

**Estimación de curva IDF a partir de lluvias máximas en 24 horas en el Departamento del
Atlántico**

Por:

Belky Soley Mejía Arrieta



Universidad de la Costa

Facultad de Ingeniería

Ingeniería civil

Barranquilla

2017

**Estimación de curva IDF a partir de lluvias máximas en 24 horas en el Departamento del
Atlántico**

Por:

Belky Soley Mejía Arrieta

Asesor:

Armando Fontalvo Lascano

Gabriel Oyaga García

Para otorgar el título de ingeniero civil

Universidad de la Costa

Facultad de Ingeniería

Ingeniería civil

Barranquilla

2017

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Barranquilla, Atlántico

Agradecimientos

Le agradezco a Dios por la oportunidad de estudiar esta hermosa carrera y por la familia tan maravillosa que me dio.

A mis padres, Pedro Mejia y Patricia Arrieta, por su apoyo incondicional, en especial a mi madre por tener siempre las palabras perfectas para motivarme a ser mejor.

A mis abuelos, Pedro Arrieta y Iris Ortega, por todo su amor, en especial a mi Abuela yiyi por consentirme siempre.

A mis hermanos, Pedro Mejia y Roiner Mejia, por querer ser su mejor ejemplo.

A la hermana que me dio la vida, Vanessa Castillo, por estar conmigo ante cualquier circunstancia y con la mejor actitud.

A mis asesores por su tiempo, conocimiento y paciencia

Dedicatoria

A mis hermanos, para demostrarle que con esfuerzo y dedicación todo se puede conseguir.

Resumen

Las curvas de Intensidad- Duración- Frecuencia (Curvas IDF) son comúnmente utilizadas en los modelos de lluvias-escorrentía para la determinación de caudales máximos en el diseño de obras hidráulicas utilizadas para el control de inundaciones y recursos hídricos. En el presente trabajo de grado se propone un método para la estimación de curvas IDF a partir de precipitaciones máximas en el Departamento del Atlántico para obras hidráulicas de magnitudes medianas y pequeñas. Para ellos se analizaron los registros de 35 estaciones pluviométricas y de 5 estaciones pluviográficas ubicadas en el departamento, considerando un periodo de referencia histórico de 37 años. Además, se evaluó el ajuste de diferentes distribuciones de probabilidad para la proyección de las intensidades máximas a diferentes duraciones y periodos de retorno para cada estación pluviográfica. Lo que permitió el ajuste de un modelo matemático ajustado en función de la media anual de las precipitaciones máximas en 24 horas para la generación de curvas IDF sintéticas. Se obtuvieron mapas de isolíneas generados a partir de la aplicación de técnicas de interpolación espacial de los parámetros ajustados de la ecuación propuesta y de media anual de las precipitaciones máximas en 24 horas, que permitirá determinar curvas IDF sintéticas en cualquier punto del Departamento del Atlántico.

Palabras Clave

Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, Intensidad, Estación, Precipitación

Abstract

Intensity-Frequency Curves (IDF Curves) are commonly used in the rainfall-runoff models for the determination of maximum flows in the design of hydraulic works used for the control of floods and water resources. In the present work of degree a method is proposed for the estimation of IDF curves from maximum precipitations in the Departamento of Atlántico for hydraulic works of medium and small magnitudes. For them, the records of 35 pluviometric stations and 5 pluviographic stations located in the department were analyzed, considering a 37-year historical reference period. In addition, it was evaluated the adjustment of different probability distributions for the projection of the maximum intensities to different durations and return periods for each rainfall season. This allowed the adjustment of a mathematic model adjusted according to the annual average of the maximum precipitations in 24 hours for the generation of synthetic IDF curves. Isoline maps generated from the application of spatial interpolation techniques of the adjusted parameters of the proposed equation and the annual average of the maximum precipitations in 24 hours were obtained, which will allow determining synthetic IDF curves at any point in the Departamento of Atlántico.

Keywords

Intensity-Duration-Frequency Curves, Intensity, Pluviometry Station, Pluviographic Station, Precipitation

Tabla de contenido

Introducción.....	16
2. Planteamiento del problema	17
2.1. Pregunta de investigación	18
3. Justificación.....	19
4. Objetivos.....	21
4.1. Objetivo general:.....	21
4.2. Objetivos específicos:	21
5. Situación actual del conocimiento.....	22
5.1. Situación actual del conocimiento en Colombia.....	25
6. Marcos de referencia	28
6.1. Marco de geográfico	28
6.2. Marco teórico	29
6.2.1. Curvas IDF.....	29
6.2.2. Distribuciones de probabilidad.....	31
6.2.3. Prueba de ajuste	32
6.2.4. Análisis geoestadístico:	33
7. Diseño metodológico.....	36
7.1. Etapa 1. Recolección y tratamiento de la información	36

7.2. Etapa 2. Construcción de curvas IDF reales	36
7.3. Etapa 3. Desarrollo de una nueva ecuación para la determinación de curvas IDF sintéticas en el Departamento del Atlántico.....	37
8. Recolección y tratamiento de la información	39
8.1. Recolección y selección de registros pluviométricos	39
8.2. Proceso de homogeneidad y completado de series anuales de precipitaciones máximas en 24 horas.....	42
8.3. Recolección y selección de registros pluviográficos	54
8.4. Selección de intensidades máximas	55
8.5. Evaluación de ajuste de series de intensidades máximas a funciones de distribución de probabilidad.....	56
9. Desarrollo de una nueva ecuación para la determinación de curvas IDF sintética en el Departamento del Atlántico.....	58
9.1. Construcción de curva IDF reales	58
9.1.1. Análisis de frecuencia de las series de intensidades máximas por medio de la función de distribución de Gumbel.....	58
9.2. Construcción de curvas IDF sintéticas a partir de precipitación máxima en 24 horas	60
9.2.1. Parametrización de ecuación de intensidad	60
9.2.2. Aplicación de técnicas geoestadísticas de interpolación	72
9.3. Análisis comparativo.....	80

9.3.1. Determinación de la curva IDF sintética aplicando del método propuesto para el Departamento del Atlántico	81
9.3.2. Determinación de la curva IDF sintética por el método simplificada	86
9.3.3. Comparación entre los dos métodos	88
Conclusiones	90
Referencias.....	93

Lista de tablas

Tabla 1 Datos de las estaciones pluviométricas del Departamento del Atlántico seleccionadas para el estudio.....	40
Tabla 2 Estadísticos de las series temporales de precipitaciones máximas.....	44
Tabla 3 Proceso y resultados de corrección de la estación La pintada perteneciente al grupo 1.	47
Tabla 4 Datos corregidos del Grupo 1 de las estaciones pluviométricas.	49
Tabla 5 Precipitación máximas promedio anual en 24h de las estaciones pluviométricas del departamento del Atlántico.....	52
Tabla 6 Estaciones seleccionadas.....	54
Tabla 7 Prueba de ECMF para la estación de A.E. Cortissoz.	56
Tabla 8 Datos de intensidades obtenidos con la distribución de Probabilidad Gumbel de la estación A. E.....	58
Tabla 9 Ecuaciones ajustadas a las curvas IDF reales propuestas para cada una de las estaciones pluviográficas estudiadas.	63
Tabla 10 Valores de intensidad de precipitación estimadas para la estación A.E. Cortissoz.	64
Tabla 11 Valores de intensidad de precipitación estimadas para la estación Galerazamba.....	65
Tabla 12 Valores de intensidad de precipitación estimadas para la estación Las Flores.	66
Tabla 13 Valores de intensidad de precipitación estimadas para la estación El Limón.....	67
Tabla 14 Valores de intensidad de precipitación estimadas para la estación N. Manatí.....	68
Tabla 15 Promedio de los errores relativos porcentuales. Cortissoz.....	72

Tabla 16	Valores promediados de los parámetros a , b , c , d y de la Media anual de la precipitación máximas en 24 horas (M) de la Ecuación (22 propuesta para el cálculo de las curvas IDF sintética.....	84
Tabla 17	Valores de curvas IDF estimadas para la ubicación del Proyecto con la ecuación propuesta en este trabajo de grado.....	85
Tabla 18	Valores de intensidad de precipitación estimadas con el método simplificado para el Proyecto.....	87
Tabla 19	Diferencia promedio entre los métodos.....	89

Lista de figuras

Figura 1. Marco de referencia. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.	28
Figura 2. Metodología utilizada. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.	38
Figura 3. Estaciones pluviométricas del Departamento del Atlántico seleccionadas. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.....	42
Figura 4. Ausencia de datos en las series hidrológicas. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017. ...	43
Figura 5. Ajuste de la serie anual de la estación La Pintada utilizando un modelo de regresión lineal en Microsoft Excel®. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.	48
Figura 6. Pluviograma de la estación de A.E. CORTISSOZ. Fuente: IDEAM.....	55
Figura 7. Curva IDF reales de la estación de A. E. Cortissoz. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.	60
Figura 8. Ajuste los datos de intensidades y duración para un periodo de retorno 2 (T-2) de la estacione A.E. Cortissoz utilizando un modelo de regresión lineal en Microsoft Excel®. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.....	62
Figura 9. Curva IDF sintética a partir de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación de A.E. Cortissoz. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.....	69
Figura 10. Curva IDF sintética a partir de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación de Galerazamba. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.....	69
Figura 11. Curva IDF sintética a partir de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación de Las Flores. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.	70
Figura 12. Curva IDF sintética a partir de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación de El Limón. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.....	70

Figura 13. Curva IDF sintética a partir de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación de N. Manatí. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.....	71
Figura 14. Mapas de la superficie IDW interpolada (izquierda) y la superficie KO interpolado (derecha) de la precipitación máximas promedio anual 24h de las 38 estaciones pluviométricas estudiadas en el departamento del Atlántico. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.	73
Figura 15. Mapas de isolíneas de la Media Anual de la Precipitación Máxima en 24 (M) en el Departamento del Atlántico. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.....	75
Figura 16. Mapas de isolíneas del parámetro “a” en el Departamento del Atlántico. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.....	76
Figura 17. Mapas de isolíneas del parámetro “b” en el Departamento del Atlántico. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.....	77
Figura 18. Mapas de isolíneas del parámetro “c” en el Departamento del Atlántico. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.....	78
Figura 19. Mapas de isolíneas del parámetro “d” en el Departamento del Atlántico. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.....	79
Figura 20. Ubicación de la Obra por Diseñar en el Departamento del Atlántico. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.....	80
Figura 21. Ubicación de la obra en el mapa de Isolíneas del parámetro “a”. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.....	81
Figura 22. Ubicación de la obra en el mapa de Isolíneas del parámetro “b”. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.....	82
Figura 23. Ubicación de la obra en el mapa de Isolíneas del parámetro “c”. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.....	82

Figura 24. Ubicación de la obra en el mapa de Isolíneas del parámetro “d”. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.....	83
Figura 25. Ubicación de la obra en el mapa de Isolíneas de la media de precipitación máxima en 24horas “M”. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.	83
Figura 26. Curvas IDF del proyecto con el método propuesto para el Departamento del Atlántico. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.....	86
Figura 27. Curvas IDF del proyecto con el método simplificado. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.....	88

Introducción

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (curvas IDF) son utilizadas en la modelación del proceso lluvia- escorrentía para la estimación de caudales máximos en una zona de interés con el fin de diseñar y dimensionar obras hidráulicas usadas para el control de inundaciones y el aprovechamiento de los recursos hídricos. La metodología de las curvas IDF permite establecer intensidades máximas en distintos periodos de diseño y para duraciones determinadas. Las curvas IDF son elaboradas a partir de los registros de precipitación de estaciones pluviográficas, pero debido a la escasa cantidad de estas estaciones se recurre a la información de estaciones pluviométricas a través de ajuste de ecuaciones locales de regresión.

Debido a la importancia de las curvas IDF en el diseño de estructuras hidráulicas confiables y efectivas, en la actualidad se han generado un gran interés por reducir la incertidumbre sujeta al fenómeno de precipitaciones máximas. Esta incertidumbre es generada por varios factores tales como los errores instrumentales o humanos, la selección equivocada de lluvias representativas del área de estudio, la adopción de cortos periodos históricos de referencia, el uso inadecuado de los métodos estadísticos relacionados con el análisis de frecuencias de eventos extremos o de técnicas que no consideren la variabilidad espacial y temporal de este fenómeno hidrológico.

Por esto, en el presente trabajo de grado se estudió el comportamiento de los eventos de lluvias de corta duración registradas por estaciones pluviográficas en el departamento del Atlántico para la obtención de eventos extremos con el objetivo de ajustar ecuaciones de intensidad que permitan estimar curvas IDF a partir de precipitaciones máximas en 24h.

2. Planteamiento del problema

La determinación de los caudales máximos de diseño es una tarea crítica y de mucha importancia para el dimensionamiento de obras civiles relacionadas con el manejo de los recursos hídricos en temas de estructuras de control y defensa contra inundaciones. Uno de los inconvenientes en la determinación de dichos caudales a nivel departamental se origina en la falta de datos de medición de caudales, por lo que se acude a modelos hidrológicos lluvia-escorrentía para cuantificar el volumen de agua que precipita en la zona de interés a partir de los registros de las estaciones pluviográficas y el uso de las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF). Sin embargo, la escasez de estaciones pluviográficas instaladas, debido a su alto costo de inversión inicial y mantenimiento, hace más difícil el análisis hidrológico de las zonas que se encuentran distanciadas de estas estaciones.

Por otra parte, el departamento cuenta con un número considerable de pluviómetros que miden la precipitación máxima diaria en 24 horas. No obstante, estos registros poseen altas limitaciones porque no permiten conocer de forma exacta como se distribuye la precipitación a lo largo de una tormenta. Más aún, una porción de datos se encuentra ausente en las series anuales registradas por los pluviómetros debido a la ineficacia de los operadores e incluso de la máquina.

A raíz de la situación descrita en torno a la escasez de estaciones pluviográficas, es necesario desarrollar modelos matemáticos que permitan obtener curvas IDF a partir de información pluviométrica y de esta forma contar con valores de intensidad que permitan estimar el comportamiento hidrológico en zonas en las que solo cuenten con registros de lluvias máximas a nivel diario.

En el departamento del Atlántico aún no se cuenta con un estudio que haya desarrollado un análisis completo, para determinar curvas IDF sintéticas a partir de las precipitaciones máximas registradas por estaciones pluviométricas, que logre obtener de manera confiable la intensidad de una tormenta de diseño en cualquier punto del departamento.

2.1. Pregunta de investigación

¿Qué ecuación en función de la media de precipitaciones máximas en 24 se ajusta mejor a las curvas IDF reales obtenidas a partir de registros pluviográficos?

3. Justificación

Las estimaciones de eventos extremos de precipitación son utilizadas generalmente en el diseño de obras de manejo de recursos hídricos y planteamiento de criterios de predicción y de riesgo de inundaciones. En el proceso de cálculo de caudales de diseño en lugares donde no se posee registros históricos de caudales se utilizan usualmente modelos de lluvia-escorrentía, que requieren de manera imprescindible la determinación de eventos extremos a un determinado periodo de retorno y, en su defecto, de curvas IDF que proporcionen la información necesaria para un adecuado dimensionamiento de la estructura hidráulica.

El análisis de la distribución espacial y temporal de la precipitación como mecanismo responsable del inicio del proceso hidrológico en el Departamento del Atlántico, ayudará a establecer patrones que definan el comportamiento hidrológico de dicha zona, esto contribuirá a diseños confiables y efectivos de obras de drenaje o de estructuras hidráulicas en general, ya que se logrará determinar el volumen máximo de agua que debe ser evacuado en un lapso de tiempo reduciendo de esta forma los riesgos inminentes por la probabilidades de excedencia de una tormenta.

En esta perspectiva las curvas IDF permiten determinar intensidades máximas anuales de precipitación para cualquier periodo de retorno y duración. Dichas curvas son obtenidas por medio de datos de precipitación registrados por estaciones pluviográficas, cuya cantidad es escasa en el Departamento del Atlántico, lo que lleva a recurrir a modelos matemáticos que relacionan la intensidad de lluvia con variables como la precipitación máxima en 24 horas obtenidas a partir de registros de estaciones pluviométricas. La estimación de curvas IDF a partir de datos pluviométricos permitirá determinar los valores de intensidad en zonas donde no haya información pluviográfica. El ajuste de esta ecuación

a las curvas IDF reales permitirá obtener un nuevo modelo matemático característico del Departamento del Atlántico para la estimación intensidades máximas de precipitación para una duración y periodo de retorno determinado.

Los resultados obtenidos en esta investigación serán útiles para obras medianas y pequeñas que se encuentren distanciadas de una estación pluviográfica y que sólo tengan disponibles registros pluviométricos ya que, analizando la forma como actúan las precipitaciones de las estaciones consultadas, se podrán obtener los patrones de comportamiento de las lluvias en cualquier cuenca dentro del Departamento del Atlántico.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general:

- Estimar curvas IDF a partir de lluvia máximas de 24 horas en el departamento del Atlántico.

4.2. Objetivos específicos:

- Recolectar y analizar la información de estaciones Pluviométricas y Pluviográficas en el departamento del Atlántico y alrededores en un periodo de 30 años.
- Completar registros pluviográficos y pluviométricos a través de modelos de ajustes.
- Construir curvas IDF sintéticas a partir de registros de precipitación máxima en 24 horas de las estaciones pluviográficas.
- Estudiar ecuaciones propuestas en la literatura que describan de manera generalizada las curvas IDF.
- Determinar una nueva ecuación que tenga mejor ajuste con las curvas IDF reales.

5. Situación actual del conocimiento

Las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) son usadas habitualmente para la determinación de tormentas de diseño empleadas en el cálculo y dimensionamiento de obras de ingeniería. La modelación de intensidades máximas en una zona geográficas mediante el ajuste de distribuciones de probabilidad posee errores inherentes. Dicha incertidumbre es producida por diferentes factores, tales como datos defectuosos, periodo de registro cortos, tipos de modelos y procedimientos utilizados en la estimación de parámetros (Huang, Mirzaei, y Mat, 2016).

Siendo el procesamiento estadístico de los registros un factor que incide en la calidad de los valores obtenidos de eventos extremos, resulta de gran interés para los investigadores la evaluación del ajuste de las diferentes técnicas estadísticas propuestas para el análisis de frecuencia de precipitaciones máximas. Nguyen, El Outayek, Lim, y Van (2017) evaluaron el rendimiento de ecuaciones de distribución de probabilidad convencionales usadas para la determinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento de lluvia en la ciudad de Ontario (Canadá), basándose en sus capacidades descriptivas y predictivas.

Jun, Qin, Gan, Tung, y De Michele (2017) presentaron un procedimiento basado en modelos de copulación, para optimizar las cantidades de lluvia de diseño. Wright, Smith, Villarini, y Baeck, (2013) combinaron la transposición estocástica de las lluvias con “catálogos de tormentas” elaborados a partir precipitaciones registradas por un radar meteorológico. Asimismo, Willems (2000) obtuvieron relaciones de curvas IDF para intensidades máximas en Uccle (Bélgica), fusionando métodos tradicionales y metodologías recién desarrollados. Finalmente, De Salas y Carrero (2008) desarrollaron una nueva herramienta computacional llamada MAXIN, para la estimación de

la intensidad máxima para una duración y periodo de retorno determinados en España Peninsular.

Otros expertos han estudiado las repercusiones generadas por las márgenes de errores producidas en la construcción de curvas IDF. Hailegeorgis y Alfredsen (2017) llevaron a cabo un análisis de los eventos extremos de precipitación y de escorrentía en la ciudad de Trondheim (Noruega), indicando las consecuencias que generan la incertidumbre adheridas a las curvas IDF sobre la fiabilidad del dimensionamiento de alcantarillados pluviales. Con este mismo objeto Fadhel, Rico y Han (2017) evaluaron la incertidumbre sujeta en la construcción de curvas IDF debido al cambio climático, encontraron que el porcentaje de incertidumbre varía significativamente para periodo de retorno largos y para duración cortas de lluvia. También observaron la gran influencia que tiene la determinación de un buen periodo de referencia a la hora de corregir los sesgos de precipitación.

Algunos estudios se han enfocado en la variabilidad temporal y espacial de los registros de precipitaciones máximas anuales en diferentes lugares. Overeem, Buishand y Holleman (2008) estudiaron los efectos de la dependencia entre la lluvia máxima para diferentes duraciones en la estimación de las curvas IDF en Netherlands (Países Bajos). Norbiato, Borga, Sangati y Zanon, (2007) caracterizaron la gravedad de una tormenta ocurrida el 29 agosto de 2003 en la cuenca superior del Tagliamento, ubicada en los Alpes Italianos Orientales, mediante el análisis regional de frecuencia de precipitaciones máximas anual de corta duración, debido a la gran variabilidad espacial que la tormenta presentó. Dolšak, Bezak y Šraj (2016) efectuaron un análisis de los datos de precipitación registrados por 30 estaciones en Eslovenia. Teniendo en cuenta la distribución espacial de la lluvia, Álvarez (2011) obtuvieron mapas de lluvias mediante la aplicación de métodos de interpolación basados en técnicas geoestadísticas y de regresión lineal para las áreas montañosas de

España. Cortéz, Ovalles, Rodríguez, Rey y Núñez (2005) también hizo un análisis geostadístico con el fin de evaluar la variabilidad temporal de los datos de precipitación climática en el estado Aragua (Venezuela).

Algunas investigaciones recurren al ajuste de ecuaciones generales de intensidad para la construcción de curvas IDF sintéticas que describan mejor los eventos de lluvias generados en un territorio, con el objetivo de inferir valores de intensidad máximas en lugares cercanos donde no haya datos registrados. Zope, Aldho y Jothiprakash (2016) obtuvieron una ecuación modificada para el desarrollo de curva IDF sintéticas de lluvia que se ajusta aproximadamente a los cambios presentados en las condiciones hidrológicas en la ciudad de Mumbai (India). En la zona de Sinaí se realizó un análisis de la distribución de la lluvia en el tiempo, con el fin de elaborar curvas IDF sintéticas para el cálculo de tormentas de diseño (Hassan, 2017). Del mismo modo en Chile se obtuvieron modelos de ajuste para 6 estaciones pluviográficas para la extrapolación de curvas IDF hacia zonas sin pluviógrafos (Pizarro, Abarza y Flores, 2001).

Recientemente se ha generado inquietud el cambio presentado en la frecuencia de las lluvias, Fowler y Kilsby (2003) argumenta que: “Esto puede deberse a variabilidad climática natural, cambio climático, o ambos. En teoría el cambio climático afecta directamente la magnitud y frecuencia de intensidades de lluvia” (p.1313). Debido a las posibles variaciones producidas por el cambio climático en las precipitaciones extremas, se debe aplicar un ajuste en los parámetros de las curvas IDF para condiciones climáticas futuras (Liuzzo, Notaro y Freni, 2016). Agilan y Umamahesh (2017) argumentan las variables que afectan las precipitaciones de corta duración son los procesos locales (la urbanización) y en el caso de lluvias de larga duración son los procesos globales como el calentamiento global. Recientemente se han desarrollado estudios teniendo en cuenta estos

factores, como el aplicado en Saskatoon (Canadá) donde se estimaron curvas IDF bajo posibles escenarios de cambio climático (Alam y Elshorbagy, 2015). Cabe resaltar que despreciar el grado de incertidumbre en la evaluación de los parámetros de las curvas IDF por los efectos del cambio climático podría causar tanto una posible sobreestimación o una subestimación en las tormentas de diseño.

5.1. Situación actual del conocimiento en Colombia

El Manual de Drenaje para Carreteras (Instituto Nacional de Vías-INVIAS, 2009) propone para Colombia un método simplificado para determinar curvas IDF cuando no se disponen registros de precipitación de corta duración. esta técnica es basada en un estudio realizado por Vargas y Díaz Granados (1998), en el cual se dividió el país en cinco regiones climatológicas equivalentes a las regiones geográficas con el fin de ajustar ecuaciones para la estimación de curvas IDF en función de la precipitación máxima promedio anual en 24 horas, el número promedio de días de lluvia al año, la precipitación total media anual y la elevación de la estación. Cabe resaltar que el grado de ajuste medido de la ecuación propuesta a los valores registrados por 28 estaciones a lo largo de la Región Caribe por el coeficiente de Pearson (r^2), cuyo valor cercano a uno determina un mejor ajuste, fue en promedio de $r^2 = 0,73$, muy por debajo de las otras regiones cuyo valor de r^2 fue superior a 0,9. Esta metodología ha sido analizada junto con otras técnicas con el propósito de optimizar el proceso de construcción de curvas IDF en el país. Vélez et al. (2002) hicieron un análisis general de diferentes metodologías en los Andes Tropicales de Colombia, evaluando el ajuste de varias ecuaciones paramétricas propuestas por diferentes autores y de la teoría de multiescalamiento con el fin de generar nuevas expresiones para la

estimación de intensidades máximas en lugares de escasos registros. Pulgarín y Poveda (2008) afirman que: “La utilización de las curvas IDF en conjunto con metodologías que determinan las propiedades de invarianza de escala de las precipitaciones máximas permite tener una perspectiva física de los procesos involucrados” (p.1). Los estudios posteriores realizados por Pulgarín (2009) aplican y comparan los resultados de metodologías basadas en teorías convencionales y de escalamiento recientemente desarrolladas en la estimación de curvas IDF en la Región Andina de Colombia. En el municipio de Anapoima en el departamento de Cundinamarca se realizó análisis comparativo entre las curvas IDF reales hechas por teorías tradicionales y las curvas sintéticas efectuadas mediante el método simplificado mencionado (Pinilla y Corzo 2015). De igual modo en el departamento de Boyacá se evaluó el ajuste de diferentes distribuciones de probabilidad, encontraron que la función de Valor Extremo Tipo 1 era la que mejor describía el comportamiento de la lluvia en esa zona (Acosta y Sierra, 2013). Además se han propuesto el uso de otras funciones de probabilidad como la distribución mixta de probabilidad Doble de Gumbel, la cual en teoría posibilita una mejora obtención de valores máximos de intensidad (Villarreal, 2015).

De acuerdo al tema del efecto del cambio climático en la estimación de curvas IDF en Colombia, Acevedo (2009) evaluó los cambios futuros en las curvas IDF ante distintos escenarios del cambio global analizados, los resultados indicaron que efectivamente si habría un cambios en las tormentas más intensas.

Como es evidente la mayoría de las investigaciones relacionadas a la optimización del proceso utilizado en la construcción de curvas IDF se han concentrado en el centro del país, pocos estudios se han enfocado en estudiar el comportamiento de las lluvias en la Región Caribe. Sin embargo, se destaca la investigación de Arrieta y Guerrero (2008), quienes parametrizaron una función logarítmica que relaciona las precipitaciones máximas en 24

(P_{MAX} 24h) horas con el periodo de retorno. Para la regionalización de las P_{MAX} 24h en el Departamento del Atlántico este estudio solo consideró cuatro estaciones pluviométricas. Fuera de la investigación mencionada, no hay registros de construcción de curvas IDF en la región caribe colombiana y en el departamento de Atlántico.

6. Marcos de referencia

La Figura 1 presenta los marcos de referencia utilizados en esta investigación:

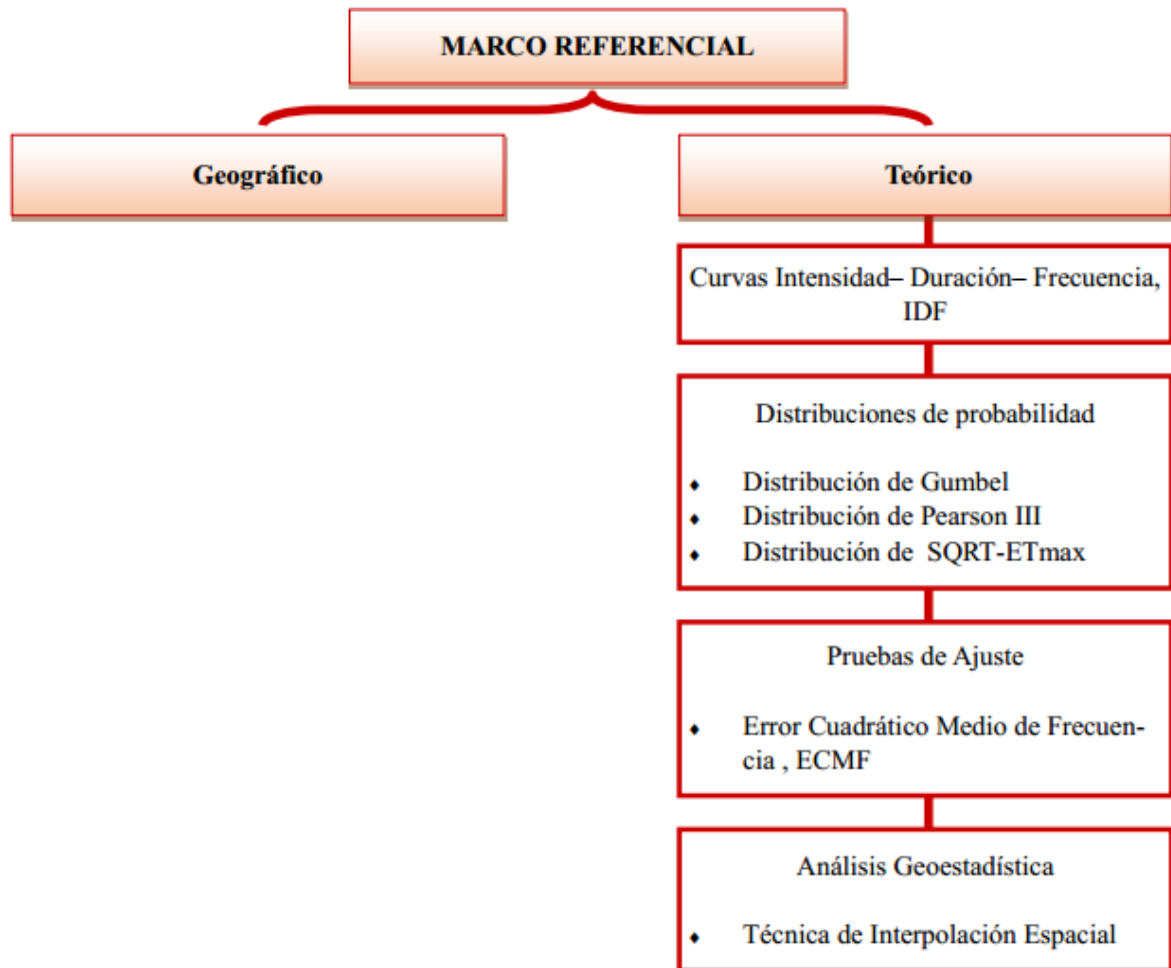


Figura 1. Marco de referencia. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

6.1. Marco de geográfico

El departamento del atlántico posee un área de 3.386 km^2 está situado al norte del territorio colombiano, se encuentra a una latitud norte entre los $10^{\circ} 15' 36''$ (Sur de San Pedrito) y $11^{\circ} 06' 37''$ (Bocas de Ceniza) y a una Longitud oeste de Greenwich $74^{\circ} 42' 47''$ (margen izquierda del río Magdalena) $75^{\circ} 16' 34''$ (intersección Santa Catalina y Arroyo

grande). El departamento limita al norte y noreste con el mar Caribe, Al este, con el río Magdalena, al sur, suroeste y oeste con el departamento de Bolívar. El departamento presenta un clima tropical de estepa y sabana de carácter árido en la desembocadura del río Magdalena y alrededores de Barranquilla; semi-árido en las fajas aledañas al litoral y al río Magdalena y semihúmedo desde Sabanalarga hacia el sur. En la orografía del territorio predomina las tierras bajas y llanas, las ciénagas y serranías y una franja litoral entre desértica y sabana. (Gobernación de Atlántico, 2014)

6.2. Marco teórico

Los temas empleados en esta investigación se exponen en los siguientes ítems:

6.2.1. Curvas IDF.

Las curvas IDF son definidas como curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno (Témez, 1978). Son utilizadas principalmente para determinar la intensidad, duración y frecuencia de la precipitación en lugares donde no se poseen pluviómetros. Habitualmente son usadas en el cálculo de tormentas diseño para el dimensionamiento de obras hidráulicas, también son utilizadas en la modelación hidrológica de cuencas para la evaluación del riesgo de inundaciones.

Varios autores han propuesto modelos matemática para la caracterización de la relación intensidad-duración y frecuencia de series de precipitaciones. Casi todas siguen un modelo general presentado en la Ecuación (1) para la determinación de intensidades máximas (Monsalve, 1999).

$$i = \frac{K \cdot T^m}{(t + t_0)^n} \quad (1)$$

Donde

i : Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).

T : Periodo de retorno, en años.

t : Duración de la lluvia, en minutos (min).

t_0 : Constante, en minutos (min).

K , m y n : Parámetros de ajuste de la regresión.

Para Colombia Vargas y Díaz Granados (1998) propusieron una ecuación de intensidad en función de la precipitación máxima promedio en 24 horas, la expresión se muestra en la Ecuación (2).

$$i = \frac{a \cdot T^b \cdot M^d}{t^c} \quad (2)$$

Donde

i : Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).

T : Periodo de retorno, en años.

M : Precipitación máxima promedio anual en 24 horas a nivel multianual.

t : Duración de la lluvia, en minutos (min).

a , b , c , d : Parámetros de ajuste de la regresión.

6.2.2. Distribuciones de probabilidad.

Una distribución de probabilidad es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria. Mediante el ajuste a una distribución de un conjunto de datos hidrológicos, una gran cantidad de información probabilística en la muestra puede resumirse en forma compacta en la función y en sus parámetros asociados (Chow et al., 1994). Para el análisis de frecuencia de series temporales de precipitación se utilizan varias funciones de distribución, a continuación, se muestran las aplicadas en esta investigación:

6.2.2.1. Distribución de Gumbel.

La Ecuación (3) y la Ecuación (4) corresponden a la función de distribución y de densidad respectivamente (Naghetini y De Andrade, 2007).

$$F(x) = e^{\left[-e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}\right]} \quad (3)$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} * e^{\left[-\frac{x-u}{\alpha} - e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}\right]} \quad (4)$$

Donde α y u son parámetros de forma y de localización respectivamente, estimados mediante el Método de los Momentos. Las expresiones obtenidas de la media y desviación típica de la población son mostradas en las Ecuación (5) y ecuación (6) (Naghetini y De Andrade, 2007).

$$\bar{x} = u + 0,5772 * \alpha \quad (5)$$

$$\delta = \frac{\pi * \alpha}{\sqrt{6}} \quad (6)$$

6.2.2.2. Distribución de Pearson III.

La función de densidad es mostrada en la Ecuación (7) (Pizarro et al., 2007).

$$f(x) = \frac{1}{\alpha^k * \Gamma(k)} (x - u)^{k-1} * e^{-\frac{(x-u)}{\alpha}} \quad (7)$$

Donde k , u y α son parámetros de forma, localización y forma, y $\Gamma(k)$ es la función de Gamma. Los parámetros de la distribución son calculados mediante la Ecuación (8), Ecuación (9) y Ecuación (10), en función del promedio \bar{x} , desviación estándar δ y el coeficiente de sesgo C_s de la muestra (Pizarro et al., 2007).

$$k = (2/C_s)^2 \quad (8)$$

$$\delta = \bar{x} - \alpha k \quad (9)$$

$$\alpha = \delta/\sqrt{k} \quad (10)$$

6.2.2.3. Distribución de SQRT ET-máx.

La ecuación (11) pertenece función de distribución de SQRT ET-máx (Zorraquino, 2004).

$$F(x) = e^{-k[1+\sqrt{\alpha \cdot x} \cdot e^{-\sqrt{\alpha \cdot x}}]} \quad (11)$$

Esta ecuación está compuesta por dos parámetros, k de formas y α de escala, su estimación se hizo por medio del método de máxima verosimilitud. El ajuste de la distribución a los registros de precipitaciones máximas anuales se hizo mediante un programa desarrollado en el software estadístico R[®] bajo el lenguaje se aplicó todos los cálculos correspondientes a esta distribución (Sáez, 2009).

6.2.3. Prueba de ajuste

Sirven para medir el grado de ajuste de la serie temporal de precipitación a un modelo de distribución de probabilidad, comparando la frecuencia acumuladas de los registros con la frecuencia acumulada calculadas con las funciones de probabilidad. A continuación, se muestras la prueba de bondad de ajuste aplicadas:

6.2.3.1. Error cuadrático medio de frecuencia, *ECMF*

Este método es uno de los más utilizados para evaluar la bondad de ajuste de distribuciones de probabilidad, este test de ajuste está definido por La Ecuación (12) (Álvarez, 2011).

$$ECMF = \sqrt{\frac{\sum (P_{i(x_i)} - P_{j(x_i)})^2}{N}} \quad (12)$$

Donde:

$P_{i(x_i)}$: Frecuencia experimental correspondiente a un valor de la variable x_i

$P_{j(x_i)}$: Frecuencia teórica correspondiente a una distribución j para la variable x_i

N : Longitud de la serie analizada

La distribución experimental fue calculada mediante la Ecuación (13)

$$f = \frac{m}{N + 1} \quad (13)$$

Donde m es el valor observado de la variable.

6.2.4. Análisis geoestadístico:

La geoestadística ofrece un conjunto de metodologías para el análisis de la dependencia, variabilidad y continuidad espacial y temporal de diferentes variables, con el fin de analizar, modelar y predecir de un fenómeno. A continuación, se explican dos técnicas de interpolación espacial comúnmente utilizadas para el análisis espacial de variables hidrológicas.

6.2.4.1. Técnicas de interpolación espacial

6.2.4.1.1. Inverse Distance Weighting, IDW

Es una técnica de interpolación en la que las estimaciones interpoladas se realizan basándose en valores ubicaciones cercanas, ponderadas sólo por la distancia desde la ubicación de interpolación. IDW no hace suposiciones acerca de las relaciones espaciales, excepto el supuesto básico de que los puntos cercanos deben estar más estrechamente relacionados que los puntos lejanos con el valor en la ubicación interpuesta (Naoum y Tsanis, 2004). La Ecuación (14) muestra la representación matemática de IDW (Lloyd, 2005).

$$\hat{z}(u_0) = \frac{\sum_{\alpha=1}^n z(u_{\alpha}) \cdot d_{\alpha 0}^{-r}}{\sum_{\alpha=1}^n d_{\alpha 0}^{-r}} \quad (14)$$

Donde

$\hat{z}(u_0)$: Valor estimado.

u_0 : Lugar donde se realiza la estimación.

$\hat{z}(u_0)$: observaciones vecinas.

n : número de observaciones vecinas.

d : Distancia entre el valor estimado y el valor observado.

r : Exponente relacionado con el peso asignado a las observaciones, usualmente es 2

6.2.4.1.2. Kriging Ordinario, KO

En general el Kriging interpola valores para puntos no muestreados a través de la utilización de variogramas que tratan las relaciones espaciales subyacentes en un conjunto de datos. Esta técnica de interpolación analiza el comportamiento espacial del fenómeno basándose en la teoría de variables regionalizadas que supone que la variación espacial en el fenómeno es estadísticamente homogénea en toda la superficie (Naoum y Tsanis, 2004).

El Kriging Ordinario KO es un tipo de Kringing que considera que la media de la muestra $m(u)$ es desconocida, una ventaja de KO sobre IDW es que los datos se utilizan para describir el grado y forma de dependencia espacial y esta se utiliza para asignar pesos a las observaciones, mientras que para IDW los pesos se asignan arbitrariamente (Lloyd, 2005).

La Ecuación (15) corresponde a la ecuación general de KO (Álvarez, 2011).

$$Z^*(u) - m(u) = \sum_i \omega_i \cdot (Z(u_i) - m(u_i)) = \sum_i \omega_i \cdot (Z(u_i) - m(u)) \quad (15)$$

Donde $Z^*(u)$ está en función de los valores conocidos de la variable $Z(u_i)$

7. Diseño metodológico

Para el desarrollo del presente proyecto de grado se llevaron a cabo tres fases metodológicas:

7.1. Etapa 1. Recolección y tratamiento de la información

En esta etapa se recolectan y analizan la información de estaciones Pluviométricas y Pluviográficas en el departamento del Atlántico en un periodo de referencia de 37 años y se efectúa el completado de los registros pluviográficos y pluviométricos a través de modelos de ajustes. Para esto se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Consulta de las bases de datos del IDEAM.
- Tratamiento y organización de los registros pluviométricos.
- Digitalización, tratamiento y organización de los registros pluviográficos.
- Selección del modelo de ajuste para corrección de los registros.
- Corrección de registros pluviométricos a través de modelos de ajustes.
- Completado de las series de registros pluviométricos
- Determinación de Media Anual de la Precipitación Máxima en 24 horas de las estaciones pluviométricas estudiadas.
- Selección de intensidades máximas.

7.2. Etapa 2. Construcción de curvas IDF reales

En esta etapa se construye curvas IDF reales de las estaciones pluviográficas ubicadas en el Departamento del Atlántico mediante el uso de una ecuación de distribución de probabilidad. Para esto se desarrollaron las siguientes actividades:

- Evaluación de ajuste de series de intensidades máximas a funciones de probabilidad.
- Selección de una ecuación de distribución de probabilidad.
- Análisis de frecuencia de las series de intensidades máximas seleccionadas.
- Construcción de curvas Intensidad- Duración- Frecuencia (IDF) reales para cada estación pluviográfica.

7.3. Etapa 3. Desarrollo de una nueva ecuación para la determinación de curvas IDF sintéticas en el Departamento del Atlántico.

En esta etapa se indaga en la literatura ecuaciones que describan de forma generalizada las curvas IDF en función de precipitación máxima en 24h, y posteriormente se determina una nueva ecuación que tenga mejor ajuste con las curvas IDF reales de cada estación pluviográfica para la construcción de curvas IDF sintéticas en cualquier punto del Departamento del Atlántico. Para esto se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Estudio de ecuaciones propuestas en la literatura que describan de manera generalizada las curvas IDF.
- Selección de un modelo matemático en función del promedio de las precipitaciones máximas en 24 horas para el cálculo de intensidades máximas de precipitación.
- Determinación de una ecuación ajustada a las curvas IDF reales de cada estación pluviográfica.
- Elaboración de curvas IDF sintéticas.
- Análisis y selección de métodos geoestadísticas de interpolación.

- Generación de mapas de isolíneas de los parámetros ajustados y del promedio de la precipitación máxima anual en 24 horas usando una técnica de interpolación geoestadística.

En la Figura 2 se muestra un diagrama de flujo con la metodología seguida en este trabajo de grado para la estimación de curva IDF a partir de precipitaciones máximas en 24 horas en Departamento del Atlántico.

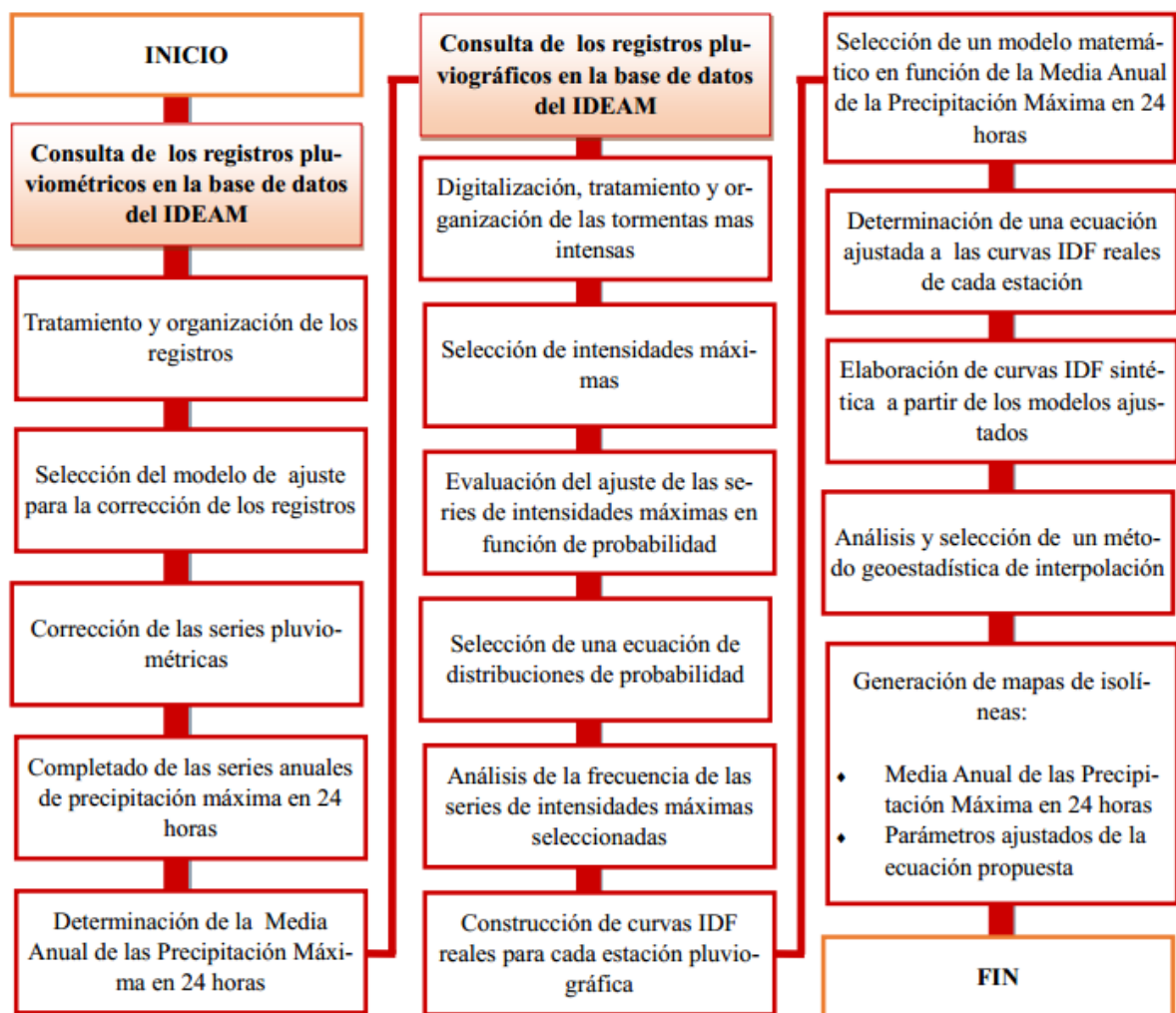


Figura 2. Metodología utilizada. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

8. Recolección y tratamiento de la información

8.1. Recolección y selección de registros pluviométricos

Se solicitó al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) los datos de precipitaciones máximas en 24h registrados por todos los pluviómetros ubicados en el Departamento del Atlántico y parte de sus alrededores. El rango de los años seleccionado para los datos del registro fue de 37 años, correspondiente al periodo de tiempo transcurrido entre 1978 y 2015. Se eligió este periodo de estudio debido a que presenta mayor densidad de datos dentro de los registros consultados. El requisito que se estableció en la elección de las estaciones fue que tuviesen como mínimo 15 años de registros. De este modo se eligieron 38 estaciones distribuidas a lo largo y ancho del Departamento del Atlántico. En la Tabla 1 se presentan codificación, nombre, categoría y ubicación en el sistema de referencia de coordenadas MAGNA-SIRGAS / Colombia Bogota Zone (EPSG: 3116) de cada una de las estaciones seleccionadas, y en la Figura 3 se muestra la distribución de las estaciones en el mapa del Departamento del Atlántico.

Tabla 1

Datos de las estaciones pluviométricas del Departamento del Atlántico seleccionadas para el estudio.

Estaciones pluviométricas		Coordenadas	
Código	Nombre	X	Y
[14010100]	La Pintada	899710	1703421
[29040230]	Pto Colombia	902491	1707088
[29060080]	Los Cocos	933400	1709208
[29040080]	Polonuevo	914646	1683897
[29040070]	Ponedera	924149	1668694
[29045120]	Las Flores	918891	1712688
[29060540]	San Rafael	935852	1663010
[14015010]	Galerazamba	870489	1685793
[29045020]	A.E. Cortissoz	923219	1695420
[29040240]	Usiacurí	899308	1682000
[29040020]	Montebello	909165	1676112
[29045110]	Juan de Acosta	893775	1691427
[14010010]	Piojó	887282	1680339
[14010020]	Hibacharo	883757	1677671
[14010090]	El Porvenir	881327	1676389
[14010030]	Bayunca	854899	1656921
[14010050]	Cañaverál	862019	1642693
[29030140]	San José	887185	1664863

Estaciones pluviométricas		Coordenadas	
Código	Nombre	X	Y
[29040190]	Sabanalarga	907934	1668175
[29040290]	Los Campanos	902121	1659458
[29040200]	Lena	910977	1655445
[29030410]	Casa de Bombas	884666	1653680
[29035070]	Repelón	885966	1653147
[29030270]	Loma Grande	884582	1645801
[29030050]	San Estanislao	881258	1642524
[29040250]	Campo de la Cruz	911203	1639392
[29040310]	San Pedrito Alerta	907682	1628480
[29030640]	Cabecera Henequen	886246	1654959
[29040270]	Hda el Rabón	901399	1638807
[29035080]	Normal Manatí	903965	1647926
[29040260]	Candelaria	911383	1648075
[29040300]	Pto Giraldo	918472	1653896
[29050020]	Salamina	922000	1651636
[29050010]	Tiogollo	928305	1635791
[29035120]	El Limón	891685	1643879

Nota. Se muestran el código y nombre de todas las estaciones pluviométricas seleccionadas para el

Departamento del Atlántico junto con sus respectivas coordenadas geográficas



Figura 3. Estaciones pluviométricas del Departamento del Atlántico seleccionadas. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

8.2. Proceso de homogeneidad y completado de series anuales de precipitaciones máximas en 24 horas

Para el proceso de organización de la información proporcionada por el IDEAM, se identificó la ausencia de datos en las estaciones seleccionadas. Las principales causas de estos faltantes fueron: ausencia del observador, ausencia del instrumento y sección inestable.

La Figura 4 muestra un diagrama con la relación de los registros de cada estación y el año de los registros, con el fin de visualizar los periodos de tiempo con ausencia de datos y los periodos comunes con datos existentes. Ésta gráfica fue desarrollada por medio del software CEDEX-CHAC®, donde se relaciona los años de registro en el eje de las abscisas y la codificación de cada estación en el eje de las ordenadas.

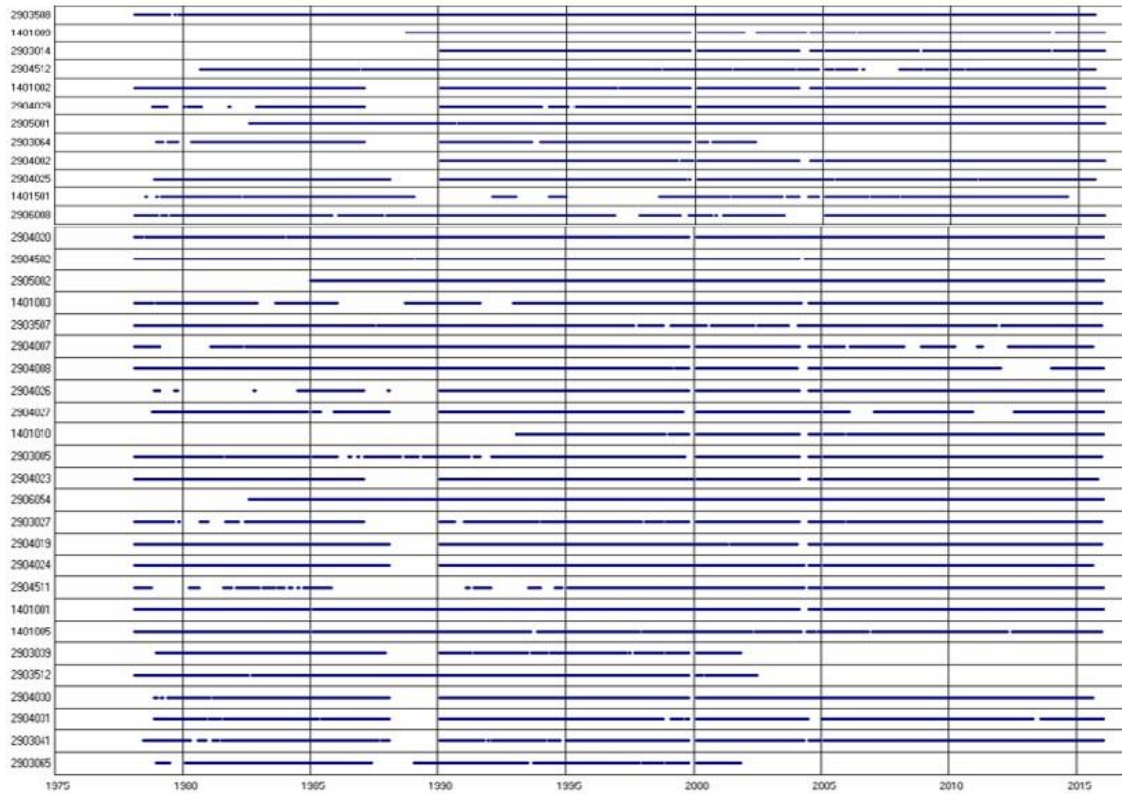


Figura 4. Ausencia de datos en las series hidrológicas. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

Se aplica un análisis univariado a las series temporales de cada estación, con el objeto de describir estadísticamente la distribución del conjunto de datos, se realizó entonces por cada estación, el cálculo de la media aritmética (Media), desviación estándar (Dv) y el coeficiente de sesgo (Cs). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Estadísticos de las series temporales de precipitaciones máximas.

Estaciones pluviométricas	Años completos	Media	Dv	Cs
La Pintada	19	101.92	16.80	-0.84
Pto Colombia	32	94.03	22.83	2.57
Los Cocos	28	94.90	21.02	-0.94
Polonuevo	34	101.80	20.69	1.39
Ponedera	27	100.18	19.69	1.11
Las Flores	22	95.02	20.72	-0.15
San Rafael	33	81.84	19.29	1.80
Galerazamba	20	87.80	20.85	3.08
A.E. Cortissoz	36	83.23	10.02	0.47
Usiacurí	34	78.27	9.60	0.44
Montebello	24	77.62	10.91	-0.13
Juan de Acosta	20	90.67	14.52	1.58
Piojó	36	85.35	20.10	0.24
Hibacharo	32	88.12	12.89	0.41
El Porvenir	21	90.38	13.56	-0.61
Bayunca	28	94.69	16.77	2.44
Cañaveral	30	95.43	20.20	1.70
San José	22	89.94	27.79	1.65
Sabanalarga	33	85.39	19.52	1.60

Estaciones pluviométricas	Años completos	Media	Dv	Cs
Los Campanos	27	88.93	18.50	0.20
Lena	35	90.00	21.76	1.53
Casa de Bombas	28	77.47	13.68	1.38
Repelón	30	77.22	20.69	2.52
Loma Grande	23	82.15	19.67	2.78
San Estanislao	29	75.89	17.00	-0.21
Campo de la Cruz	31	78.89	14.08	1.41
San Pedrito Alerta	28	75.98	11.09	1.11
Cabecera Henequen	15	76.28	15.19	2.13
Hda el Rabón	27	84.06	9.71	1.07
Normal Manatí	36	82.91	15.91	-0.31
Candelaria	26	80.87	10.59	-0.59
Pto Giraldo	31	91.07	13.98	1.68
Salamina	31	84.77	18.08	-0.84
Tiogollo	32	93.02	13.80	1.19
El Limón	21	96.88	23.01	-0.98

Nota. Se anexan en una columna el número de años completo de registros y los parámetros estadísticos media, desviación estándar y coeficiente de sesgos de todas las estaciones pluviométricas.

El proceso de corrección y completado de las series hidrológicas de cada estación pluviométrica se hizo comparando la información registrada de otras estaciones de aforo. Para facilidades de cálculo se optó por dividir en seis grupos las estaciones estudiadas. Esta segmentación se hizo teniendo en cuenta la cercanía geográfica entre estaciones y la similitud en la información de los parámetros estadísticos presentados en la Tabla 2.

Para la corrección de los datos de precipitaciones máximas por 24 horas se empleó el método de dobles masas (Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras – HIMAT, 1990), donde se comparó durante un periodo común de registro el acumulado de la lluvia anual de una estación determinada con el acumulado de la media de la precipitación anual del grupo de estaciones al que esta pertenecía. Esta última variable es considerada la serie base de dicha comparación.

El análisis comparativo se aplicó graficando en el eje de las abscisas el acumulado de la serie base y en el eje de las ordenas el acumulado de la lluvia máxima de la estación a corregir. Una vez construidas las gráficas, se observó que se presentaban cambios de pendiente en los registros anuales de las estaciones de interés, por lo que se realizó un ajuste de las series anuales utilizando un modelo de regresión lineal en Microsoft Excel®, del cual se obtuvo una ecuación de ajuste por cada serie de datos examinada.

Con el fin de reestablecer la homogeneidad del conjunto de datos de precipitación, se calculó por medio de cada ecuación de ajuste los valores acumulados corregidos, a partir de los cuales se determinaron los valores corregidos de precipitación máxima en 24 horas para cada estación y cada año. En la Tabla 3 se muestra la metodología aplicada para corregir los registros de precipitación de la estación La Pintada perteneciente al Grupo 1, seguido en la Figura 5 se puede observar el ajuste lineal de las series anuales de precipitación de esta

misma estación. En la Tabla 4 se muestran los datos corregidos de las estaciones pluviométricas pertenecientes al Grupo 1.

Tabla 3

Proceso y resultados de corrección de la estación La pintada perteneciente al grupo 1.

Años	La Pintada	Media Grupo 1	Acumulado La Pintada	Acumulado media Grupo 1	Acumulado corregido La Pintada	Nuevo La Pintada
1993	10.30	9.53	10.30	9.53	5.45	5.45
1994	9.10	7.98	19.40	17.52	14.30	8.85
1995	8.80	11.12	28.20	28.64	26.64	12.33
1996	5.80	9.99	34.00	38.62	37.71	11.07
1997	8.10	8.69	42.10	47.32	47.35	9.64
2000	11.00	9.86	53.10	57.17	58.28	10.93
2001	14.20	9.38	67.30	66.55	68.68	10.40
2002	9.10	9.82	76.40	76.37	79.57	10.89
2003	21.40	12.21	97.80	88.58	93.11	13.54
2006	7.10	8.56	104.90	97.14	102.60	9.49
2007	6.00	8.96	110.90	106.10	112.54	9.93
2008	11.40	8.72	122.30	114.81	122.20	9.67
2009	7.60	7.51	129.90	122.32	130.53	7.60
2010	10.40	10.19	140.30	132.51	141.83	11.30
2011	12.60	10.37	152.90	142.88	153.32	11.50
2012	11.30	8.28	164.20	151.15	162.50	9.18
2013	11.00	9.71	175.20	160.86	173.27	10.77

Años	La Pintada	Media Grupo 1	Acumulado La Pintada	Acumulado media Grupo 1	Acumulado corregido La Pintada	Nuevo La Pintada
2014	7.00	9.25	182.20	170.12	183.53	10.26
2015	13.50	9.13	195.70	179.24	193.65	10.12

Nota. Se muestra el proceso de corrección de la estación La Pintada por el método de dobles masas.

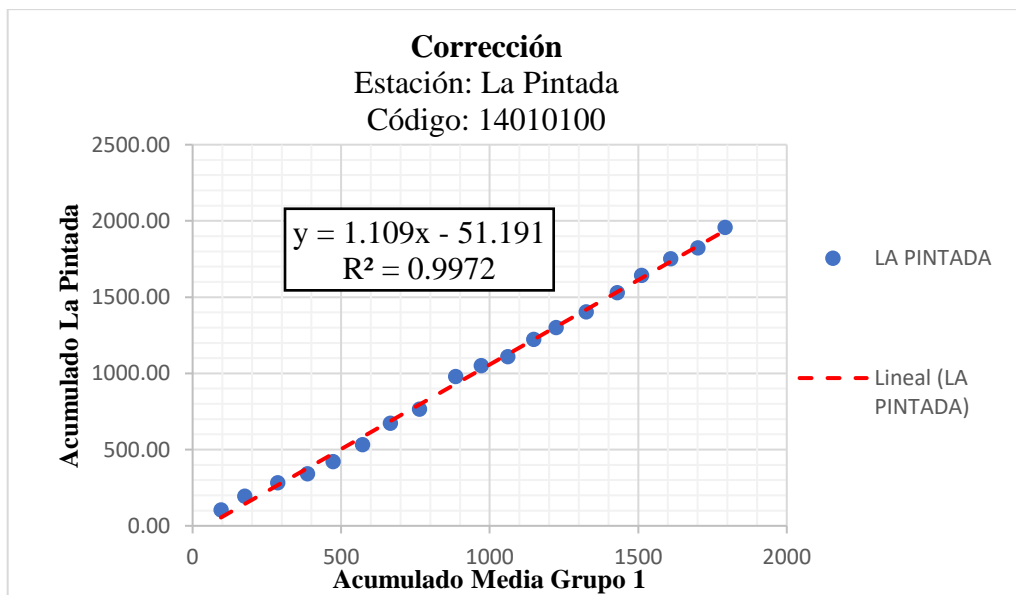


Figura 5. Ajuste de la serie anual de la estación La Pintada utilizando un modelo de regresión lineal en Microsoft Excel®. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

Tabla 4

Datos corregidos del Grupo 1 de las estaciones pluviométricas.

Estaciones				
Galerazamba [14015010]	A.E. Cortissoz [29045020]	Usiacurí [29040240]	Montebello [29040020]	San Rafael [29060540]
	84.41	92.50		111.50
166.73	104.31	98.21		137.14
76.85	77.08	72.58		67.72
98.94	99.24	93.45		68.01
	81.92	77.14		80.07
80.75	81.00	76.26		154.49
81.91	82.16	77.36		66.84
84.64	84.90	79.94		71.90
79.11	79.35	74.71		60.57
82.62	82.87	78.03		81.00
100.51	100.82			110.90
				116.98
	71.24	67.08	52.32	81.34
	63.36	59.65	60.78	63.91
75.97	76.20	71.75	73.10	93.87
	94.60	89.07	90.75	81.32
	83.62	78.73	80.21	68.10

Estaciones				
Galerazamba [14015010]	A.E. Cortissoz [29045020]	Usiacurí [29040240]	Montebello [29040020]	San Rafael [29060540]
	76.79	72.30	73.66	94.88
	78.25	73.68	75.06	85.18
	77.09	72.59	73.95	74.16
	101.19	95.28	97.07	85.80
79.28	79.53	74.88		55.66
77.98	78.22	73.65	75.03	84.09
	84.21	79.29	80.78	80.02
73.29	73.51	69.22	70.52	83.77
	87.97	82.83	84.38	104.16
				51.19
80.53	80.78	76.06	77.49	77.16
	78.41	73.83	75.22	73.01
	82.90	78.06	79.53	76.42
104.40	104.72	98.60	100.46	74.36
83.19	83.44	78.57	80.04	64.05
85.61	85.87	80.86	82.37	86.90
90.98	91.26	85.93	87.54	88.45
64.44	64.64	60.86	62.00	70.60
88.30	88.57	83.39	84.96	82.84

Estaciones				
Galerazamba	A.E.	Usiacurí	Montebello	San
[14015010]	Cortissoz	[29040240]	[29040020]	Rafael
	[29045020]			[29060540]
	68.98	64.95	66.17	78.94
	82.81		79.44	77.85

Nota. Se exponen las precipitaciones máximas en 24 horas corregidas de las estaciones correspondientes al Grupo 1.

Corregidas todas las series anuales de precipitaciones máxima en 24 horas de cada estación, se procedió a completar las lagunas en las series de datos anuales registrados de cada pluviómetro. El completado de los valores de precipitación inexistentes se hizo también por grupos, relacionando la información subyacente de la serie anual de precipitación de una estación con las de las de otras estaciones pertenecientes al mismo grupo, esto se aplicó mediante la Ecuación (16) (HIMAT, 1990). En la Tabla 5 se presenta el promedio de las series de precipitaciones máximas en 24 horas completas de cada una de las 38 estaciones pluviométricas.

$$P_x = \frac{\bar{P}_x}{N} \left[\frac{P_A}{\bar{P}_A} + \frac{P_B}{\bar{P}_B} + \dots + \frac{P_C}{\bar{P}_C} \right] \quad (16)$$

Donde

N : número de estaciones pluviométricas con datos registrados en el año por completar.

P_A a P_n : precipitación de la estación A al n durante el periodo de tiempo por completar.

P_x : precipitación de la estación x durante el periodo de tiempo por completar.

\bar{P}_x : precipitación media anual a nivel multianual de la estación.

\bar{P}_A a \bar{P}_n : precipitación media anual a nivel multianual de las estaciones de A al n .

Tabla 5

Precipitación máximas promedio anual en 24h de las estaciones pluviométricas del departamento del Atlántico.

Nombre	Media	Dv	Cs
La Pintada	102.60	23.11	0.67
Pto. Colombia	94.28	23.95	1.91
Los cocos	96.12	23.36	-0.10
Polonuevo	99.72	21.16	1.20
Ponedera	99.31	21.63	1.30
Las flores	95.18	21.95	0.58
San Rafael	83.29	20.89	1.59
Galerazamba	87.32	18.15	2.37
A.E. Cortissoz	83.27	12.39	0.30
Usiacurí	78.75	11.93	0.24
Montebello	79.03	13.93	0.44
Juan de Acosta	90.16	19.52	1.29
Piojó	84.17	20.34	0.27
Hibacharo	88.11	16.24	1.12
El Porvenir	89.46	18.79	1.02
Bayunca	94.32	20.49	1.60
Cañaveral	93.30	19.12	1.68
San José	89.43	24.23	1.44
Sabanalarga	83.64	19.81	1.38

Nombre	Media	Dv	Cs
Los Campanos	92.77	21.66	0.96
Lena	90.99	21.86	1.33
Casa de Bombas	78.28	18.49	2.17
Repelón	77.71	20.82	2.16
Loma Grande	83.41	22.87	2.23
San Estanislao	76.75	20.09	1.13
Campo de la Cruz	80.57	19.28	1.96
San Pedrito Alerta	78.49	18.18	2.03
Cabecera Henequen	78.07	18.32	2.10
Hda el Rabon	85.76	15.99	-0.49
Normal Manati	82.67	15.51	-0.27
Candelaria	82.45	15.98	-0.87
Pto Giraldo	91.71	19.04	-0.02
Salamina	85.78	21.00	-0.85
Tiogollo	93.84	19.42	-0.23
El limón	96.15	17.86	-0.96

Nota. Se muestran la media, desviación estándar y coeficiente de sesgo de las series anuales de los registros de precipitación máxima en 24 horas de cada estación pluviométrica.

Los resultados de las series precipitación máxima en 24 horas obtenidos del proceso de corrección y completado para los seis grupos de las estaciones pluviométricas pueden observarse en el Apéndice 1.

8.3. Recolección y selección de registros pluviográficos

Se solicitó al IDEAM los pluviogramas disponibles entre los años 1978 y 2015 de las estaciones pluviográficas ubicadas en el departamento del Atlántico. Durante la selección de la información se observó que varias de las bandas pluviográficas estaban defectuosas por falta de mantenimiento del instrumento o por suspensión temporal de este. Con el fin de obtener estimaciones confiables, se estableció como condición que cada estación contara con un mínimo de 10 años de registros anuales completos. De acuerdo con lo anterior, en la Tabla 6 se relacionan las estaciones pluviográficas escogidas. En la Figura 6 se muestra el escáner de un pluviograma de la estación de A.E. Cortissoz del 2 de junio de 1978 proporcionado por el IDEAM.

Tabla 6

Estaciones seleccionadas.

Código	Nombre	X	Y	Años con registros
14015010	Galerazamba	870489	1685793	23
29045020	A.E. Cortissoz	923219	1695420	36
29045120	Las Flores	918891	1712688	18
29035080	Normal Manatí	903965	1647926	12
29035120	El Limón	891685	1643879	13

Nota. Se muestran los años completos de registro de cada estación pluviográfica seleccionada.

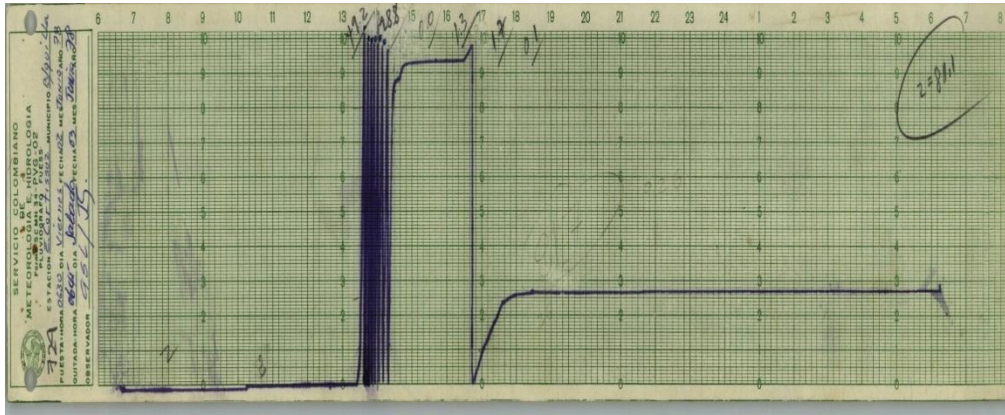


Figura 6. Pluviograma de la estación de A.E. Cortissoz. Fuente: IDEAM

8.4. Selección de intensidades máximas

Para la construcción de las curvas IDF se siguió una metodología que describe el HIMAT (1990) que consta de los siguientes pasos: en primer lugar, se eligieron 5 de las tormentas más intensas para cada año de registro, posteriormente se evaluó, para cada tormenta elegida, el volumen de lluvia presentado en intervalos de tiempo de 10 min. A partir de estos valores de precipitación se obtuvo la cantidad de lluvia registrada para intervalos de duración de 20 a 150 minutos por medio sumas sucesivas.

Una vez tabuladas las precipitaciones para cada una de las duraciones mencionadas, se seleccionó por cada año los valores extremos de precipitación registrada para los distintos intervalos de tiempos establecidos. Hecho esto se convirtieron las precipitaciones máximas en intensidades máximas (mm/h), este factor se obtuvo dividiendo la precipitación en milímetros entre su duración correspondiente en horas.

Las intensidades máximas seleccionadas para cada estación pluviográfica estudiada se muestran en el Apéndice 2.

8.5. Evaluación de ajuste de series de intensidades máximas a funciones de distribución de probabilidad

Obtenidos los valores máximos de intensidades anuales para cada duración establecida presentados en las cinco estaciones pluviográficas de interés, se validaron tres modelos univariado de probabilidad con el fin de determinar la probabilidad de ocurrencia de cada serie temporal. Las tres funciones de distribución de probabilidad utilizadas para el ajuste de la información de dichas series temporales son la Distribución de Gumbel, Distribución Pearson Tipo III y Distribución de SQRT expuestas en el marco teórico.

Se efectuó la prueba de bondad de ajuste Error Cuadrático Medio de Frecuencia (ECMF) a las funciones de probabilidad aplicadas, el estudio minucioso de los resultados obtenidos por esta técnica ayudó en la determinación de la función de distribución de probabilidad que mejor se ajustaba a los datos de intensidades máximas de precipitación seleccionadas para las cinco estaciones hidrológica estudiadas. En la Tabla 7 se muestran los resultados de la prueba de ajuste obtenidos de cada serie de datos de la estación A.E. Cortissoz.

Tabla 7

Prueba de ECMF para la estación de A.E. Cortissoz.

Tiempo (min)	ECMF -Estación: A. E. Cortissoz		
	Gumbel	SQRT- ETmax	Pearson III
10	0.047	0.051	0.025
20	0.041	0.039	0.032
30	0.046	0.057	0.034

ECMF -Estación: A. E. Cortissoz			
Tiempo (min)	SQR- ETmax		
	Gumbel		Pearson III
40	0.060	0.068	0.081
50	0.045	0.062	0.052
60	0.054	0.065	0.063
70	0.058	0.068	0.065
80	0.051	0.056	0.052
90	0.054	0.056	0.055
100	0.055	0.053	0.060
110	0.057	0.055	0.071
120	0.057	0.056	0.077

Nota. A medida que el resultado de test ECMF aplicado sea menor, mayor será el ajuste a las frecuencias de la serie de datos registrados. Los valores sombreados en azul corresponden a los valores menores de cada fila.

El análisis a las pruebas de ajuste permitió observar que la distribución de Gumbel fue la función que mejor se adaptó a las series de máximas de precipitaciones diarias registradas por las cinco estaciones pluviográficas. La ecuación de distribución Pearson III a pesar de que en el resto de las estaciones obtuvo un buen ajuste, para la estación de A.E. Cortissoz presentó deficiencias a la hora de analizar los valores extremos de intensidad tanto así que no se pudo ajustar a los modelos matemático propuesto para calculo da intensidades extremas

El análisis de la calidad de ajuste de las tres ecuaciones de distribución evaluadas para cada estación pluviográfica se puede ver en el Apéndice 3.

9. Desarrollo de una nueva ecuación para la determinación de curvas IDF sintética en el Departamento del Atlántico

9.1. Construcción de curva IDF reales

9.1.1. Análisis de frecuencia de las series de intensidades máximas por medio de la función de distribución de Gumbel

Se empleo un análisis de frecuencias a las intensidades máximas seleccionadas de los registros de las cinco estaciones pluviográficas, calculando para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años las intensidades máximas probables para las diferentes duraciones, por medio de la función de distribución de probabilidad de Gumbel. En la Tabla 8 se ilustra los valores de intensidad máxima probables para los periodos de retorno mencionados de la estación pluviográficas A. E. Cortissoz.

Tabla 8

Datos de intensidades obtenidos con la distribución de Probabilidad Gumbel de la estación A. E. Cortissoz.

Estación A.E. Cortissoz curvas IDF real (mm/h)								
Tiempo (min)	Periodo de retorno (Años)							
	T-2	T-5	T-10	T-25	T-50	T-75	T-100	T-500
10	110	133	148	167	181	194	208	226
20	81	97	108	122	132	142	153	166
30	72	86	95	107	116	124	133	144

Estación A.E. Cortissoz curvas IDF real (mm/h)								
Tiempo (min)	Periodo de retorno (Años)							
	T-2	T-5	T-10	T-25	T-50	T-75	T-100	T-500
40	63	78	88	101	111	120	130	142
50	57	71	80	92	100	108	117	128
60	50	62	70	80	88	95	102	112
70	45	56	63	73	80	87	94	103
80	40	51	59	68	75	82	89	98
90	36	47	54	63	70	76	83	92
100	33	43	49	58	64	70	77	85
110	30	39	45	53	59	65	71	78
120	27	36	42	49	55	60	65	73

Nota. Se observan los valores de intensidad proyectados para diferentes duraciones y periodo de retorno reales para la estación A.E. Cortissoz.

Definidas las máximas intensidades probables para los periodos de retornos especificados, se elaboraron las curvas IDF reales para cada estación. En la Figura 7 se presenta la curva IDF real de la estación de A. E. Cortissoz.

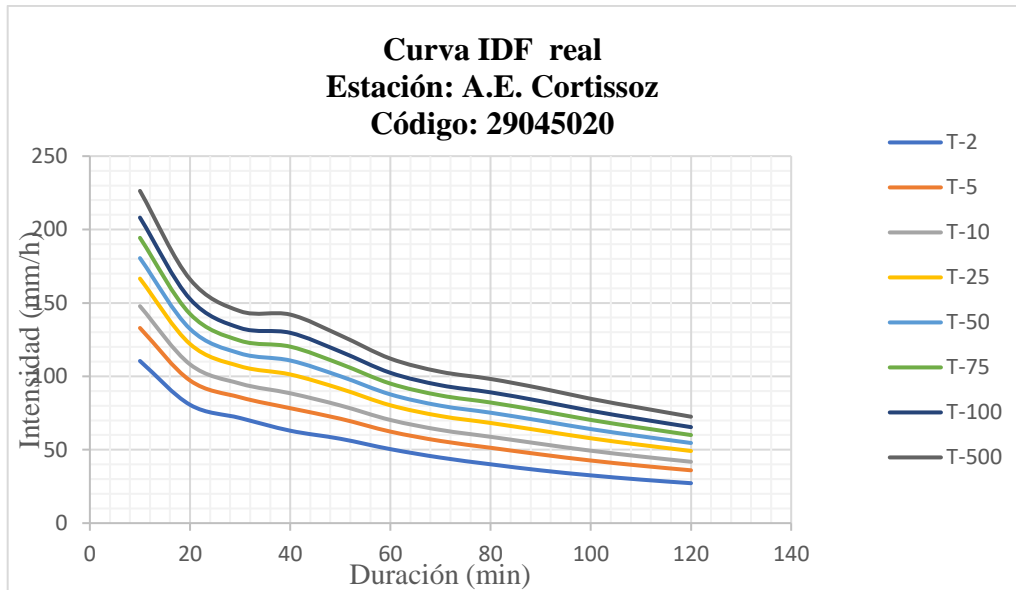


Figura 7. Curva IDF reales de la estación de A. E. Cortissoz. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

Las gráficas y tablas de las Gráficas y tablas de las curvas Intensidad- Duración- Frecuencias Reales de las cinco estaciones pluviográficas pueden observarse en el Apéndice 4.

9.2. Construcción de curvas IDF sintéticas a partir de precipitación máxima en 24 horas

9.2.1. Parametrización de ecuación de intensidad

En esta sección se ajustó la Ecuación (2) a las curvas IDF reales construidas para cada estación pluviográfica. En el proceso de parametrización, primero se transformó la Ecuación (2) de tipo exponencial a una ecuación de tipo lineal aplicando logaritmo natural a ambos lados de la igualdad, al final la expresión matemática de la intensidad quedó definida como muestra la Ecuación (17).

$$\ln I = \ln A - c \ln(t) \quad (17)$$

Donde

$$\ln A = \ln k + b \ln(T) \quad (18)$$

Donde

$$\ln k = \ln a + d \ln M \quad (19)$$

La aplicación de este artificio permitió establecer una relación lineal entre los logaritmos de las variables, por lo que se pudo aplicar la técnica de mínimos cuadrados para determinar los valores óptimos de cada parámetro.

Para determinar los coeficientes de la Ecuación (17) se empleó el método de mínimos cuadrados, este análisis se efectuó haciendo uso de hojas de cálculo de Microsoft Excel®, se estableció como variable independiente $x = \ln t$ y como variable dependiente $y = \ln I$.

Se realizó un análisis de regresión entre las variables de intensidad y duración para cada periodo de retorno determinado de cada estación, la calidad de esta regresión se evaluó mediante el coeficiente de correlación de Pearson (R^2) este valor se obtuvo haciendo uso de la función de regresión lineal en Microsoft Excel®. El coeficiente de Pearson para todas las estaciones varía de 0.95 y 0.99 para cada periodo retorno, lo que indica un buen ajuste de los datos al modelo matemático propuesto. En la Figura 8 se muestra el análisis de regresión aplicado a las variables de intensidad y duración proyectados para el periodo de retorno 2 de la estación A.E. Cortissoz, también se observa el valor de R^2 obtenido.

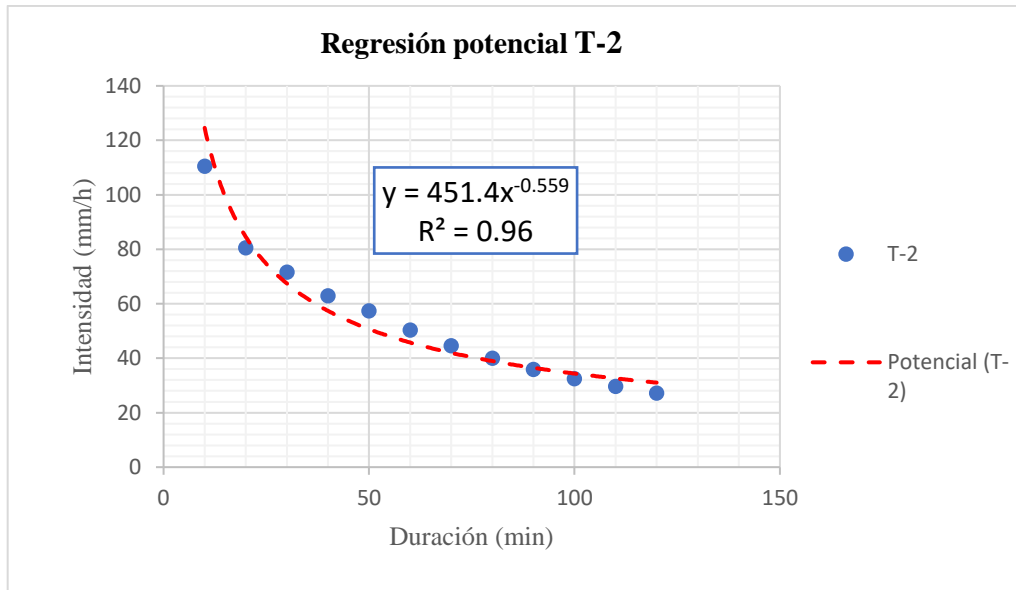


Figura 8. Ajuste los datos de intensidades y duración para un periodo de retorno 2 (T-2) de la estacione A.E. Cortissoz utilizando un modelo de regresión lineal en Microsoft Excel®.

Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

Agrupados los datos se calcularon los coeficientes α y β con la Ecuación (20) y la Ecuación (21) respectivamente, cuyos resultados corresponden a $\ln A$ y c en ese mismo orden.

$$\alpha = \frac{[(\sum y)(\sum x^2)] - [(\sum x)(\sum xy)]}{[N(\sum x^2) - (\sum x)^2]} \quad (20)$$

$$\beta = \frac{[N(\sum yx)] - [(\sum x)(\sum y)]}{[N(\sum x^2) - (\sum x)^2]} \quad (21)$$

Con los valores estimados de A para cada periodo de retorno establecido, se procedió a resolver la Ecuación (18) aplicando nuevamente el método de mínimos cuadrados utilizando la Ecuación (20) y Ecuación (21) para la estimación de los coeficientes $\ln k$ y b respectivamente. Por último, para la asignación de los coeficientes K y d de la ecuación (19), cuya variable independiente corresponde al promedio de la precipitación máxima

anual en 24 horas (M) de la estación pluviométrica correspondiente, se aplicó un código con la función Solver en Microsoft VBA®. En la Tabla 9 se muestran las ecuaciones obtenidas reemplazando los parámetros estimados para cada estación pluviográfica, conjuntamente se enseñan las tablas y las gráficas de las curvas IDF sintéticas conseguidas a partir de precipitaciones máximas en 24 horas. De la Tabla 10 a la Tabla 14 se muestran los valores de intensidad de precipitación estimados con la ecuación propuesta ajustada para cada una de las cinco estaciones pluviográficas.

Tabla 9

Ecuaciones ajustadas a las curvas IDF reales propuestas para cada una de las estaciones pluviográficas estudiadas.

Estación	Ecuaciones en función de la PMAX en 24h ajustadas
A.E. CORTISSOZ	$i = \frac{23.679 \cdot T^{0.070} \cdot M^{0.656}}{t^{0.481}}$
GALERAZAMBA	$i = \frac{19.235 \cdot T^{0.198} \cdot M^{0.650}}{t^{0.532}}$
LAS FLORES	$i = \frac{20.281 \cdot T^{0.104} \cdot M^{0.678}}{t^{0.520}}$
EL LIMÓN	$i = \frac{36.124 \cdot T^{0.121} \cdot M^{0.503}}{t^{0.479}}$
N. MANATÍ	$i = \frac{33.444 \cdot T^{0.133} \cdot M^{0.657}}{t^{0.589}}$

Nota: Ecuación parametrizada para cada estación pluviográficas seleccionada en el Departamento del Atlántico.

Tabla 10

Valores de intensidad de precipitación estimadas para la estación A.E. Cortissoz.

Estación A.E. Cortissoz curvas IDF sintética								
Tiempo (min)	Periodo de retorno (Años)							
	T-2	T-5	T-10	T-25	T-50	T-75	T-100	T-500
10	149	159	166	177	186	192	195	219
20	107	114	119	127	133	137	140	157
30	88	93	98	105	110	113	115	129
40	76	81	85	91	96	98	100	112
50	69	73	77	82	86	88	90	101
60	63	67	70	75	79	81	83	92
70	58	62	65	70	73	75	77	86
80	55	58	61	65	68	70	72	80
90	52	55	58	62	65	67	68	76
100	49	52	55	59	61	63	65	72
110	47	50	53	56	59	60	62	69
120	45	48	50	54	56	58	59	66

Nota. Se observan los valores de intensidad proyectados para diferentes duraciones y periodo de retorno reales mediante la ecuación ajustada para la estación A.E. Cortissoz.

Tabla 11

Valores de intensidad de precipitación estimadas para la estación Galerazamba.

Estación Galerazamba curvas IDF sintética								
Tiempo (min)	Periodo de retorno (Años)							
	T-2	T-5	T-10	T-25	T-50	T-75	T-100	T-500
	10	118	142	163	195	224	242	257
20	82	98	113	135	155	168	177	244
30	66	79	91	109	125	135	143	197
40	57	68	78	93	107	116	123	169
50	50	60	69	83	95	103	109	150
60	46	55	63	75	86	93	99	136
70	42	50	58	69	79	86	91	125
80	39	47	54	65	74	80	85	117
90	37	44	51	61	69	75	80	110
100	35	42	48	57	66	71	75	104
110	33	40	45	54	62	68	72	99
120	32	38	43	52	60	65	68	94
130	30	36	42	50	57	62	66	90

Nota. Se muestran los valores de intensidad proyectados para diferentes duraciones y periodo de retorno reales mediante la ecuación ajustada para la estación Galerazamba.

Tabla 12

Valores de intensidad de precipitación estimadas para la estación Las Flores.

Estación Las Flores curvas IDF sintética								
Tiempo (min)	Periodo de retorno (Años)							
	T-2	T-5	T-10	T-25	T-50	T-75	T-100	T-500
10	145	159	171	188	202	211	217	257
20	101	111	119	131	141	147	152	179
30	82	90	97	106	114	119	123	145
40	70	77	83	92	98	103	106	125
50	63	69	74	82	88	91	94	111
60	57	63	67	74	80	83	86	101
70	53	58	62	68	74	77	79	93
80	49	54	58	64	69	72	74	87
90	46	51	55	60	65	67	69	82
100	44	48	52	57	61	64	66	78
110	42	46	49	54	58	61	63	74
120	40	44	47	52	56	58	60	71
130	38	42	45	50	53	56	57	68
140	37	40	43	48	51	54	55	65
150	35	39	42	46	50	52	53	63

Nota: Se observan los valores de intensidad proyectados para diferentes duraciones y periodo de retorno reales mediante la ecuación ajustada para la estación La Flores.

Tabla 13

Valores de intensidad de precipitación estimadas para la estación El Limón.

Estación El Limón curvas IDF sintética								
Tiempo (min)	Periodo de retorno (Años)							
	T-2	T-5	T-10	T-25	T-50	T-75	T-100	T-500
10	130	145	158	176	192	201	209	254
20	93	104	113	127	138	145	150	182
30	77	86	93	104	113	119	123	150
40	67	75	81	91	99	104	107	131
50	60	67	73	82	89	93	97	117
60	55	61	67	75	81	85	88	108
70	51	57	62	69	76	79	82	100
80	48	54	58	65	71	74	77	94
90	45	51	55	62	67	70	73	89
100	43	48	52	59	64	67	69	84
110	41	46	50	56	61	64	66	80
120	39	44	48	54	58	61	63	77

Nota: Se observan los valores de intensidad proyectados para diferentes duraciones y periodo de retorno reales mediante la ecuación ajustada para la estación El Limón.

Tabla 14

Valores de intensidad de precipitación estimadas para la estación N. Manatí

Estación N. Manatí curvas IDF sintética								
Tiempo (min)	Periodo de retorno (Años)							
	T-2	T-5	T-10	T-25	T-50	T-75	T-100	T-500
10	171	193	212	239	263	277	288	356
20	114	129	141	159	174	184	191	237
30	90	101	111	125	137	145	151	186
40	76	85	94	106	116	122	127	157
50	66	75	82	93	102	107	111	138
60	60	67	74	83	91	96	100	124
70	54	61	67	76	83	88	91	113
80	50	57	62	70	77	81	85	105
90	47	53	58	66	72	76	79	98
100	44	50	55	62	68	71	74	92
110	42	47	52	58	64	67	70	87
120	40	45	49	55	61	64	67	82
130	38	43	47	53	58	61	63	79
140	36	41	45	51	55	58	61	75

Nota. Se observan los valores de intensidad proyectados para diferentes duraciones y periodo de retorno reales mediante la ecuación ajustada para la estación N. Manatí.

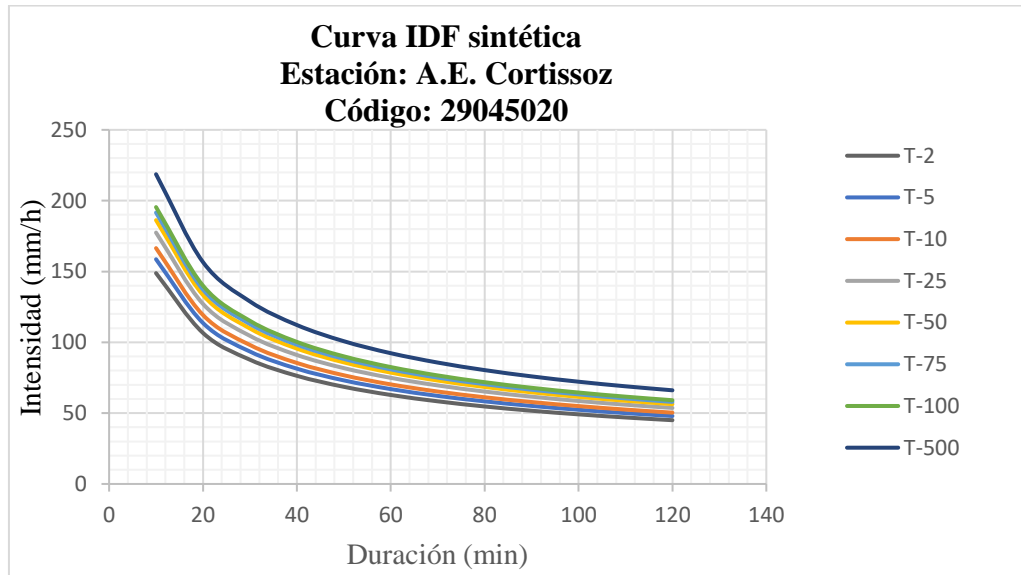


Figura 9. Curva IDF sintética a partir de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación de A.E. Cortissoz. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

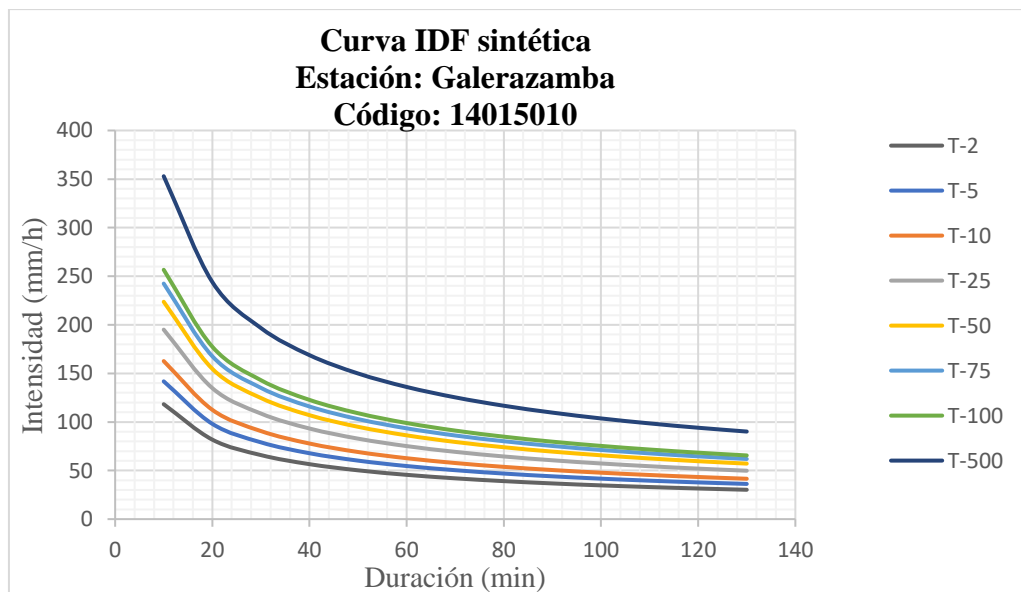


Figura 10. Curva IDF sintética a partir de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación de Galerazamba. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

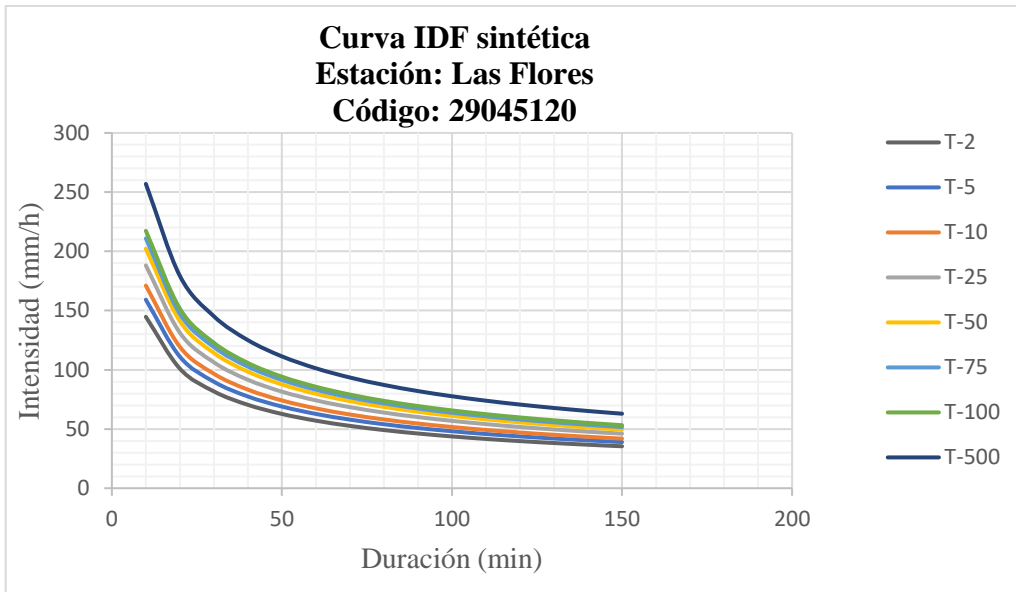


Figura 11. Curva IDF sintética a partir de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación de Las Flores. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

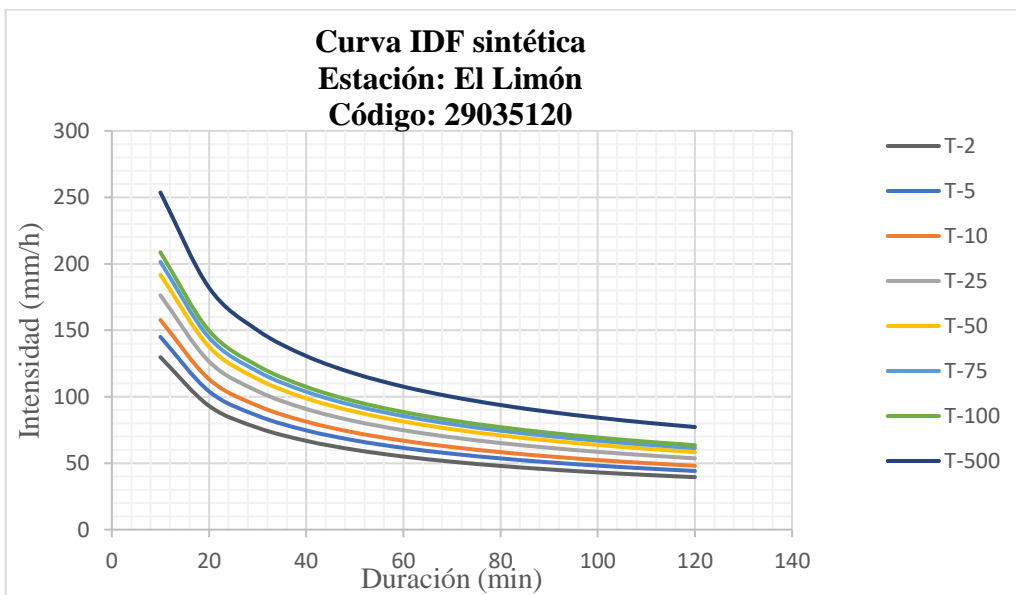


Figura 12. Curva IDF sintética a partir de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación de El Limón. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

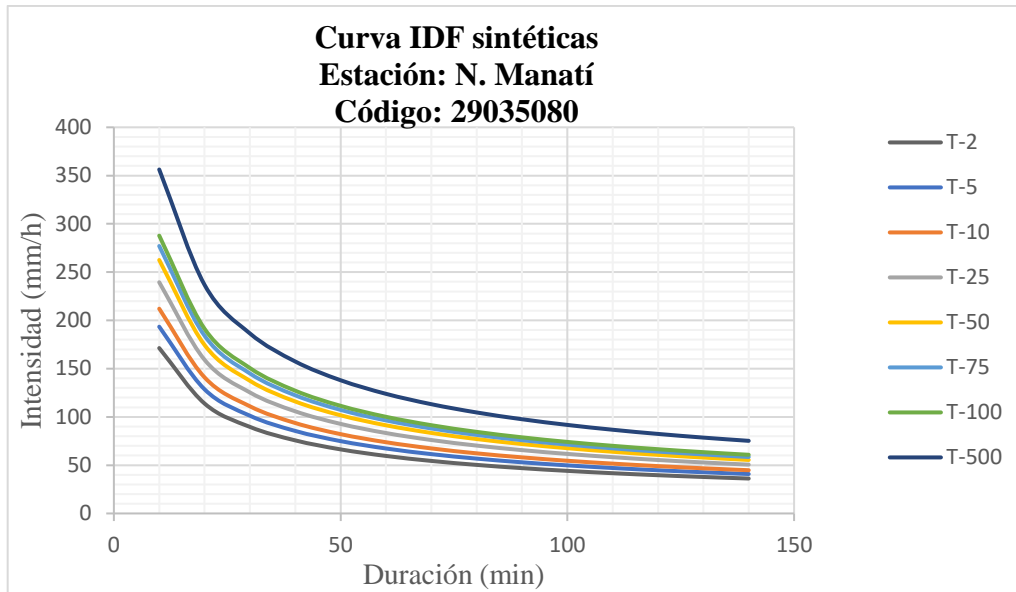


Figura 13. Curva IDF sintética a partir de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación de N. Manatí. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

Para medir la calidad de los valores de intensidad proyectados con la ecuación paramétrica propuesta para cada estación pluviográfica, se aplicó el indicador Error Relativo Porcentual. En la Tabla 15 se observa el error relativo porcentual presentado entre las curvas IDF reales y las curvas IDF sintéticas de cada estación. Se observó que los porcentajes mayores a 16% son debido a que los valores de intensidad estimados por la ecuación propuesta son mayores a los valores reales.

Tabla 15

Promedio de los errores relativos porcentuales. Cortissoz.

ESTACIÓN	PERIODO DE RETORNO							
	T-2	T-5	T-10	T-25	T-50	T-75	T-100	T-500
GALERAZ								30
AMBA	7%	7%	6%	4%	5%	5%	4%	%
A.E								14
CORTISSOZ	37%	16%	8%	6%	7%	11%	16%	%
LAS FLORES	28%	10%	7%	7%	8%	10%	13%	8%
NORMAL								
MANATI	19%	6%	4%	5%	4%	6%	10%	4%
EL LIMON	19%	8%	6%	5%	5%	7%	10%	6%

Nota. Se muestran los errores relativos entre las curvas IDF reales y las curvas IDF sintéticas de cada estación pluviográfica.

El proceso de ajuste de la ecuación propuesta para cada estación pluviográficas se puede observar en el Apéndice 5.

9.2.2. Aplicación de técnicas geoestadísticas de interpolación

Se evaluó el uso de dos técnicas de interpolación, Inverse Distance Weighting (IDW) y Kriging Ordinario (KO), para estimar la distribución espacial de los parámetros ajustados a, b, c y d de la Ecuación (2) mostrados en la Tabla 9 y de la Media Anual de la Precipitación Máxima en 24 h presentado en la Tabla 5 de las 38 estaciones pluviométricas estudiadas.

En la Figura 14 se pueden comparar los mapas interpolados de la precipitación máximas promedio anual en 24h de las estaciones pluviométricas estudiadas, obtenidos por las

herramientas de análisis espacial mencionadas del Sistema de Información Geográfica QGIS®.

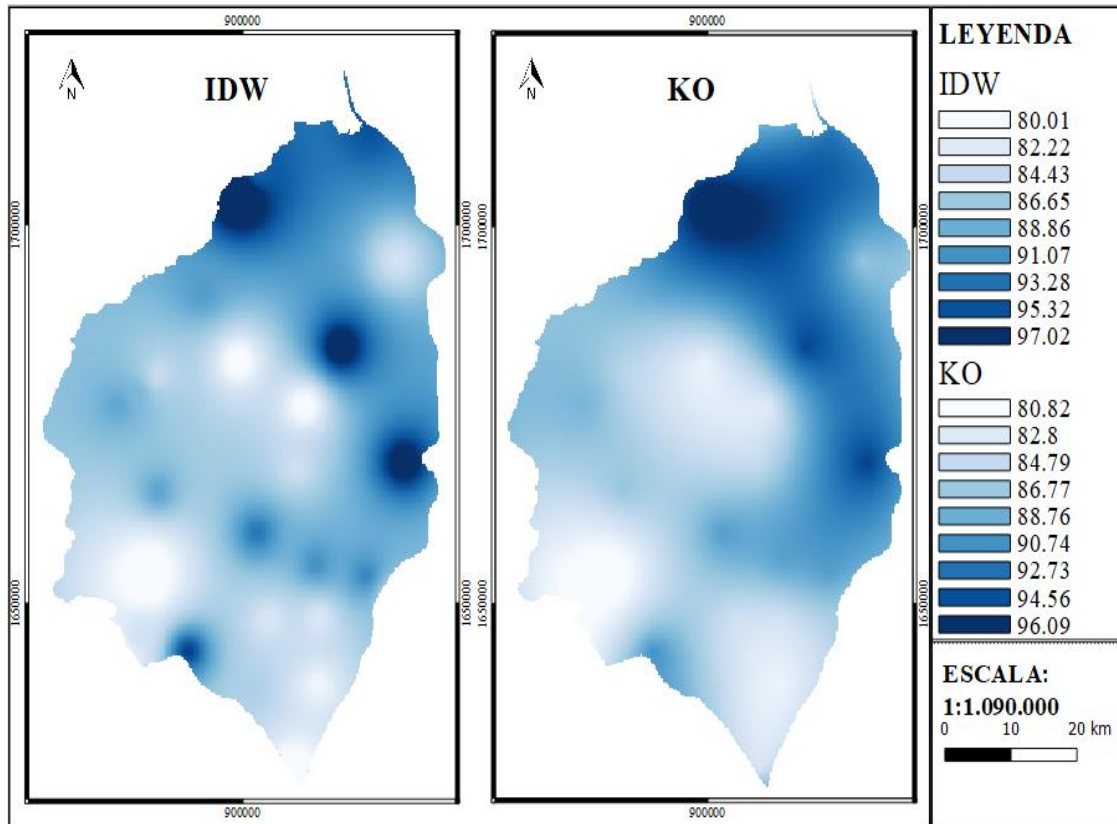


Figura 14. Mapas de la superficie IDW interpolada (izquierda) y la superficie KO interpolado (derecha) de la precipitación máximas promedio anual 24h de las 38 estaciones pluviométricas estudiadas en el departamento del Atlántico. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

Se puede observar que la superficie ráster generada por la técnica de Kriging Ordinario (KO) posee una mejor distribución de los valores interpolados por lo que se escogió este método para el trazado de mapas de isolíneas regionalizadas de uso práctico de los parámetros ajustados a , b , c , d de la Ecuación (22) y de la Media Anual de la Precipitación

Máxima en 24h (M), los mapas generados se pueden observar en las Figura 15, Figura 16, Figura 17, Figura 18 y Figura 19.

$$i = \frac{a \cdot T^b \cdot M^d}{t^c} \quad (22)$$

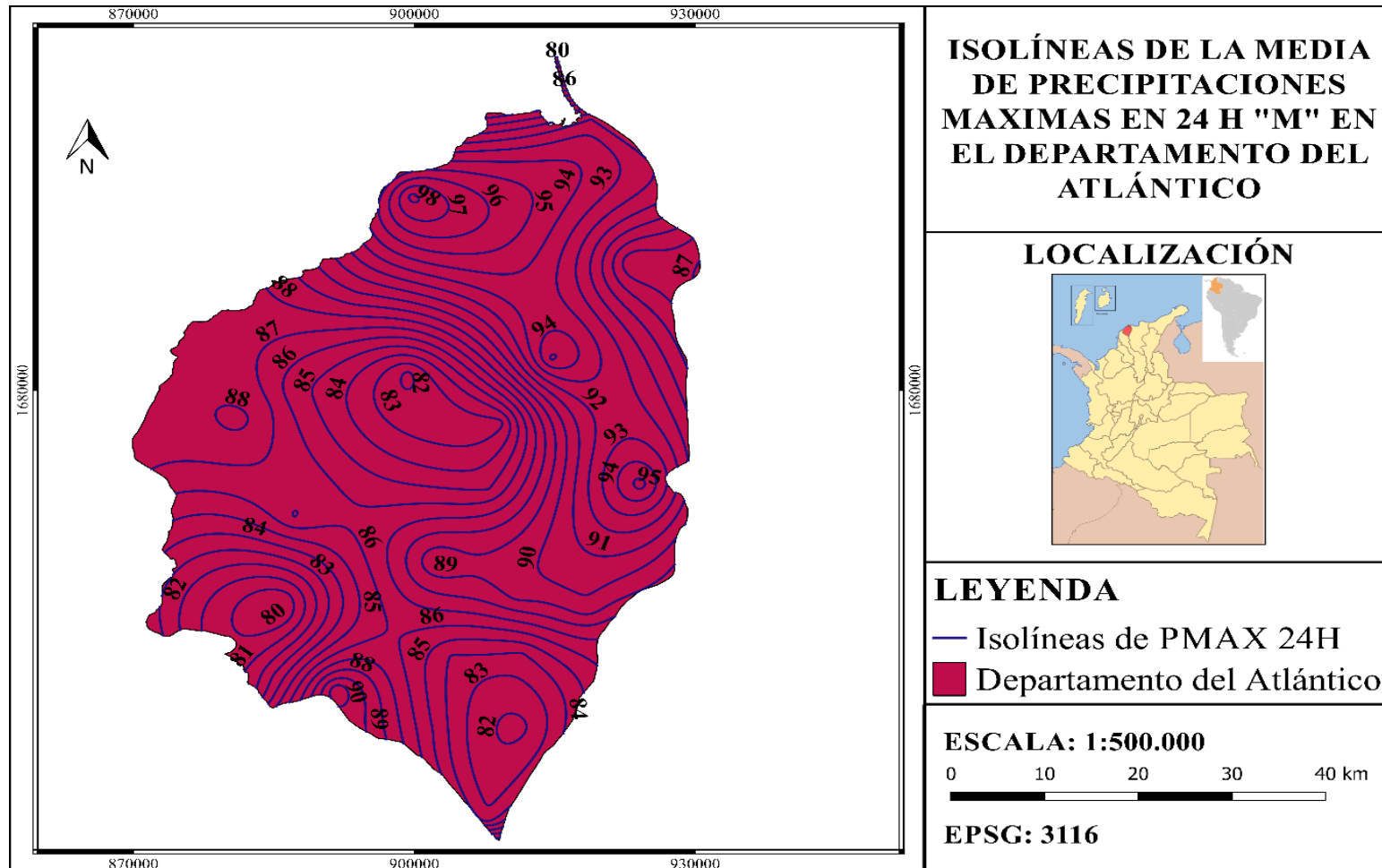


Figura 15. Mapas de isolíneas de la Media Anual de la Precipitación Máxima en 24 (M) en el Departamento del Atlántico. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

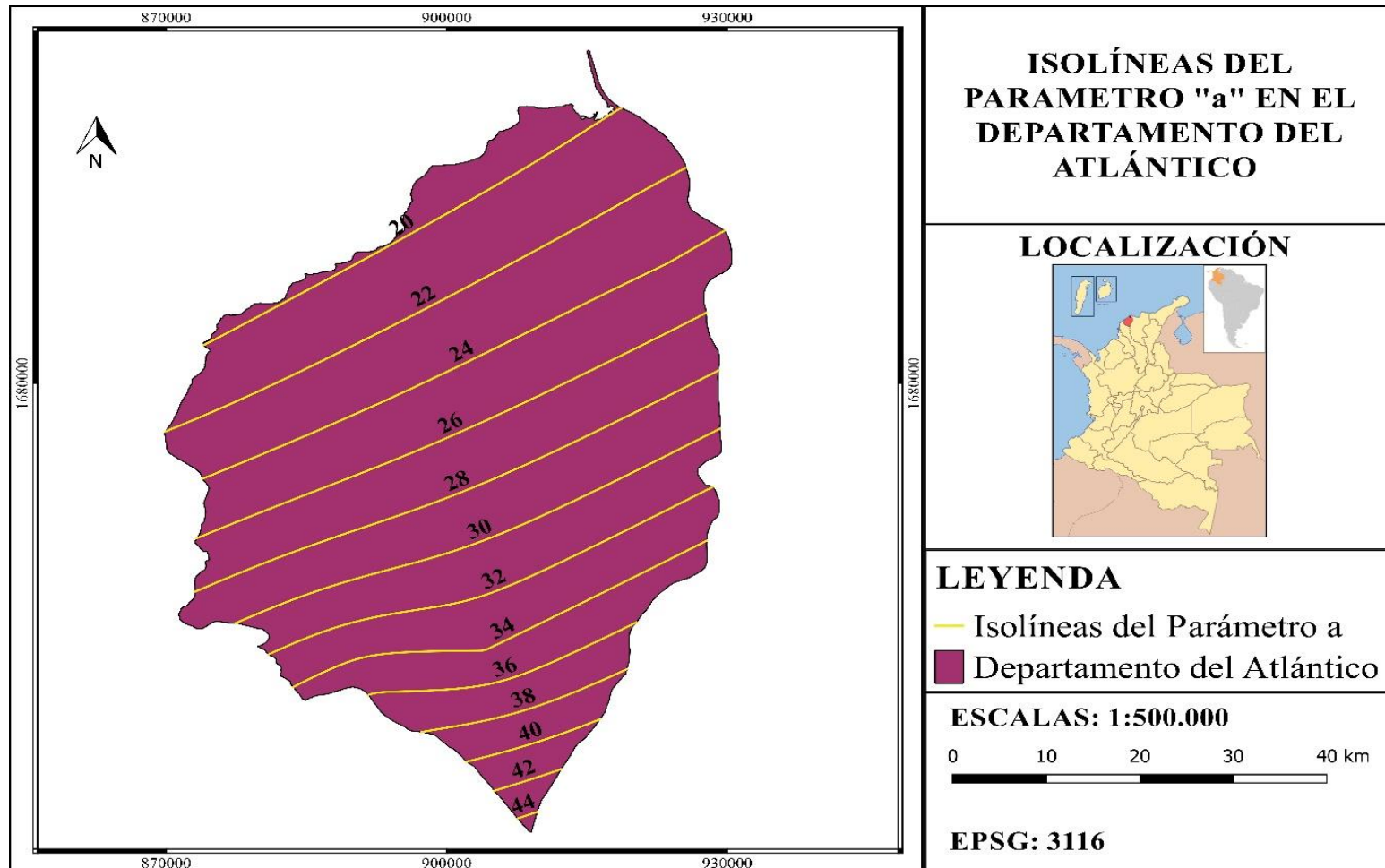


Figura 16. Mapas de isolíneas del parámetro “a” en el Departamento del Atlántico. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

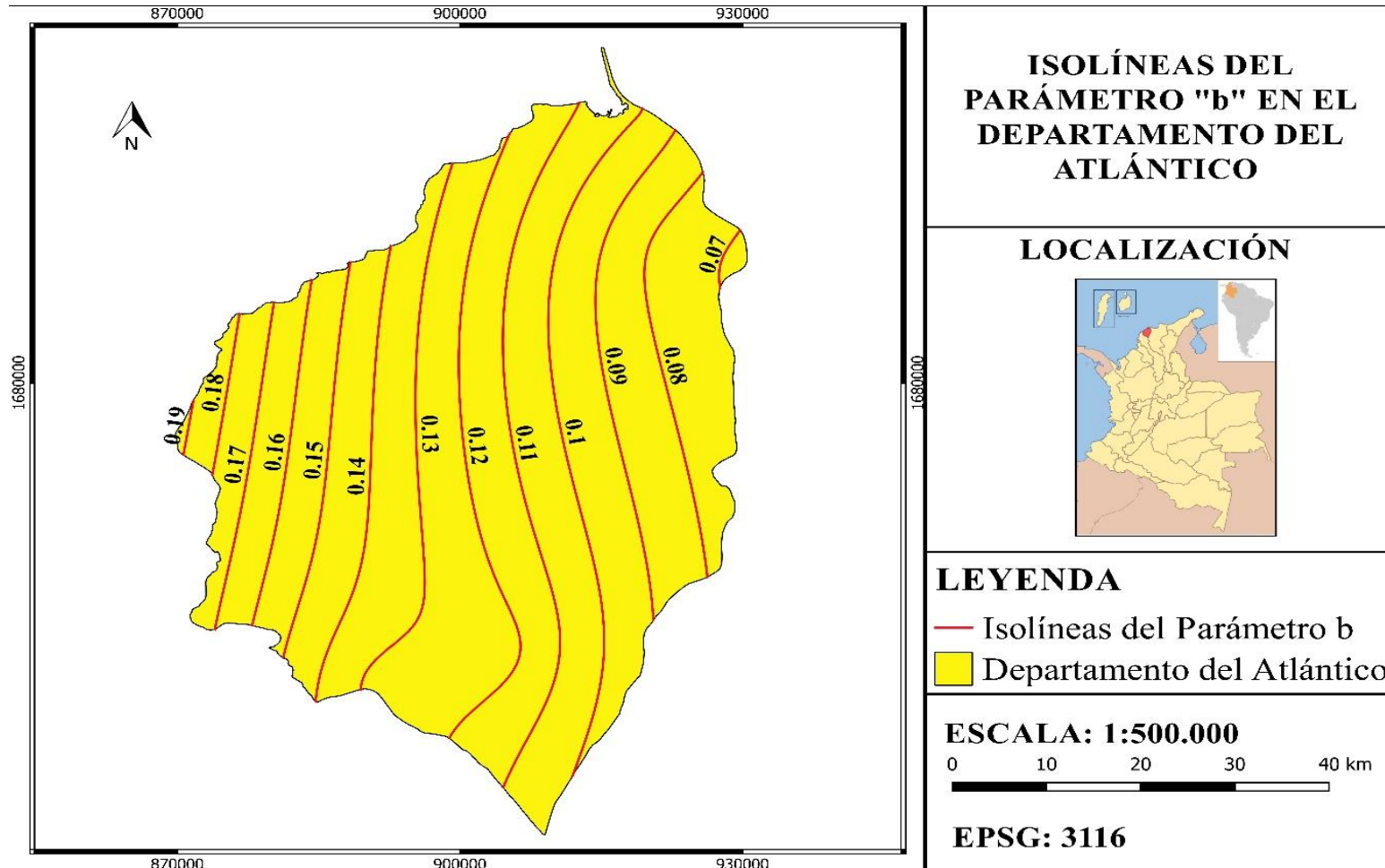


Figura 17. Mapas de isolíneas del parámetro “b” en el Departamento del Atlántico. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

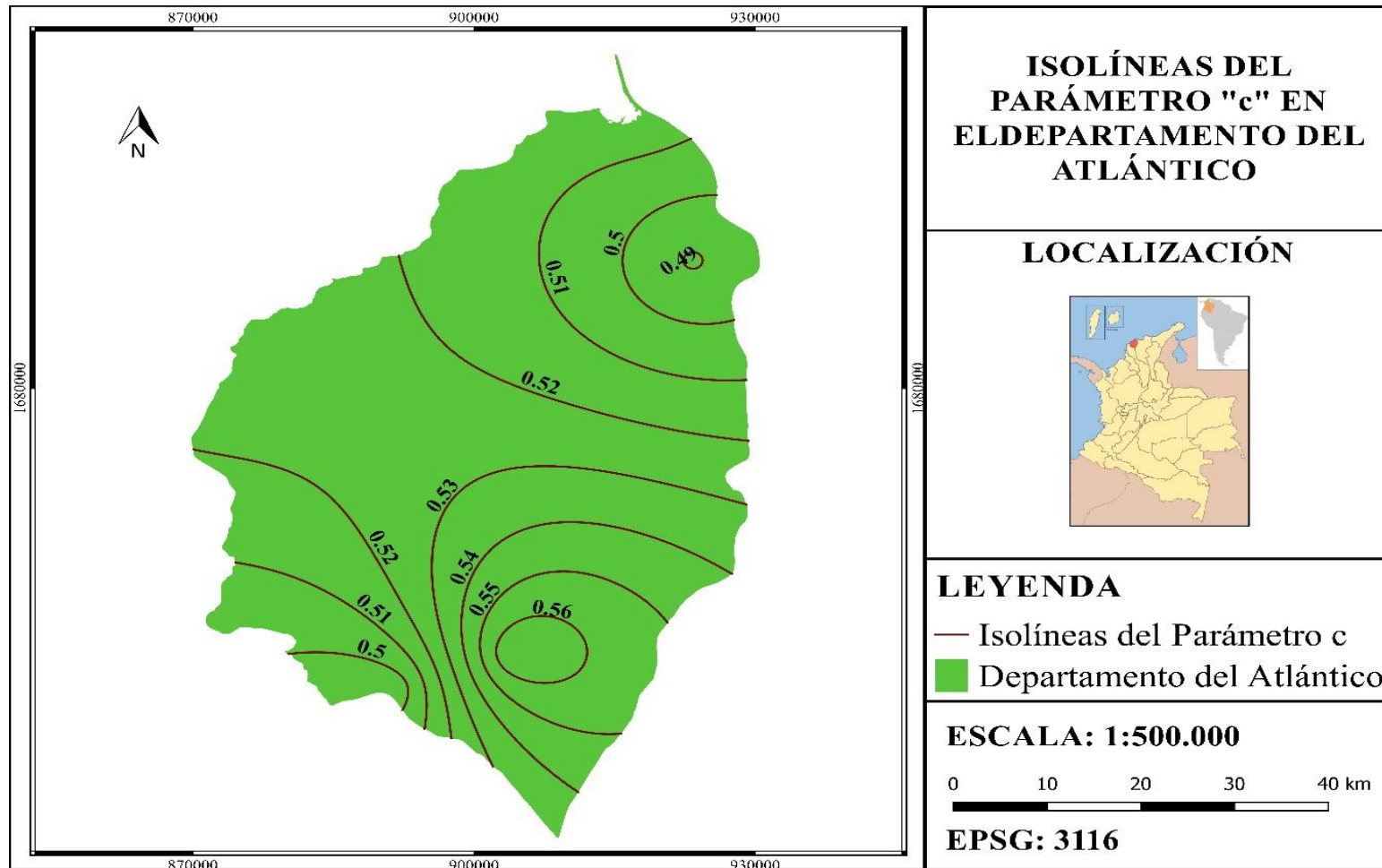


Figura 18. Mapas de isolíneas del parámetro "c" en el Departamento del Atlántico. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

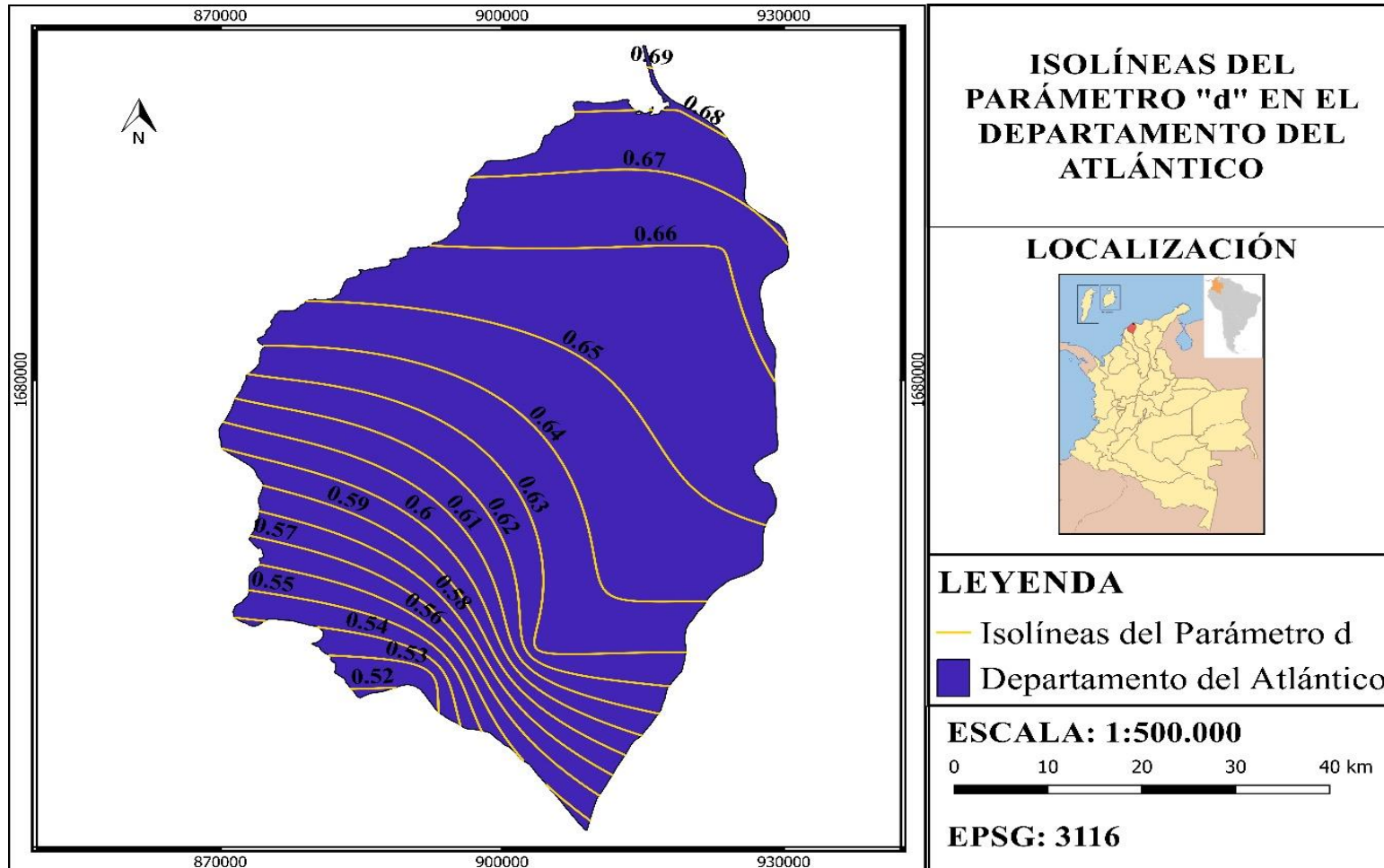


Figura 19. Mapas de isolíneas del parámetro “d” en el Departamento del Atlántico. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

9.3. Análisis comparativo

A modo de ejemplo se dispone a construir un box culvert en una zona del municipio de Sabanalarga en el Departamento Atlántico con coordenadas (907769, 1664560) en el sistema de referencia EPSG: 3116, en la Figura 20 se muestra la ubicación de la Obra.



Figura 20. Ubicación de la Obra por Diseñar en el Departamento del Atlántico. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

9.3.1. Determinación de la curva IDF sintética aplicando del método propuesto para el Departamento del Atlántico

Se extraen los parámetros a, b, c y d de la Ecuación (22) propuesta para el cálculo de las curvas IDF sintética, junto con la Media anual de la precipitación máximas en 24 horas (M) de los mapas de isolíneas generados en este trabajo de grado, promediando los valores de las isoyetas próximas a la ubicación de la obra que se va a diseñar, de la Figura 21 a la Figura 25 se muestran la ubicación de la obra en dichos mapas.

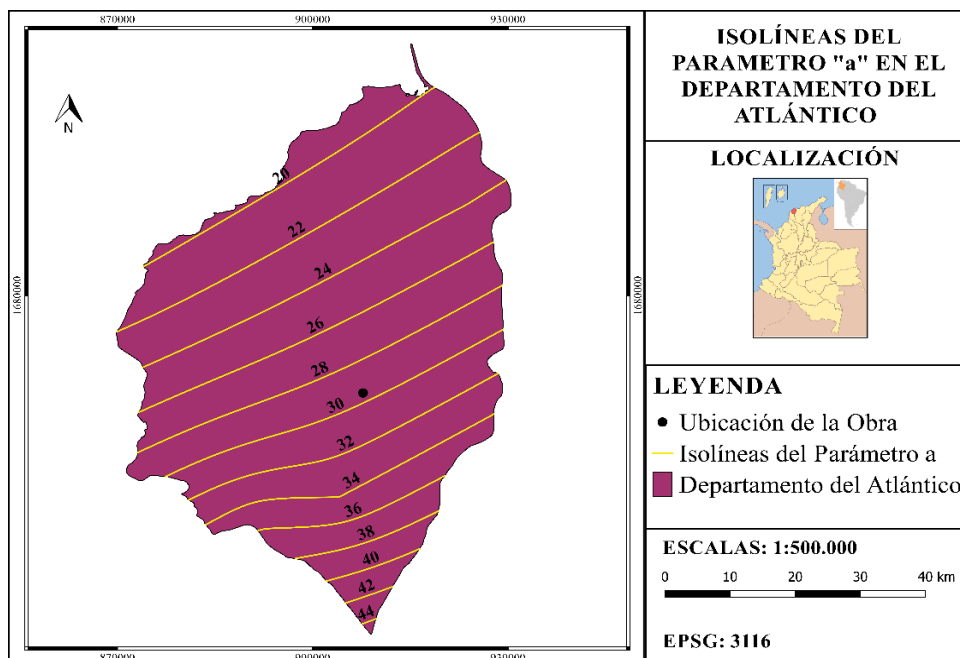


Figura 21. Ubicación de la obra en el mapa de Isolíneas del parámetro "a". Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

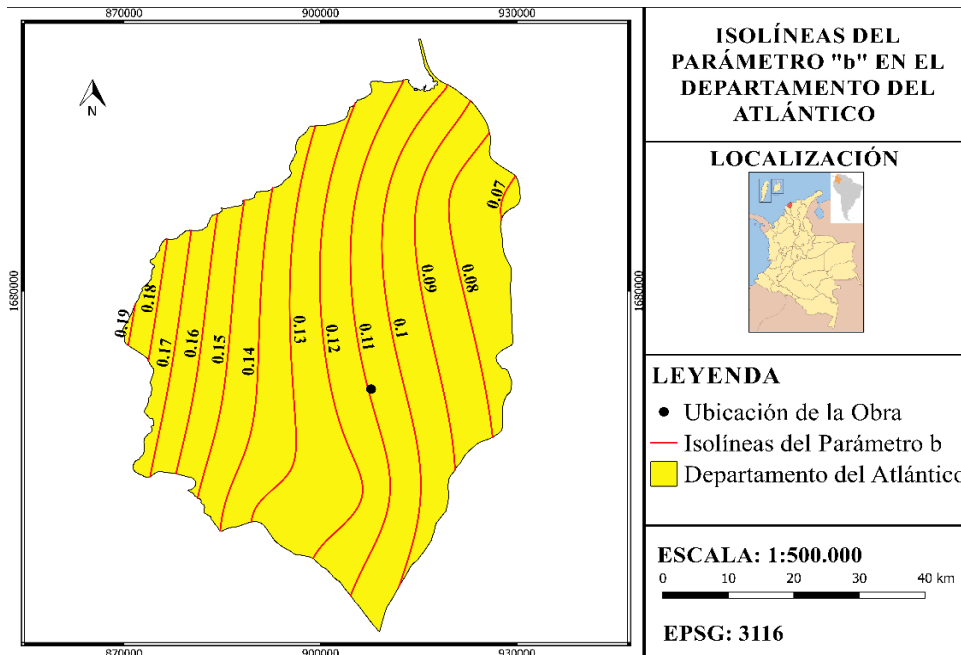


Figura 22. Ubicación de la obra en el mapa de Isolíneas del parámetro “b”. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

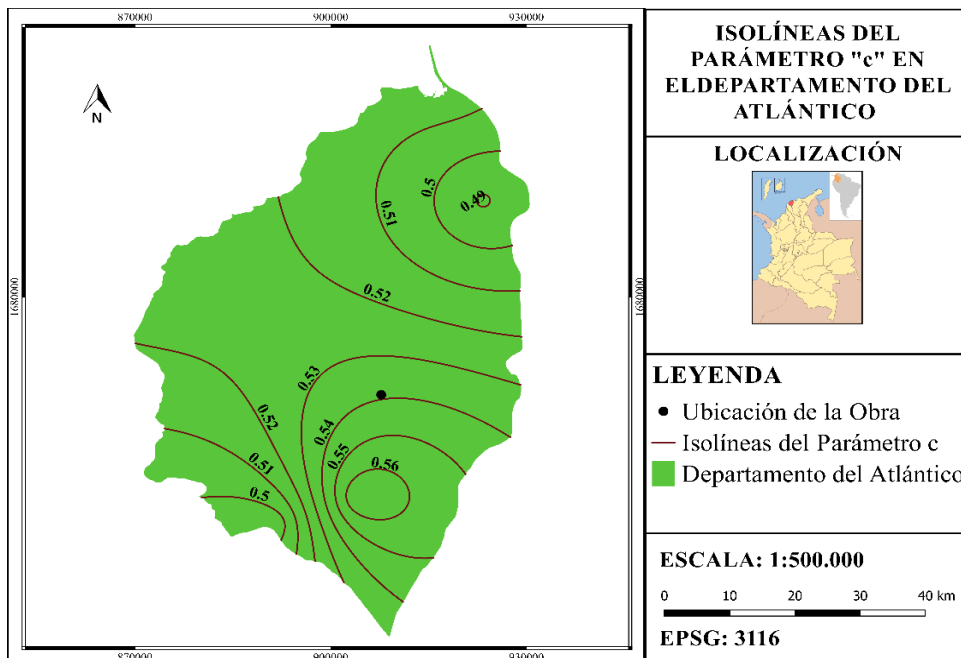


Figura 23. Ubicación de la obra en el mapa de Isolíneas del parámetro “c”. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

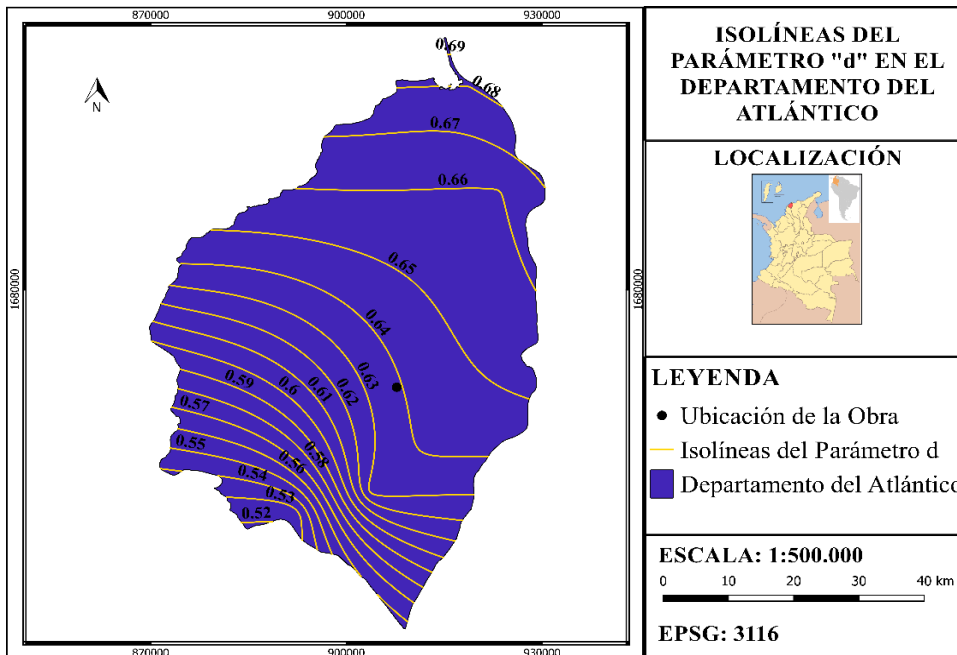


Figura 24. Ubicación de la obra en el mapa de Isolíneas del parámetro “d”. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

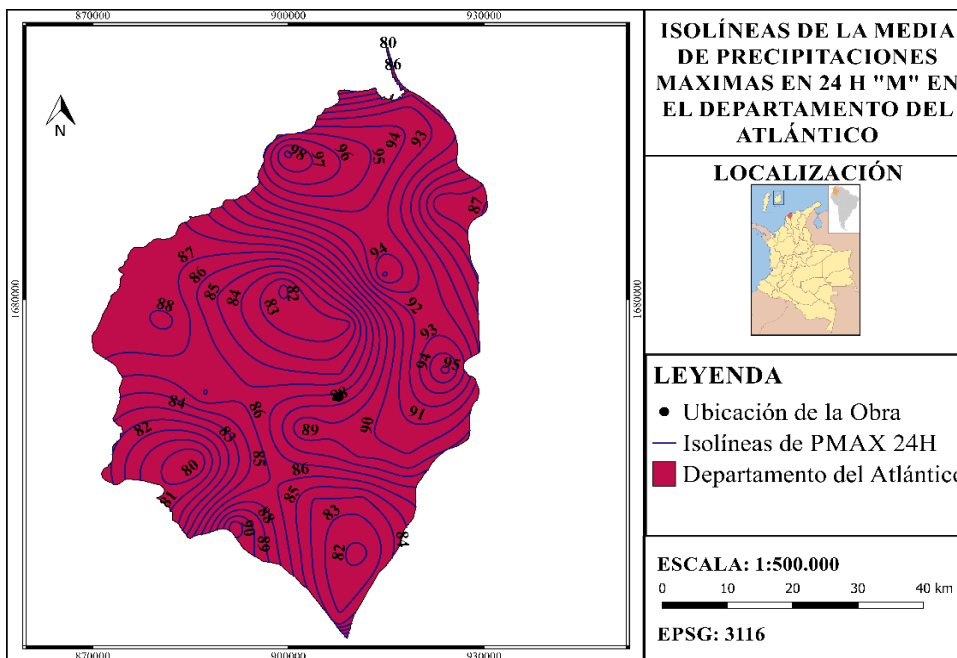


Figura 25. Ubicación de la obra en el mapa de Isolíneas de la media de precipitación máxima en 24horas “M”. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

Tabla 16

Valores promediados de los parámetros a, b, c, d y de la Media anual de la precipitación máximas en 24 horas (M) de la Ecuación (22) propuesta para el cálculo de las curvas IDF sintética.

Parámetro	Valores promediados
<i>a</i>	29
<i>b</i>	0.105
<i>c</i>	0.535
<i>d</i>	0.635
<i>M</i>	87.5

Nota. Se muestran el promedio de los valores de las isólineas próximas a la ubicación de la obra.

Los valores mostrados en la Tabla 15 se reemplazan en la Ecuación (22). De este modo curvas IDF de la zona de interés se construyen mediante la Ecuación (23).

$$i = \frac{29 \cdot T^{0.105} \cdot M^{0.635}}{t^{0.535}} \quad (23)$$

Tabla 17

Valores de curvas IDF estimadas para la ubicación del Proyecto con la ecuación propuesta en este trabajo de grado.

Curva IDF del Proyecto-Método propuesto para el Departamento del Atlántico								
Tiempo (min)	Periodo de retorno (Años)							
	T-2	T-5	T-10	T-25	T-50	T-75	T-100	T-500
10	151	166	178	196	211	220	227	269
20	104	114	123	135	146	152	157	186
30	84	92	99	109	117	122	126	149
40	72	79	85	93	101	105	108	128
50	64	70	75	83	89	93	96	114
60	58	64	68	75	81	84	87	103
70	53	59	63	69	75	78	80	95
80	49	54	59	65	69	72	75	88
90	46	51	55	61	65	68	70	83
100	44	48	52	57	62	64	66	78
110	42	46	49	54	59	61	63	75
120	40	44	47	52	56	58	60	71

Nota. Se observan los valores de intensidad proyectados para diferentes duraciones y periodo de retorno obtenidas por el método propuesto para el Departamento del Atlántico en este trabajo de Grado.

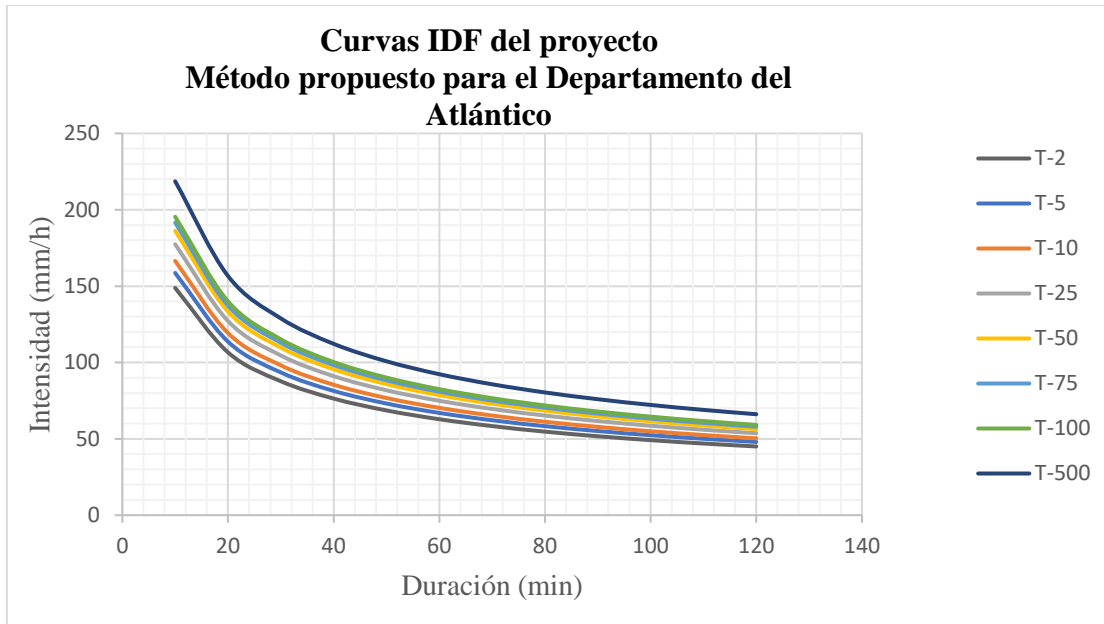


Figura 26. Curvas IDF del proyecto con el método propuesto para el Departamento del Atlántico. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

9.3.2. Determinación de la curva IDF sintética por el método simplificada

El método simplificado propuesto en el Manual de Drenaje para Carreteras de Colombia (INVIAS, 2009) plantea para el cálculo de las curvas IDF en la Región Caribe la expresión mostrada en la Ecuación (24).

$$i = \frac{24.85 \cdot T^{0.22} \cdot M^{0.10}}{(t/60)^{0.50}} \quad (24)$$

Tabla 18

Valores de intensidad de precipitación estimadas con el método simplificado para el Proyecto.

Curva IDF del Proyecto-Método simplificado								
Tiempo (min)	Periodo de retorno (Años)							
	T-2	T-5	T-10	T-25	T-50	T-75	T-100	T-500
10	111	136	158	193	225	246	262	374
20	78	96	112	137	159	174	185	264
30	64	78	91	112	130	142	151	216
40	55	68	79	97	113	123	131	187
50	50	61	71	86	101	110	117	167
60	45	55	64	79	92	100	107	153
70	42	51	60	73	85	93	99	141
80	39	48	56	68	80	87	93	132
90	37	45	53	64	75	82	87	125
100	35	43	50	61	71	78	83	118
110	33	41	48	58	68	74	79	113
120	32	39	46	56	65	71	76	108

Nota. Se observan los valores de intensidad proyectados para diferentes duraciones y periodo de retorno obtenidas por el método simplificado propuesto para la Región Caribe en el manual de drenaje para carreteras.

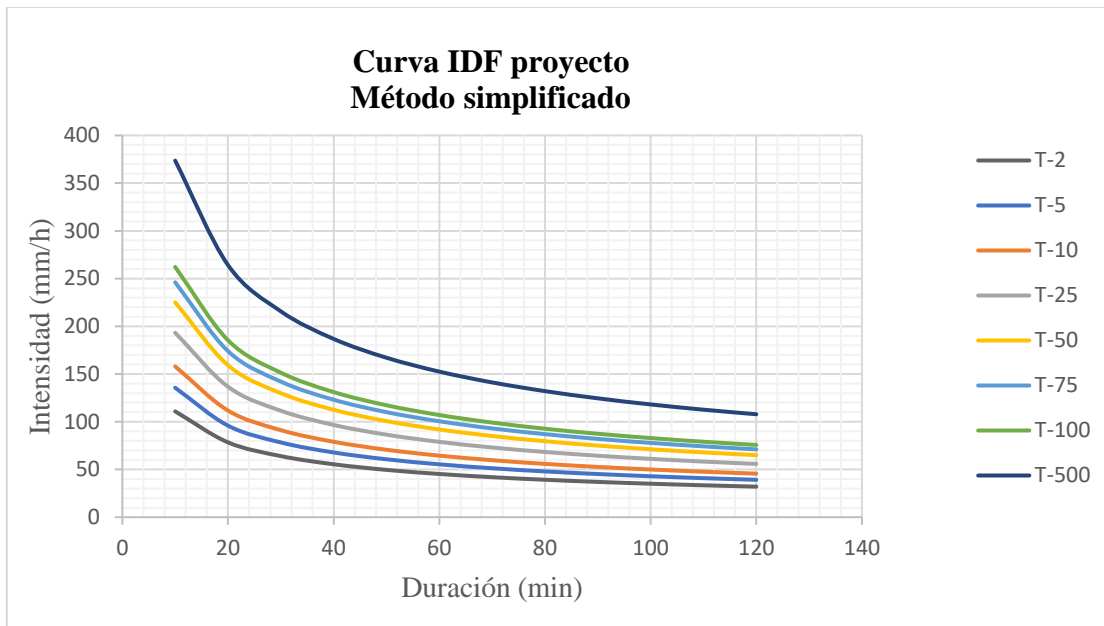


Figura 27. Curvas IDF del proyecto con el método simplificado. Fuente: B. Mejía Arrieta, 2017.

9.3.3. Comparación entre los dos métodos

Se calcula la diferencia promedio entre los valores de intensidad máxima para periodo de retorno determinados a diferentes duraciones, estimados por la metodología propuesta en este estudio y por el método simplificado propuesto para Colombia. En la Tabla 19 que muestra la diferencia promedio entre los métodos, se observa que para periodo de retorno menores a 25 años los valores de intensidad calculados por la ecuación propuesta son mayores a los del método simplificado, para periodos de retorno mayores pasa lo contrario el método simplificado arroja valores mayores de intensidad.

Tabla 19

Diferencia promedio entre los métodos.

Periodo de retorno	Diferencia promedio
T-2	18
T-5	13
T-10	8
T-25	0
T-50	-8
T-75	-13
T-100	-18
T-500	-51

Nota. Las intensidades máximas para periodo de retorno menores de 25 años calculadas por el método propuesto en este trabajo son mayores a las obtenidas por el método simplificado.

Conclusiones

Se analizó el comportamiento de los eventos de lluvias de corta duración del departamento del Atlántico de cada estación pluviográfica, seleccionando cinco de las tormentas más intensas por cada año de registro disponible de dichas estaciones, mediante la observación detallada de cada uno de los pluviogramas recolectados para el cálculo de las intensidades máximas de precipitación por cada intervalo de lluvia. Se consideró un periodo de referencia de registros históricos mayor a 10 años para el análisis estadístico aplicado a cada serie temporal.

Se evaluó la calidad de ajuste de tres funciones de probabilidad a las series de intensidades máximas de precipitación en el departamento del Atlántico, se observó que la ecuación de distribución Pearson III, a pesar de que en la mayoría de las estaciones obtuvo un buen ajuste, para la estación de A.E. Cortissoz presentó deficiencias a la hora de analizar los valores extremos de intensidad. Esta ecuación no se pudo ajustar de forma adecuada a los modelos matemáticos propuestos para el cálculo de la intensidad, razón por la que fue descartada para el análisis de frecuencia de las intensidades máximas de las estaciones hidrológicas estudiadas. Por otro lado, la distribución de SQRT-ETmax presentó en casi todas las estaciones mayor frecuencia por lo que se recomienda su uso en el cálculo de valores extremos a periodos de retorno altos. En general, se observó que la distribución de probabilidad de Gumbel fue la que mejor se comportó para todas las estaciones, por lo que fue seleccionada para la estimación de eventos extremos en un determinado periodo de retorno para la elaboración de curvas IDF reales características de cada una de las cinco estaciones pluviográficas estudiadas.

Se ajustó un modelo matemático propuesto para el cálculo de la intensidad máximas en Departamento del Atlántico dependiente del promedio Anual de la Precipitación Máxima en 24

horas, a las curvas IDF reales de cada estación pluviográfica. El error relativo promedio porcentual de los valores de intensidad máxima calculado por los dos métodos en cada estación pluviográfica varían de 4 a 37%. Cabe resaltar que los errores relativos mayores a 16% es generado por que los valores de intensidades máximas calculados con las ecuaciones parametrizadas para cada estación pluviográfica son mayores a los valores extremos reales proyectados, indicando que los valores arrojados por la ecuación propuesta son conservadores. Los modelos parametrizados propuestos para cada estación poseen buena calidad de ajuste por lo que se garantiza una buena estimación de intensidades de precipitación.

Se realizó un análisis geoestadístico para evaluar la variabilidad espacial de los promedios de precipitación máxima anual en 24h y de los parámetros de la ecuación general de intensidad ajustada a cada estación pluviográfica, comparando gráficamente dos métodos geoestadísticas de interpolación. Al comparar los dos métodos se concluye que la técnica de Kriging Ordinario presenta una mejor distribución de los valores interpolados geográficamente, esto se puede apreciar gráficamente al observar la suavidad de la superficie ráster desarrollada en SAGA Gis®.

Se destaca como uno de los aportes del presente trabajo de grado la generación de mapas de isolíneas de la precipitación máxima promedio anual en 24 horas y de los parámetros a , b , c y d del modelo general de intensidad propuesto en este estudio para el cálculo de intensidades máximas de precipitación en cualquier punto del Departamento del Atlántico mediante las superficies de interpolación obtenidas con el método de Kriging Ordinario. Los cuales fueron debidamente validados y comparados con el método simplificado propuesto para Colombia.

El análisis comparativo entre los dos métodos mostró que los valores de intensidades máximas calculados por la metodología propuesta en este estudio son mayores a los determinados por el método simplificado para periodo de retorno menores a 25 años. Para

periodos de retorno entre 25 y 50 años se presenta una diferencia promedio admisible. De acuerdo con lo anterior, se garantiza un buen ajuste de los datos de intensidad proyectados por la metodología propuesta para el Departamento del Atlántico en esta investigación, en el diseño de obras hidráulicas de magnitudes pequeñas y medianas, que exijan un periodo de retorno inferior a los 50 años. La calidad del ajuste se debe entre otras cosas a la consideración de un periodo de referencia de registro historio de entre 10 a 35 años en la determinación de tormentas representativas en el departamento.

Para periodos de retornos mayores a los 50 años el método simplificado calcula valores de intensidad máximas mayores a los arrojados por la metodología propuesta. Para la proyección de intensidades máximas a periodos de retorno mayores a 50 años se recomienda seguir la metodología propuesta en este trabajo de grado, utilizando la ecuación de distribución de SQRT-ETmax, para la solución de los parámetros de esta función se debe utilizar el método de máxima de verosimilitud que maximiza el valor de la función.

Apéndice

Apéndice 1. Resultados de las series precipitación máxima en 24 horas obtenidos del proceso de corrección y completado para los seis grupos de las estaciones pluviométricas.

Series de precipitaciones máximas en 24 horas corregidas de las estaciones del Grupo 1							
Años	La Pintada	Pto. Colombia	Los cocos	Polo nuevo	Ponedera	Las flores	San Rafael
1978		182		65	151		
1979		156		172			
1980		105	22	115			
1981		85	92	94	91	42	
1982		89	96	98		95	
1983		83	90	92	89	89	154
1984		75	81	83	81	80	67
1985		81		89	87	86	72
1986		68	74	75	73		61
1987				100	98	97	81
1988			135	137	134	133	111
1989			142	145	141	140	117
1990		91	99	101	98	98	81
1991		72	78	79	77	77	64
1992		106	114	116	113	113	94
1993	55	91	99	101	98	97	81
1994	89	77	83	84	82	82	68
1995	123	107	115	117	114	114	95
1996	111	96		105	103	102	85
1997	96	83		92	89	89	74
1998		96	104	106	103		86
1999						67	56
2000	109	95		104	101	101	84
2001	104	90	97	99	96		80
2002	109	94	102	104	101	100	84
2003	135	117		129	126		104
2004							51
2005		87	94	95			77
2006	95	82	89	90	88		73
2007	99	86	93	94	92		76

Series de precipitaciones máximas en 24 horas corregidas de las estaciones del Grupo 1

Años	La Pintada	Pto. Colombia	Los cocos	Polo nuevo	Ponedera	Las flores	San Rafael
2008	97	84	90	92			74
2009	83	72	78	79	77		64
2010	113	98	106	107			87
2011	115	99	108	109		106	88
2012	92	79	86			85	71
2013	108	93	101		100	99	83
2014	103	89	96	98			79
2015	101		95	96			78

Series de precipitaciones máxima en 24 horas corregidas de las estaciones del Grupo 2

Años	Galerazamba	A.E. Cortissoz	Usiacurí	Montebello	San Rafael
1978		84	93		111
1979	167	104	98		137
1980	77	77	73		68
1981	99	99	93		68
1982		82	77		80
1983	81	81	76		154
1984	82	82	77		67
1985	85	85	80		72
1986	79	79	75		61
1987	83	83	78		81
1988	101	101			111
1989					117
1990		71	67	52	81
1991		63	60	61	64
1992	76	76	72	73	94
1993		95	89	91	81
1994		84	79	80	68
1995		77	72	74	95
1996		78	74	75	85
1997		77	73	74	74
1998		101	95	97	86
1999	79	80	75		56
2000	78	78	74	75	84
2001		84	79	81	80

Series de precipitaciones máxima en 24 horas corregidas de las estaciones del Grupo 2					
Años	Galerazamba	A.E. Cortissoz	Usiacurí	Montebello	San Rafael
2002	73	74	69	71	84
2003		88	83	84	104
2004					51
2005	81	81	76	77	77
2006		78	74	75	73
2007		83	78	80	76
2008	104	105	99	100	74
2009	83	83	79	80	64
2010	86	86	81	82	87
2011	91	91	86	88	88
2012	64	65	61	62	71
2013	88	89	83	85	83
2014		69	65	66	79
2015		83		79	78

Series de precipitaciones máxima en 24 horas corregidas de las estaciones del Grupo 3							
Años	Juan de Acosta	Piojó	Hibacharo	El porvenir	Bayunca	Cañaveral	San Rafael
1978		18	68			62	111
1979		117	121		162	128	137
1980		76	79		83	83	68
1981		68	71		74	74	68
1982		88	91			96	80
1983		97	101			106	154
1984			79		83		67
1985		73	76		79	80	72
1986		67	69			73	61
1987		76				83	81
1988		156				170	111
1989		83		57	90	90	117
1990		96	99	102	104	105	81
1991		70	72	74		76	64
1992		103	107	109		113	94
1993		74	77	78	81		81
1994		87	90	92	94	95	68
1995	137	85	89	91	93	93	95

Series de precipitaciones máxima en 24 horas corregidas de las estaciones del Grupo 3

Años	Juan de Acosta	Piojó	Hibacharo	El porvenir	Bayunca	Cañaveral	San Rafael
1996	74	72		76	78	79	85
1997	91	89	92	94	97		74
1998	100	98	101	103	106	107	86
1999	94	92			101	101	56
2000	75	73	76	77	79	80	84
2001	89	87	90		95	95	80
2002	82	80	83		87		84
2003	88	86	90	92	94	94	104
2004							51
2005	101	99	103	105	108	108	77
2006	87	85	88		92		73
2007	88	86	89	91	94	94	76
2008	97	95	98	100	103	103	74
2009	76	74	77	79	81	81	64
2010	97	95	98	100	103	103	87
2011	106	104	108	110	113	113	88
2012	92	90	94	96	98		71
2013	76	74	77		81	81	83
2014	91	89	92	94	97	97	79
2015	75	73	76	77			78

Series de precipitaciones máxima en 24 horas corregidas de las estaciones del Grupo 4

Años	San José	Sabanalarga	Los Campanos	Lena
1978		100		
1979		83		88
1980		80		88
1981		95		104
1982		64		70
1983		69	54	
1984		103	117	113
1985		68	76	74
1986		87	98	95
1987		62		68
1988				123
1989				87

Series de precipitaciones máxima en 24 horas corregidas de las estaciones del Grupo 4				
Años	San José	Sabanalarga	Los Campanos	Lena
1990	161	76	86	84
1991	61	58	66	64
1992	80	76	86	84
1993	98	94	106	103
1994	163	156		170
1995	88	84		92
1996	100	96	108	105
1997	66	63	71	69
1998	96	91	103	100
1999		110		
2000	80	77	87	84
2001	92		99	96
2002	80	76	86	84
2003	77	74	83	81
2004	65		63	61
2005	83	63	71	69
2006	79	80	90	87
2007		75	85	82
2008	86	87	98	95
2009	98	83	93	90
2010	123	93	105	102
2011	82	118	133	129
2012		78	88	86
2013	63	96	109	105
2014	58	60	67	66
2015			63	61

Series de precipitaciones máximas en 24 horas corregidas de las estaciones del Grupo 5							
Años	Casa de bombas	Repelón	Loma grande	San Estanislao	Campo de la Cruz	San Pedrito Alerta	Cabecera Henequen
1978		137	157	22			
1979	80	86		90	105	70	
1980		60		63	63		
1981		77			82		71
1982	71	69		72	73	73	72

Series de precipitaciones máximas en 24 horas corregidas de las estaciones del Grupo 5

Años	Casa de bombas	Repelón	Loma grande	San Estanislao	Campo de la Cruz	San Pedrito Alerta	Cabecera Henequen
1983	67	64	69	68	68	68	68
1984	95	91	98		97	96	96
1985	66	63	68	67	67		67
1986	74	71	76		75	75	75
1987				75	75	75	
1988		152					
1989		66					
1990	62	60		63	63	63	63
1991		68	73		72	72	71
1992	71	68	73	72	72	72	72
1993	76	73		77	78	77	
1994		59	64	62	63	63	62
1995	80	77	83	81	82	82	81
1996	79	76	82	80	81	80	80
1997	64			65	66	65	65
1998	120			121	122		121
1999		53					
2000	62		64	63	63	63	
2001	79	76	82	80	81	81	80
2002	76		78	77	77	77	
2003	69		71	70	70	70	
2004		82			87		
2005	92	89		93		94	
2006	79	76	81	80	80	80	
2007	80	77	83	81	82	82	
2008	88	85	91	89	90	89	
2009	69	66	71	70	70	70	
2010	78	75	80	79		79	
2011	107		110	108	109	109	
2012	75	72	78	76	77	77	
2013	87	84	90	88	89		
2014	67	64	69	67	68	68	
2015	58					59	

Series de precipitaciones máxima en 24 horas corregidas de las estaciones del Grupo 6							
Años	Hda el Rabón	Normal Manatí	Candelaria	Pto Giraldo	Salamina	Tiogollo	El Limón
1978		30					26
1979	110				21	100	103
1980	100	99		143	106		113
1981	80	79			94		90
1982	77	76		84	123	103	
1983	73	73		80	126	77	83
1984		96		106	75	110	110
1985		72	52	79	81		82
1986	104	103	104	113	84	98	118
1987	92	91		100	92	128	105
1988		119					137
1989		123					140
1990	74	73	73	80	79	131	83
1991	80	79	80	87	89	84	90
1992	83	82	83	90	85	88	94
1993	90	89	90	98	91	95	102
1994	78	77	77	85	85	82	88
1995	88	87	87	95	102	93	99
1996	84	83	83	91	78	89	95
1997	90	88	89	97	73	95	101
1998	84	83	84	91	86		95
1999		99					
2000	77	76	77	84	73	89	
2001	72	71	71	78	73	106	81
2002	85	84	84	92	87	81	
2003	72	71	71	78	77	76	
2004		71		78	85		
2005	86	85	85	93		89	
2006		75	76	83	85	76	
2007	84	83	83	91	96	75	
2008	83	82	83	91	94	91	
2009	94	93	94	103	95	80	
2010		91	92	100		88	
2011		92	93	101	61	88	
2012		59	60	65	80	100	
2013	78	78	78	85	78		
2014	76	76	76	83	78	97	
2015	77		76			98	

Series de precipitaciones máxima en 24 horas completas de las estaciones del Grupo1							
Años	La Pintada	Pto Colombia	Los Cocos	Polonuevo	Ponedera	Las Flores	San Rafael
1978	139	182	129	65	151	129	111
1979	171	156	159	172	168	159	137
1980	84	105	22	115	83	79	68
1981	85	85	92	94	91	42	68
1982	100	89	96	98	98	95	80
1983	110	83	90	92	89	89	154
1984	84	75	81	83	81	80	67
1985	89	81	83	89	87	86	72
1986	76	68	74	75	73	70	61
1987	101	93	94	100	98	97	81
1988	140	129	135	137	134	133	111
1989	147	136	142	145	141	140	117
1990	102	91	99	101	98	98	81
1991	80	72	78	79	77	77	64
1992	118	106	114	116	113	113	94
1993	55	91	99	101	98	97	81
1994	89	77	83	84	82	82	68
1995	123	107	115	117	114	114	95
1996	111	96	99	105	103	102	85
1997	96	83	86	92	89	89	74
1998	107	96	104	106	103	100	86
1999	70	65	66	70	69	67	56
2000	109	95	98	104	101	101	84
2001	104	90	97	99	96	94	80
2002	109	94	102	104	101	100	84
2003	135	117	121	129	126	121	104
2004	64	59	59	64	63	59	51
2005	97	87	94	95	95	90	77
2006	95	82	89	90	88	85	73
2007	99	86	93	94	92	89	76
2008	97	84	90	92	92	87	74
2009	83	72	78	79	77	75	64
2010	113	98	106	107	108	102	87
2011	115	99	108	109	110	106	88
2012	92	79	86	90	88	85	71
2013	108	93	101	105	100	99	83
2014	103	89	96	98	98	93	79
2015	101	91	95	96	97	92	78

Series de precipitaciones máxima en 24 horas completas de las estaciones del Grupo 2				
Años	Galerazamba	A.E. cortissoz	Usiacurí	Montebello
1978	103	84	93	91
1979	167	104	98	117
1980	77	77	73	69
1981	99	99	93	84
1982	86	82	77	76
1983	81	81	76	92
1984	82	82	77	72
1985	85	85	80	75
1986	79	79	75	69
1987	83	83	78	76
1988	101	101	96	95
1989	123	117	110	109
1990	74	71	67	52
1991	67	63	60	61
1992	76	76	72	73
1993	97	95	89	91
1994	85	84	79	80
1995	86	77	72	74
1996	85	78	74	75
1997	81	77	73	74
1998	103	101	95	97
1999	79	80	75	68
2000	78	78	74	75
2001	88	84	79	81
2002	73	74	69	71
2003	98	88	83	84
2004	54	51	48	48
2005	81	81	76	77
2006	82	78	74	75
2007	86	83	78	80
2008	104	105	99	100
2009	83	83	79	80
2010	86	86	81	82
2011	91	91	86	88
2012	64	65	61	62
2013	88	89	83	85
2014	76	69	65	66
2015	86	83	77	79

Series de precipitaciones máxima en 24 horas completas de las estaciones del Grupo 3						
Años	Juan de Acosta	Piojó	Hibacharo	El Porvenir	Bayunca	Cañaverl
1978	67	18	68	67	70	62
1979	135	117	121	134	162	128
1980	79	76	79	79	83	83
1981	72	68	71	72	74	74
1982	91	88	91	91	95	96
1983	119	97	101	119	124	106
1984	78	73	79	78	83	82
1985	77	73	76	77	79	80
1986	69	67	69	69	73	73
1987	82	76	80	82	86	83
1988	149	156	145	149	156	170
1989	89	83	87	57	90	90
1990	99	96	99	102	104	105
1991	73	70	72	74	76	76
1992	108	103	107	109	112	113
1993	80	74	77	78	81	85
1994	89	87	90	92	94	95
1995	137	85	89	91	93	93
1996	74	72	76	76	78	79
1997	91	89	92	94	97	96
1998	100	98	101	103	106	107
1999	94	92	87	89	101	101
2000	75	73	76	77	79	80
2001	89	87	90	90	95	95
2002	82	80	83	85	87	90
2003	88	86	90	92	94	94
2004	56	52	54	56	58	59
2005	101	99	103	105	108	108
2006	87	85	88	87	92	91
2007	88	86	89	91	94	94
2008	97	95	98	100	103	103
2009	76	74	77	79	81	81
2010	97	95	98	100	103	103
2011	106	104	108	110	113	113
2012	92	90	94	96	98	97
2013	76	74	77	79	81	81
2014	91	89	92	94	97	97
2015	75	73	76	77	82	83

Series de precipitaciones máxima en 24 horas completas de las estaciones del Grupo 4				
Años	San José	Sabanalarga	Los campanos	Lena
1978	105	100	104	105
1979	88	83	87	88
1980	86	80	85	88
1981	102	95	101	104
1982	69	64	68	70
1983	64	69	54	64
1984	113	103	117	113
1985	74	68	76	74
1986	95	87	98	95
1987	67	62	66	68
1988	123	117	122	123
1989	87	82	86	87
1990	161	76	86	84
1991	61	58	66	64
1992	80	76	86	84
1993	98	94	106	103
1994	163	156	164	170
1995	88	84	88	92
1996	100	96	108	105
1997	66	63	71	69
1998	96	91	103	100
1999	116	110	114	116
2000	80	77	87	84
2001	92	91	99	96
2002	80	76	86	84
2003	77	74	83	81
2004	65	60	63	61
2005	83	63	71	69
2006	79	80	90	87
2007	82	75	85	82
2008	86	87	98	95
2009	98	83	93	90
2010	123	93	105	102
2011	82	118	133	129
2012	86	78	88	86
2013	63	96	109	105
2014	58	60	67	66
2015	62	59	63	61

Series de precipitaciones máxima en 24 horas completas de las estaciones del Grupo 5

Años	Casa de Bombas	Repelón	Loma Grande	San Estanislao	Campo de la Cruz	San Pedrito Alerta	Cabecera henequen
1978	103	137	157	22	105	101	101
1979	80	86	92	90	105	70	85
1980	62	60	66	63	63	61	61
1981	77	77	81	75	82	75	71
1982	71	69	77	72	73	73	72
1983	67	64	69	68	68	68	68
1984	95	91	98	93	97	96	96
1985	66	63	68	67	67	65	67
1986	74	71	76	72	75	75	75
1987	75	75	80	75	75	75	74
1988	153	152	162	150	156	150	151
1989	67	66	71	65	68	65	66
1990	62	60	66	63	63	63	63
1991	70	68	73	69	72	72	71
1992	71	68	73	72	72	72	72
1993	76	73	81	77	78	77	75
1994	62	59	64	62	63	63	62
1995	80	77	83	81	82	82	81
1996	79	76	82	80	81	80	80
1997	64	65	70	65	66	65	65
1998	120	121	129	121	122	119	121
1999	53	53	56	52	54	52	52
2000	62	62	64	63	63	63	62
2001	79	76	82	80	81	81	80
2002	76	76	78	77	77	77	75
2003	69	69	71	70	70	70	69
2004	84	82	89	82	87	82	83
2005	92	89	99	93	95	94	91
2006	79	76	81	80	80	80	77
2007	80	77	83	81	82	82	79
2008	88	85	91	89	90	89	87
2009	69	66	71	70	70	70	68
2010	78	75	80	79	79	79	77
2011	107	108	110	108	109	109	106
2012	75	72	78	76	77	77	74
2013	87	84	90	88	89	85	85
2014	67	64	69	67	68	68	66
2015	58	59	62	58	60	59	58

Series de precipitaciones máxima en 24 horas completas de las estaciones del Grupo 6							
Años	Hda el rabon	Norm al manatí	Cande laria	Pto giraldo	Sala mina	Tiogol lo	El limón
1978	26	30	25	28	26	29	26
1979	110	76	75	84	21	100	103
1980	100	99	103	143	106	119	113
1981	80	79	80	90	94	92	90
1982	77	76	86	84	123	103	103
1983	73	73	78	80	126	77	83
1984	93	96	89	106	75	110	110
1985	70	72	52	79	81	78	82
1986	104	103	104	113	84	98	118
1987	92	91	92	100	92	128	105
1988	120	119	115	130	121	133	137
1989	123	123	118	133	124	136	140
1990	74	73	73	80	79	131	83
1991	80	79	80	87	89	84	90
1992	83	82	83	90	85	88	94
1993	90	89	90	98	91	95	102
1994	78	77	77	85	85	82	88
1995	88	87	87	95	102	93	99
1996	84	83	83	91	78	89	95
1997	90	88	89	97	73	95	101
1998	84	83	84	91	86	93	95
1999	100	99	96	109	101	111	116
2000	77	76	77	84	73	89	89
2001	72	71	71	78	73	106	81
2002	85	84	84	92	87	81	96
2003	72	71	71	78	77	76	83
2004	76	71	73	78	85	84	87
2005	86	85	85	93	86	89	98
2006	77	75	76	83	85	76	88
2007	84	83	83	91	96	75	96
2008	83	82	83	91	94	91	98
2009	94	93	94	103	95	80	105
2010	90	91	92	100	91	88	104
2011	85	92	93	101	61	88	97
2012	70	59	60	65	80	100	81
2013	78	78	78	85	78	87	91
2014	76	76	76	83	78	97	91
2015	77	80	76	88	82	98	94

Apéndice 2. Intensidades máximas seleccionadas para cada estación pluviográfica estudiada.

Años	Intensidades máximas de la estación A.E. Cortissoz											
	Tiempo (min)											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1978	142	97	94	89	88	86	79	74	66	59	54	49
1979	126	86	76	57	47	41	39	34	30	27	25	23
1980	91	72	65	59	52	45	38	34	30	27	24	22
1981	132	98	85	69	56	49	43	44	40	37	34	32
1982	109	77	70	63	53	46	43	39	34	31	28	26
1983	71	60	56	55	54	47	41	36	32	29	26	24
1984	169	93	81	73	62	58	51	46	41	37	33	30
1985	131	98	77	72	84	73	66	58	52	47	42	39
1986	60	48	45	34	27	23	19	17	15	14	12	11
1987	127	66	83	63	51	43	37	32	28	26	23	21
1988	78	63	50	40	40	40	35	32	28	25	23	21
1989	98	91	93	71	58	49	42	36	32	29	26	24
1990	135	108	94	96	83	73	64	56	50	45	41	37
1991	109	85	68	51	48	44	37	33	29	26	24	22
1992	120	91	73	69	57	47	40	35	31	28	26	24
1993	143	121	99	98	88	79	69	60	54	48	44	40
1994	92	69	74	62	53	46	40	35	31	28	25	23
1995	128	92	74	66	59	54	52	50	46	43	39	36
1996	81	75	65	60	55	47	41	36	32	29	26	24
1997	135	73	65	51	51	48	44	40	36	32	29	27
1998	109	69	77	69	66	56	50	46	41	37	33	31
1999	139	106	80	71	59	49	42	37	33	29	27	25
2000	116	95	87	69	57	48	41	36	33	31	28	26
2001	86	71	69	68	67	58	50	44	39	35	32	29
2002	103	81	69	59	61	56	50	49	47	45	41	38
2003	95	59	48	43	37	34	30	27	25	22	20	18
2004	104	89	62	56	55	49	43	37	33	30	27	25
2005	109	63	65	53	45	38	32	28	25	23	21	19
2006	108	84	88	68	76	73	64	57	50	45	41	38

Intensidades máximas de la estación A.E. Cortissoz												
Años	Tiempo (min)											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
2007	120	90	68	57	69	63	55	48	43	38	35	32
2008	115	82	77	69	60	50	43	38	34	30	27	25
2009	169	141	122	130	103	73	75	80	80	75	71	66
2010	153	98	84	74	59	50	43	37	33	30	27	25
2011	101	75	65	62	70	65	58	51	45	41	37	34
2012	109	65	49	55	51	46	40	36	32	29	26	24
MEDIA	115	84	74	66	60	53	47	42	38	34	31	29
DV	25.4	18.8	16.0	17.3	15.5	13.5	12.8	12.8	12.3	11.4	10.7	9.9
CS	0.1	0.8	0.5	1.6	0.8	0.6	0.7	1.1	1.4	1.5	1.7	1.7

Nota. En la tabla se muestra la media, desviación estándar (DV) y coeficiente de sesgo (CS) calculados de las series de intensidades máximas para la estación de A. E. Cortissoz.

Intensidades máximas de la estación de Galerazamba													
Años	Tiempo (min)												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
1978	133	84	80	68	79	73	63	55	49	44	40	37	34
1979	122	119	98	71	66	72	70	64	57	52	47	43	40
1980	118	78	70	62	54	54	51	48	42	38	35	32	29
1981	115	74	75	67	55	48	42	37	33	29	27	25	23
1982	105	77	79	74	61	56	48	42	37	34	30	28	26
1983	94	84	51	52	48	45	39	36	34	32	31	28	26
1984	133	116	94	78	67	61	53	47	42	41	39	37	34
1985	86	85	70	60	50	43	37	32	28	26	23	21	20
1986	92	83	81	79	69	61	54	48	42	38	35	32	29
1987	149	89	99	63	64	61	54	48	43	38	35	32	29
1998	113	87	89	66	64	63	60	56	59	62	62	59	56
1999	143	102	72	54	43	37	36	32	29	26	23	21	20
2000	89	65	56	53	49	41	35	31	27	24	22	20	19

Intensidades máximas de la estación de Galerazamba													
Años	Tiempo (min)												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
2001	62	61	34	41	41	34	29	26	23	21	19	17	16
2002	124	98	91	87	63	53	63	65	60	55	50	46	42
2003	184	122	108	96	81	71	64	58	52	47	43	40	37
2005	75	53	54	49	44	37	33	29	26	23	21	19	18
2006	124	90	98	84	70	59	53	49	44	40	36	33	31
2007	121	72	69	71	81	68	58	51	45	41	37	34	31
2008	130	77	64	54	43	45	43	43	43	40	37	34	32
2009	122	81	75	58	46	39	34	30	27	24	22	20	19
2010	163	107	102	83	67	56	48	42	37	33	30	28	26
2011	110	82	64	51	44	39	35	31	28	26	24	22	20
MEDIA	118	86	77	66	59	53	48	43	39	36	33	31	28
DV	27.9	17.8	18.6	13.9	12.9	12.2	11.8	11.5	11.1	11.0	10.6	10.1	9.5
CS	0.2	0.5	-0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.3	0.3	0.6	0.8	1.0	1.1

Nota. En la tabla se muestra la media, desviación estándar (DV) y coeficiente de sesgo (CS) calculados de las series intensidades máximas para la estación de Galerazamba.

Intensidades máximas de la estación Las Flores															
Años	Tiempo (min)														
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
1980	119	89	98	89	81	69	60	54	48	43	39	36	33	31	29
1981	118	91	83	67	62	56	52	47	44	42	43	41	38	38	37
1982	116	85	70	57	48	40	35	31	28	25	23	21	19	18	17
1983	115	88	64	48	42	43	48	45	44	41	39	37	35	33	31

Intensidades máximas de la estación Las Flores															
Años	Tiempo (min)														
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
1984	92	80	67	67	57	48	42	36	32	29	27	24	22	21	19
1985	98	60	61	52	44	38	32	28	25	23	21	19	17	16	15
1986	15 4	11 7	92	89	81	74	65	58	51	46	42	39	36	33	31
1987	95	89	77	56	53	56	49	50	50	48	44	40	37	35	32
2001	14 0	10 2	98	62	73	67	60	55	50	45	42	38	35	33	31
2002	95	80	58	67	60	51	44	39	35	31	28	26	24	22	21
2003	10 3	71	68	61	49	41	35	31	27	25	22	20	19	18	16
2004	43	31	24	19	21	20	17	15	13	12	11	10	9	9	8
2008	12 8	10 0	73	64	59	52	46	40	36	33	30	28	26	24	22
2009	95	74	56	55	50	51	47	42	37	34	30	28	26	24	22
2010	11 2	92	62	63	55	50	47	43	38	35	31	29	27	25	23
2011	16 0	13 8	10 7	85	75	82	77	71	66	60	55	50	46	43	40
2012	11 6	98	76	75	83	71	62	56	50	45	41	37	35	32	30
2013	88	73	57	57	57	50	44	39	34	31	28	26	24	22	21
MEDIA	111	87	72	63	58	53	48	43	39	36	33	31	28	26	25
DV	26.7	22.6	19.6	16.3	15.9	15.0	13.9	13.1	12.4	11.4	10.7	10.0	9.2	8.8	8.4
CS	-	-	-	-	-	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0
	0.3	0.2	0.3	0.7	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0

Nota. En la tabla se muestra la media, desviación estándar (DV) y coeficiente de sesgo (CS) calculados de las series intensidades máximas para la estación de Las

Flores.

Intensidades máximas de la estación El Limón												
Años	Tiempo (min)											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1978	113	85	74	60	53	45	38	34	30	27	24	22
1979	132	74	69	63	54	55	47	41	37	33	30	28
1980	180	144	101	103	98	89	76	67	66	62	59	54
1981	114	94	96	83	69	67	63	57	51	46	42	38
1982	79	65	63	54	45	38	32	28	25	23	21	19
1983	112	83	73	64	53	47	43	38	34	31	28	25
1984	85	66	70	65	63	60	52	45	40	36	33	30
1985	77	69	66	65	64	60	52	45	40	36	33	30
1986	69	60	54	35	32	35	32	29	25	23	21	19
1987	84	68	59	45	36	30	35	37	34	31	28	25
1988	124	93	82	77	74	72	63	55	49	44	41	41
1989	127	78	77	72	58	48	41	37	35	32	30	27
1990	104	81	68	52	44	39	43	42	40	39	37	35
MEDIA	108	81	73	64	57	53	48	43	39	36	33	30
DV	30.2	21.5	13.6	17.3	17.4	16.7	13.4	11.4	11.1	10.7	10.3	9.8
CS	1.0	2.2	0.9	0.5	0.8	0.7	0.9	0.8	1.1	1.3	1.3	1.2

Nota. En la tabla se muestra la media, desviación estándar (DV) y coeficiente de sesgo (CS) calculados de las series de intensidades máximas para la estación de El Limón.

Intensidades máximas de la estación N. Manatí														
Años	Tiempo (min)													
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
1992	138	87	66	60	52	43	37	32	29	26	24	22	20	19
1993	121	95	101	91	78	72	62	55	49	44	40	36	34	31
1994	130	124	79	80	77	70	62	54	48	43	39	36	33	31
1995	118	84	73	77	68	66	65	59	55	50	46	42	39	36
1996	232	133	93	69	56	46	40	35	31	28	25	23	21	20
1997	181	125	100	88	82	71	62	55	49	44	40	37	34	31
1998	143	92	101	79	63	53	45	40	35	32	29	26	24	23
1999	146	132	120	72	60	70	62	55	51	49	47	43	41	38
2000	157	148	99	90	80	75	65	58	52	47	42	39	36	33
2013	134	117	79	79	81	70	64	62	61	56	53	50	47	44
2014	78	58	60	53	52	47	40	35	31	28	25	23	21	20
2015	66	41	44	34	29	24	20	18	16	14	13	12	11	10
MEDIA	137	103	85	73	65	59	52	46	42	38	35	32	30	28
DV	43.4	32.3	21.6	16.7	16.2	15.9	14.9	14.0	13.4	12.5	11.8	11.0	10.4	9.7
CS	0.5	-0.6	-0.3	-1.2	-0.9	-1.0	-0.9	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2

Nota. En la tabla se muestra la media, desviación estándar (DV) y coeficiente de sesgo (CS) calculados de las series de intensidades máximas para la estación de

N. Manatí.

Apéndice 3. Análisis de la calidad de ajuste de las tres ecuaciones de distribución evaluadas.

Tiempo (min)	ECMF -Estación: A. E. Cortissoz		
	Gumbel	SQRT-Etmax	Pearson III
10	0.047	0.051	0.025
20	0.041	0.039	0.032
30	0.046	0.057	0.034
40	0.060	0.068	0.081
50	0.045	0.062	0.052
60	0.054	0.065	0.063
70	0.058	0.068	0.065
80	0.051	0.056	0.052
90	0.054	0.056	0.055
100	0.055	0.053	0.060
110	0.057	0.055	0.071
120	0.057	0.056	0.077

Tiempo (min)	ECMF -Estación: Galerazamba		
	Gumbel	SQRT-Etmax	Pearson III
10	0.067	0.067	0.044
20	0.044	0.050	0.048
30	0.058	0.058	0.041
40	0.048	0.034	0.034
50	0.084	0.076	0.065
60	0.082	0.067	0.059
70	0.080	0.066	0.057
80	0.074	0.065	0.053
90	0.071	0.067	0.054
100	0.061	0.063	0.048
110	0.054	0.060	0.045
120	0.049	0.056	0.045
130	0.047	0.059	0.046

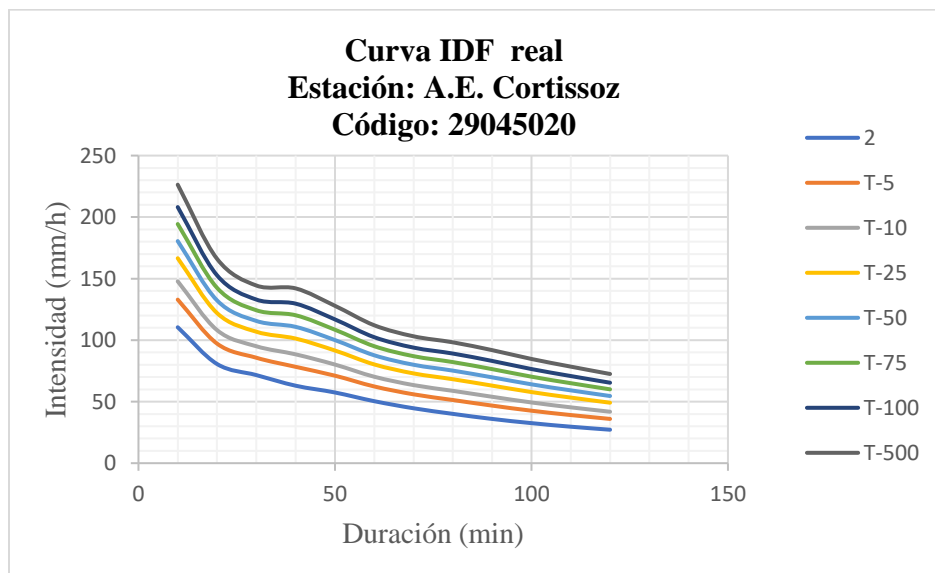
Tiempo (min)	ECMF -Estación: Las Flores		
	Gumbel	SQRT-Etmax	Pearson III
10	0.063	0.097	0.063
20	0.069	0.101	0.054
30	0.044	0.085	0.054
40	0.071	0.115	0.076
50	0.050	0.077	0.062
60	0.053	0.070	0.057
70	0.061	0.076	0.049
80	0.053	0.065	0.030
90	0.058	0.065	0.041
100	0.062	0.061	0.045
110	0.069	0.064	0.056
120	0.071	0.064	0.059

Tiempo (min)	ECMF -Estación: El Limón		
	Gumbel	SQRT-Etmax	Pearson III
10	0.07	0.49	0.06
20	0.06	0.05	0.05
30	0.04	0.04	0.04
40	0.06	0.06	0.05
50	0.04	0.05	0.04
60	0.04	0.05	0.04
70	0.04	0.05	0.04
80	0.04	0.05	0.04
90	0.05	0.05	0.05
100	0.04	0.04	0.04
110	0.04	0.04	0.04
120	0.04	0.05	0.04

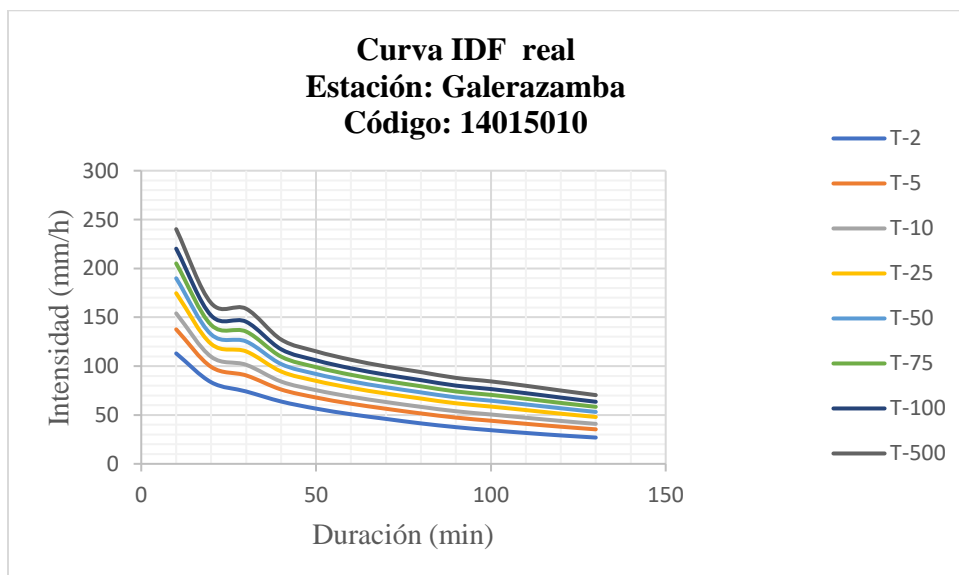
Tiempo (min)	ECMF -Estación: N. Manatí		
	Gumbel	SQRT-Etmax	Pearson III
10	0.078	0.087	0.066
20	0.093	0.084	0.059
30	0.087	0.073	0.062
40	0.117	0.107	0.046
50	0.088	0.087	0.067
60	0.127	0.106	0.093
70	0.140	0.114	0.114
80	0.129	0.102	0.095
90	0.115	0.090	0.082
100	0.110	0.085	0.077
110	0.104	0.081	0.072
120	0.101	0.080	0.070
130	0.098	0.078	0.068
140	0.096	0.075	0.067

Apéndice 4. Gráficas y tablas de las curvas Intensidad- Duración- Frecuencias Reales (curvas IDF Reales) de las cinco estaciones pluviográficas

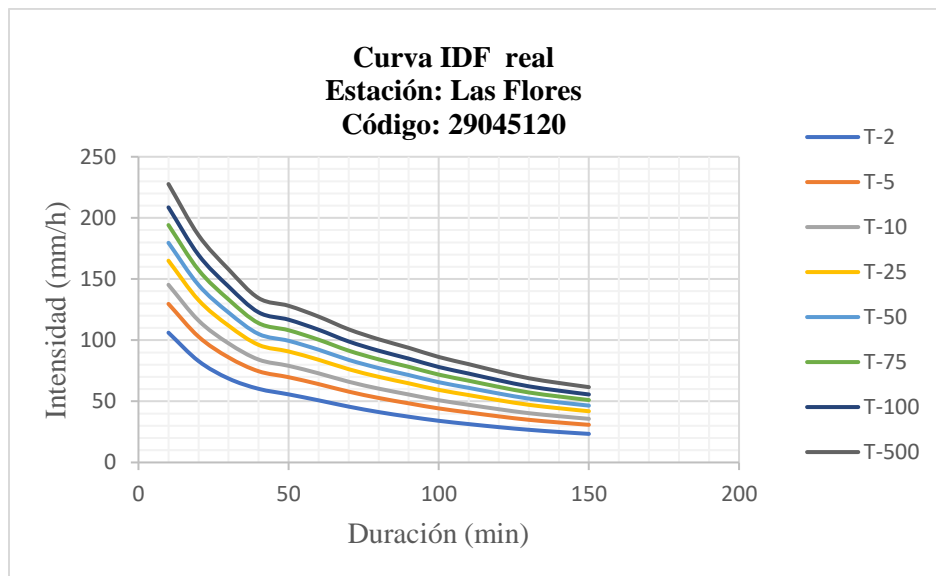
Curvas IDF reales de la estación A.E. Cortissoz (mm/h)								
Tiempo(min)	Periodo de retorno (Años)							
	T-2	T-5	T-10	T-25	T-50	T-75	T-100	T-500
10	110	133	148	167	181	194	208	226
20	81	97	108	122	132	142	153	166
30	72	86	95	107	116	124	133	144
40	63	78	88	101	111	120	130	142
50	57	71	80	92	100	108	117	128
60	50	62	70	80	88	95	102	112
70	45	56	63	73	80	87	94	103
80	40	51	59	68	75	82	89	98
90	36	47	54	63	70	76	83	92
100	33	43	49	58	64	70	77	85
110	30	39	45	53	59	65	71	78
120	27	36	42	49	55	60	65	73



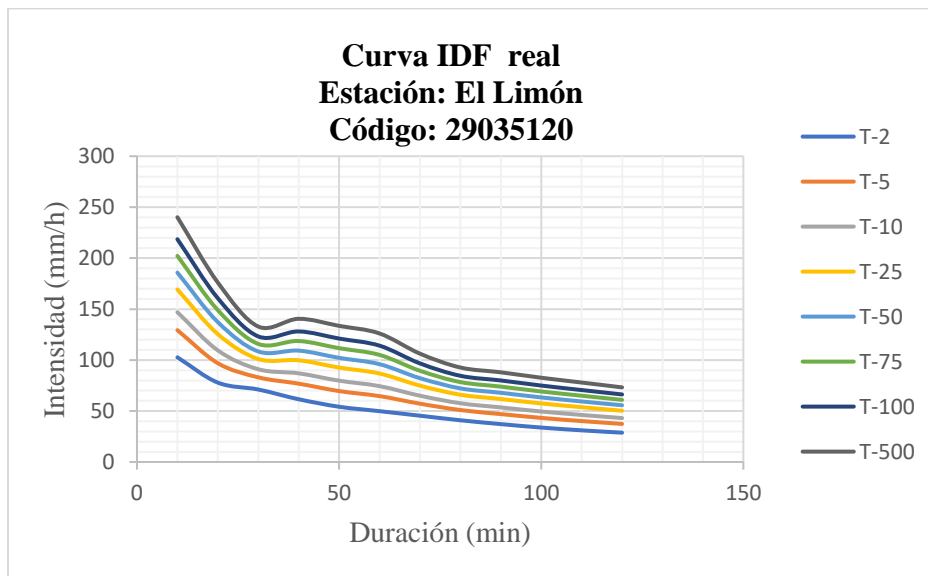
Curvas IDF reales de la estación Galerazamba (mm/h)								
Tiempo(min)	Periodo de retorno (Años)							
	T-2	T-5	T-10	T-25	T-50	T-75	T-100	T-500
10	113	138	154	175	190	205	220	240
20	84	99	110	123	132	142	152	165
30	74	91	101	115	125	135	145	159
40	64	76	84	95	102	110	117	127
50	57	68	75	85	92	99	106	115
60	51	62	69	78	84	91	98	107
70	46	56	63	72	78	85	91	100
80	41	52	58	67	73	79	86	94
90	38	47	54	62	68	74	80	88
100	34	44	51	59	65	71	77	84
110	32	41	47	55	61	67	72	80
120	29	38	44	51	57	62	68	75
130	27	35	41	48	53	58	64	70



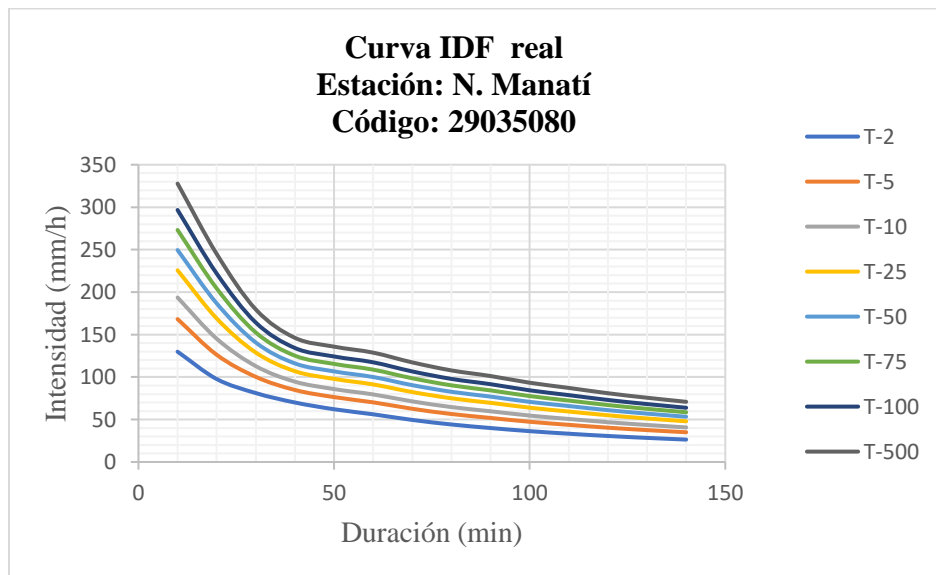
Curvas IDF reales de la estación Las Flores (mm/h)								
Tiempo(min)	Periodo de retorno (Años)							
	T-2	T-5	T-10	T-25	T-50	T-75	T-100	T-500
10	106	130	145	165	180	194	209	228
20	83	103	116	133	145	157	170	186
30	69	86	97	112	123	133	144	158
40	60	75	84	96	105	114	123	134
50	56	70	79	91	99	108	117	128
60	51	64	73	84	92	100	109	119
70	46	58	66	76	84	91	99	109
80	41	53	60	70	77	84	91	101
90	37	48	56	65	71	78	85	94
100	34	44	51	59	66	72	78	86
110	31	41	47	55	61	67	73	80
120	29	38	44	51	56	62	67	74
130	27	35	40	47	52	57	62	69
140	25	33	38	44	49	54	59	65
150	23	31	36	42	46	51	56	62



Curvas IDF reales de la estación El Limón (mm/h)								
Tiempo(min)	Periodo de retorno (Años)							
	T-2	T-5	T-10	T-25	T-50	T-75	T-100	T-500
10	103	129	147	169	186	202	219	240
20	78	97	110	125	137	149	161	176
30	71	83	91	101	108	116	123	133
40	62	77	87	100	109	119	128	140
50	54	70	80	93	102	112	121	134
60	50	65	74	87	96	105	114	126
70	45	57	65	75	82	89	97	106
80	41	51	58	66	72	78	85	93
90	37	47	54	62	68	74	80	88
100	34	43	50	57	63	69	75	83
110	31	40	46	54	59	65	71	78
120	29	37	43	50	56	61	66	73



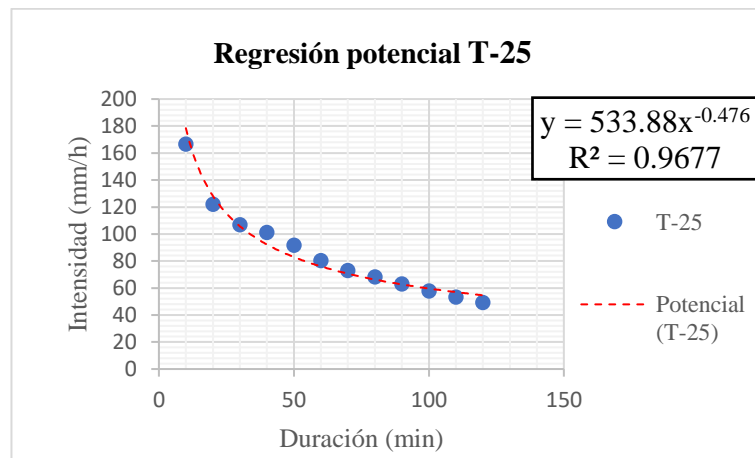
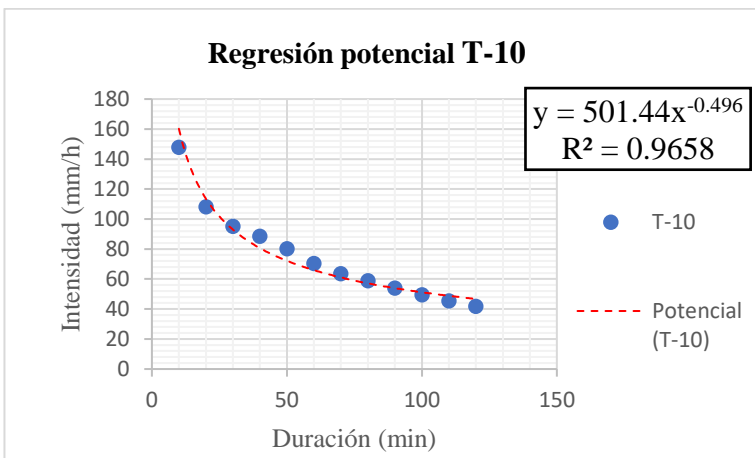
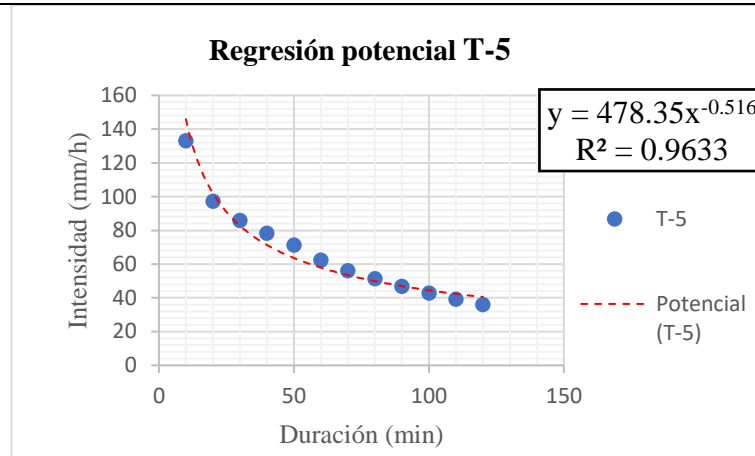
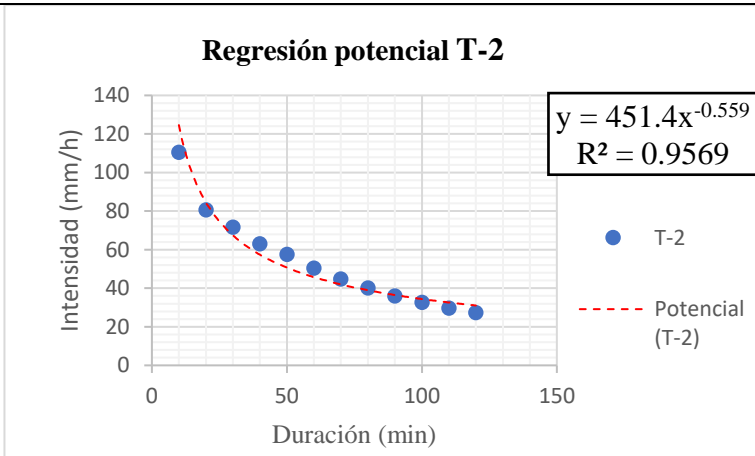
Curvas IDF reales de la estación N. Manatí (mm/h)								
Tiempo(min)	Periodo de retorno (Años)							
	T-2	T-5	T-10	T-25	T-50	T-75	T-100	T-500
10	130	168	194	226	250	273	297	328
20	98	126	145	169	187	204	222	245
30	81	100	113	129	141	152	164	180
40	70	85	95	107	116	125	134	146
50	62	76	86	98	107	115	124	136
60	56	70	80	91	100	109	117	129
70	50	63	71	82	90	99	107	117
80	44	57	65	75	83	90	98	108
90	40	52	60	70	77	84	92	101
100	36	47	55	64	71	78	84	93
110	33	44	51	59	66	72	79	87
120	31	40	47	55	61	67	73	81
130	28	38	44	51	57	63	68	76
140	26	35	41	48	53	59	64	71



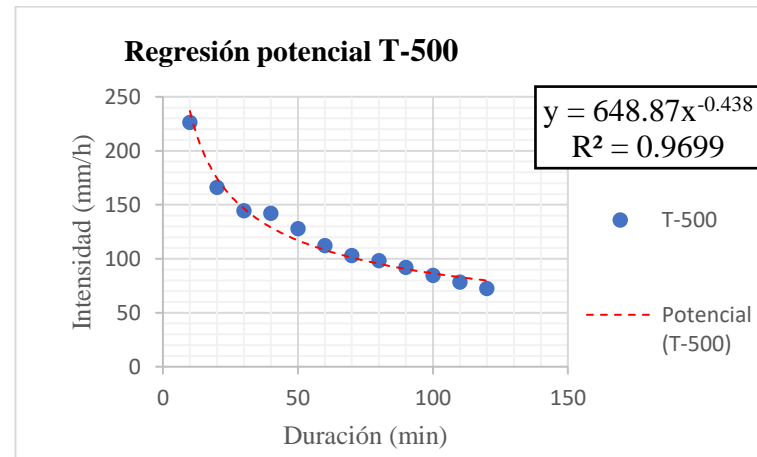
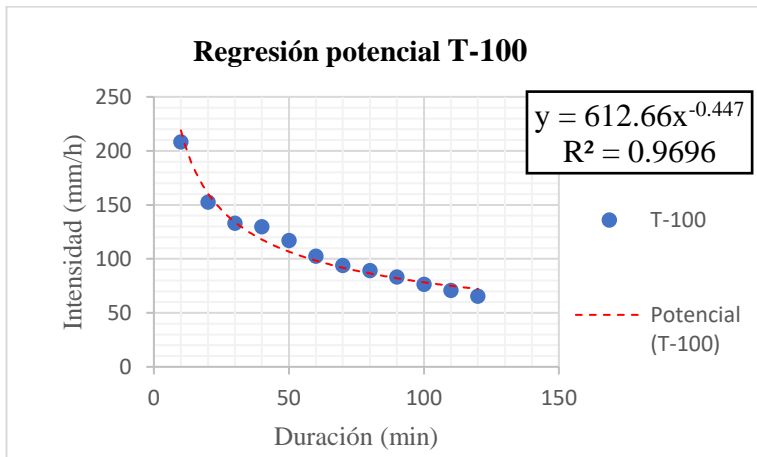
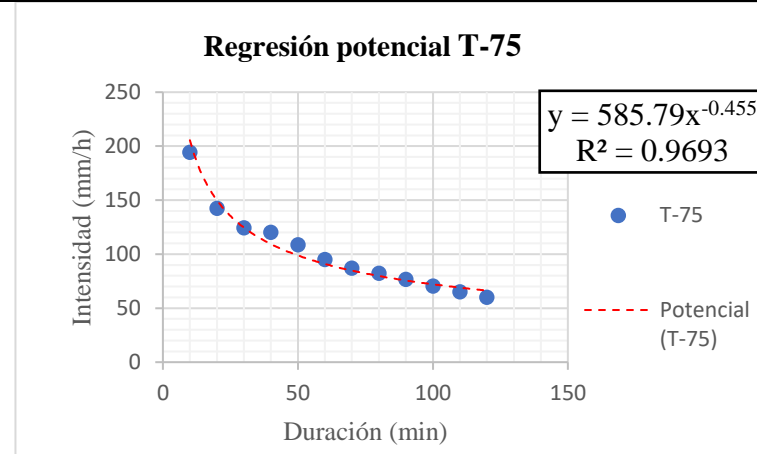
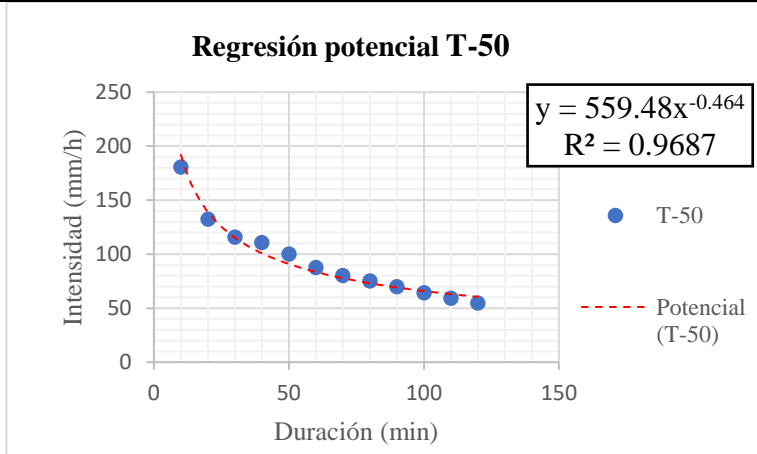
Apéndice 5. Ajuste de la ecuación propuesta para cada estación pluviográfica estudiada.

1. Estación pluviográfica A.E. Cortissoz

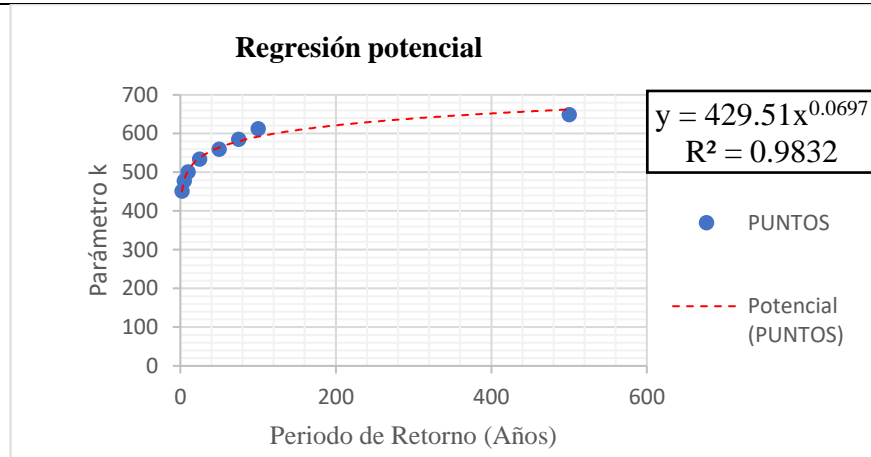
Determinación de los parámetros “A” Y “c” por el método de los mínimos cuadrados



Determinación de los parámetros “A” Y “c” por el método de los mínimos cuadrados



Determinación de los parámetros “k” Y “b” por mínimos cuadrados



Determinación de los parámetros “a” y “d”

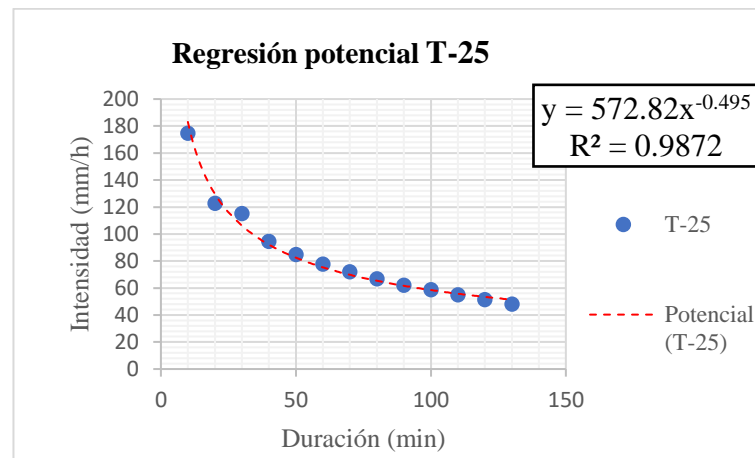
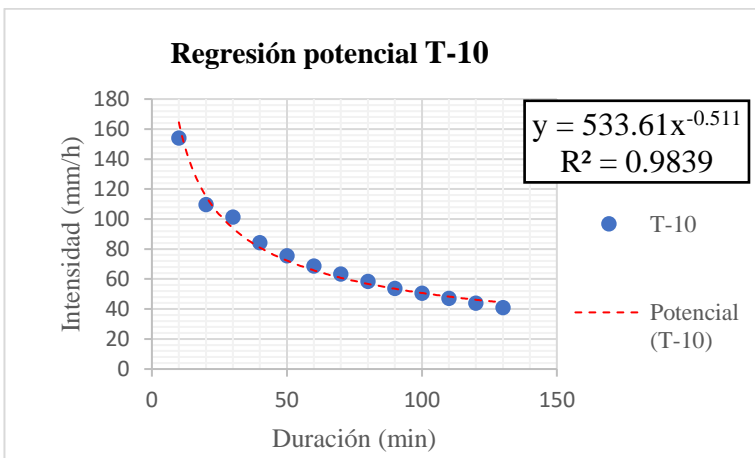
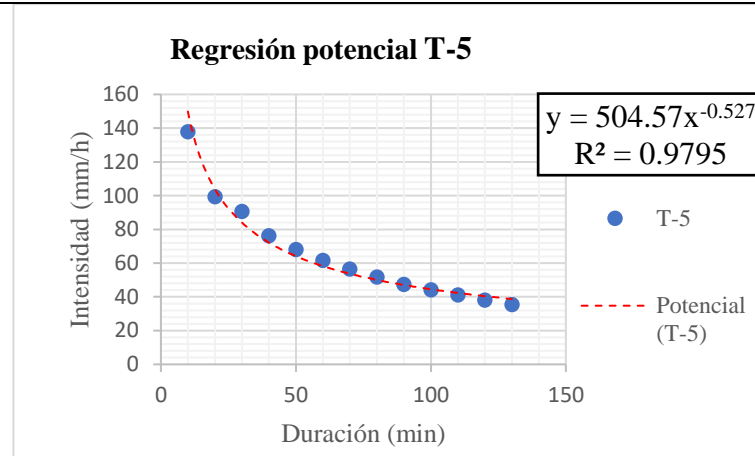
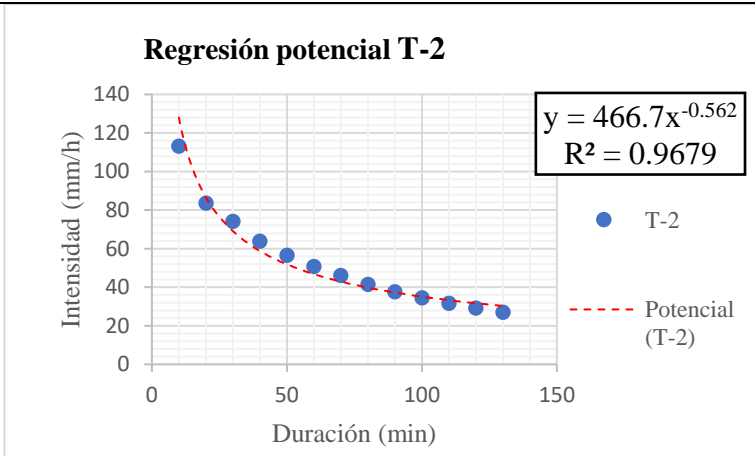
M	K	K Por Definir	a	d
83.00	429.51	429.51	23.68	0.66

Ecuación para el cálculo de curvas IDF de la estación A.E. Cortissoz

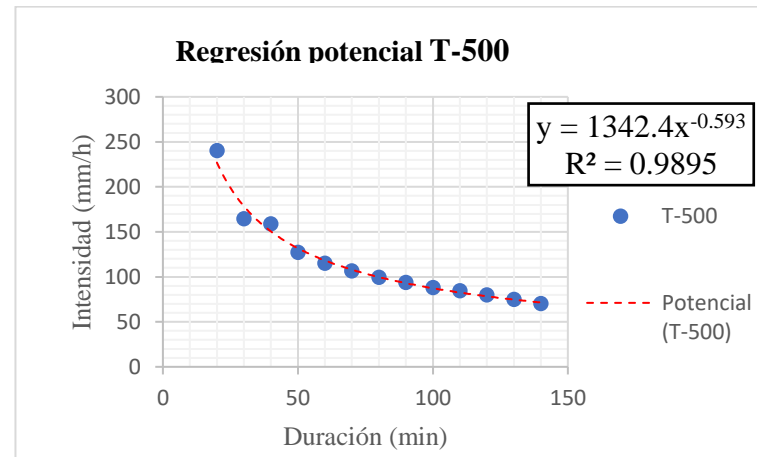
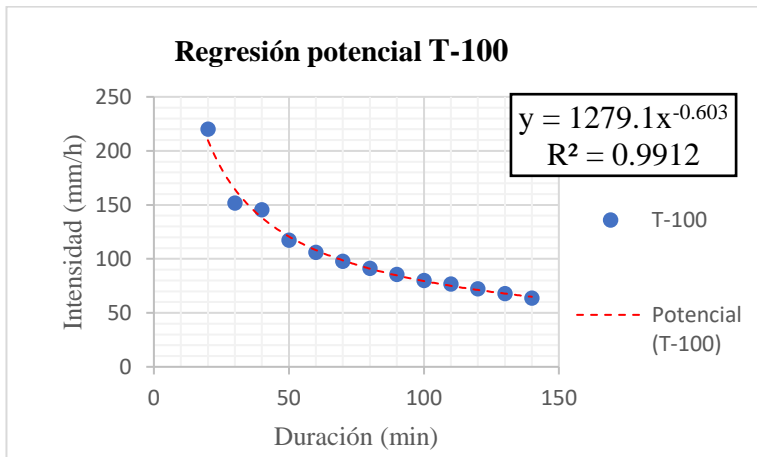
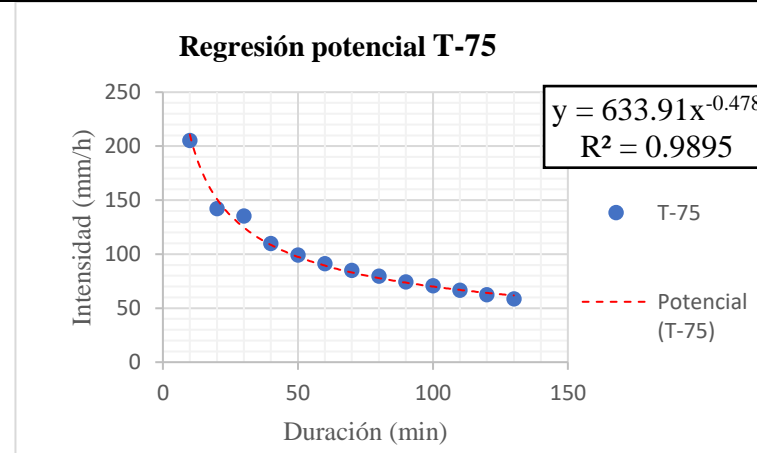
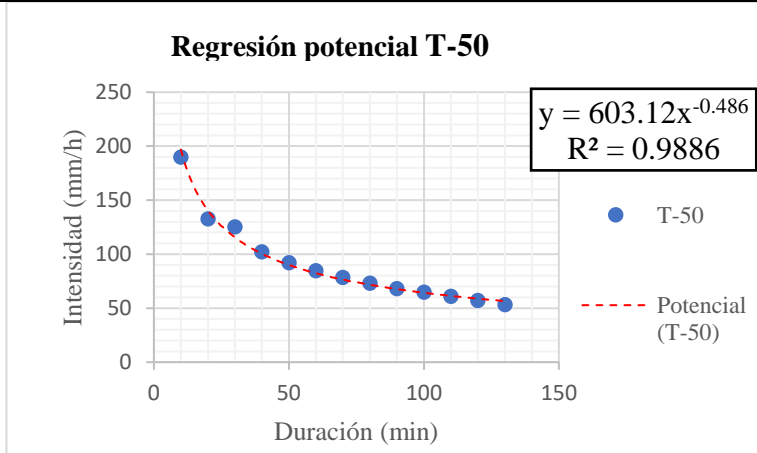
$$i = \frac{23.679 \cdot T^{0.070} \cdot M^{0.656}}{t^{0.481}}$$

2. Estación pluviográfica Galerazamba

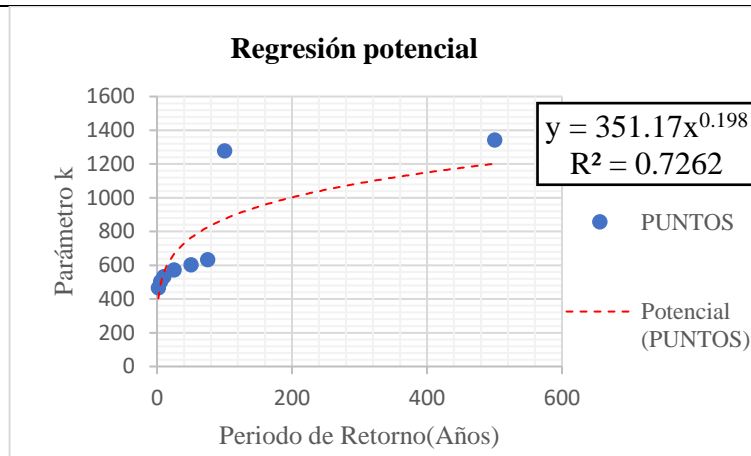
Determinación de los parámetros “A” Y “c” por el método de los mínimos cuadrados



Determinación de los parámetros “A” Y “c” por el método de los mínimos cuadrados



Determinación de los parámetros “k” Y “b” por mínimos cuadrados



Determinación de los parámetros “a” Y “d”

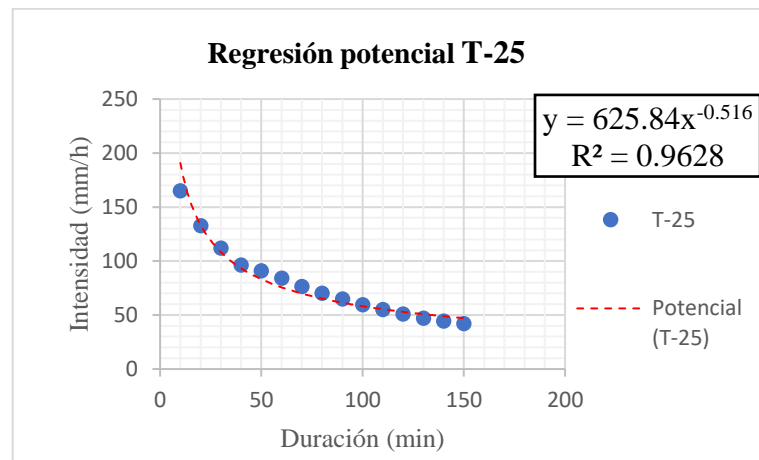
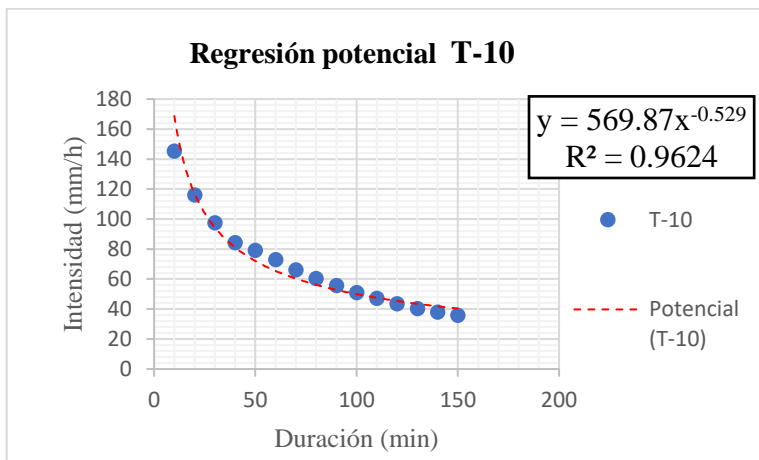
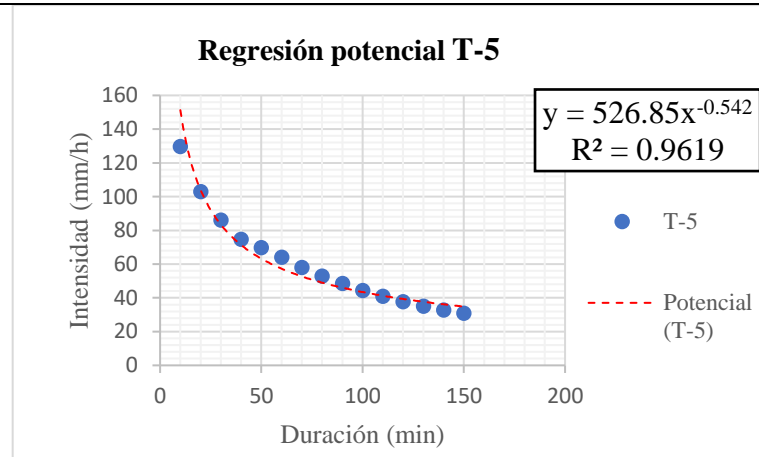
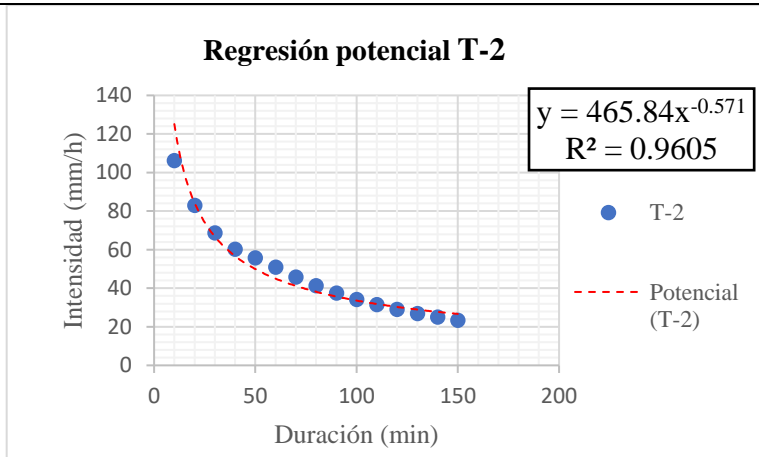
M	k	k Por Definir	a	d
87.29	351.17	351.17	19.23	0.65

Ecuación para el cálculo de curvas IDF de la estación Galerazamba

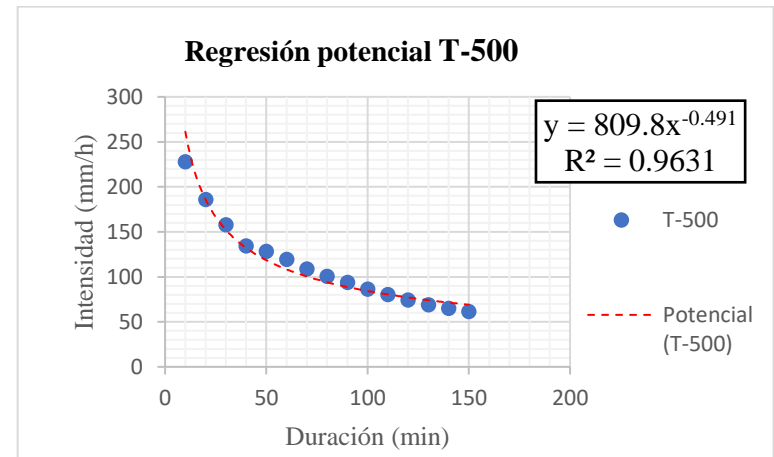
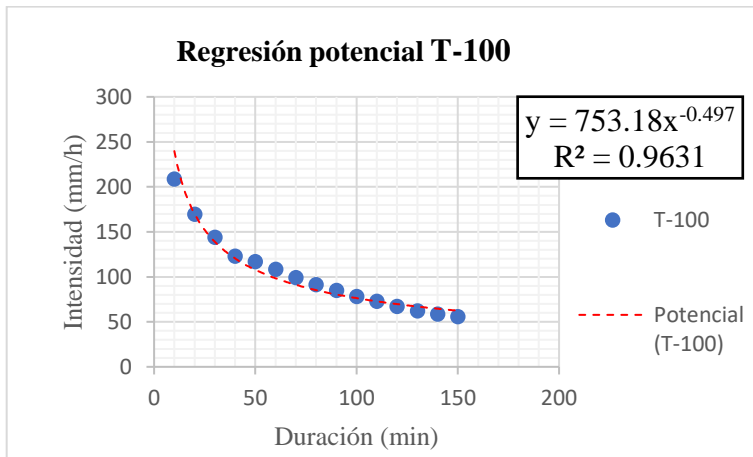
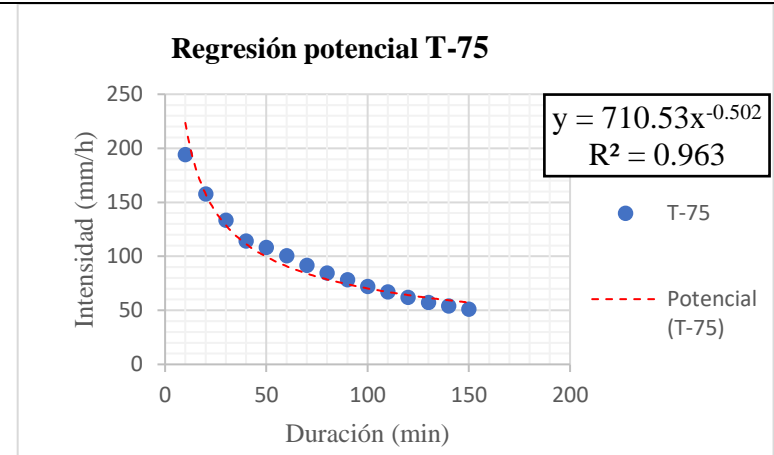
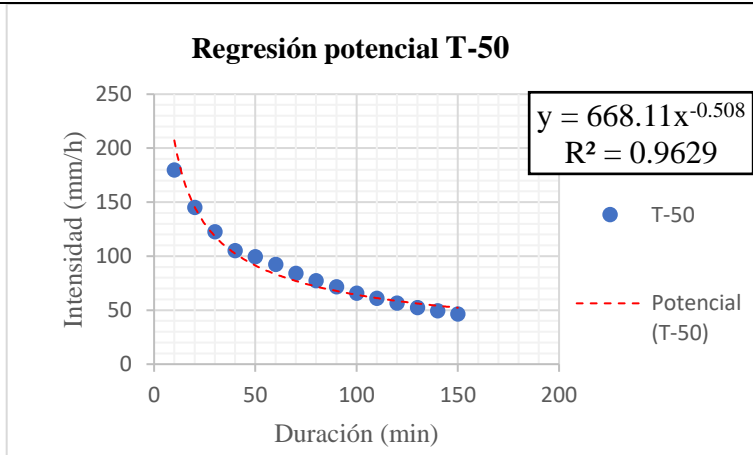
$$i = \frac{19.235 \cdot T^{0.198} \cdot M^{0.650}}{t^{0.532}}$$

3. Estación pluviográfica Las Flores

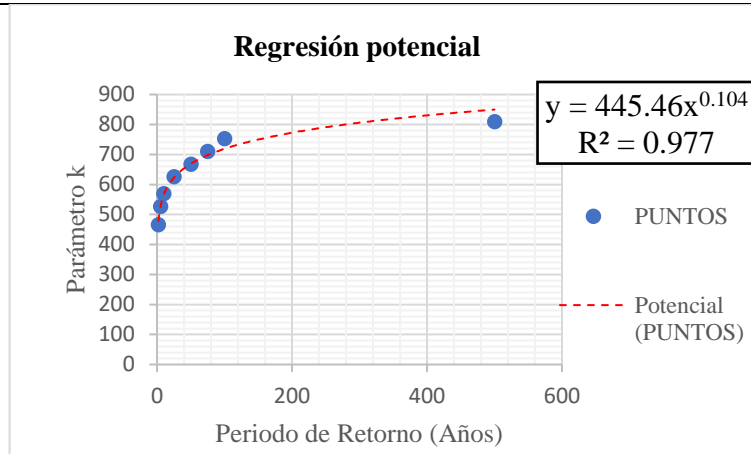
Determinación de los parámetros “A” Y “c” por el método de los mínimos cuadrados



Determinación de los parámetros “A” Y “c” por el método de los mínimos cuadrados



Determinación de los parámetros “k” Y “b” por mínimos cuadrados



Determinación de los parámetros “a” Y “d”

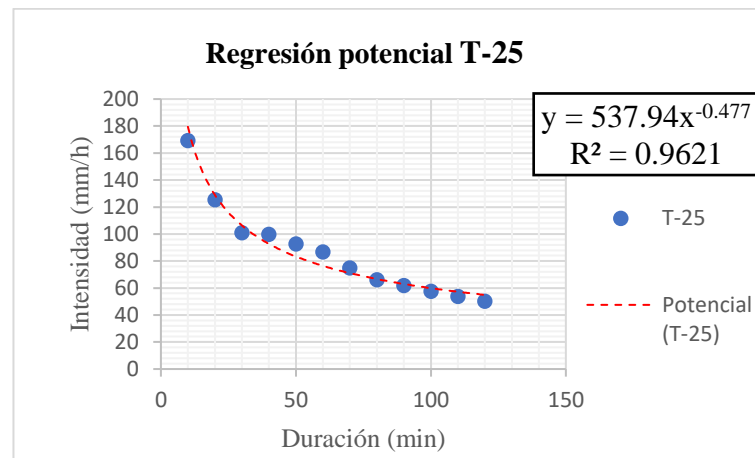
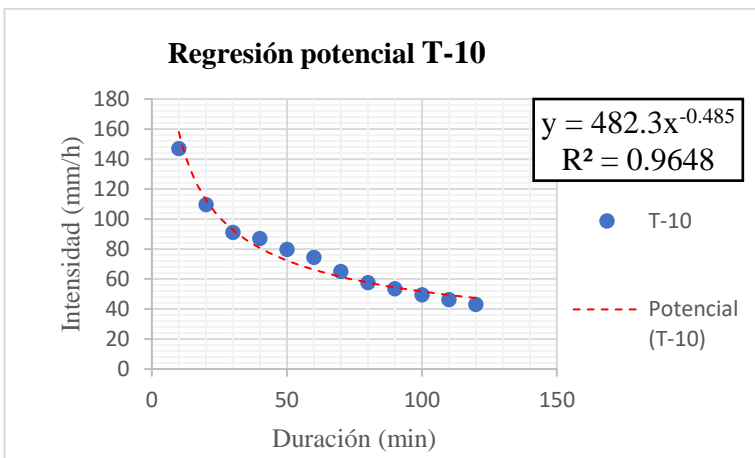
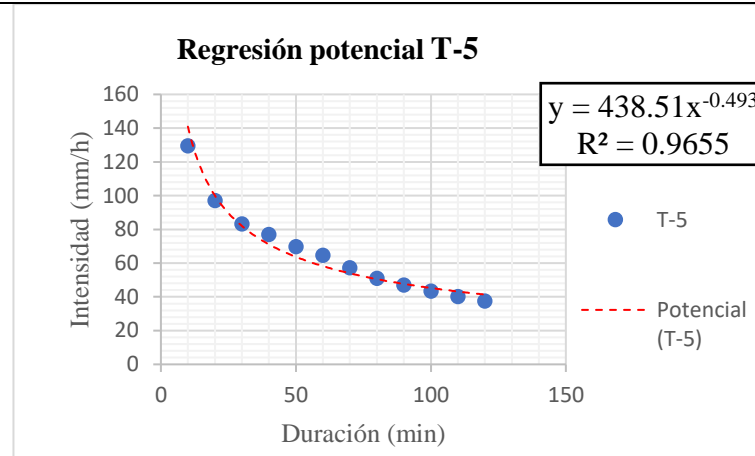
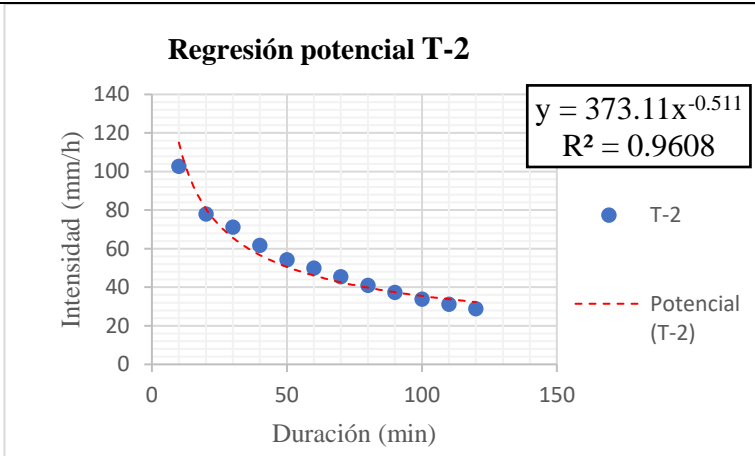
M	k	k Por Definir	a	d
95.18	445.46	445.46	20.28	0.68

Ecuación para el cálculo de curvas IDF de la estación Las Flores

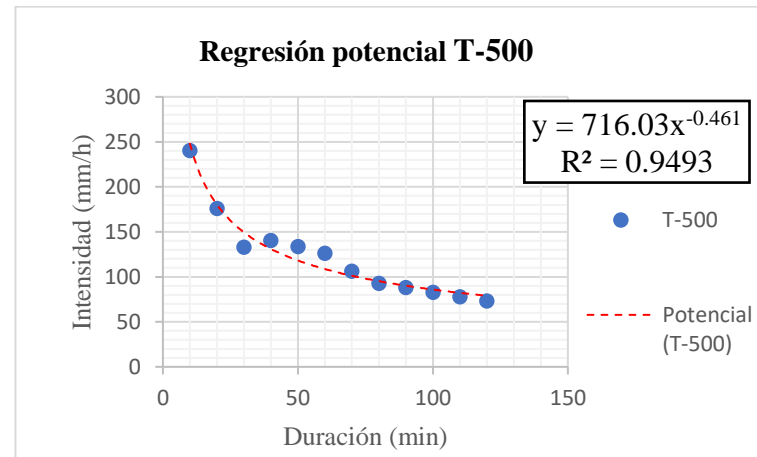
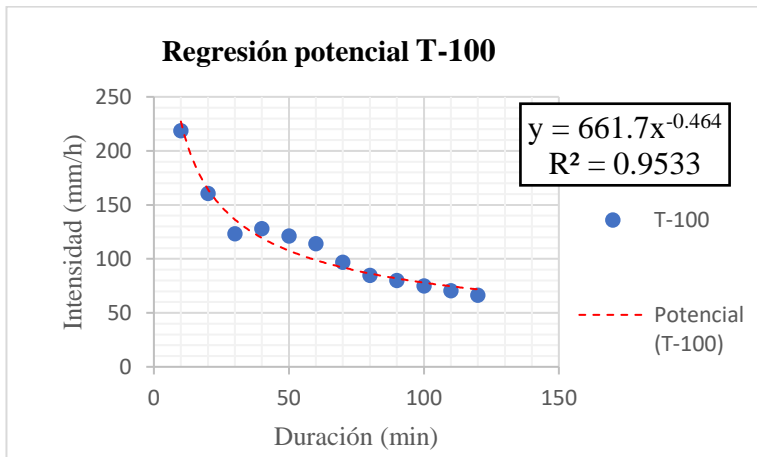
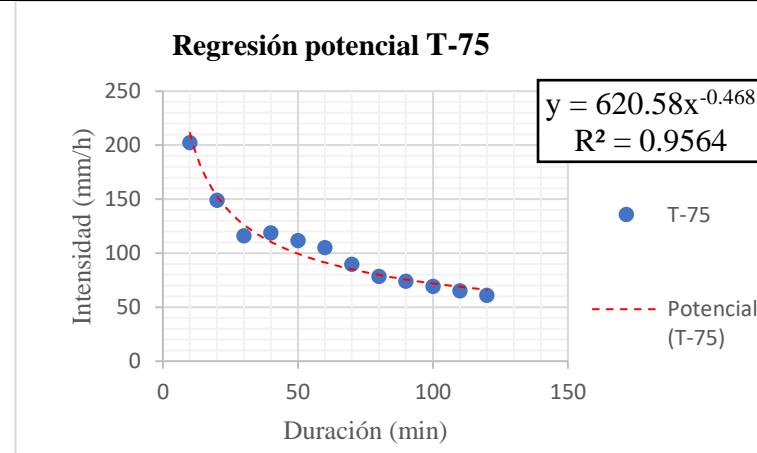
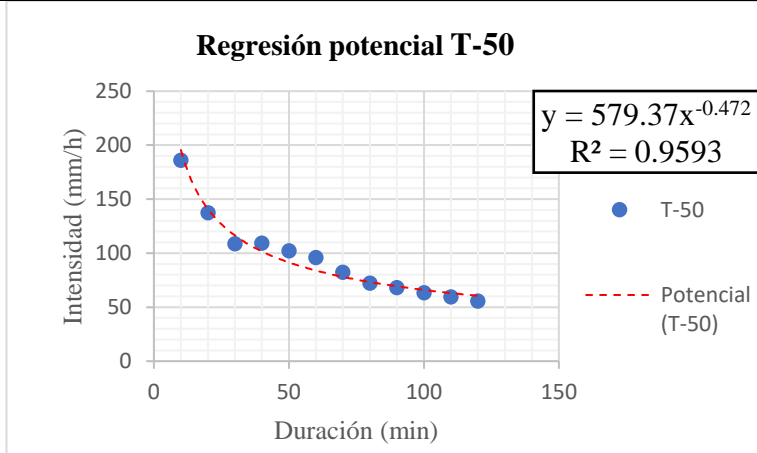
$$i = \frac{20.281 \cdot T^{0.104} \cdot M^{0.678}}{t^{0.520}}$$

4. Estación pluviográfica El Limón

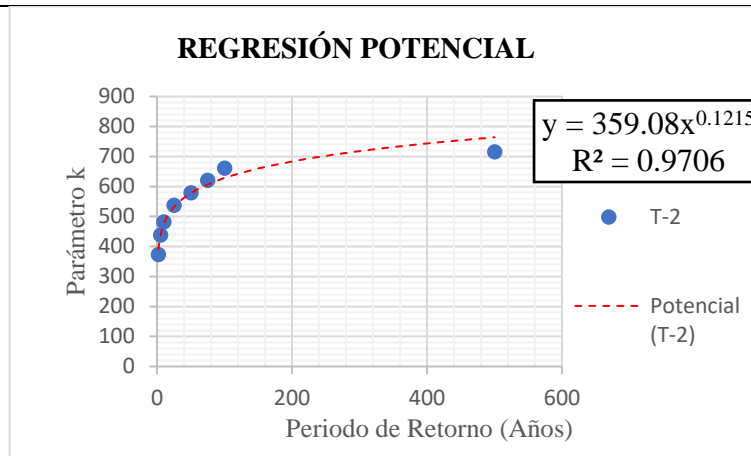
Determinación de los parámetros “A” Y “c” por el método de los mínimos cuadrados



Determinación de los parámetros “A” Y “c” por el método de los mínimos cuadrados



Determinación de los parámetros “k” Y “b” por mínimos cuadrados



Determinación de los parámetros “a” Y “d”

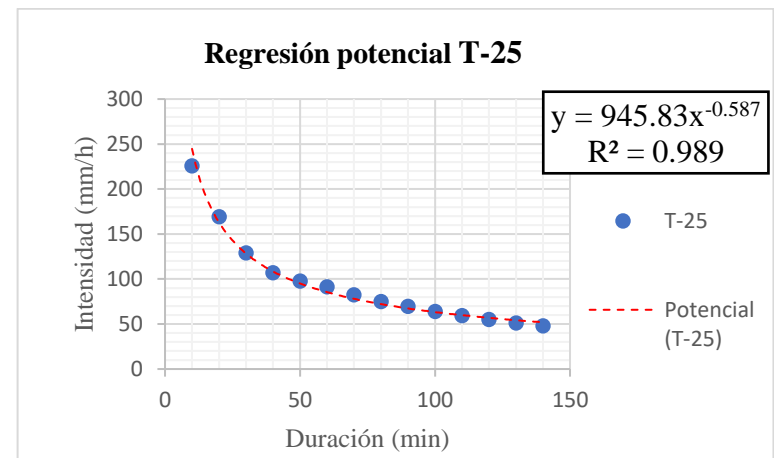
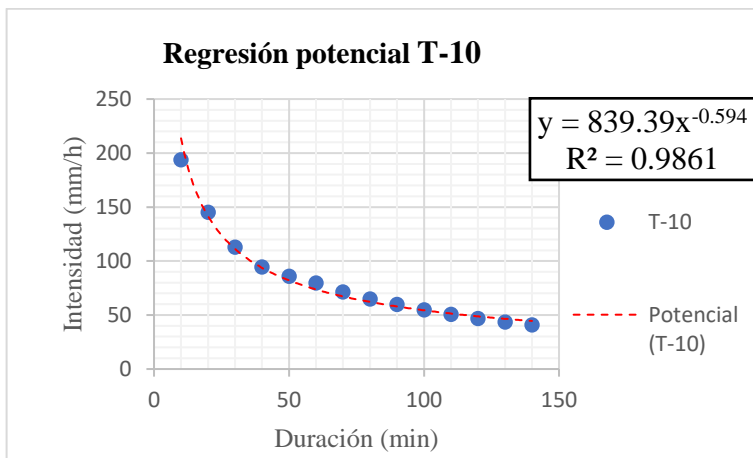
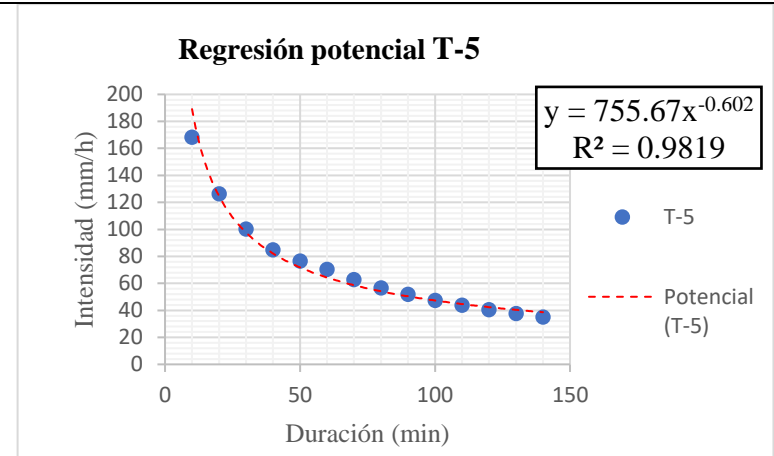
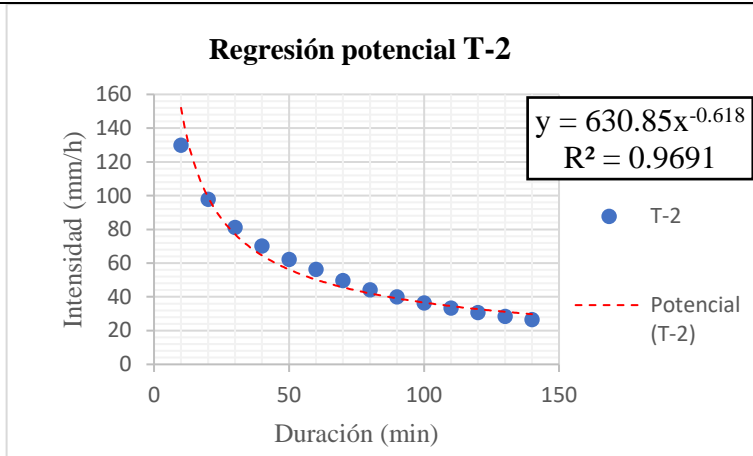
M	k	k Por Definir	a	d
96.15	359.08	359.08	36.12	0.50

Ecuación para el cálculo de curvas IDF de la estación El Limón

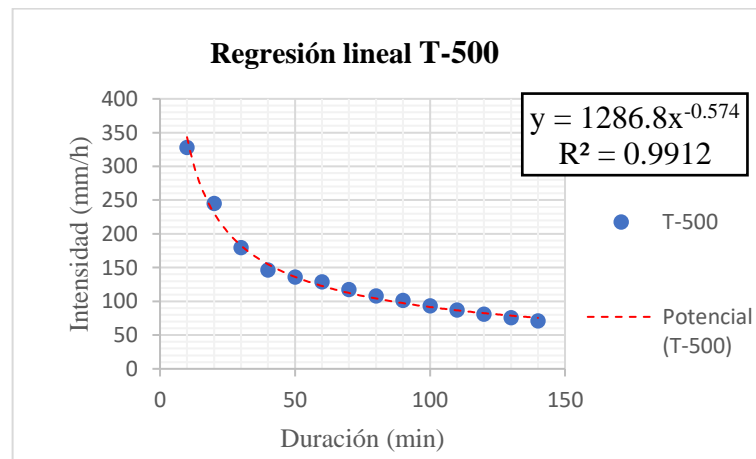
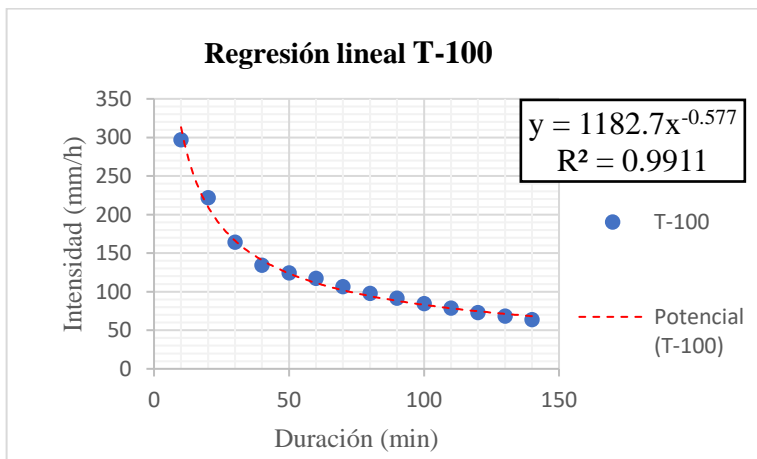
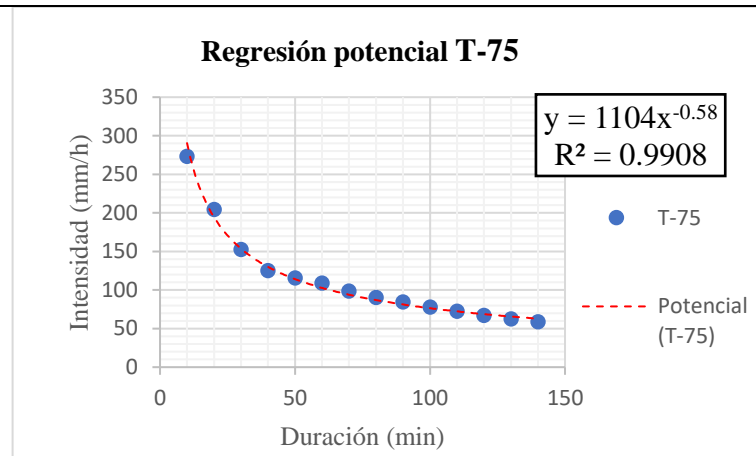
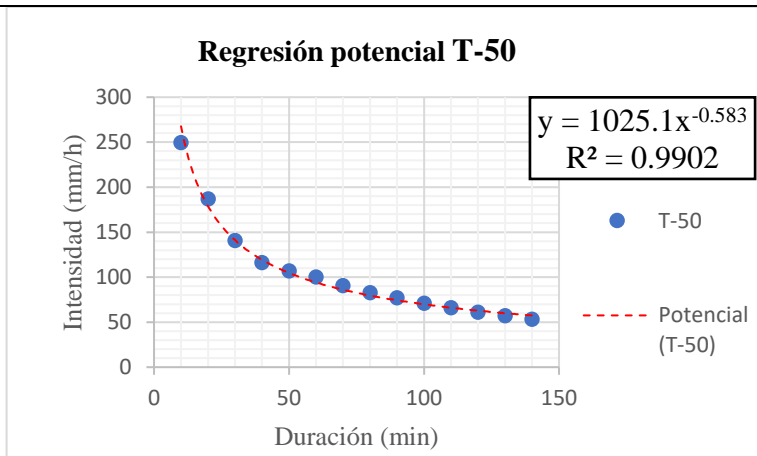
$$i = \frac{36.124 \cdot T^{0.121} \cdot M^{0.503}}{t^{0.479}}$$

5. Estación pluviográfica N. Manatí

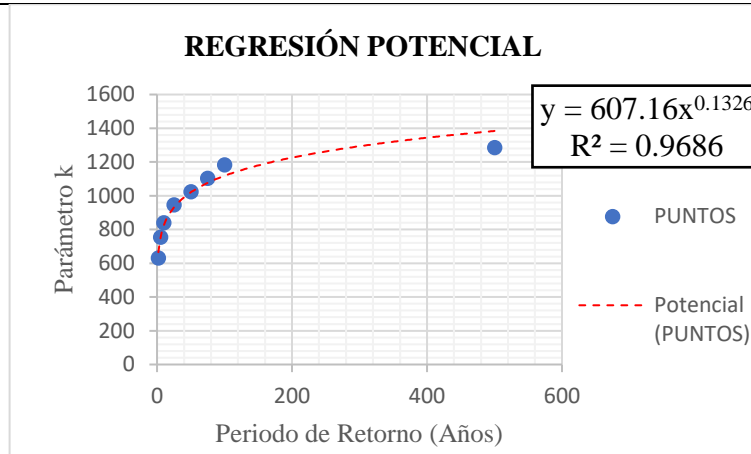
Determinación de los parámetros “A” Y “c” por el método de los mínimos cuadrados



Determinación de los parámetros “A” Y “c” por el método de los mínimos cuadrados



Determinación de los parámetros “k” Y “b” por mínimos cuadrados



Determinación de los parámetros “a” y “d”

M	k	k Por Definir	a	d
82.67	607.16	607.16	33.44	0.66

Ecuación para el cálculo de curvas IDF de la estación N. Manatí

$$i = \frac{33.444 \cdot T^{0.133} \cdot M^{0.657}}{t^{0.589}}$$

Referencias

- Acevedo Aristizábal, L. A. (2009). *Estimación hidrológica bajo escenarios de cambio climático en Colombia* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Acosta Castellanos, P.M. y Sierra Aponte, L. (2013). Evaluación de métodos de construcción de curvas IDF a partir de distribuciones de probabilidad y parámetros de ajuste. *Revista Facultad de Ingeniería*, 22(35), 25-33.
- Agilan, V. y Umamahesh, N. V. (2017). What are the best covariates for developing non-stationary rainfall Intensity-Duration-Frequency relationship? *Advances in Water Resources*, 101, 11–22.
- Alam, M. S. y Elshorbagy, A. (2015). Quantification of the climate change-induced variations in Intensity–Duration–Frequency curves in the Canadian Prairies. *Journal of Hydrology*, 527, 990–1005.
- Álvarez Rodríguez, J. (2011). *Estimación de la distribución espacial de la precipitación en zonas montañosas mediante métodos geoestadísticos* (Tesis Doctoral). E. T. S. I. Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España.
- Arrieta, A. y Guerrero, M. (2008). *Regionalización de la precipitación máxima en 24 horas en la costa atlántica colombiana*. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, de la Asociación Internacional de Ingeniería e Investigaciones Hidráulicas, IHAR. Congreso llevado a cabo en Cartagena de indias, Colombia.
- Chow, V.T., Maidment, D. R. y Mays L.W. (1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill,.

- Cortéz, A., Ovalles, F. A., Rodríguez, M. F., Rey, J. C. y Núñez, M. C. (2005). Análisis geostadístico de la variabilidad temporal, a una escala anual y mensual, de parámetros climáticos en un campo experimental, estado Aragua, Venezuela. *Agronomía Trop*, 55(3), 327–342.
- De Salas Regalado, L. y Carrero Díez, L. (2008). Estimación de la intensidad máxima anual para una duración y periodo de retorno determinados en la España Peninsular mediante la aplicación informática MAXIN. *Presentado en Curso internacional en hidrología general y aplicada*, Madrid, España.
- Dolšak, D., Bezak, N. y Šraj, M. (2016). Temporal characteristics of rainfall events under three climate types in Slovenia. *Journal of Hydrology*, 541, 1395–1405.
- Fadhel, S., Rico Ramírez, M. A. y Han, D. (2017). Uncertainty of Intensity–Duration–Frequency (IDF) curves due to varied climate baseline periods. *Journal of Hydrology*, 547, 600–612.
- Fowler, H. J. y Kilsby, C. G. (2003). A regional frequency analysis of United Kingdom extreme rainfall from 1961 to 2000. *International Journal of Climatology*, 23, 1313–1334.
- Gobernación del Atlántico. (2010-2014). *El departamento*. Barranquilla, Colombia. Recuperado de <http://www.atlantico.gov.co/index.php/departamento>.
- Hailegeorgis, T. T. y Alfredsen, K. (2017). Analyses of extreme precipitation and runoff events including uncertainties and reliability in design and management of urban water infrastructure. *Journal of Hydrology*, 544, 290–305.
- Hassan El-Sayed, E. A. (2017). Development of synthetic rainfall distribution curves for Sinai area. *Ain Shams Engineering Journal*. Recuperado a partir de <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.01.010>.

Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras – HIMAT. (1990).

Técnicas estadísticas aplicadas en el manejo de datos hidrológicos y meteorológicos. Bogotá

D.C.: Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras – HIMAT..

Recuperado de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/009198/009198.pdf>.

Huang, Y. F., Mirzaei, M. y Mat Amin, M. Z. (2016). Uncertainty Quantification in Rainfall

Intensity Duration Frequency Curves Based on Historical Extreme Precipitation Quantiles.

Procedia Engineering, 154, 426–432.

Instituto Nacional de Vías-INVIAS. (2009). *Manual de Drenaje para Carretera*. Bogota:

Instituto Nacional de Vías-INVIAS. Recuperado de

<https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos->

[tecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras/file](https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras/file)

Jun, C., Qin, X., Gan, T. Y., Tung, Y.-K. y De Michele, C. (2017). Bivariate frequency analysis

of rainfall intensity and duration for urban stormwater infrastructure design. *Journal of*

Hydrology, 553, 374–383.

Liuzzo, L., Notaro, V. y Freni, G. (2016). Uncertainty Analysis in the Evaluation of the DDF

Curves Parameters in Climate Change Scenarios. *Procedia Engineering*, 154, 670–678.

Lloyd, C. D. (2005). Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of

monthly precipitation in Great Britain. *Journal of Hydrology*, 308, 128–150.

Monsalve Sáenz, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería*. Santafé de Bogotá, Colombia: Escuela

Colombiana de Ingeniería.

Naghattini, M. y De Andrade Pinto, É. J. (2007). *Hidrologia estatística*. Brasil: CPRM.

Naoum, S. y Tsanis, I. K. (2004). Ranking spatial interpolation techniques using a GIS-based

DSS. *Global Nest*, 6(1), 1–20.

- Nguyen, T.-H., El Outayek, S., Lim, S. H. y Van Nguyen, V.-T. (2017). A systematic approach to selecting the best probability models for annual maximum rainfalls-a case study using data in ontario (Canada). *Journal of Hydrology*, 553, 49-58.
- Norbiato, D., Borga, M., Sangati, M. y Zanon, F. (2007). Regional frequency analysis of extreme precipitation in the eastern Italian Alps and the August 29, 2003 flash flood. *Journal of hydrology*, 345, 149–166.
- Overeem, A., Buishand, A. y Holleman, I. (2008). Rainfall depth-duration-frequency curves and their uncertainties. *Journal of Hydrology*, 348, 124–134.
- Pinilla Mora, J. C. y Corzo Oviedo, F. A. (2015). *Comparación de curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) reales y sintéticas*. Caso de estudio Municipio de Anapoima, Cundinamarca (Tesis de posgrado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C.
- Pizarro Tapia, R., Abarza Martínez, A. y Flores Villanelo, J. P. (2001). Análisis Comparativo de las Curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF) en 6 Estaciones Pluviográficas (VII Región del Maule, Chile). *Biblioteca Virtual del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe de la UNESCO*.
- Pizarro Tapia, R., Aravena Garrido, D., Macaya Pérez, K., Abarza Martínez, A., Cornejo Espinoza, M., Labra Lorca, M., Pavez Vidal, M. y Román Arellano, L. (2007). Curvas Intensidad Duración Frecuencia para la zona del sur de Chile. *Biblioteca Virtual del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe de la UNESCO*.
- Pulgarín Dávila, E. G. (2009). *Fórmulas regionales para la estimación de curvas intensidad-frecuencia-duración basadas en las propiedades de escala de la lluvia (Región Andina Colombiana)*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

- Pulgarín, E. y Poveda, G. (2008). Estimación de curvas IDF basadas en las propiedades de escala de la lluvia. *Presentado en XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Bogotá D.C.* Recuperado a partir de <https://www.researchgate.net/publication/237046111>
- Sáez, A. J. Modelización estocástica de precipitaciones máximas para el cálculo de eventos extremos a partir de los periodos de retorno mediante R. (2009-2017). Andalucía, España: Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Universidad de Jaén. Recuperado de <http://www4.ujaen.es/~ajsaez/informe.html.LyXconv/informe.html#Xhydrotoolbox>
- Témez, J. (1978). *Calculo Hidrometeorológico de Caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Dirección General de Carreteras. Madrid. España. 111p.
- Vargas, M. R. y Díaz-Granados, D. M. (1998). *Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*. Universidad de los Andes, Santafé de Bogotá.
- Vélez, J. I., Poveda, G., Mesa, O., Hoyos, C. D., Mejía, J. F., Quevedo, D. I., Salazar, L.F y Vieira, S. C. (2002). Aplicación de diferentes metodologías para estimación de curvas Intensidad–Frecuencia–Duración en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 6, 91–100.
- Villarreal Marimón, Y. J. (2015). *Aproximación metodológica para determinar curvas de intensidad-duración-frecuencia, utilizando la distribución mixta de probabilidad doble Gumbel*. (Tesis de Maestría). Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias, Colombia.
- Willems, P. (2000). Compound intensity/duration/frequency-relationships of extreme precipitation for two seasons and two storm types. *Journal of Hydrology*, 233(1), 189–205.
- Wright, D. B., Smith, J. A., Villarini, G. y Baeck, M. L. (2013). Estimating the frequency of extreme rainfall using weather radar and stochastic storm transposition. *Journal of hydrology*, 488, 150–165.

Zorraquino Junquera, C. (2004). El modelo Sqrt-EtMax. *Revista de Obras Públicas*, 151(3.447), 33–37.

Zope, P. E., Aldho, T. I. y Jothiprakash, V. (2016). Development of rainfall intensity duration frequency curves for Mumbai city, India. *Journal of water resource and protection*, 8, 756-765.