|
| Históricos | Baja | 0.0024 | 0.0551 | 0.1342 |
| Sintéticos | Baja | 0.0006 | 0.1335 | 0.4581 |
| | Buena | Regular | Mala | |

Para las tormentas históricas y para los sintéticos resultó baja como se muestra en la Figura 16, Figura 61, Figura 28, Figura 71, Figura 40, y Figura 81 respectivamente.

De acuerdo con la tabla anterior y la definición de índice de extensión espacial, se afirma que la magnitud de las precipitaciones máximas está correlacionada con la extensión espacial de las tormentas, ya que para cada uno de los umbrales el comportamiento es similar, en la generación de datos sintéticos y los históricos y por lo tanto, el segundo procedimiento lo mejora con respecto del primer procedimiento.

La tabla siguiente presenta si se reprodujeron adecuadamente los estadísticos de la generación sintética en el segundo procedimiento.

Segundo Procedimiento

| Reproducción de estadísticos | Umbral 1 | Umbral 2 | Umbral 3 |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Media | Muy buena | Muy buena | Buena |
| Desv. Estándar | Muy buena | Muy buena | Regular |
| Coef. Asimetría | Muy buena | Regular | Muy buena |

Se concluye que el método en su segundo procedimiento se puede aplicar, para cada uno de los casos estudiados y se obtendrán valores generados sintéticamente que representarán de manera adecuada a los históricos.

Finalmente para dejar claro que procedimiento generador de datos sintéticos representan mejor a los datos históricos, se hace la comparación mediante los coeficientes de determinación calculados para cada uno de los casos, mostrándose los resultados a continuación:

| C_{det} | | | | |
|---------------|-----------------|----------|----------|----------|
| Procedimiento | Estadístico | Umbral 1 | Umbral 2 | Umbral 3 |
| 1er | Media | 0.9753 | 0.9303 | 0.9798 |
| | Desv. Estándar | 0.8627 | 0.7247 | 0.7999 |
| | Coef. Asimetría | 0.8031 | 0.433 | -0.001 |
| 2do | Media | 0.9336 | 0.8966 | 0.7679 |
| | Desv. Estándar | 0.9063 | 0.8274 | 0.4012 |
| | Coef. Asimetría | 0.7826 | 0.5411 | 0.9115 |

Por lo anterior, se afirma que el segundo procedimiento mejora la generación de datos sintéticos, sin lugar a dudas.

Como consecuencia no esperada se puede señalar que cuando se considera dividir la serie histórica de tormentas máximas en dos grupos se identifica una correlación relativamente alta en el segundo grupo para todos los casos, lo cual no se contemplaba y ello motiva a que en la segunda etapa se sugiera hacer una separación de las tormentas máximas en tres grupos para observar si con ello mejora el proceso de generación sintética.

Se observa reiteradamente la importancia de la correlación entre la forma de la tormenta, expresada por el índice de extensión espacial, y la magnitud de la precipitación máxima.

La propuesta de relacionar las precipitaciones máximas (en el centro de cada tormenta) con su extensión usando un índice de extensión espacial en lugar del promedio permitió ver que las tormentas con mayores valores máximos son menos extensas.

En este trabajo se demuestra que los resultados se optimizaron al pasar de 1 a 2 subconjuntos, por lo tanto una línea de trabajo a continuar es la definición del número de subconjuntos óptimo en los que se debería dividir a las tormentas históricas, para incrementar la similitud estadística de los datos sintéticos e históricos.

Igualmente el trabajo consigue perfeccionar adicionalmente si las tormentas sintéticas generadas se consiguieran agrupar por años relacionando su tiempo de ocurrencia a un proceso de Poisson. De esta forma es posible construir series de máximos anuales de cualquier evento. Al ajustar funciones de distribución de probabilidades a dichas series es posible hacer extrapolaciones para distintos eventos de diseño que suelen usarse en obras hidráulicas.

El método propuesto es sencillo de implementar, y los resultados obtenidos son adecuados, dado que se cumple con el requisito básico de reproducir adecuadamente los estadísticos de las tormentas históricas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Arganis-Juárez M. L., R Domínguez- Mora, H. L. Cisneros-Iturbe and G. E. Fuentes-Mariles, 2008. Génération d'échantillons synthétiques des volumes mensuels écoulés de deux barrages utilisant la Méthode de Svanidze Modifiée. *J. Hydrological Sciences*. 53, 130-141.
2. Arnaud P., J. Lavabre. Using a stochastic model for generating hourly hyetographs to study extreme rainfalls. *Hydrological Sciences-Journal~des Sciences Hydrologiques*, 44(3) June (1999) 433-443
3. Arnaud, P., J. Lavabre and M. Masson, 1999. Amélioration des performances d'un modèle stochastique de génération de hyétoigrammes horaires : application au pourtour méditerranéen français. *Revue des sciences de l'eau / J. of Water Science*. 12, 251-271.
4. Arnaud P., J.A. Fine, J. Lavabre, 2007. A hourly rainfall generation model applicable to all types of climate. *Atmosphere Research* 85 230-242
5. Bouvier C., L. Cisneros, R. Domínguez, J-P. Labord and T Lebel, 2003. Generating Rainfall fields using principal components (PC) decomposition of the covariance matrix: a case study in Mexico City. *J. of Hydrology*. 8, 107-120.
6. Bogárdi J. J., L. Duckstein and O. H. Rubambo, 1988. Practical generation of synthetic rainfall time series event in a semi-arid climatic zone. *J. of Hydrology*. 103, 357-373.
7. Cernesson F., J. Lavabre, J.M., Masson, 1996. Stochastic model for generating hourly hyetographs. *Atmospheric Research* 42 149-161
8. Cisneros L., C. Bouvier and R Domínguez-Mora, 1998. Aplicación del método Kriging en la construcción de campos de tormenta en la Ciudad de México. XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Asociación Mexicana de Hidráulica e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Oaxaca, México, Octubre.
9. Cole, J.A., J. D. F. Sherriff, Some single- and multi-site models of rainfall, within discrete time increments *Journal of hidrology* 17 (1972) 97-113
10. Delleur J. W. and M. L. Kavvas, 1978. Stochastic models for monthly rainfall forecasting and synthetic generation. *J. of Applied Meteorology*. 17, 1528-1536.
11. Domínguez-Mora R., M. L. Arganis Juárez¹, A. Mendoza R., E. Carrizosa Elizondo, B. Echavarría S. Storm generator method that preserves their historical statistical characteristics. Application to Mexico City basin daily rainfall fields. Aceptado. *Atmósfera* (2012)

12. Echávez-Aldape G., R. Arrijoa-Jiménez R., 2006. Aplicaciones de la Correlación Espuria a la Ingeniería Hidráulica. Memorias del XIX Congreso Nacional de Hidráulica, Cuernavaca, Mor., México. Octubre.
13. Cernesson F., Jacques Lavabre, Jean-Marie Masson. Stochastic model for generating hourly hyetographs. *Atmospheric Research* 42 (1996) 149-161
14. Fowler H. J., C. G. Kilsby, P. E. O'Connell, A. Burton, 2005. A Weather type conditioned multi-site stochastic rainfall model for the generation of scenarios of climatic variability and change. *J. of Hydrology*. 308, 50-66.
15. Frost A.J., S.P. Charles, B. Timbal, F. Chiew, R. Mehrotra, K.C. Nguyen, R.E. Chandler, J. McGregor, G. Fu, D. Kirono, E. Fernandez. D.M. Kent. A comparison of multi-site daily rainfall downscaling techniques under Australian conditions. *Journal of Hydrology*. 408 (2011) 1-18
16. Geng S., F. W. T. Penning de Vries, I. Supit, 1986. A Simple method for generating rainfall data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 36, 363-373.
17. Guichard-Romero. D., R. Domínguez-Mora, F. Francés-García, R. García-Bartual, 2009. Análisis de la densidad de estaciones en zonas de lluvias convectivas. Caso del mediterráneo español. *Ingeniería Hidráulica en México*. 24, 35-49.
18. Jiménez E. M., 1996. Programa AX. Área de Riesgos Hidrometeorológicos. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México.
19. Koutsoyiannis D., C. Onof, Rainfall disaggregation using adjusting procedures on a Poisson cluster model, *Journal of Hidrology* 246 (2001) 109-122
20. Licznar C., J. Lomotosky D.E. Rupp. Random cascade driven rainfall disaggregation for urban hydrology: An evaluation of six models and a new generator. *Atmospheric Research*. 99 (2011) 563-578
21. Mehrotra R., A. Sharma, 2006. Conditional Resampling of hydrologic time series using multiple predictor variables: A K-nearest neighbour approach. *Advances in Water Resources*. 29, 987-999
22. Mehrotra R., R. Srikanthan, A. Sharma, 2006. A comparison of three stochastic multi-site precipitation occurrence generators. *Journal of Hydrology* 331, 280-292
23. Molnar P., P. Bourlando, 2005. Preservation of rainfall properties in stochastic disaggregation by simple random cascade model. *Atmospheric Research* 77, 137-151

24. Rodríguez-Iturbe, I., P.S. Eagleson, 1987. Water Resources research, vol. 23, NO. 1, 181-190 January 1987. Mathematical models of rainstorm events in space and time. Water Resources research, vol. 23, NO. 1, 181-190 January
25. Salsón S., García-Bartual, R., (2003) "A space-time rainfall generator for highly convective Mediterranean rainstorms". Natural Hazards and Heart System Sciences, 3:103-114.
26. Schertzer D., S. Lovejoy, 1987. Physical Modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes. Journal of geophysical research Vol. 92, No D8 9693-9714, Aug 20
27. Schertzer D., S. Lovejoy, 2009. Physical Modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes. Journal of Hydrology 375 273-286
28. Srikanthan R., T. A. Mc Mahon, 2001. Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: A review. Hydrology and Earth System Sciences. 5, 653-670.
29. Svanidze G.G., 1980. Mathematical modeling of hydrologic Series. Water Resources Publications, USA, 314 pp. SE ENCUENTRA EN LA LIBRERÍA DEL POSGRADO
30. Vischel T., T. Lebel, S. Massuel, B. Cappelaere. Conditional simulation schemes of rain fields and their application to modeling studies in the Sahel. Journal of Hydrology. 375 (2009) 273-286
31. Waymire E., V.K. Gupta. The mathematical structure of rainfall representations 1. A review of the state of the stochastic rainfall models (1981) Water Resources Research. Vol 17, No 5. pp. 1261-1272
32. Wilks D. S., 1998. Multisite generalization of daily stochastic precipitation generation model. J. of Hydrology. 210, 178-191
33. Zimmermann E. Modificaciones en los procesos hidrológicos provocados por el riego complementario en un área de llanura. (1998). XVII Congreso Nacional del Agua. Santa Fe. Argentina. Vol 2. Pp. 278-289