

**IMPACTO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA LLUVIA EN LA CIUDAD
DE CARTAGENA DE INDIAS**



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827



TRABAJO DE GRADO

AUTORES

JAIRO ENRIQUE ORTIZ CORRALES

DANIEL FERNANDO PATERNINA GALEANO

DIRECTOR

JAVIER MOUTHON BELLO, PhD



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA DE INDIAS**

2020

**IMPACTO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA LLUVIA EN LA CIUDAD
DE CARTAGENA DE INDIAS**



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827



LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

GRUPO DE INVESTIGACIÓN MODELACION AMBIENTAL (GIMA)



AUTORES

JAIRO ENRIQUE ORTIZ CORRALES

DANIEL FERNANDO PATERNINA GALEANO

DIRECTOR

JAVIER MOUTHON BELLO, PhD

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS

2020

DEDICATORIA

A mis padres, por su esfuerzo, dedicación y compromiso en querer superarme y alcanzar mis metas. Por estar a pesar de todo, al tanto de mis necesidades. Enseñarme que con dedicación es posible lograr todo lo que uno proponga y que la mejor herencia que puede ser dejada es lo que no puede ser robado, la educación y el conocimiento.

A mi pareja, por estar siempre en mi proceso de formación, impulsarme a llegar más allá del límite, recordarme en los momentos más difíciles las buenas capacidades que tengo y a no desistir jamás.

Ustedes son y serán siempre mi motor para ser cada vez mejor, Muchas gracias...

Jairo Ortiz Corrales

A las cuatro mujeres de mi vida, María del Rosario, Elizabeth, Carolina y Claudia, porque con su guía, y más con su ejemplo, me enseñaron la disciplina, la constancia, la tolerancia y sobretodo el amor por el conocimiento que me llevó hasta aquí y que me hará avanzar siempre.

A la vida que recién comienza, la de María José, quien nos alegrará la vida.

Daniel Paternina Galeano

AGRADECIMIENTOS

Ingeniero Javier Mouthon Bello por compartir la iniciativa de la realización de este trabajo de grado, ser el director, su acompañamiento, estar siempre al tanto y apoyo incansable.

Al Grupo de Investigación Modelación Ambiental (GIMA) y las personas que hacen parte del mismo, y el proyecto de investigación “Estudio de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias” por su importante apoyo.

Le agradecemos a la Universidad de Cartagena, la población de Tierra Bomba, Vivarium del Caribe, Universidad de Tecnológica de Bolívar e Ingeniero Hugo Escorcía, empresa YARA S.A. e Ingeniero Arturo Cuevas, y sus respectivos servicios de seguridad, por permitir la instalación de los pluviómetros y cuidarlos durante el periodo de recolección de datos.

Sistemas y bases de datos en línea de la Universidad de Cartagena, Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH) y DIMAR, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Sistema de Información Geográfica para la Planificación y el Ordenamiento Territorial (SIG-OT), por tener y compartir la información necesaria para poder realizar este trabajo de grado.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	19
ABSTRACT	20
INTRODUCCIÓN	21
1 MARCO DE REFERENCIA	25
1.1 Antecedentes	25
1.1.1 Antecedentes Internacionales	25
1.1.2 Antecedentes Nacionales	25
1.1.3 Antecedentes Locales	27
1.1.3.1 Plan Maestro de Drenajes Pluviales	27
1.2 Estado del arte	29
1.2.1 Estado del arte Internacional	30
1.2.2 Estado del arte Nacional	30
1.2.3 Estado del arte Regional y/o Local	31
1.3 Marco teórico	31
1.3.1 Precipitación Media	31
1.3.1.1 Método de Media Aritmética	31
1.3.1.2 Método de Polígono de Thiessen	32
1.3.1.3 Método de Isoyetas	32
1.3.2 Trazado de Isoyetas	32
1.3.2.1 Método de interpolación de Kriging	33
1.3.3 Parámetros estadísticos	33
1.3.4 Precipitación máxima en 24 horas (<i>P24h – Max</i>)	33
1.3.5 Intensidad de lluvia	35

1.3.5.1	Curvas IDF para la estación Aeropuerto Rafael Núñez.....	35
1.3.5.2	Estimación de las intensidades para la estación Aeropuerto Rafael Núñez	36
1.3.6	Análisis de frecuencia estacionario	36
1.3.6.1	Funciones de distribución de probabilidad	36
1.3.6.2	Periodo de retorno	37
1.3.6.3	Estimación de $P_{24h} - Max$ para diferentes periodos de retorno	38
1.3.7	Ajuste a una distribución de probabilidad	38
1.3.7.1	Máxima Verosimilitud.....	38
1.3.7.2	Prueba de bondad de ajuste: χ^2 (ji-cuadrado)	39
1.3.7.3	Prueba de bondad de ajuste: Kolmogorov-Smirnov (KS)	41
2	OBJETIVOS	42
2.1	Objetivo general.....	42
2.2	Objetivos específicos	42
3	ALCANCE.....	43
4	METODOLOGÍA	46
4.1	Ubicación de los dispositivos.....	46
4.2	Instalación de dispositivos	47
4.3	Toma de datos	48
4.4	Recolección de datos.....	49
4.5	Procesamiento y análisis de datos.....	50
4.5.1	Análisis de calidad y estimación de datos faltantes.....	51
4.5.2	Estimación de la precipitación media	51
4.5.3	Ajuste a funciones de distribución.....	52
4.5.4	Análisis estadístico	52

4.5.5	Interpolación de datos.....	52
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	54
5.1	Estimación de la precipitación media en Cartagena de Indias.....	54
5.1.1	Métodos de Media aritmética y Polígonos de Thiessen	54
5.1.2	Método de Isoyetas.....	57
5.2	Serie de tiempo multianual de precipitación máxima en 24h.....	59
5.3	Ajuste a funciones de distribución acumulativa y análisis de frecuencia.....	62
5.3.1	Distribución espacial de $P_{24h} - Max$	68
5.4	Análisis espacial de Intensidad y Duración para estaciones en Cartagena de Indias	
	71	
	CONCLUSIONES	77
	RECOMENDACIONES	80
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	82
	ANEXOS.....	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas ubicada en Bolívar	28
Tabla 2. Cálculo de la precipitación – Estación Apto Rafael Núñez.....	28
Tabla 3. Parámetros de regionalización para diferentes estaciones cercanas a Cartagena	29
Tabla 4. Parámetros de población y estadística de muestras	34
Tabla 5. Distribuciones de probabilidad para el ajuste de información hidrológica	37
Tabla 6. Valores percentiles (χ^2_p) de la distribución ji-cuadrado con n grados de libertad	40
Tabla 7. Valores críticos d para la prueba Kolmogorov-Smirnov de bondad de ajuste	41
Tabla 8. Ubicación geográfica de las estaciones pluviométricas instaladas	47
Tabla 9. Información general de las estaciones utilizadas del IDEAM y DIMAR.....	50
Tabla 10. Resumen de Pmax-24h 2019, desviaciones y área aferente de cada estación	56
Tabla 11. Comparación entre las precipitaciones mensuales, determinadas con la media aritmética y polígonos de Thiessen y su diferencia.	56
Tabla 12. Resumen estadístico para precipitación máxima anual en 24h de las estaciones.....	62
Tabla 13. Comparación de distribuciones alternas para cada estación.....	64
Tabla 14. $P_{24h} - Max$ para diferentes períodos de retorno en cada estación y mejor función de ajuste	66
Tabla 15. $P_{24h} - Max$ para diferentes periodos de retorno en las estaciones indicadas	66
Tabla 16. $P_{24h} - Max$ calculada para diferentes períodos de retorno en cada estación y función de ajuste usada	68

Tabla 17. desviación de la $P_{24h} - Max$ de cada estación respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez	69
Tabla 18. Intensidades (mm/h) en cada estación para diferentes duraciones de lluvia (min) para el 2019.....	72
Tabla 19. Resumen de regresión lineal simple de intensidades de curva IDF y las estimadas por Chang Nieto & Bolívar Lobato (1997)	73
Tabla 20. Diferencia entre Intensidades de la estación Aeropuerto Rafael Núñez y las registradas por cada estación para diferentes duraciones de lluvia (min) para el 2019	74
Tabla 21. Correlación y factor lineal para las intensidades entre las estaciones instaladas y la estación Aeropuerto Rafael Núñez	74
Tabla 22. Matriz de relación lineal entre la información de las curvas IDF de la estación Aeropuerto Rafael Núñez	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la estación Aeropuerto Rafael Núñez.....	23
Figura 2. Numero de investigaciones sobre la variabilidad espacial de la lluvia en zonas costeras (a) a lo largo del tiempo, (b) Por país	25
Figura 3. Mapa de precipitación media multianual, del período 1975-2006.....	26
Figura 4. Mapa de isohietas media intermensual.....	27
Figura 5. Precipitación media de enero en milímetros.	29
Figura 6. Superficie de predicción por Kriging	33
Figura 7. Información de curva IDF para la estación Aeropuerto Rafael Núñez de Cartagena de Indias.....	35
Figura 8. Ubicación geográfica de Cartagena de Indias	44
Figura 9. Esquema general de la metodología a realizar	46
Figura 10. Ubicación de las estaciones pluviométricas	48
Figura 11. Montaje del pluviómetro	49
Figura 12. Comparación de precipitación media por los métodos de Media Aritmética y Polígono de Thiessen para Pmax-24h de la serie 2009-2019.....	55
Figura 13. División de la superficie de Cartagena de Indias en Polígonos de Thiessen. (a) para la serie histórica (2009-2019). (b) para el 2019.....	57
Figura 14. <i>P24h – Max</i> 2019. Método de ajuste Kriging Ordinario.....	58
Figura 15. <i>P24h – Max</i> de la estación Rafael Núñez para la serie 1970-2019.....	59
Figura 16. <i>P24h – Max</i> de la estación Santa Ana para la serie 1985-2019	59

Figura 17. <i>P24h – Max</i> de la estación Bayunca para la serie 1974-2019.....	60
Figura 18. <i>P24h – Max</i> de la estación Arjona para la serie 1981-2019.....	60
Figura 19. <i>P24h – Max</i> de la estación Cañaveral para la serie 1985-2019.....	60
Figura 20. <i>P24h – Max</i> de la estación Rocha para la serie 1981-2017.....	61
Figura 21. <i>P24h – Max</i> de la estación Berrugas para la serie 1974-2017	61
Figura 22. <i>P24h – Max</i> de la estación El Porvenir para la serie 1988-2016	61
Figura 23. Gráficas de probabilidad de la mejor distribución Vs estación respectiva. (a) Rafael Núñez, (b) Santa Ana, (c) Bayunca, (d) Arjona, (e) Cañaveral, (f) Rocha, (g) Berrugas, (h) El Porvenir.....	65
Figura 24. Relación entre las Precipitaciones Máximas anuales en 24h y los periodos de retorno para cada estación	68
Figura 25. Comparación entre diferentes métodos de interpolación (a) Método de interpolación Spline <i>P24h – Max</i> 2019 (b) Método de interpolación IDW T=2años, (c) Método de interpolación Spline T=2años	70
Figura 26. Isoyetas de <i>P24h – Max</i> para diferentes periodos de retorno. (a) 2 años. (b) 5 años. (c) 10 años. (d) 20 años. (e) 25 años. (f) 50 años. (g) 100 años. Métodos de ajuste IDW	71
Figura 27. Distribución espacial del error en las intensidades respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez.....	75
Figura 28. <i>P24h – Max</i> para T=2años. Método de ajuste Kriging Ordinario.....	87
Figura 29. <i>P24h – Max</i> para T=3años. Método de ajuste Kriging Ordinario.....	88
Figura 30. <i>P24h – Max</i> para T=5años. Método de ajuste Kriging Ordinario.....	89
Figura 31. <i>P24h – Max</i> para T=10años. Método de ajuste Kriging Ordinario.....	90

Figura 32. <i>P24h – Max</i> para T=25años. Método de ajuste Kriging Ordinario.....	91
Figura 33. <i>P24h – Max</i> para T=50años. Método de ajuste Kriging Ordinario.....	92
Figura 34. <i>P24h – Max</i> para T=100años. Método de ajuste Kriging Ordinario.....	93
Figura 35. Distribución de la desviación respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez para T=2años	94
Figura 36. Distribución de la desviación respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez para T=25años	95
Figura 37. Distribución de la desviación respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez para T=50años	96
Figura 38. Distribución de la desviación el respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez para T=50años	97
Figura 39. Regresión lineal simple entre la información IDF del IDEAM y la estimada calculada con Chan & Bolívar (1997) para un T=2 años.....	98
Figura 40. Intensidades de la estación UNAD Vs la estación Rafael Núñez para el 2019.....	98
Figura 41. Intensidades de la estación CIOH Vs la estación Rafael Núñez para el 2019	99
Figura 42. Intensidades de la estación UDC Vs la estación Rafael Núñez para el 2019.....	99
Figura 43. Intensidades de la estación Tierra Bomba Vs Rafael Núñez para el 2019.....	100
Figura 44. Intensidades de la estación Vivarium Vs Rafael Núñez para el 2019.....	100
Figura 45. Intensidades de la estación UTB Vs Rafael Núñez para el 2019	101
Figura 46. Intensidades de la estación Mamonal Vs Rafael Núñez para el 2019.....	101
Figura 47. Intensidades de la estación Turbaco Vs Rafael Núñez para el 2019.....	102



RESUMEN

La información de lluvia, entre muchas de las aplicaciones que tiene, es altamente utilizada para los diseños hidráulicos de ingeniería civil, que requieren información histórica de precipitaciones e intensidades. Muchas veces por no contar con una amplia red de pluviómetros se tiende a asumir que las lluvias se distribuyen uniformemente en el espacio, lo que podría generar impactos como obras subdiseñadas o sobrediseñadas. Cartagena de Indias por ejemplo, cuenta con la estación Aeropuerto Rafael Núñez que hace parte de la red nacional, registra información pluviométrica y tiene curvas IDF. Por lo anterior, se analizó el comportamiento de las precipitaciones en la ciudad, a través de una red de 16 pluviómetros compuesta por equipos del IDEAM, DIMAR-CIOH y la Universidad de Cartagena, y así se determinó la variación espacial en precipitación e intensidad, y la diferencia que existe con respecto a los datos de la estación Aeropuerto Rafael Núñez. Para esto, se comprobó que las precipitaciones no son homogéneas en la ciudad comparando los métodos de precipitación media. Se realizaron análisis de frecuencia de $P_{24h-Max}$ usando cinco funciones de distribución (Gamma, Log-Normal, Normal, Exponencial y Gumbel) y tres test de ajuste (Log Verosimilitud, Kolmogorov-Smirnov y Chi-cuadrado), para generar mapas de isoyetas de $P_{24h-Max}$ para períodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años evaluando cual método de interpolación (Kriging Ordinario, IDW y Spline) describe mejor la información registrada, encontrando a KO como el mejor. En cuanto a las intensidades, se compararon las curvas ID obtenidas para el 2019 y se obtuvo un mapa de desviaciones respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez. De este modo, se encontró que las funciones de mejor ajuste fueron Gamma y Normal, y no Gumbel como usualmente se asume. Por otro lado, las $P_{24h-Max}$ independientemente del periodo de retorno, se presentan en la parte norte del territorio pero disminuyen al sur y, las intensidades son máximas en un 30% y 50%, respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez, en la zona rural Norte y urbana respectivamente representando periodos de retorno en las curvas IDF de 10 y 25 años.

Palabras clave: Cartagena de Indias, Intensidad, Kriging Ordinario, Precipitación, Variación espacial de la lluvia, Zona Costera.

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

ABSTRACT

Rainfall data, among many of the applications it has, is highly used for civil engineering hydraulic designs, which require historical information on rainfall and intensities. Frequently, due to the lack of a wide network of rain gauges, it tends to be assumed that rainfall is uniformly distributed in space, which could generate impacts such as under- or over-designed works. Cartagena de Indias, for example, has the Rafael Núñez Airport station that is part of the national network, which registers pluviometric information and has IDF curves. Therefore, the behavior of rainfall in the city was analyzed through a network of 16 rain gauges composed of equipment from IDEAM, DIMAR-CIOH and the University of Cartagena, and thus determined the spatial variation in rainfall and intensity, and the difference that exists with the data from the Rafael Núñez Airport station. For this purpose, it was proven that rainfall is not homogeneous in the city by comparing average rainfall methods. Frequency analyses of $P_{24h-Max}$ were performed using five distribution functions (Gamma, Log-Normal, Normal, Exponential and Gumbel) and three fitting tests (Log likelihood, Kolmogorov-Smirnov and Chi-square) to generate $P_{24h-Max}$ isohyet maps for return periods of 2, 3, 5, 10, 25, 50 and 100 years evaluating which interpolation method (Ordinary Kriging, IDW and Spline) describes better the recorded information, finding KO as the best. As for the intensities, the ID curves obtained for 2019 were compared and a map of deviations from the Rafael Núñez Airport station was obtained. Thus, it was found that the best fitting functions were Gamma and Normal, and not Gumbel as is usually assumed. On the other hand, the $P_{24h-Max}$, independently of the return period, are located in the northern part of the territory decreasing to the south and, the intensities are maximum in 30% and 50%, with respect to the Rafael Núñez Airport station, in the rural North and urban areas respectively, representing return periods in the IDF curves of 10 and 25 years. On the other hand, the $P_{24h-Max}$, independently of the return period, are located in the northern part of the territory decreasing to the south and, the intensities are maximum in 30% and 50%, with respect to the Rafael Núñez Airport station, in the rural North and urban areas respectively, representing return periods in the IDF curves of 10 and 25 years.

Keywords: Cartagena de Indias, Intensity, Ordinary Kriging, Precipitation, Spatial Variation of Rainfall, Coastal Zone.



INTRODUCCIÓN

Por su situación geográfica en el área Suroeste del Caribe, el régimen climático de la región donde se encuentra Cartagena de Indias, está bajo la influencia de los desplazamientos Norte - Sur de la Zona de Convergencia Intertropical (Z.C.I.), los cuales son una resultante de los fenómenos físicos Subtropicales. Además, el sector está influenciado por las circulaciones atmosféricas de los vientos Alisios (vientos del N y NE), procedentes de los Centros de Alta Presión del Atlántico Nororiental (CIOH, 2011, 2018). Estos fenómenos influyen principalmente en la variabilidad espacial de la precipitación (López, 2016). La ciudad de Cartagena de Indias posee un clima que se caracteriza como tropical semiárido a cálido - seco. La humedad relativa del aire es menor en el primer trimestre del año, luego aumenta en un promedio alrededor del 90%, con la estación lluviosa típicamente entre abril- mayo y septiembre-noviembre (CIOH, 2011).

Históricamente, se ha dado por supuesto que la distribución espacial de las precipitaciones sobre pequeños territorios es homogénea, utilizándose el registro de un solo pluviómetro para caracterizar las precipitaciones de un determinado espacio (Patrick & Stephenson, 1990). Sin embargo, la extrapolación del registro de un solo pluviómetro al conjunto de toda una cuenca puede en ocasiones no ser representativo y por lo tanto alterar el resultado final en la elaboración de un balance hídrico. En algunos eventos la cantidad y la intensidad de la lluvia tiene un reparto muy desigual (Ceballos, 1998), por tanto, se requiere la instalación de instrumentos de medición, tantos como sean necesarios, y no utilizar solamente los datos pluviométricos de la red nacional para estimar las precipitaciones de amplios territorios (Torreño & Schnabel, 2017).

La importancia de conocer la distribución espacial y temporal de las variables meteorológicas es que permite identificar patrones de comportamiento del clima en una región. La precipitación por ejemplo, es una de las variables climatológicas más usadas (Pabón, Eslava, & Gómez, 2001), su variabilidad espacial puede generar errores significativos en los diferentes métodos de análisis, especialmente en áreas urbanas (Haris, Chow, & Sidek, 2019).

Es necesario conocer la variación espacial de las precipitaciones en pequeñas cuencas, puesto a que además de tratarse de un aspecto fundamental para el desarrollo de la vegetación, también constituye la entrada de agua en el ciclo hidrológico repercutiendo directamente sobre este (Torreño & Schnabel, 2017). Cartagena tiene una superficie de 609.1 Km^2 (Alcaldía Mayor de

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

Cartagena de Indias, 2015) que la clasifica como una cuenca intermedia-grande según lo propuesto por Aranda Campo (1992). De acuerdo a lo anterior, se deduce la importancia de conocer la situación espacial de las precipitaciones en la ciudad.

Independientemente del tamaño de la cuenca, la importancia de conocer la variación espacial de la lluvia incluye los análisis hidrológicos (generación de escorrentía en laderas y cauces, por ejemplo) y estudios de procesos erosivos para modelizar donde es indispensable contar con una óptima entrada de datos (Torreño & Schnabel, 2017). De igual forma, permitiría en principio identificar vulnerabilidades tanto ambientales como socio-económicas, así como apoyar políticas de adaptación en los sectores en miras al desarrollo (Ruiz & Escobar, 2012). Además de permitir identificar las áreas de precipitación relacionadas, también conforman una base para la planeación de zonas poco estudiadas (Bekis, Brady, Bowen, Tulley-Cordova, & Strong, 2018) lo que permite apoyar la construcción de un plan de ordenamiento territorial donde los recursos hídricos sean importantes.

Cartagena actualmente cuenta con una estación que registra información pluviométrica que está dentro la red de estaciones del IDEAM y se encuentra ubicada en el Aeropuerto Rafael Núñez como se puede ver en la [Figura 1](#). Esta es de tipo sinóptico principal y opera desde hace más de 50 años (IDEAM, 2019; Observatorio Ambiental de Cartagena de Indias, 2019), lo que quiere decir que muchos estudios, análisis y diseños realizados en el territorio de Cartagena de Indias relacionados con la precipitación han tomado como referencia datos recolectados por esta única estación que además se encuentra ubicada en la zona norte de la ciudad.

Por otro lado, en estudios como el realizado por la Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias (2009) se observa que para analizar la distribución de las lluvias en la ciudad se tienen que realizar interpolaciones con estaciones que están por fuera de ella y en ocasiones muy alejadas, resultando de ello, que al interior de Cartagena la distribución tenga una tendencia muy homogénea o muy poco variable. En esta situación, la variabilidad espacial de la lluvia y las isoyetas resultantes son un parámetro fundamental puesto que con estos datos se elabora en Plan Maestro de Drenajes Pluviales del distrito.

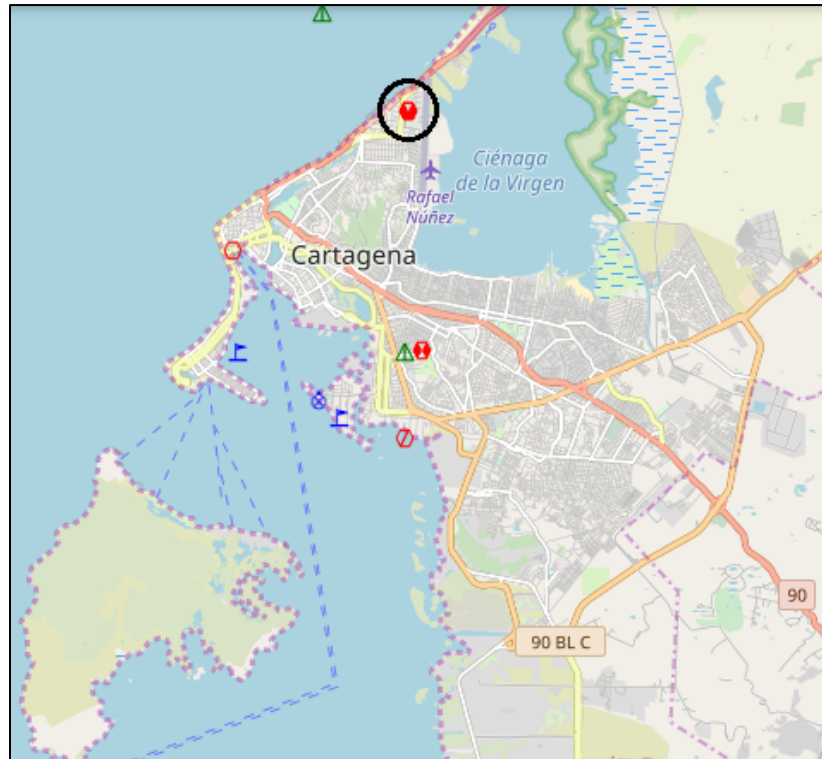


Figura 1. Ubicación de la estación Aeropuerto Rafael Núñez
Fuente: IDEAM

Autores como Torreño & Schnabel (2017) han analizado este problema mediante la instalación de una serie de pluviómetros de tipo balancín distribuidos sobre la cuenca de estudio para luego analizar los datos por el método del Polígono de Thiessen y el de Precipitación Media para posteriormente comparar estos métodos entre sí. Por otro lado, autores como Rivas (2014) han analizado la correlación de datos de precipitación utilizando el método de interpolación Kriging Ordinario (KO) y el software ArcGis Desktop. Siguiendo lo anterior, este proyecto de investigación propone la ubicación de estaciones pluviométricas en diferentes puntos preestablecidos en la ciudad de Cartagena de Indias y en zonas aledañas para analizar datos de precipitación (mm) y tiempo (día, mes) aplicando la metodología de los autores anteriormente mencionados, agregando además el método de Isoyetas, para poder de esta forma conocer la variabilidad espacial de la precipitación y su impacto en la selección de datos en la estación Rafael Núñez.

La importancia de este proyecto radica en que pocos estudios se han realizado para conocer la variabilidad espacial de la precipitación en la ciudad, por lo que el conocimiento de esta aportaría

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

a la correcta toma de decisiones en los ámbitos económico, social, político y ambiental de la planificación de la ciudad, ya que todos estos deben contener una componente climática significativa que dará soluciones al requerimiento de nuevos parámetros para el diseño de obras de protección, control y evacuación, y al requerimiento de políticas claras para la adecuada ocupación y protección del territorio. Todos estos planteamientos obedeciendo a las condiciones actuales del clima.

A partir de la información anterior surgen las siguientes preguntas: ¿Qué tanta variabilidad espacial sufre la precipitación en Cartagena de Indias y qué tanto se diferencian los datos de lluvia promedio de los obtenidos por la red nacional en la estación del Aeropuerto Rafael Núñez? ¿Afectará la variabilidad espacial de la lluvia los cálculos hidráulicos efectuados con datos obtenidos por la red nacional en el municipio de Cartagena de Indias?, si es así, ¿de qué modo se ven afectados?. Responder estas preguntas es el punto de partida y corresponde al objetivo de la presente propuesta de investigación.



1 MARCO DE REFERENCIA

1.1 Antecedentes

1.1.1 Antecedentes Internacionales

Saber la distribución de la lluvia en el territorio ha sido muy importante internacionalmente. La Figura 2, muestra como se ha comportado la cantidad de investigaciones por año sobre el tema en zonas costeras y en ella se observa además que el número aumentó drásticamente a inicios del siglo XXI y desde entonces ha sido creciente y casi lineal con el tiempo. Por otro lado, el país que más se ha preocupado por esta temática es Estados Unidos con 300 investigaciones al respecto, seguido de Australia e India con 126 y 118 investigaciones respectivamente.

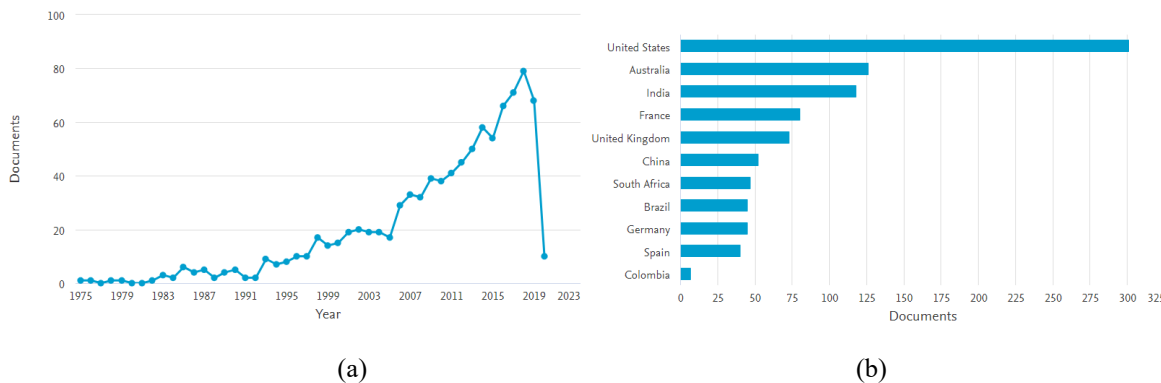


Figura 2. Numero de investigaciones sobre la variabilidad espacial de la lluvia en zonas costeras (a) a lo largo del tiempo, (b) Por país
Fuente: Scopus (2020)

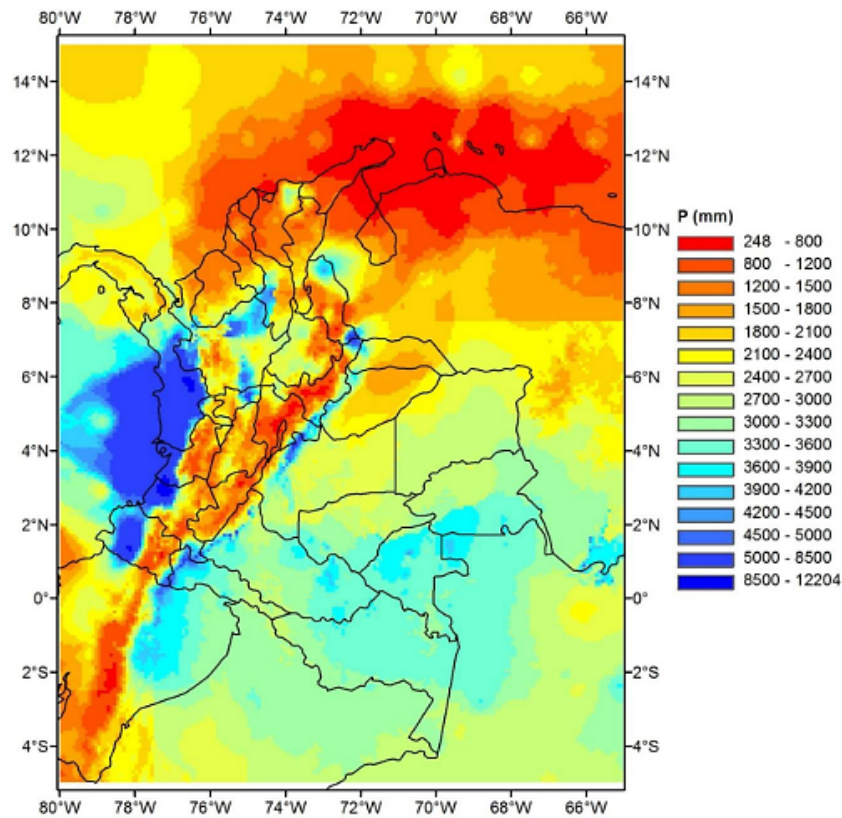
1.1.2 Antecedentes Nacionales

La variabilidad espacial de las lluvias en Colombia ha sido analizada a gran escala en distintos estudios. En el mapa presentado en la [Figura 3](#) por Hurtado & Mesa (2015) elaborado a partir de 348 mapas de precipitación mensual en el período de 1975-2006 se muestra la distribución de las profundidades de precipitación. Este estudio consistió en la estimación y análisis de Funciones Ortogonales Empíricas, Componentes Principales y pruebas estadísticas de homogeneidad para la detección de cambios o tendencias en el tiempo de precipitación mensual en Colombia. En Hurtado

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

y Mesa (2014) y Hurtado (2009) se encuentra el procedimiento y características de la base de datos (Hurtado Montoya & Mesa Sánchez, 2015).



*Figura 3. Mapa de precipitación media multianual, del periodo 1975-2006
Fuente: Hurtado Montoya & Mesa Sánchez, 2015*

Otros estudios se han llevado a cabo pero en áreas más específicas como el realizado en la cuenca del río Chicú en la sabana de Bogotá. En este se analizó la variabilidad local y espacio-temporal de la precipitación en la cuenca, como insumo en la detección de posibles impactos del cambio climático, indicadores determinados mediante el software RCLIMDEX y el diseño de medidas de adaptación y mitigación a nivel municipal. Para ello se obtuvo la información histórica de precipitación, recopilada de las estaciones hidrometeorológicas de la región, y se realizó el análisis de calidad y estimación de datos faltantes con el propósito de generar mapas de distribución espacial de la precipitación para la cuenca. En la [Figura 4](#) se muestra el mapa de isoyetas media intermensual el cual representa la variabilidad espacial de la lluvia (López, 2016).



Impacto de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias

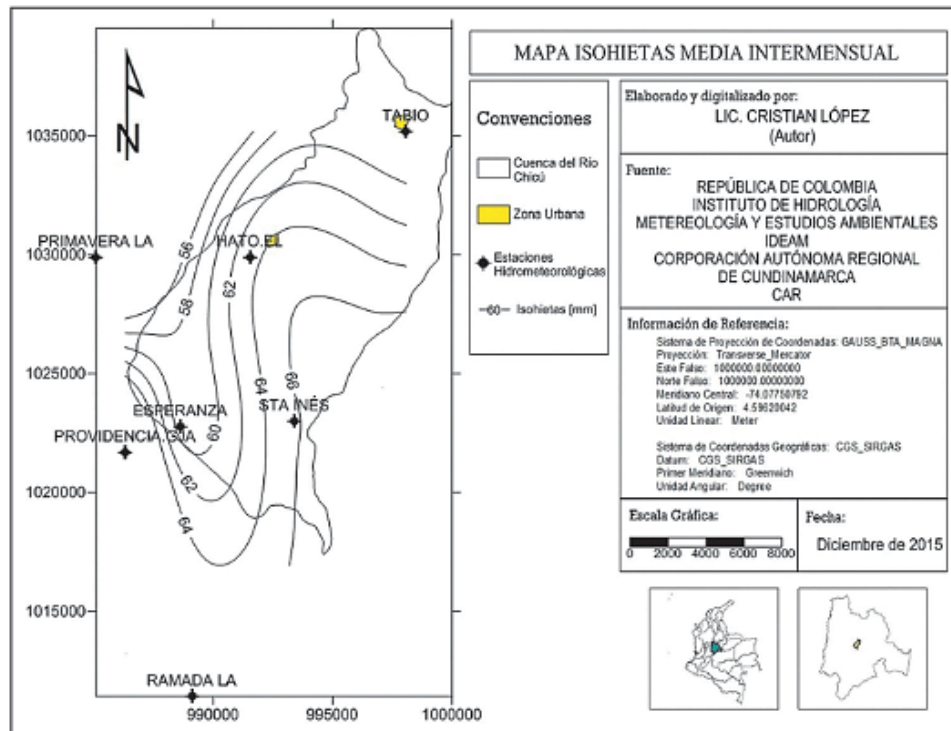


Figura 4. Mapa de isohietas media intermensual
Fuente: López, (2016)

1.1.3 Antecedentes Locales

En Cartagena de Indias la información encontrada en la literatura sobre el análisis de variabilidad espacial de la precipitación es muy escasa. El trabajo realizado por Herrera, Llamas, & Arrieta, (2018) arroja como resultado la actualización de las curvas intensidad, duración y frecuencia (IDF) de la estación meteorológica Aeropuerto Rafael Núñez, pero esta actualización no resuelve las limitaciones dentro de la ciudad en donde las profundidades de precipitación solo son medidas por una estación, imposibilitando el análisis a profundidad de la variabilidad espacial.

1.1.3.1 Plan Maestro de Drenajes Pluviales

Este plan impulsado por la Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias tiene por objeto buscar un adecuado sistema de drenajes pluviales para minimizar, corregir y evitar los efectos nocivos de las lluvias en las cuencas de la ciudad. Con la finalidad de cumplir este objetivo, en la etapa de estudios y diseños se hizo un estudio de la hidrometeorología el cual tiene dos componentes principales: la probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones máximas 24 horas y la distribución de la precipitación total.

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

- **Probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones máximas 24 horas**

Para el análisis de lluvia de la zona de estudio se tuvieron en cuenta un total de ocho estaciones pertenecientes al IDEAM que se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas ubicada en Bolívar

Estaciones	Municipio	Coordenadas		Altura (m.s.n.m)	Tipo
		X	Y		
Aeropuerto Rafael Núñez	Cartagena	842787.8	1647446.1	2	Sinóptica principal
Bayunca	Bayunca	855603.3	1656610.5	75	Pluviométrica
Cañaveral	Turbaco	862844	1641829.2	75	Pluviométrica
Escuela Naval	Cartagena	840928.7	1640078.1	1	Climatológica Principal
Santa Ana	Cartagena	839027.2	1623489.9	1	Pluviométrica
Arjona	Arjona	860952.9	1625241.2	60	Pluviográficas
Rocha	Arjona	853579.3	1608675	5	Pluviométrica
Sincerín	Arjona	868187.897	1614164.77	10	Climatológica Principal

Fuente: Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias (2009)

De estas estaciones se extrajeron los datos multianuales disponibles de la precipitación máxima 24 horas y se ajustaron cada una de ellas con la función de probabilidad de Gumbel y con ajuste logarítmico a fin de encontrar la precipitación máxima 24 horas para períodos de retorno de 2 a 120 años. A manera de ejemplo de muestra en la Tabla 2 los ajustes de la estación Aeropuerto Rafael Núñez.

Tabla 2. Cálculo de la precipitación – Estación Apto Rafael Núñez

T*	P (X=>Xi)**	Ajuste Gumbel		Ajuste Logarítmico
Años	%	Yi***=-Ln(-Ln(T-1/T))	Precipitación (mm)	Precipitación (mm)
2	50,00	0,3665	85,77	89,26
5	80,00	1,4999	119,54	118,28
10	90,00	2,2504	141,89	140,23
15	93,33	2,6738	154,51	153,07
20	95,00	2,9702	163,34	162,18
25	96,00	3,1985	170,14	169,25
50	98,00	3,9019	191,10	191,20
100	99,00	4,6001	211,90	213,15
120	99,17	4,7833	217,35	218,92

* Período de Retorno en años

** Probabilidad de no ocurrencia del evento Xi

*** Variable Reducida (Monsalve, 1999)

Fuente: Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias (2009)

Finalmente, se cita una regionalización del artículo “Regionalización de la Precipitación Máxima en 24 Horas en la Costa Atlántica Colombiana” (Arrieta & Guerrero, 2005) en donde determinan los parámetros de la distribución logarítmica de la forma $y = a \times \ln(x) + b$, donde x representa el periodo de retorno en años e y la precipitación máxima en 24 horas.



Tabla 3. Parámetros de regionalización para diferentes estaciones cercanas a Cartagena

Estaciones	Parámetros		Ecuaciones	Parámetros		Ecuaciones
	a	b	$y=aLn(x)+b$	a	b	$y=aLn(x)+b$
Aeropuerto Rafael Núñez	33,672	63,584	$y=33,672Ln(x)+63,584$	38,449	54,086	$y=38,449Ln(x)+54,086$
Bayunca	27,349	74,446	$y=27,349Ln(x)+74,446$	33,017	63,965	$y=33,017Ln(x)+63,965$
Cañaveral	31,841	67,799	$y=31,841Ln(x)+67,799$	41,008	52,941	$y=41,008Ln(x)+52,941$
Escuela Naval	27,868	58,209	$y=27,868Ln(x)+58,209$	33,639	47,34	$y=33,639Ln(x)+47,34$
Santa Ana	21,531	80,136	$y=21,531Ln(x)+80,136$	33,801	68,019	$y=33,801Ln(x)+68,019$
Arjona	22,259	64,87	$y=22,291Ln(x)+64,87$	26,964	56,188	$y=26,964Ln(x)+56,188$
Rocha	21,531	80,136	$y=21,531Ln(x)+80,136$	25,278	72,635	$y=25,278Ln(x)+72,635$
Sincerín	-	-	-	18,998	63,349	$y=18,998Ln(x)+63,349$

Fuente: Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias (2009)

• **Distribución de la precipitación total**

Con el fin de representar la distribución espacio-temporal de las lluvias en el estudio se presentan mapas de isoyetas de precipitación total en cada uno de los meses del año. A manera de ejemplo se muestra en la Figura 5 el mapa de la precipitación media de enero en milímetros.

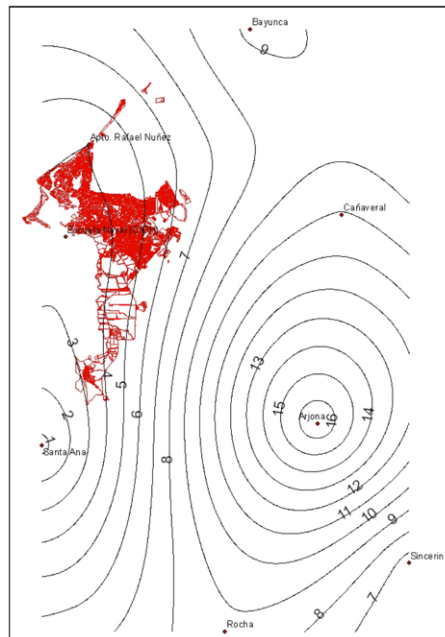


Figura 5. Precipitación media de enero en milímetros.

Fuente: Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias (2009)

1.2 Estado del arte

Es indispensable disponer de datos precisos y completos sobre las precipitaciones para la planificación, el diseño y el funcionamiento de los proyectos hídricos. De igual manera, es

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

importante poseer una red de medición de lluvias para la gestión de recursos hídricos, previsión y control de inundaciones (Chen, Wei, & Yeh, 2008). En el mundo, se ha encontrado una disminución considerable en el número de pluviómetros debido a los elevados costos de instalación y mantenimiento creando la tendencia de cerrar cada vez más estaciones que midan la profundidad de la precipitación (Dai et al., 2017).

Pese a lo anterior, la profundidad de las lluvias sigue siendo medida en gran mayoría con pluviómetros de balancín. De hecho, el IDEAM utiliza esta herramienta en las diferentes estaciones meteorológicas que tiene instaladas en todo el territorio.

1.2.1 Estado del arte Internacional

Son múltiples las investigaciones encaminadas al análisis y diseño de una red óptima de pluviómetros. Es el caso, por ejemplo, del diseño de la red de pluviómetros para la cuenca del lago Folsom, en Estados Unidos en donde se instalaron 42 pluviómetros para los 4820 km² de extensión de la cuenca. Para la zonas donde no se encontraban pluviómetros se utilizó el método *kriging* para la interpolación de los datos (Tsintikidis et al., 2002). Este método es ampliamente utilizado para distribuir espacialmente las medidas de profundidad de precipitación en distintas investigaciones (por ejemplo: Chen et al., 2008; Nazaripour, Reza, & Daneshvar, 2016; Panthi et al., 2015).

La cantidad de pluviómetros requeridos depende de las características específicas de cada cuenca a analizar. Encontramos, por ejemplo, el estudio de la variabilidad espacial de las lluvias en la cuenca del río Gandaki, en Nepal en donde se usaron 9 pluviómetros para un área de 35 000 km², área que se caracteriza por ser *agroecológica* (Panthi et al., 2015).

De esto se entiende que la red de pluviómetros que se emplea depende de las características específicas de cada cuenca, al igual que el método de interpolación y cálculo de datos. Para el caso del análisis de la variabilidad espacial de la ciudad de Cartagena de Indias, debido a las limitaciones en la red de pluviómetros, la metodología utilizada y los métodos de análisis se hará de acuerdo a Torreño & Schnabel (2017) quienes utilizaron pluviómetros de tipo balancín para la medida de la profundidad de la precipitación, para luego analizar los datos mediante el método del Polígono de Thiessen y el de Precipitación Media.

1.2.2 Estado del arte Nacional

Existe poca investigación acerca de la variabilidad espacial de las lluvias a nivel nacional, en cambio, otros parámetros meteorológicos sí han sido analizados. El anterior es el caso del estudio



de Ávila, Guerrero, Escobar, & Justino, (2019) en donde se analizaron varios índices climáticos extremos de lluvia en la cuenca del río Cauca en el suroeste del país, del que resultó que los índices de lluvia son negativos en el año, en especial en la parte central de la cuenca, es decir que la tendencia de parámetros como lluvia máxima diaria y precipitación máxima 5 días es a disminuir. Además, los días secos consecutivos tienden a aumentar en el período de Septiembre-Octubre-Noviembre.

1.2.3 Estado del arte Regional y/o Local

A nivel regional, estudios realizados por González-álvarez et al., (2019) analizan series multianuales de precipitación máxima diaria. En este se recogen los datos de 318 pluviómetros ubicados en la Región Caribe con los cuales se evaluó si al realizar análisis de frecuencia, la distribución de Gumbel era la que mejor se ajustaba o si en realidad era otra de las otras dos distribuciones analizadas (Valores Extremos Generalizados (GEV) y Log-Pearson 3 (LP3)). Como resultado se encontró que GEV era más adecuado en el 47,2% de las estaciones, mientras que Gumbel, a pesar de ser ampliamente utilizado en Colombia, sólo era el más adecuado en el 34,3% de los casos.

1.3 Marco teórico

A continuación se presentan algunos conceptos y teorías necesarias para la elaboración de esta investigación referentes a la recolección de datos de lluvia, los diferentes análisis estadísticos y no estadísticos que se realizaron, consideraciones y limitaciones, y la información utilizada a nivel local.

1.3.1 Precipitación Media

En general, la altura de lluvia que cae en un sitio dado difiere de la que cae en los alrededores, aunque sea en sitios cercanos. Los pluviómetros registran la lluvia puntual, es decir, la que se produce en el punto en que está instalado el aparato y, para los cálculos ingenieriles, es necesario conocer la lluvia media en una zona dada, como puede ser una cuenca. Para calcular la lluvia media de una tormenta dada, existen tres métodos de uso generalizado: la media aritmética, el polígono de Thiessen y el método de las Isoyetas (Aparicio Mijares, 1989).

1.3.1.1 Método de Media Aritmética

Consiste simplemente en obtener el promedio aritmético de las alturas de precipitación registradas en cada estación usada en el análisis.

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

$$\bar{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \dots (1)$$

Donde \bar{h} es la altura de precipitación media, h_i es la altura de precipitación registrada en la estación i y n es el número de estaciones bajo análisis (Aparicio Mijares, 1989).

1.3.1.2 Método de Polígono de Thiessen

Esta es en esencia una media ponderada. A cada estación pluviométrica se le asigna un área de influencia delimitada por un polígono que se obtiene de la siguiente manera: Se realiza una triangulación de la cuenca uniendo cada estación pluviométrica con las adyacentes a ella. Se trazan las mediatrices (perpendiculares por el punto medio) de cada uno de los lados de los triángulos dibujados. Estas mediatrices definen una serie de polígonos y cada uno de ellos encierra en su interior una estación pluviométrica. Se supone que la precipitación medida en esa estación define la del área del polígono asociado a ella (Martínez Alfaro, Martínez SantoLs, & Castaño Castaño, 2005). Se puede describir mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{h} = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n h_i A_i \dots (2)$$

Donde A_i es el área de influencia de la estación i , h_i es la precipitación en cada estación y A_T es el área total de la cuenca.

1.3.1.3 Método de Isoyetas

Las lluvias al presentar una gran variación en el espacio y tiempo, pueden ser representadas por mapas de Isoyetas, que es un contorno de lluvia constante. Estos mapas se construyen interpolando información de lluvia que se registra en sitio con pluviógrafos (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

1.3.2 Trazado de Isoyetas

En los últimos años se ha desarrollado un conjunto de técnicas matemáticas complejas destinadas a explicar la variabilidad espacial de la precipitación en áreas con una red de pluviómetros completa y homogénea, destacando el Universal Kriging Ordinario (KO), curvatura mínima (Spline Surface Fitting Method) (Ceballos, 1998) e inverso de la distancia (IDW). Programas como ArcGIS tienen extensiones de análisis geoespacial para comparar estos métodos (Cortés, 2010).



1.3.2.1 Método de interpolación de Kriging

Kriging es una técnica óptima de interpolación de superficies basada en la varianza dependiente del espacio. Se refiere a una familia de métodos de regresión de mínimos cuadrados generalizados en geoestadística. Es el mejor estimador lineal imparcial de valores de variables desconocidas en lugares no muestreados en el espacio, donde no se dispone de mediciones basadas en los valores de muestreo conocidos del área circundante (Adhikary, Yilmaz, & Muttil, 2015). En la Figura 6 se puede ver una superficie de predicción y su error estándar por el método de Kriging.

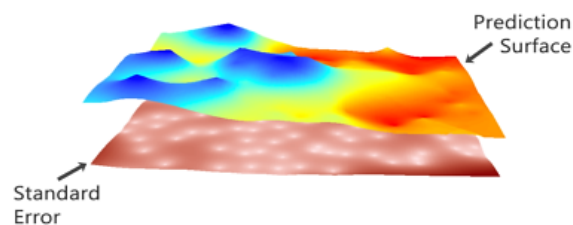


Figura 6. Superficie de predicción por Kriging
Fuente: GISGeography, 2018

Existen varios métodos Kriging para predecir comportamientos estadísticos. Para efectos de este estudio se utilizará el de Kriging Ordinario (KO) porque presupone que el valor medio constante es desconocido, es decir que la media es desconocida entre valores conocidos (Rivas, 2014).

1.3.3 Parámetros estadísticos

Los parámetros estadísticos son características de una población que se resumen en un número calculado y pueden derivarse del estudio de una variable estadística (Chow et al., 1994). En la Tabla 4 se resumen estos parámetros.

1.3.4 Precipitación máxima en 24 horas ($P_{24h-Max}$)

El total de lluvia en 24 horas corresponde a la precipitación ocurrida entre las 07 horas de un cierto día y las 07 horas del día siguiente, período que se conoce como “Día Pluviométrico”. A partir de las cantidades diarias de precipitación se calculan las máximas mensuales y de la serie histórica de máximas mensuales, se deducen las máximas absolutas para cada lugar de medición (IDEAM, 2019).

Tabla 4. Parámetros de población y estadística de muestras

Parámetro de la población	Estadística de la muestra	Descripción
1. Medidas de tendencia central		
Media aritmética	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	Suma de las observaciones dividido por el tamaño de la muestra.
Mediana	Valor de la información en el 50° percentil	Es el valor de la variable aleatoria en la que los valores en ambos lados son igualmente probables.
Media Geométrica	$\bar{x}_G = \left(\prod_{i=1}^n x_i \right)^{1/n}$	Indica la tendencia central de un conjunto de datos mediante el uso del producto de sus valores.
2. Medidas de dispersión		
Rango o recorrido		Es la diferencia entre el máximo y el mínimo valores en la muestra.
Varianza	$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$	Toma la media como valor central. Para una muestra de tamaño n, la varianza es la desviación cuadrática promedio de la media muestral.
Desviación estándar	$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$	Es la raíz cuadrada positiva de la varianza.
Coefficiente de variación	$CV = \frac{s}{\bar{x}}$	Relación entre la desviación estándar y la media. Los valores más altos indican datos más dispersos, es decir, una gran variabilidad sobre la media y viceversa.
3. Medida de simetría		
Coefficiente de asimetría (oblicuidad)	$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)s^3}$	Para la asimetría positiva ($C_s > 0$), los datos están sesgados a derecha y de manera similar para asimetría negativa ($C_s < 0$) los datos están sesgados a la izquierda. La diferencia entre la media y el modo indica la asimetría de los datos.
4. Medida de cola		
Apuntamiento o curtosis	$k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{(n-1)(n-2)(n-3)s^4}$	Proporciona una interpretación importante sobre las colas, es decir, valores atípicos. Para una muestra, la curtosis muestra el efecto de los valores atípicos existentes.

Fuente: Chow et al., 1994; Maity, 2018



1.3.5 Intensidad de lluvia

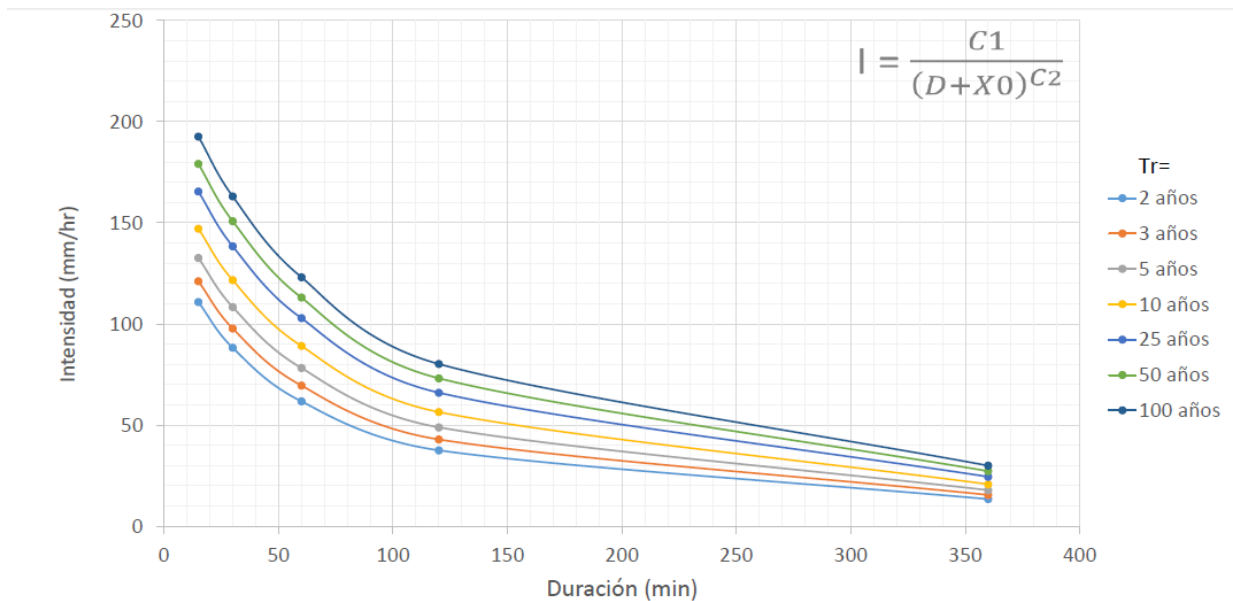
La intensidad es la tasa temporal de precipitación, es decir, la profundidad por unidad de tiempo (mm/h o pulg/h). Puede ser la intensidad instantánea o la intensidad promedio sobre la duración de la lluvia. Comúnmente se utiliza la intensidad promedio, que puede expresarse como:

$$i = \frac{P}{T_d} \dots (3)$$

Donde P es la profundidad de lluvia (mm) y T_d es la duración, dada usualmente en horas (Chow et al., 1994).

1.3.5.1 Curvas IDF para la estación Aeropuerto Rafael Núñez

En la Figura 7 se aprecian las curvas IDF para la estación Rafael Núñez ajustadas a la distribución de probabilidad Gumbel con 40 años de información de lluvia (serie 1970 a 2010), cuyos parámetros se estimaron con el método de L-Momentos y su fecha de actualización fue de diciembre de 2016 (IDEAM, 2019).



TR (años)	C1	X0	C2
2	19027.095	56.907	1.204
3	24275.161	62.902	1.217
5	31568.636	69.285	1.234
10	43071.436	76.793	1.257
25	61645.820	85.436	1.284
50	78546.079	91.269	1.304
100	98087.189	96.608	1.322

D (min)	I _{TR=2}	I _{TR=3}	I _{TR=5}	I _{TR=10}	I _{TR=25}	I _{TR=50}	I _{TR=100}
15	110.5	120.7	132.1	146.4	164.5	177.9	191.2
30	88.7	98.4	109.1	122.6	139.6	152.2	164.8
60	61.9	70.0	78.9	90.2	104.5	115.0	125.5
120	36.6	41.6	47.1	54.1	62.8	69.4	75.8
360	14.0	16.3	18.9	22.1	26.2	29.2	32.2

Figura 7. Información de curva IDF para la estación Aeropuerto Rafael Núñez de Cartagena de Indias
Fuente: IDEAM, 2019

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

1.3.5.2 Estimación de las intensidades para la estación Aeropuerto Rafael Núñez

Chang Nieto & Bolívar Lobato (1997) estudiaron para la estación del Aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena de Indias, la relación existente entre la precipitación registrada en 24 horas y la precipitación caída en una duración t menor, P_t . Esta relación es importante porque en Colombia existen más estaciones pluviométricas que pluviográficas, por lo que son más abundantes los registros diarios de 24 horas y no se dispone en su gran mayoría de información sobre curvas IDF (Arrieta Pastrana & Martínez Padilla, 2019).

Los resultados de Chang Nieto & Bolívar Lobato (1997) mostraron que el periodo de retorno no era significativo en el establecimiento de la relación y propusieron la siguiente expresión para tiempos de duración inferiores a 4 horas y 20 minutos.

$$\%P_t = -0.0067t^4 + 0.0902t^3 - 0.423t^2 + 0.897t + 0.0026 \dots (4)$$

Donde t es la duración de la lluvia en horas, $\%P_t$ es la fracción de la precipitación en 24h caída en una duración t de la lluvia.

Configurando la relación de Chang Nieto & Bolívar Lobato (1997) en términos de intensidad de lluvia para una duración de lluvia dada, se obtiene que:

$$i_t = \frac{P_t}{t} = \frac{P_{24h} \times \%P_t}{t} \dots (5)$$

$$i_t = P_{24h} \left[-0.0067t^3 + 0.0902t^2 - 0.423t + 0.897 + \frac{0.0026}{t} \right] \dots (6)$$

1.3.6 Análisis de frecuencia estacionario

El objetivo del análisis de frecuencia de información hidrológica es relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad (Chow et al., 1994). Existen un gran número de estas funciones para el análisis de valores extremos tales como Extreme Value, Log-Normal, Log-Pearson 3, entre otras. Cuando se asume que el análisis de frecuencia no cambia con el tiempo se le llama *estacionario* (González et al., 2019).

1.3.6.1 Funciones de distribución de probabilidad

Una distribución de probabilidad es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria (Chow et al., 1994), en la Tabla 5, se resumen algunas de las más utilizadas en hidrología.



Tabla 5. Distribuciones de probabilidad para el ajuste de información hidrológica

Distribución	Función de densidad de probabilidad	Rango	Ecuación de los parámetros
Normal	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$	$-\infty \leq x \leq \infty$	$\mu = \bar{x}, \quad \sigma = S_x$
Log-Normal	$f(x) = \frac{1}{x\beta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2}$	$x > 0$	$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\ln x_i}{n}$ $\beta = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\ln x_i - \alpha)^2}{n} \right]^{1/2}$
Gamma	$f(x) = \frac{\lambda^\beta x^{\beta-1} e^{-\lambda x}}{\Gamma(\beta)}$	$x \geq 0$	$\lambda = \frac{\bar{x}}{S_x^2}, \quad \beta = \frac{\bar{x}^2}{S_x^2}$ $\Gamma =$ Función Gamma
Pearson tipo III o Gamma de tres parámetros	$f(x) = \frac{\left(\frac{x-\varepsilon}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\varepsilon}{\alpha}\right)}}{\alpha \Gamma(\beta)}$	$x \geq \varepsilon$	$\alpha = \frac{S_x}{\sqrt{\beta}}, \quad \beta = \left(\frac{2}{C_s}\right)^2$ $\varepsilon = \bar{x} - S_x \sqrt{\beta}$
Log-Pearson tipo III	$f(x) = \frac{\left(\frac{y-\varepsilon}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{y-\varepsilon}{\alpha}\right)}}{\alpha x \Gamma(\beta)}$ donde $y = \ln x$	$\ln x \geq \varepsilon$	$\alpha = \frac{S_y}{\sqrt{\beta}}, \beta = \left(\frac{2}{C_s(y)}\right)^2$ $\varepsilon = \bar{y} - S_y \sqrt{\beta}$
Exponencial	$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$	$x \geq 0$	$\lambda = \frac{1}{\bar{x}}$
EVI o Gumbel	$f(x) = \alpha e^{-\alpha(x-\beta)} e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}}$	$-\infty \leq x \leq \infty$	$\alpha = \frac{1.2825}{S}$ $\beta = \bar{x} - 0.45 S$
Dos poblaciones	$F(x) = F_1(x)[p + (1-p)F_2(x)]$ Rango depende de $F_1(x)$ y $F_2(x)$		$F_1(x)$ y $F_2(x)$: funciones de distribución de probabilidad una variable no producida y la producida por fenómenos meteorológicos respectivamente. p : Probabilidad de que en un año cualquiera una variable no se produzca por un fenómeno meteorológico.

Fuente: Aparicio Mijares, 1989; Chow et al., 1994; Naghettini, 2016

1.3.6.2 Periodo de retorno

El periodo de retorno puede ser definido como el promedio del tiempo para que un evento de una magnitud dada pueda ser igualado o excedido estadísticamente. Este no hace referencia a un

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

período físico de tiempo sino que es una medida de tendencia central de tiempos físicos (Maity, 2018).

$$T = \frac{1}{p} = \frac{1}{p(X \geq x_T)} \dots (7)$$

Donde T es el período de retorno y $p(X \geq x_T)$ es la probabilidad de ocurrencia o excedencia.

1.3.6.3 Estimación de $P_{24h-Max}$ para diferentes periodos de retorno

Para un período de retorno dado se pueden hallar los datos de $P_{24h-Max}$ de la siguiente manera (Chow et al., 1994):

$$T = \frac{1}{1 - p(X < x_T)} \dots (8)$$

Donde $p(X < x_T)$ es la probabilidad de no excedencia. Esta probabilidad es la función de las distribuciones explicadas anteriormente, por lo que se puede escribir de la siguiente forma:

$$T = \frac{1}{1 - F(x_T)} \dots (9)$$

O escrito de otra manera,

$$F(x_T) = \frac{T - 1}{T} \dots (10)$$

1.3.7 Ajuste a una distribución de probabilidad

Una selección apresurada de cualquiera de las funciones podría traducirse en una estructura sobrediseñada y costosa o subdiseñada y peligrosa, por ello, se debe seleccionar con cuidado la de más adecuada (Aparicio Mijares, 1989). 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). A continuación se describen algunos métodos más usuales en hidrología para hacerlo.

1.3.7.1 Máxima Verosimilitud

R. A. Fisher (1922) razonó que el mejor valor de un parámetro de una distribución de probabilidad debería ser el valor que maximizara la verosimilitud o probabilidad conjunta de ocurrencia de la muestra observada como se muestra a continuación:

$$L = \prod_{i=1}^n f(x_i) \dots (11)$$



Debido a que muchas funciones de densidad de probabilidad son exponenciales, algunas veces es conveniente trabajar con la función logaritmo de la verosimilitud:

$$\ln L = \sum_{i=1}^n \ln[f(x_i)] \dots (12)$$

Teóricamente, este método es el más correcto para ajustar distribuciones de probabilidad a información en el sentido de que produce los estimativos de parámetros más eficientes, aquellos que estiman los parámetros de la población con los menores errores promedio (Chow et al., 1994).

1.3.7.2 Prueba de bondad de ajuste: χ^2 (ji-cuadrado)

La bondad de ajuste de una distribución de probabilidad puede probarse comparando los valores teóricos y muestrales de las funciones de frecuencia relativa con la prueba χ^2 , que está dada por:

$$\chi_c^2 = \sum_{i=1}^m \frac{n[f_s(x_i) - p(x_i)]^2}{p(x_i)} \dots (13)$$

Donde m es el número de intervalos, $f_s(x_i)$ es el valor muestral de la frecuencia relativa del intervalo i [$f_s(x_i) = n_i/n$] y $p(x_i)$ es el valor teórico [$p(x_i) = F(x_i) - F(x_{i-1})$].

Para determinar el número de intervalos de clase autores señalan que puede ser aproximado al entero de \sqrt{n} y con rangos entre 5 y 25, por otro lado, Sturges define una regla de la forma (Naghattini, 2016):

$$m = 1 + 3.322 \log n \dots (14)$$

Donde m es el número de intervalos o clase, y n es el número de observaciones de la muestra.

Para describir esta prueba, debe definirse la distribución de probabilidad para saber los ν grados de libertad, sabiendo que $\nu = m - p - 1$, donde p es el número de parámetros utilizados en el ajuste de la distribución propuesta. En las tabulaciones de la prueba de la Tabla 6, se escoge un nivel de confianza (un valor típico es del 95%), que es expresa usualmente como $1 - \alpha$, donde α se conoce como el nivel de significancia. La hipótesis nula se rechaza si el valor χ_c^2 es mayor que el valor limite $\chi^2_{\nu, 1-\alpha}$, determinado con ν grados de libertad como el valor que tiene una probabilidad acumulada de $1 - \alpha$ (Chow et al., 1994).

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

Tabla 6. Valores percentiles (χ^2_p) de la distribución ji-cuadrado con n grados de libertad

n	$\chi^2_{0.995}$	$\chi^2_{0.99}$	$\chi^2_{0.975}$	$\chi^2_{0.95}$	$\chi^2_{0.90}$	$\chi^2_{0.75}$	$\chi^2_{0.50}$	$\chi^2_{0.25}$	$\chi^2_{0.10}$	$\chi^2_{0.05}$	$\chi^2_{0.025}$	$\chi^2_{0.01}$	$\chi^2_{0.005}$
1	7.88	6.63	5.02	3.84	2.71	1.32	0.455	0.102	0.0158	0.0039	0.0010	0.0002	0.0000
2	10.6	9.21	7.38	5.99	4.61	2.77	1.39	0.575	0.211	0.103	0.0506	0.0201	0.0100
3	12.8	11.3	9.35	7.81	6.25	4.11	2.37	1.21	0.584	0.352	0.216	0.115	0.072
4	14.9	13.3	11.1	9.49	7.78	5.39	3.36	1.92	1.06	0.711	0.484	0.297	0.207
5	16.7	15.1	12.8	11.1	9.24	6.63	4.35	2.67	1.61	1.15	0.831	0.554	0.412
6	18.5	16.8	14.4	12.6	10.6	7.84	5.35	3.45	2.20	1.64	1.24	0.872	0.676
7	20.3	18.5	16.0	14.1	12.0	9.04	6.35	4.25	2.83	2.17	1.69	1.24	0.989
8	22.0	20.1	17.5	15.5	13.4	10.2	7.34	5.07	3.49	2.73	2.18	1.65	1.34
9	23.6	21.7	19.0	16.9	14.7	11.4	8.34	5.90	4.17	3.33	2.70	2.09	1.73
10	25.2	23.2	20.5	18.3	16.0	12.5	9.34	6.74	4.87	3.94	3.25	2.56	2.16
11	26.8	24.7	21.9	19.7	17.3	13.7	10.3	7.58	5.58	4.57	3.82	3.05	2.60
12	28.3	26.2	23.3	21.0	18.5	14.8	11.3	8.44	6.30	5.23	4.40	3.57	3.07
13	29.8	27.7	24.7	22.4	19.8	16.0	12.3	9.30	7.04	5.89	5.01	4.11	3.57
14	31.3	29.1	26.1	23.7	21.1	17.1	13.3	10.2	7.79	6.57	5.63	4.66	4.07
15	32.8	30.6	27.5	25.0	22.3	18.2	14.3	11.0	8.55	7.26	6.26	5.23	4.60
16	34.3	32.0	28.8	26.3	23.5	19.4	15.3	11.9	9.31	7.96	6.91	5.81	5.14
17	35.7	33.4	30.2	27.6	24.8	20.5	16.3	12.8	10.1	8.67	7.56	6.41	5.70
18	37.2	34.8	31.5	28.9	26.0	21.6	17.3	13.7	10.9	9.39	8.23	7.01	6.26
19	38.6	36.2	32.9	30.1	27.2	22.7	18.3	14.6	11.7	10.1	8.91	7.63	6.84
20	40.0	37.6	34.2	31.4	28.4	23.8	19.3	15.5	12.4	10.9	9.59	8.26	7.43
21	41.4	38.9	35.5	32.7	29.6	24.9	20.3	16.3	13.2	11.6	10.3	8.90	8.03
22	42.8	40.3	36.8	33.9	30.8	26.0	21.3	17.2	14.0	12.3	11.0	9.54	8.64
23	44.2	41.6	38.1	35.2	32.0	27.1	22.3	18.1	14.8	13.1	11.7	10.2	9.26
24	45.6	43.0	39.4	36.4	33.2	28.2	23.3	19.0	15.7	13.8	12.4	10.9	9.89
25	46.9	44.3	40.6	37.7	34.4	29.3	24.3	19.9	16.5	14.6	13.1	11.5	10.5
26	48.3	45.6	41.9	38.9	35.6	30.4	25.3	20.8	17.3	15.4	13.8	12.2	11.2
27	49.6	47.0	43.2	40.1	36.7	31.5	26.3	21.7	18.1	16.2	14.6	12.9	11.8
28	51.0	48.3	44.5	41.3	37.9	32.6	27.3	22.7	18.9	16.9	15.3	13.6	12.5
29	52.3	49.6	45.7	42.6	39.1	33.7	28.3	23.6	19.8	17.7	16.0	14.3	13.1
30	53.7	50.9	47.0	43.8	40.3	34.8	29.3	24.5	20.6	18.5	16.8	15.0	13.8
40	66.8	63.7	59.3	55.8	51.8	45.6	39.3	33.7	29.1	26.5	24.4	22.2	20.7
50	79.5	76.2	71.4	67.5	63.2	56.3	49.3	42.9	37.7	34.8	32.4	29.7	28.0
60	92.0	88.4	83.3	79.1	74.4	67.0	59.3	52.3	46.5	43.2	40.5	37.5	35.5
70	104.2	100.4	95.0	90.5	85.5	77.6	69.3	61.7	55.3	51.7	48.8	45.4	43.3
80	116.3	112.3	106.6	101.9	96.6	88.1	79.3	71.1	64.3	60.4	57.2	53.5	51.2
90	128.3	124.1	118.1	113.1	107.6	98.6	89.3	80.6	73.3	69.1	65.6	61.8	59.2
100	140.2	135.8	129.6	124.3	118.5	109.1	99.3	90.1	82.4	77.9	74.2	70.1	67.3

Fuente: Aparicio Mijares, 1989

Esta prueba como se aplica a las variables aleatorias continuas, necesita la prueba previa especificación del número y el ancho intervalos, lo que podría afectar gravemente la estimación estadística de la prueba, especialmente en las colas de distribución e incluso cambiar la toma de decisiones (Naghetini, 2016).



1.3.7.3 Prueba de bondad de ajuste: Kolmogorov-Smirnov (KS)

Esta prueba consiste en comprobar el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la función de distribución de probabilidad observada $F_o(x_m)$ y la estimada $F(x_m)$ con un valor crítico d que depende del número de datos y el nivel de significancia seleccionada de la Tabla 7, de tal forma de que si $D < d$, se acepta la hipótesis nula. La ventaja de esta prueba sobre la χ^2 de que compara los datos con el modelo estadístico sin necesidad de agruparlos.

$$D = \text{máx} |F_o(x_m) - F(x_m)| \dots (15)$$

La función de distribución de probabilidad observada se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_o(x_m) = 1 - \frac{m}{n + 1} \dots (16)$$

Donde m es el número de orden de dato x_m en una lista de mayor a menor y n es el número total de datos (Aparicio Mijares, 1989).

Tabla 7. Valores críticos d para la prueba Kolmogorov-Smirnov de bondad de ajuste

Tamaño de la muestra	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
5	0.51	0.56	0.67
10	0.37	0.41	0.49
15	0.30	0.34	0.40
20	0.26	0.29	0.35
25	0.24	0.26	0.32
30	0.22	0.24	0.29
40	0.19	0.21	0.25
<i>n grande</i>	$1.22/\sqrt{n}$	$1.36/\sqrt{n}$	$1.63/\sqrt{n}$

Fuente: Benjamin & Comell, 1970

Las diferencias permitidas entre las distribuciones empíricas y teóricas son demasiado grandes antes de que se rechace una hipótesis nula falsa, diferencias altamente permisibles cuando una decisión relativa a un costoso y proyecto de recursos hídricos potencialmente impactantes está en juego. Otra desventaja potencial de la prueba KS, es que no tiene Tablas de valores críticos para todos los padres distribuciones de probabilidad de uso actual en hidrología estadística (Naghattini, 2016).

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento de las precipitaciones en la ciudad de Cartagena de Indias a través de un conjunto de pluviómetros distribuidos e instalados para determinar la variación espacial y la diferencia que existe con respecto a los datos de la estación Rafael Núñez.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar las precipitaciones medias de la zona de estudio, comparando los métodos de Polígonos de Thiessen, Media Aritmética e Isoyetas mediante análisis estadístico para observar la variación espacial de la precipitación y establecer de esta manera la diferencia existente con los datos de la estación Rafael Núñez.
- Identificar el patrón de comportamiento de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias interpolando los datos de precipitación para generar mapas de distribución geoespacial y de error estándar mediante el método de Kriging Ordinario (KO) utilizando el software ArcGis Desktop.



3 ALCANCE

Este proyecto de investigación se realizó en la ciudad de Cartagena de Indias. Esta se encuentra localizada en el norte del departamento de Bolívar sobre la orilla del Mar Caribe a 10° 25' 30" latitud norte y 075° 32' 25" de longitud oeste respecto al Meridiano de Greenwich y en una zona costera típica, accidentada e irregular (CIOH, 2011). El Distrito de Cartagena de Indias tiene una extensión de 609.1 Km^2 , de los cuales 551.1 Km^2 que representan el 91.14% del territorio, corresponden al área rural y los restantes 54 Km^2 , equivalentes al 8.86 %, conforman el área urbana (POT, 2001) y una población de 1'028.736 habitantes de acuerdo a las proyecciones de censo realizado por el DANE en el año 2018, de los cuales la mayoría son afrodescendientes (Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias, 2015). Este estudio se limita al casco urbano de la ciudad y zonas aledañas, como se puede ver en la Figura 8.

La investigación se llevó a cabo en la segunda mitad del 2019 y la primera mitad del 2020, con una duración de catorce (14) semanas. Esta se divide en dos partes fundamentales, la primera incluye la toma y recolección de datos durante un periodo de ocho (8) semanas, donde se recolectaron los datos de precipitación y tiempo. Iniciando consecutivamente con la primera fase, la segunda consistió en el procesamiento y análisis de los datos recolectados donde se aplicaron diferentes métodos estadísticos como matrices de correlación y de interpolación utilizando el software Microsoft Excel y ArcGis Desktop respectivamente para cumplir con los objetivos, obtener resultados y realizar conclusiones al respecto, con una duración aproximada de seis (6) semanas.

En los resultados encontrados se explica la existente variabilidad espacial de la lluvia determinada a través de diferentes métodos estadísticos y se explica en qué magnitud esta afecta a los eventos registrados en cada uno de los puntos de monitoreo por medio de variables como precipitación máxima diaria y precipitación mensual. El análisis se hizo principalmente a las variables de precipitación (milímetro) y el tiempo (día, mes o evento) ubicadas en coordenadas espaciales específicas, que corresponden a las variables independientes.

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

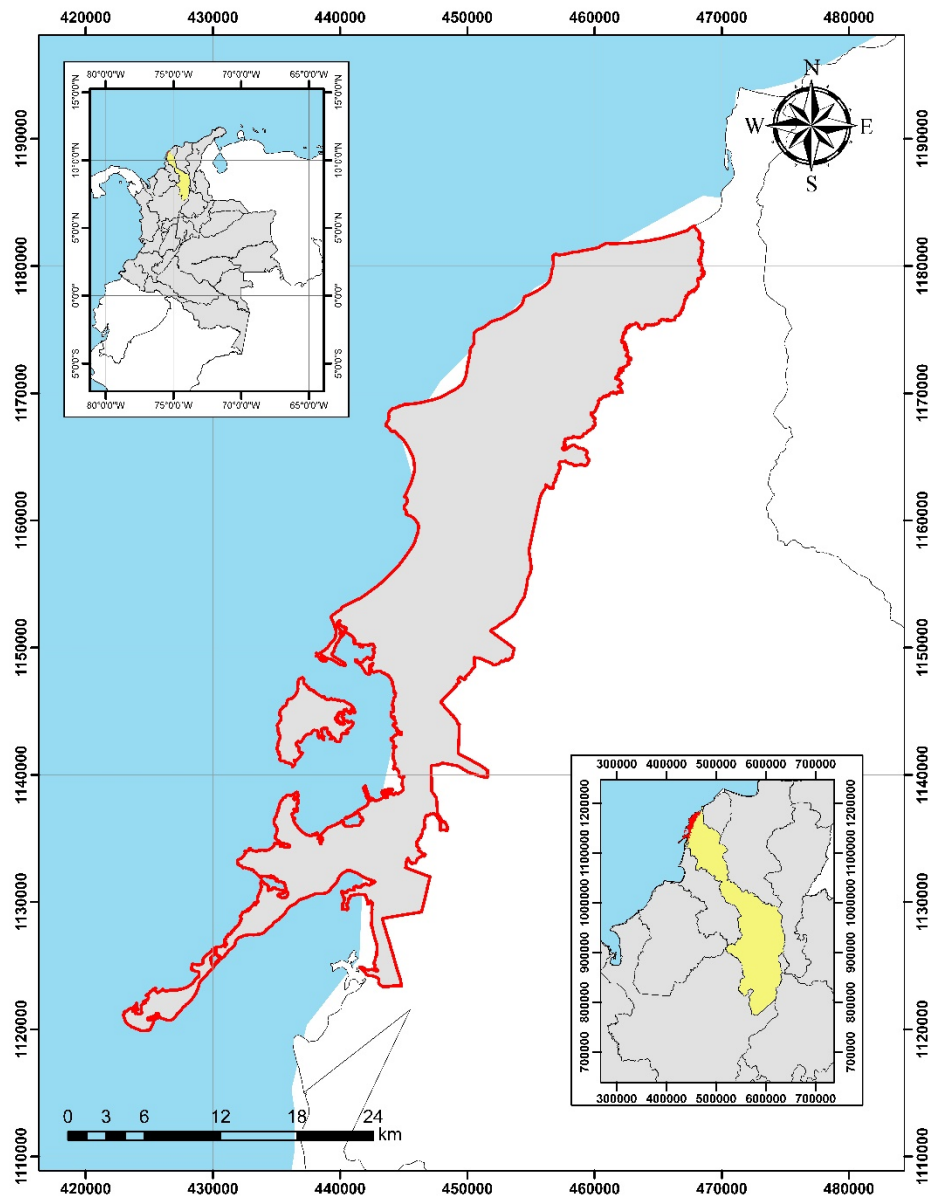


Figura 8. Ubicación geográfica de Cartagena de Indias

Con los resultados obtenidos, se construye el producto principal del proyecto, la determinación de la variabilidad espacial de la lluvia y su impacto mediante la representación de gráficas como método de interpretación visual para una gran cantidad de datos, estos son soportados por tablas para representar los datos recopilados y los resultados obtenidos. Toda esta información servirá como base para futuras investigaciones y proyectos. Así mismo, esta investigación permitirá la generación de nuevo conocimiento para la comunidad científica,



Impacto de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias



ingenieros civiles e hidráulicos como información de referencia para futuros diseños y decisiones tomadas en planes de desarrollo.

Adicional a la variabilidad espacial, se recogen datos de precipitación de estaciones del IDEAM cercanas a la ciudad y se ajustan a las distribuciones de probabilidad usadas para estas series de datos. Se analiza también cuál de estas funciones se ajusta mejor a las series y se compara con los ajustes que tradicionalmente se dan por sentados que son los mejores. De manera similar, se evalúan estos ajustes por tres pruebas diferentes y no a través de una única prueba como generalmente se observa en la literatura.

Esta investigación se encuentra limitada a nivel temporal puesto a que se recopilaron datos de precipitación de unos pocos meses de lluvia de los doce que tiene el año. Esto no impide la ejecución de la misma y el cumplimiento de los objetivos teniendo en cuenta que autores realizan sus investigaciones en este tema en por lo menos un año. A nivel económico se encuentra limitado para adquirir solamente seis pluviómetros para toda una ciudad como lo es Cartagena de Indias lo que pudo generar impacto en la precisión de los resultados por la distribución de los datos. Para contrarrestar esto, se cuenta con el apoyo de los datos de la estación Rafael Núñez y se realizaron contactos con terceros para ampliar la red de información pluviométrica.

Este trabajo se encarga de presentar el estudio del comportamiento de la lluvia a nivel espacial en Cartagena de Indias, por lo tanto, no se tratarán temas como las causas y consecuencias de la lluvia, el impacto del cambio climático y de los fenómenos climáticos en la precipitación, la influencia del cambio de estaciones del año, generación de modelos para predecir la lluvia o determinar el tamaño de las gotas de agua.

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

4 METODOLOGÍA

La investigación se realizó en la ciudad de Cartagena de Indias en el segundo período del 2019 con una duración de catorce semanas. Esta fue de campo con un diseño estadístico (Rivas, 2014), porque se recolectaron datos de fuentes primarias directamente en campo, sin manipular o controlar las variables ni alterar las condiciones existentes a través de la implementación de dispositivos especializados de medición de precipitación como lo son los pluviómetros instalados en diferentes puntos de la ciudad. Su diseño estadístico obedece al análisis cuantitativo de los datos recolectados en campo para obtener un resultado numérico (Cajal, 2018).

Para cumplir con los objetivos de esta investigación, la metodología se compuso de cinco fases fundamentales, iniciando con la ubicación de los dispositivos, para luego realizar su instalación, seguidamente se tomaron los datos, alternadamente su recolección y finalmente se procesaron y analizaron. A continuación, en la [Figura 9](#) se presenta un esquema general de la metodología realizada y se explicará en que consiste cada una de estas fases.

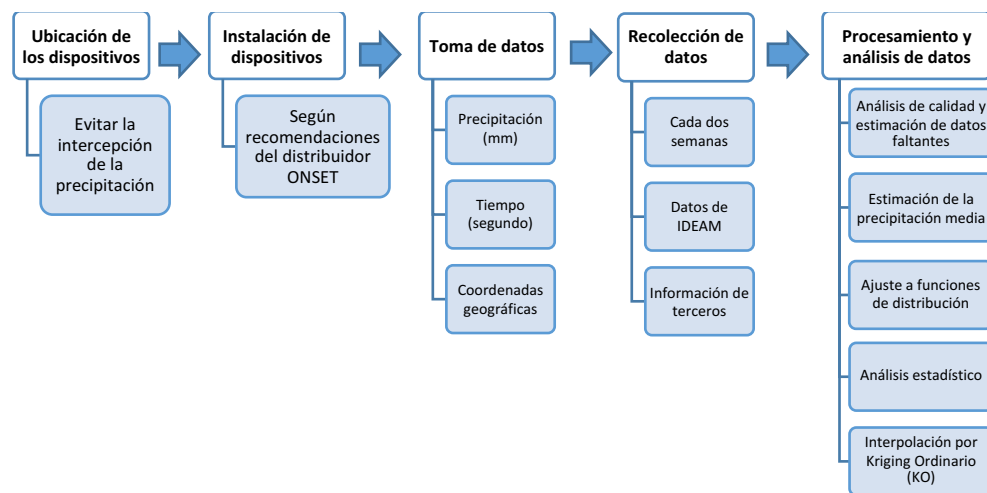


Figura 9. Esquema general de la metodología a realizar

Fuente: Autores

4.1 Ubicación de los dispositivos

De acuerdo con World Meteorological Organization (2008), se ha establecido que para la existencia de una red pluviométrica óptima en zonas urbanas se debe contar al menos con un



pluviómetro cada 10 a 20 Km^2 . De lo anterior y sabiendo que actualmente el área urbana de Cartagena de Indias se encuentra en aproximadamente 100 Km^2 según Google Earth, una red de seis pluviómetros (siete incluyendo Rafael Núñez) con área aferente de máximo 20 Km^2 sería suficiente para cumplir con las recomendaciones de la WMO.

Con la finalidad de que las medidas de precipitación fuesen lo más exactas y precisas posibles para la obtención de datos significativos, la selección de las zonas donde se ubicaron las estaciones con los dispositivos fue primordial. Estos se situaron en zonas estratégicas donde las precipitaciones pueden ser captadas con facilidad y a su vez están rodeadas de árboles y arbustos que mitigan los efectos de viento. Además, se sitúan a una distancia al menos igual al doble de su altura para evitar la intercepción de la precipitación (Haris et al., 2019). En la [Tabla 8](#) y [Figura 10](#) se pueden ver los puntos seleccionados de monitoreo para ubicación de las estaciones.

Tabla 8. Ubicación geográfica de las estaciones pluviométricas instaladas

ID	Estación / Localización	Coordenadas geográficas
1	UDC sede Piedra Bolívar	10°24'10.50"N – 75°30'20.40"W
2	Urbanización La Granja-Turbaco	10°20'23.42"N 75°25'3.07"W
3	Vivarium del Caribe- Vía Pontezuela / Bayunca	10°32'22.5"N - 75°25'04.70"W
4	Zona industrial de Mamonal-YARA	10°18'13.0"N – 75°30'0.4"W
5	UTB-Barrio El Rodeo	10°22'10.50"N – 76°27'52.50"W
6	Tierra Bomba- El caserío	10°22'38.00"N – 75°34'34.10"W

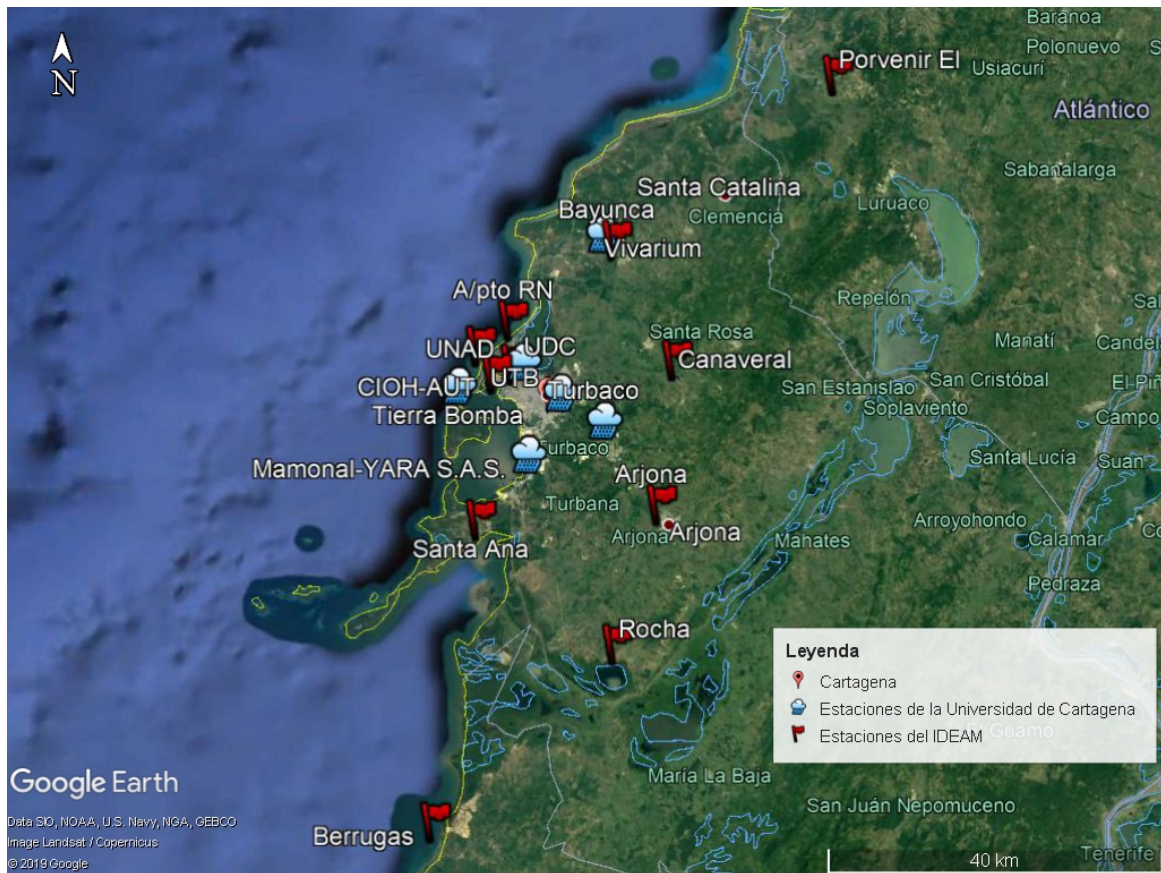
Fuente: Autores

4.2 Instalación de dispositivos

Después de realizar la selección de los puntos donde fueron colocadas cada una de las estaciones se procedió a su instalación. Cada estación contó con un (1) pluviómetro de tipo balancín (Torreño & Schnabel, 2017) de la referencia HOBO RG3 y registrador HOBO UA-003, que se instaló dependiendo de la condiciones del lugar ya sea sobre una superficie o en un poste nivelado como se indica en la [Figura 11](#), siguiendo las recomendaciones del distribuidor ONSET (Onset, 2010).

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD



*Figura 10. Ubicación de las estaciones pluviométricas
Fuente: Autores*

4.3 Toma de datos

Los pluviómetros con registrador HOBO UA-003, que recopilan fecha y hora para cada goteo, tienen capacidad para la toma de hasta 1600 lecturas de eventos y se configuraron para que tomaran los datos cada cinco minutos (Onset, 2010). Las variables estudiadas fueron principalmente la precipitación (milímetro) y el tiempo (mes, día, segundo o evento) ubicadas en coordenadas espaciales específicas, que correspondieron a las variables independientes.

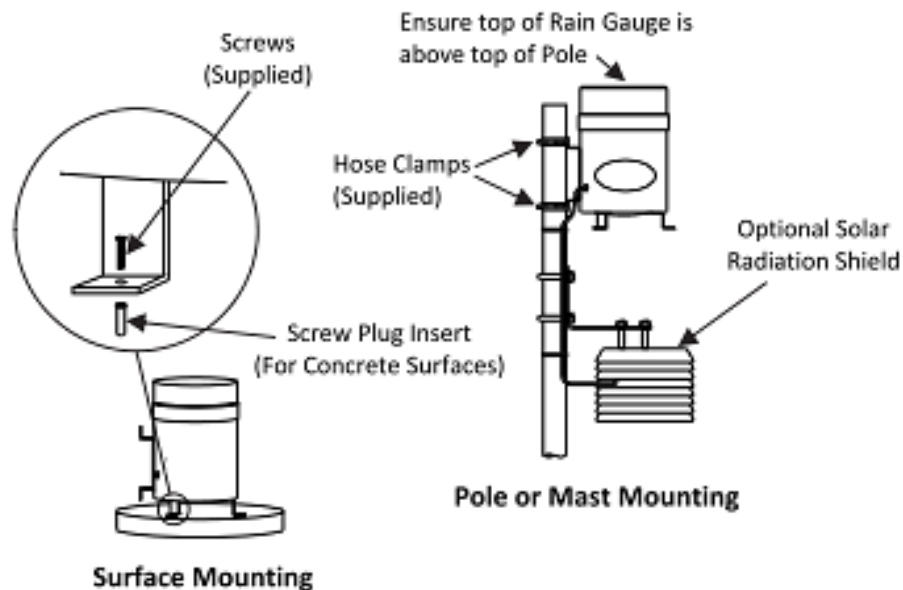


Figura 11. Montaje del pluviómetro
Fuente: Onset, 2010

4.4 Recolección de datos

Siguiendo las recomendaciones del distribuidor de los dispositivos, la recolección de datos se realizó inicialmente al menos una vez cada dos semanas para validar el correcto funcionamiento de los dispositivos (Onset, 2010; Torreño & Schnabel, 2017), para luego pasar a períodos de recolección de hasta dos meses, se recolectaron entre 90 y 150 días de datos para las estaciones instaladas con un total de 690 días de registro, entre los meses de Julio y Diciembre. Por otro lado, además de la información de los pluviómetros instalados, se utilizaron datos de precipitación recogidos por entidades como el IDEAM y DIMAR en el mismo año y a escala histórica, que fueron solicitados a través de su página web (Ruiz & Escobar, 2012), solicitando datos de por lo menos 20 años de registro según lo recomendado por la Organización Meteorológica Mundial para períodos de cálculo (OMM, 2011). En la Tabla 9 se resume la información obtenida de cada una de las estaciones, sus ubicaciones en la ciudad se encuentran incluidas en la Figura 10. En total se obtuvieron dieciséis estaciones con información pluviométrica distribuidas en el territorio de Cartagena de Indias y cerca de este.

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

Tabla 9. Información general de las estaciones utilizadas del IDEAM y DIMAR

ID	Estación	Coordenadas Geográficas	Entidad	Serie de datos	Agregación temporal	No de datos
1	Escuela Naval CIOH	10°23'27.80"N- 75°32'2.20"W	DIMAR	2019	10 min	48.960
2	Aeropuerto Rafael Núñez	10°26'50.10"N- 75°30'57.70"W	IDEAM	1970-2019	24h	18.055
3	Santa Ana	10°14'3.00"N- 75°33'4.00"W	IDEAM	1985-2019	24h	12.287
4	Bayunca	10°31'60.00"N- 75°24'11.00"W	IDEAM	1974-2019	24h	14.521
5	Universidad UNAD Cartagena - AUT	10°24'1.00"N- 75°30'48.00"W	IDEAM	2019	10 min	50.596
6	Arjona	10°15'1.00"N- 75°21'16.00"W	IDEAM	1981-2019	24h	12.940
7	Cañaveral	10°24'18.00"N- 75°20'15.00"W	IDEAM	1985-2019	24h	12.378
8	Rocha	10° 6'3.00"N- 75°24'9.00"W	IDEAM	1981-2017	24h	13.140
9	Berrugas	9°54'37.00"N- 75°36'2.00"W	IDEAM	1974-2017	24h	15.695
10	El Porvenir	10°42'36.80"N- 75° 9'44.20"W	IDEAM	1988-2016	24h	10.585

4.5 Procesamiento y análisis de datos

Posteriormente los pluviómetros proporcionaron detalles necesarios para determinar las tasas de precipitación y duración, luego, se transformó el goteo en pulsaciones que fueron registradas, graficadas y analizadas mediante el software HOBOWare (Onset, 2010).

En áreas de clima seco, el carácter pluviométrico de un año no puede ser definido exclusivamente por la cantidad total, sino hay que considerar también las precipitaciones mensuales e, incluso, las diarias (Torreño & Schnabel, 2017), por esta razón para esta investigación los datos se analizaron a escalas diarias y mensuales. De igual forma, al contar con datos pluviométricos de varias estaciones en intervalos de tiempo menores a un día, se pudieron comparar las intensidades para el año 2019. El criterio empleado consiste en analizar las



intensidades máximas en 5, 10, 30 y 60 minutos de cada uno de los eventos o de los eventos seleccionados (Torreño & Schnabel, 2017).

El análisis de los datos se llevó a cabo mediante la aplicación de métodos estadísticos adecuados los cuales corresponden a las variables dependientes y, pueden sugerir la existencia (o no) de relaciones entre las variables que se estudiaron resaltando que la descripción de los datos observados puede ayudar a la predicción de eventos futuros. A continuación se resume la realización de los análisis:

4.5.1 Análisis de calidad y estimación de datos faltantes

Previo al análisis pluviométrico, se contempló que de ser necesario se estimarían los datos faltantes para completar los registros de la base de datos, pero al no tener datos faltantes no se realizó, es decir que sí se tuvo en cuenta este aspecto. Estos serían estimados utilizando análisis de regresión dependiendo de la relación que mejores resultados ofrezca (Torreño & Schnabel, 2017). Autores como Monsalve G (1995), reconstruyen series de datos faltantes a nivel mensual y anual utilizando métodos de relleno de datos que utilizan información de estaciones cercanas conocido como Razón de Valores Normales (como se cita en Ruiz & Escobar, 2012), otros como López (2016) utilizan varios métodos de estimación de datos faltantes en el mismo estudio como el de Regresión Lineal Múltiple y el del Cociente normal, donde indicadores como el coeficiente de Pearson define el uso de uno u otro método.

Los datos recolectados son bastante confiables por el mecanismo de “balde basculante” que utiliza Onset (2010). Además, los equipos fueron calibrados por su distribuidor en Colombia InSak SAS, y fueron ubicados en zonas donde no se vieran afectados por el sonido o vibraciones por el paso de vehículos.

4.5.2 Estimación de la precipitación media

Para conocer las precipitaciones anuales de la cuenca, diarias, mensuales y estacionales, se suele utilizar el método de la media aritmética y el método de los Polígonos de Thiessen, para analizar diferencias y conocer más las características pluviométricas de la cuenca experimental (Torreño & Schnabel, 2017). Sin embargo otros autores utilizan el método de las Isoyetas por ser el más adecuado en casos con fuertes contrastes en los registros de precipitación debido a la topografía y permite la elaboración de una cartografía que expresa los gradientes de precipitación en la zona estudiada (Ceballos, 1998; Torreño & Schnabel, 2017).

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

Para efectos de esta investigación se utilizó el programa Microsoft Office Excel para comparar los métodos de cálculo de precipitación media como son los de Media Aritmética y el Método de los Polígonos de Thiessen. Para analizar cuál es el comportamiento de las precipitaciones bajo el supuesto de que estas se distribuyen homogéneamente en todo el territorio de Cartagena de Indias, la escala temporal fue diaria ($P_{24h-Max}$) para la serie de tiempo histórica de los últimos once años (2009 a 2019) y mensual solo para el 2019. De igual forma, se trazó un mapa de isoyetas para la $P_{24h-Max}$ en el 2019 utilizando el programa ArcGis que también se empleó para dividir el territorio en Polígonos de Thiessen.

4.5.3 Ajuste a funciones de distribución

Los datos para cada estación de serie histórica de $P_{24h-Max}$ se ajustaron a las funciones de distribución más usuales en hidrologías como Gamma, Log-normal, Normal, Exponencial y Gumbel, de las que se seleccionó la que se ajustara mejor a los datos a partir de las pruebas Log Verosimilitud, Kolmogorov-Smirnov (KS) y Chi-cuadrado (χ^2). Además, se trazaron graficas cuantil-cuantil (Q-Q) para observar su ajuste visualmente. Con la selección del mejor método se calculó la $P_{24h-Max}$ para diferentes frecuencias, es decir periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años y se compararon con estudios previos.

4.5.4 Análisis estadístico

Para realizar este tipo de análisis se calcularon parámetros estadísticos, principalmente de tipo de medidas de tendencia central y dispersión como media, varianza, desviación estándar y coeficiente de variación para datos de $P_{24h-Max}$ de una misma estación. Por otro lado, para datos entre diferentes estaciones, es decir, una estación x y la estación principal de estudio que es la del Aeropuerto Rafael Núñez, además de calcular las medidas de dispersión y desviación respecto a esta última para las $P_{24h-Max}$, se realizaron graficas comparativas, funciones de tendencia y cálculo de correlación de datos para la información de intensidades.

4.5.5 Interpolación de datos

Se analizaron los datos de precipitación máxima anual diaria ($P_{24h-Max}$) para diferentes periodos de retorno (T) y el 2019 e intensidades máximas para el 2019 utilizando el método de Kriging Ordinario (KO) para trazar Isoyetas por medio del software ArcGis Desktop que igualmente se utilizó para analizar el método de Polígonos de Thiessen. De esta manera, se estimaron los datos medios entre estaciones instaladas y se generaron mapas de distribución



Impacto de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias



espacial de la lluvia y de error estándar respecto a la información del Aeropuerto Rafael Núñez. Esta información se comparó con los mapas de isoyetas del plan maestro de drenajes pluviales de Cartagena de Indias que se hizo con base a información de la estación Rafael Núñez.

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Estimación de la precipitación media en Cartagena de Indias

A continuación se estima la precipitación media por los métodos de media aritmética y de polígonos de Thiessen a escalas de tiempo mensual y diaria ($P_{24h-Max}$) para una serie histórica de los últimos once años (2009 a 2019) y el año 2019. De igual forma, se utilizó el método de Isoyetas para observar su distribución espacial en el territorio a escala diaria para el 2019.

5.1.1 Métodos de Media aritmética y Polígonos de Thiessen

Para la serie histórica se compararon los datos de las estaciones del IDEAM (Aeropuerto Rafael Núñez, Santa Ana, Bayunca, Arjona, Cañaveral y Porvenir) por los métodos de Media aritmética y Polígonos de Thiessen. En la Figura 12, se comparan los resultados obtenidos por cada método para cada año de la serie estudiada. En general se observa que la diferencia entre estos es mínima, donde la diferencia máxima se presentó en el 2011 con un valor de 6.81mm y la desviación máxima del 7% para los años 2009, 2015 y 2019, demostrando que la distribución de las precipitaciones máximas es aparente y aproximadamente uniforme. En la Figura 13(a) se distribuyó el territorio en Polígonos de Thiessen con las estaciones históricas.

Con los datos de $P_{24h-Max}$ recopiladas en el año 2019 de cada estación (IDEAM, CIOH e instaladas por la UDC) se compararon sus desviaciones respecto a la media aritmética y respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez y además sus áreas de influencia como se observa en la Tabla 10. Se encontró que para ambos casos las estaciones que están más desviadas son Santa Ana, Bayunca, UTB, Vivarium y Mamonal que superaron el $\pm 20\%$ de desviación. Por otro lado, las estaciones UNAD, UDC y Tierra Bomba presentaron valores semejantes a la Media, con valores de desviación inferiores a $\pm 10\%$; y las estaciones Arjona, y Tierra Bomba presentaron menos desviación respecto a Aeropuerto Rafael Núñez. Además, la Tabla 10 incluye la información necesaria para calcular la precipitación media por los métodos de media aritmética y polígonos de Thiessen que, al compararlos se obtuvo que el método de Thiessen superó a la Aritmética en 21.73 mm. Esta información se sostiene con el análisis estadístico realizado para las $P_{24h-Max}$ donde se encontraron altos índices de desviación estándar (32.13mm), de coeficiente de variación (46.47) y un rango muy amplio de datos (126.4mm) para ser del mismo año confirmando la existencia de



variación de la lluvia en la ciudad. Este análisis se realizó igualmente para precipitaciones mensuales como se observa en la Tabla 11 donde, la diferencia entre los métodos disminuye notablemente por lo que realizar este tipo de análisis a escala mensual puede no ser tan representativo. En la Figura 13(b) se observa la distribución del territorio en Polígonos de Thiessen.

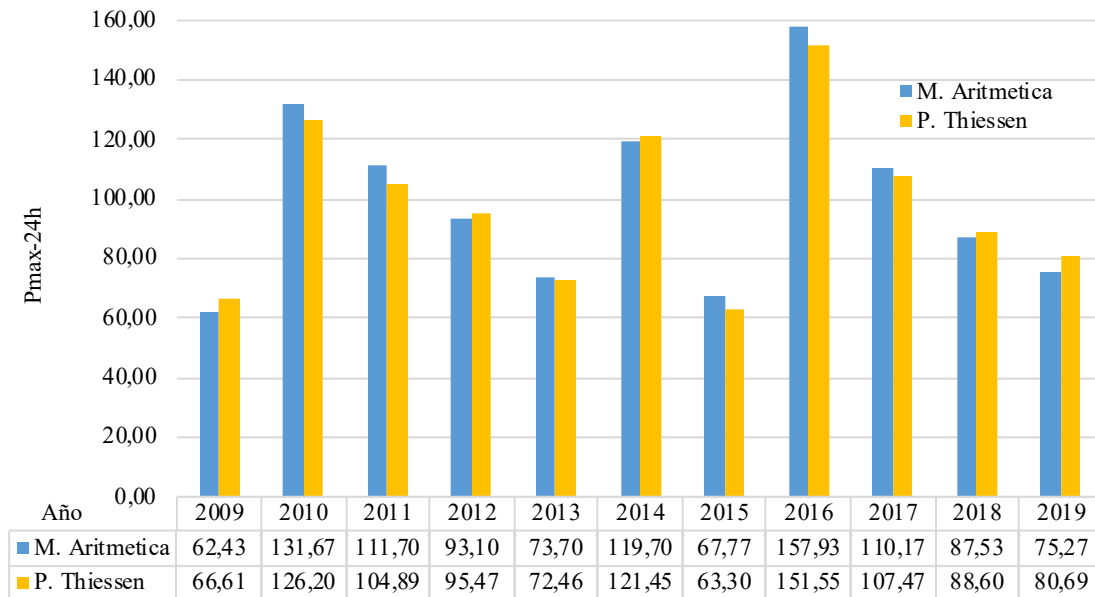


Figura 12. Comparación de precipitación media por los métodos de Media Aritmética y Polígono de Thiessen para Pmax-24h de la serie 2009-2019

$$P_{media}(Aritmética) = \frac{689.93 \text{ mm}}{10} = 68.99 \text{ mm}$$

$$P_{media}(Thiessen) = \frac{53210.93 \text{ km}^2 \times \text{mm}}{586.49 \text{ km}^2} = 90.73 \text{ mm}$$

$$P_{media}(Aritmética) - P_{media}(Thiessen) = -21.73 \text{ mm}$$

$$Desviación.M = \left| \frac{-21.73 \text{ mm}}{68.99 \text{ mm}} \right| \times 100 = 32\%$$

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

Tabla 10. Resumen de Pmax-24h 2019, desviaciones y área aferente de cada estación

Estación	Pmax 24h	Desviación respecto a la media Aritmética	Desviación respecto al aeropuerto R.N	A (km²)	Pi*Ai
CIOH	56.93*	-17%	-28%	7.26	413.35
Apto R.N	78.80*	14%	0%	58.05	4574.17
Santa Ana	50.00*	-28%	-37%	94.73	4736.34
Bayunca	97.00*	41%	23%	108.02	10477.55
UNAD	66.20*	-4%	-16%	10.39	687.70
Arjona	85.00	-	8%	0.00	0.00
Cañaveral	58.20	-	-26%	0.14	8.33
UDC	62.80*	-9%	-20%	27.20	1708.03
UTB	26.80*	-61%	-66%	43.38	1162.65
Turbaco	64.40	-	-	1.54	99.34
Vivarium	151.80*	120%	93%	177.30	26914.50
Tierra Bomba	74.20*	8%	-6%	19.33	1434.59
Mamonal- Yara	25.40*	-63%	-68%	39.15	994.38
Total	689.93¹	-	-	586.49	53210.93

¹ Se tienen en cuenta solo las estaciones que están en el territorio, marcados con (*)

Tabla 11. Comparación entre las precipitaciones mensuales, determinadas con la media aritmética y polígonos de Thiessen y su diferencia.

Año	Aritmética (mm)	Thiessen (mm)	Aritmética -Thiessen (mm)
2019-10	8.42	9.74	-1.32
2019-11	6.09	5.06	1.03
2019-12	0.28	0.12	0.16

La Figura 13 presenta la división del territorio en Polígonos de Thiessen para diferentes períodos de tiempo. Se observa una notable diferencia entre estos en donde, para años previos al 2019 en la Figura 13 (a), el territorio se divide principalmente en tres partes, siendo las estaciones dominantes Bayunca, Aeropuerto Rafael Núñez y Santa Ana. Por otro lado, para el 2019, en la Figura 13 (b) donde se incluyeron las estaciones instaladas por la Universidad de Cartagena donde



Impacto de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias



se observa que la división resultó ser más uniforme y mejor distribuida, sobre todo en la zona urbana. Esta desproporcional división del territorio puede repercutir en los cálculos de la precipitación media como se observó anteriormente para el año 2019 que se encontró que la desviación estándar de la precipitación media puede pasar del 7% al 32% dependiendo de la distribución del territorio.

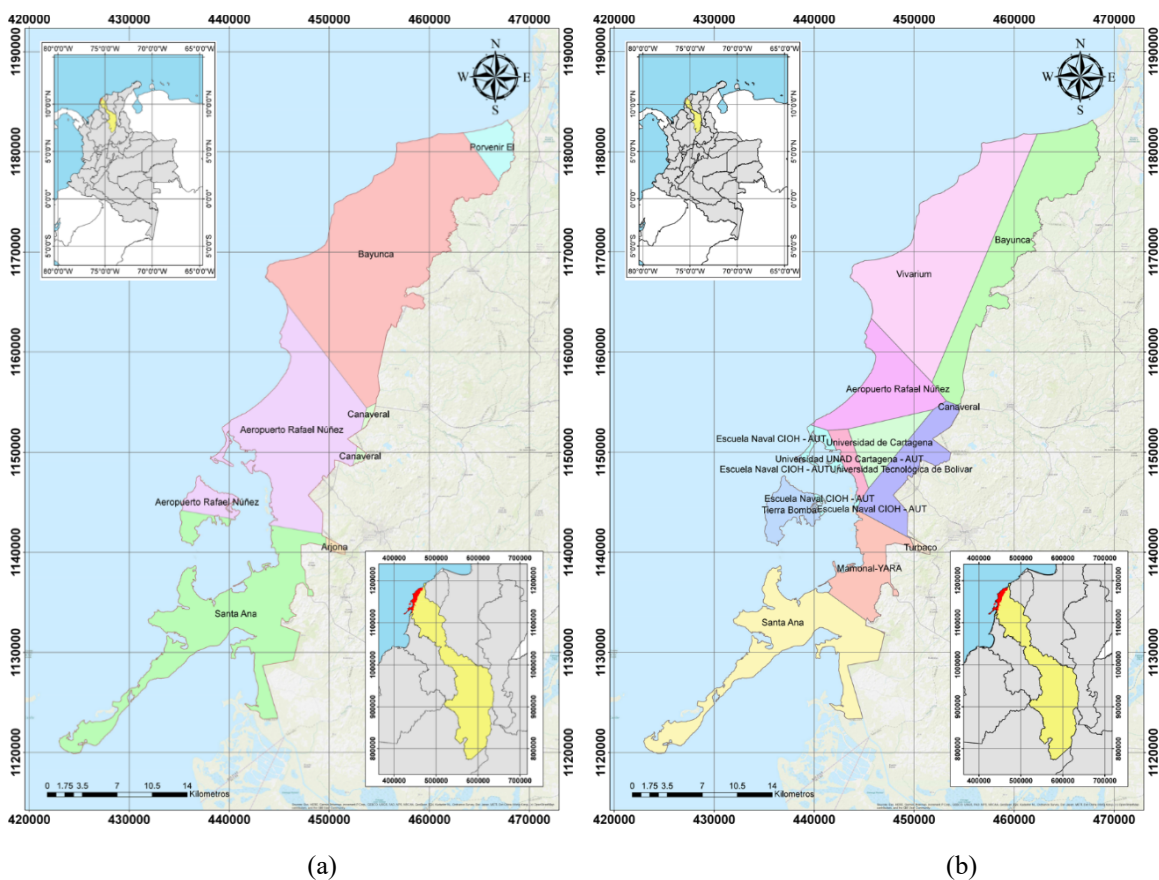


Figura 13. División de la superficie de Cartagena de Indias en Polígonos de Thiessen. (a) para la serie histórica (2009-2019). (b) para el 2019.

5.1.2 Método de Isoyetas

Con la información de $P_{24h-Max}$ que se encuentra resumida en la Tabla 10, para el 2019 se trazó un mapa de isoyetas como el de la Figura 14, donde se observa que la precipitación no se distribuye tan homogéneamente como se suele creer, concentrándose esta en la parte Norte del territorio cercano a la costa y distribuyéndose hacia el Sur y el Este. De este modo, se comprueba

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

que existe una variabilidad espacial de la lluvia en el territorio, idea que se sostiene con los cálculos realizados anteriormente de las medidas de dispersión para la precipitación media.

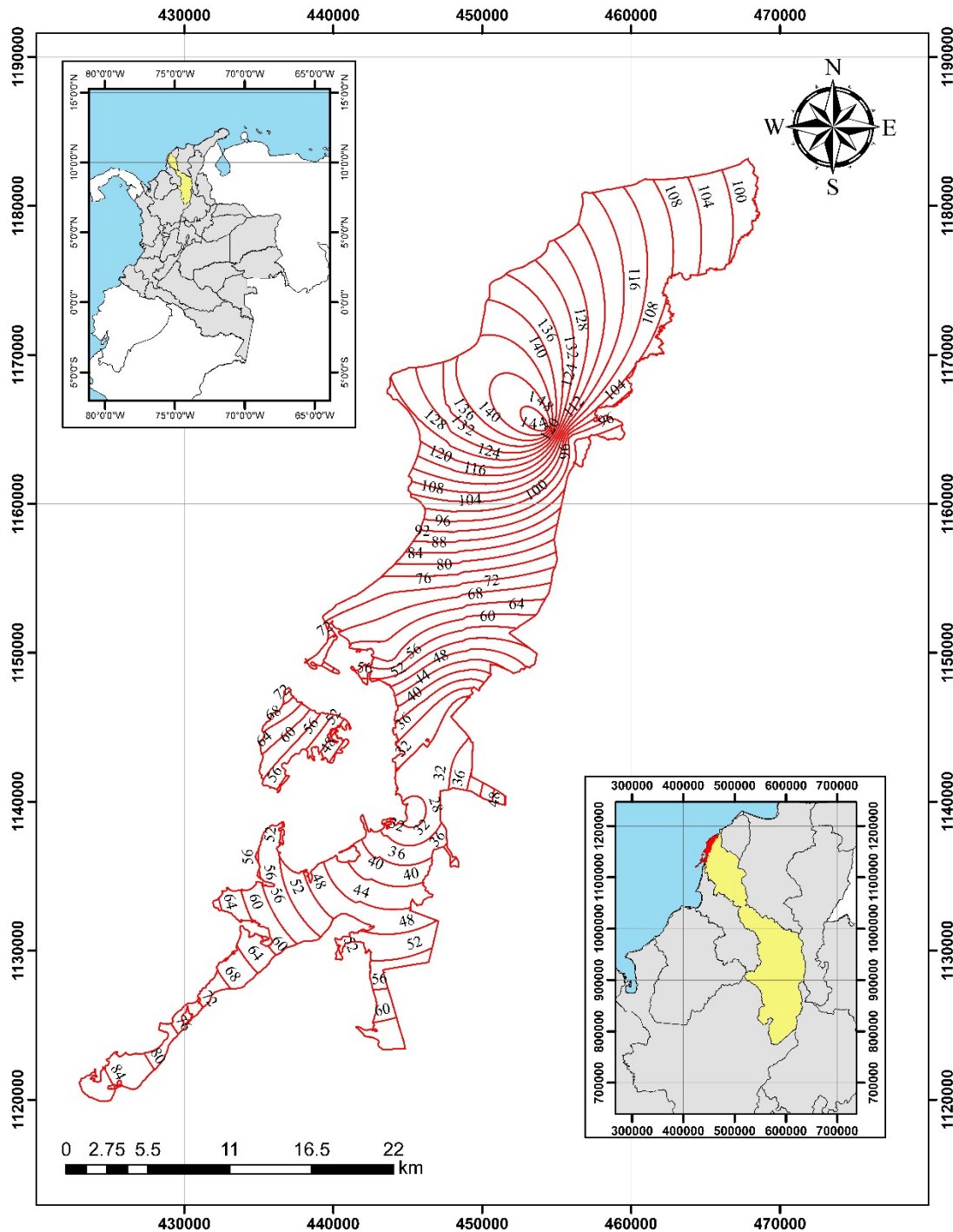


Figura 14. $P_{24h-max}$ 2019. Método de ajuste Kriging Ordinario



5.2 Serie de tiempo multianual de precipitación máxima en 24h

Las Figuras 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 y 22 muestran los diagramas de dispersión de los datos de $P_{24h-Max}$ en diferentes series de tiempo y las líneas de tendencia para las estaciones Aeropuerto Rafael Núñez, Santa Ana, Bayunca, Arjona, Cañaveral, Rocha, Berrugas y El Porvenir respectivamente. De estas se puede analizar que para las estaciones Rafael Núñez, Santa Ana y Rocha, la tendencia de la $P_{24h-Max}$ es creciente con el tiempo; caso contrario para Bayunca, Arjona, Cañaveral, Berrugas y El Porvenir. Su diferencia indica que existe una posible variabilidad espacial de la lluvia en el territorio y los eventos de lluvia se empiezan a concentrar en lugares específico lo que tendría un alto impacto en los diseños de ingeniería.

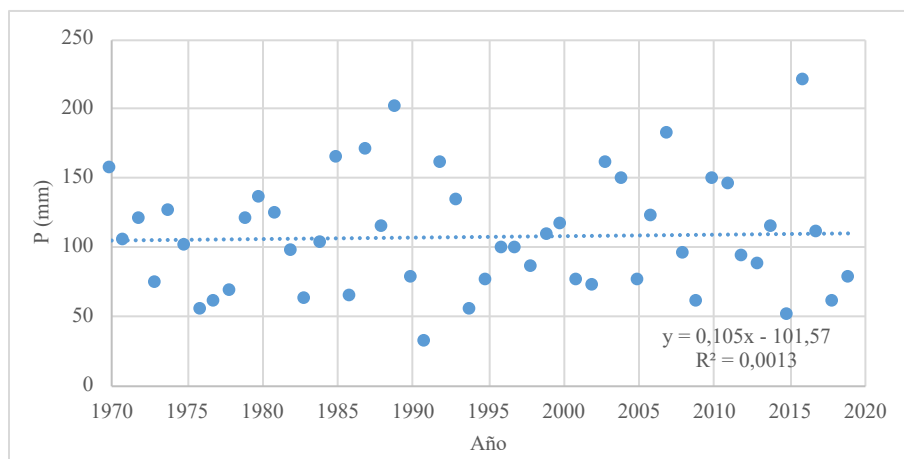


Figura 15. $P_{24h-Max}$ de la estación Rafael Núñez para la serie 1970-2019

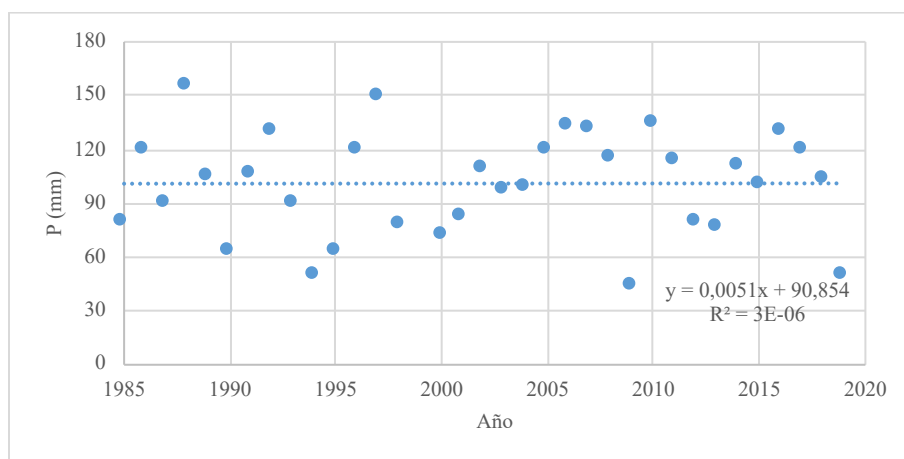


Figura 16. $P_{24h-Max}$ de la estación Santa Ana para la serie 1985-2019

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

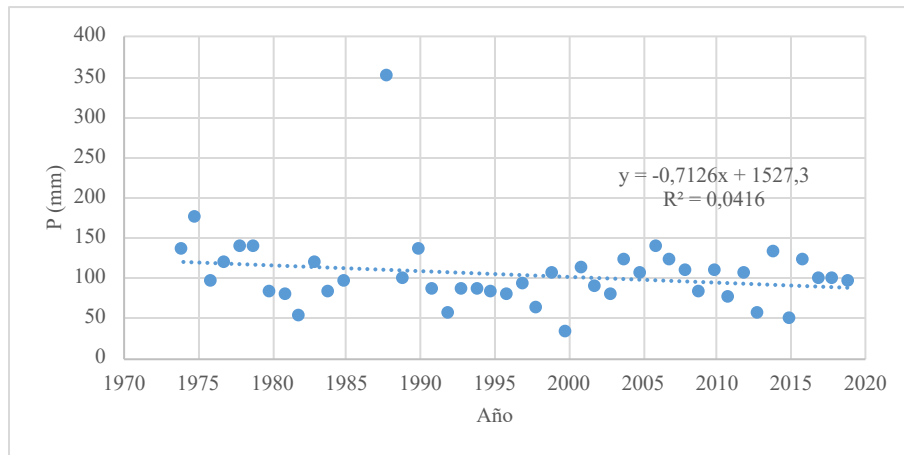


Figura 17. P_{24h-Max} de la estación Bayunca para la serie 1974-2019

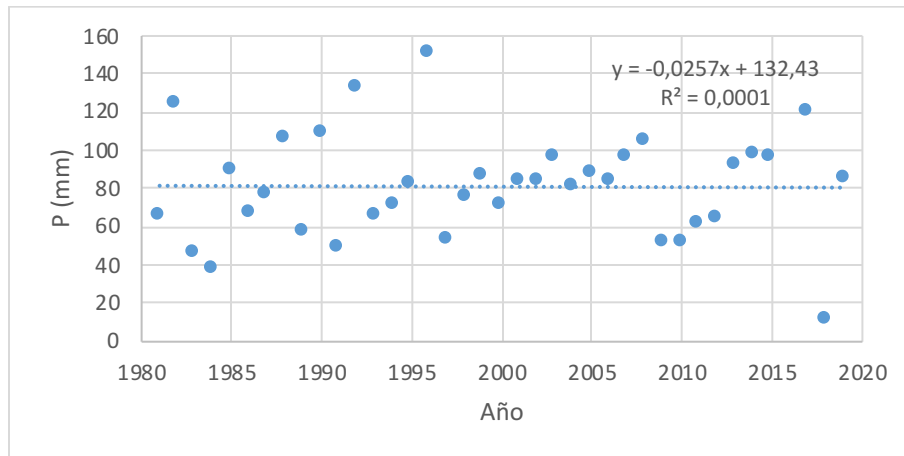


Figura 18. P_{24h-Max} de la estación Arjona para la serie 1981-2019

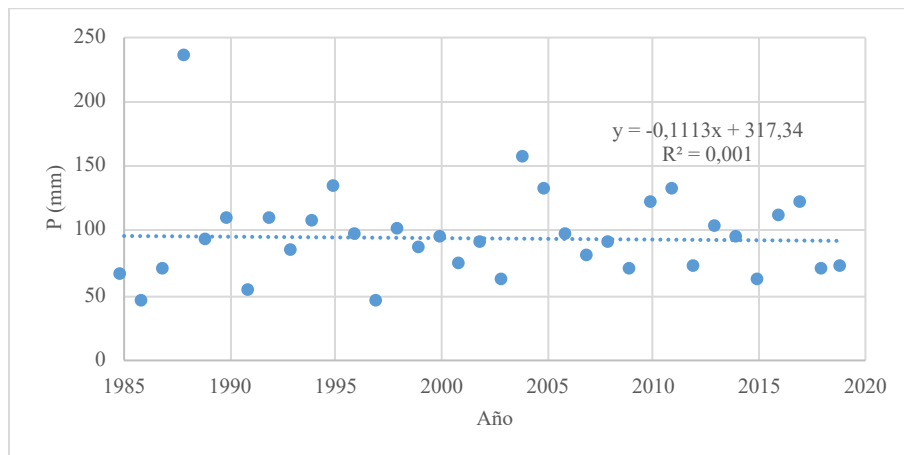


Figura 19. P_{24h-Max} de la estación Cañaverl para la serie 1985-2019



Impacto de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias

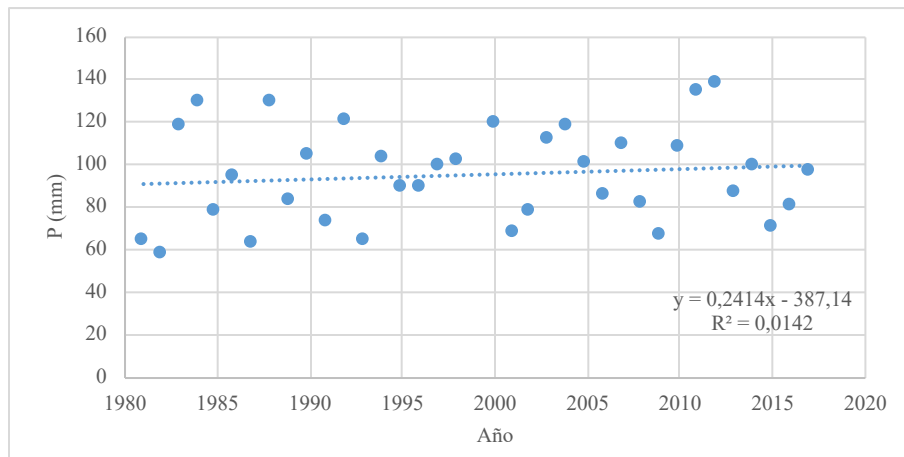


Figura 20. $P_{24h-Max}$ de la estación Rocha para la serie 1981-2017

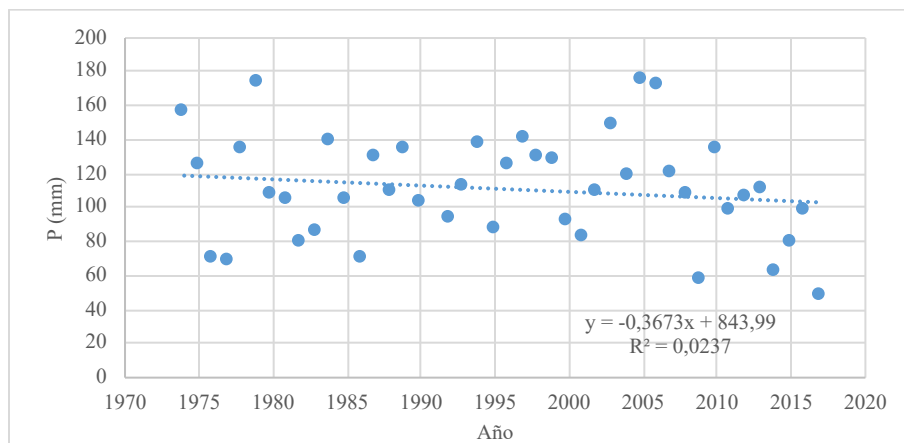


Figura 21. $P_{24h-Max}$ de la estación Berrugas para la serie 1974-2017

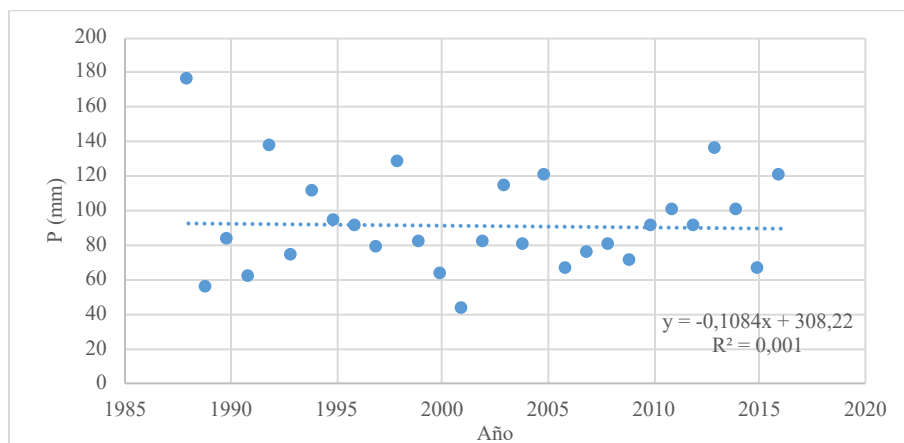


Figura 22. $P_{24h-Max}$ de la estación El Porvenir para la serie 1988-2016

5.3 Ajuste a funciones de distribución acumulativa y análisis de frecuencia

El análisis estadístico de los datos de las Figuras 15 a 22 se resume en la Tabla 12 donde se observa que el promedio de las $P_{24h-Max}$ de las estaciones se encuentran alrededor de 100 mm a excepción de la estación Arjona que está 20 mm por debajo. Por otro lado, se observa un gran contraste de las medidas de dispersión para las estaciones Bayunca y Rocha, que tienen el rango más amplio y más reducido de datos respectivamente y su influencia se refleja en la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Tabla 12. Resumen estadístico para precipitación máxima anual en 24h de las estaciones

Estación	Rafael Núñez	Santa Ana	Bayunca	Arjona	Cañaverl	Rocha	Berrugas	El Porvenir
Recuento	50	34	44	40	35	36	43	29
Promedio	107.89	101.03	104.20	79.48	94.48	95.45	111.02	91.26
Desviación Estándar	41.85	28.54	47.37	28.98	36.04	22.24	30.94	29.05
Coefficiente de Variación	38.79%	28.25%	45.46%	36.47%	38.14%	23.3%	27.87%	31.83%
Mínimo	32.5	45.0	32.5	11.0	44.0	59	48	42
Máximo	222.0	156.0	350.0	151.3	235.0	139	175	175
Rango	189.5	111.0	317.5	140.3	191.0	80	127	133
Sesgo Estandarizado	1.81	-0.50	8.90	-0.23	4.28	0.49	0.33	2.00
Curtosis Estandarizada	0.04	-0.69	22.52	1.02	6.90	-1.11	-0.41	1.17

Los datos de las series de cada estación se compararon con cinco funciones de distribución más usuales en hidrología, y se seleccionó la que mejor se ajustó según los métodos de Log Verosimilitud, Kolmogorov-Smirnov (KS) y Chi-cuadrado (χ^2) como se observa en la Tabla 13 donde se organizaron las funciones en orden decreciente de acuerdo al ajuste del método Log Verosimilitud para cada estación. Los otros dos métodos son utilizados como decisivos para la selección de la función, y se señala la función elegida como la mejor.



En general, la función que no se ajustó en ninguno de los casos fue la exponencial, seguida de Log-Normal que solo se ajustó en el 13% de las funciones para la prueba x^2 , por otro lado, las funciones que presentaron mejor ajuste fueron Gamma y Normal a tal punto de distribuirse los resultados entre estas dos. La función KS presentó un mayor número de hipótesis nulas aceptadas (80%) contrario a x^2 que solo el 40% de los casos cumplieron. Para el caso de la estación Bayunca, que se seleccionó la función Gamma a pesar de no cumplir con el ajuste de x^2 , se debe a que el orden de decisión en el cumplimiento fue primero Log Verosimilitud, luego KS y finalmente x^2 lo que se debió a la naturaleza de la prueba en la agrupación de los datos que puede repercutir en los resultados (Naghattini, 2016). De igual forma, la discrepancia del resultado con su valor límite de aceptación no es mucha: solo excedió en un 40%; se realizó además, una comparación entre las funciones Gamma y Gumbel (que sería la que mejor se ajustaría según sus resultados) encontrándose una diferencia mínima, esto mismo se hizo para la función Log-Normal, pero los resultados fueron incoherentes, a tal punto de que al representarlos como en la Figura 20, los datos comenzaron siendo los menores y terminan siendo mayores respecto de los demás ajustes, es decir un rango demasiado alto. El mismo experimento con la función Log-Normal se realizó para las estaciones Cañaveral, Berrugas y El Porvenir, y los resultados fueron igual de incoherentes que en la estación Bayunca.

La Figura 23 presenta un conjunto de gráficas Q-Q para cada estación indicada donde se aprecia la relación casi lineal entre los datos de la función de mejor ajuste y la estación respectiva, esto señala que la función seleccionada representa de mejor manera la distribución de datos de cada una. El conjunto de puntos de la estación Aeropuerto Rafael Núñez tendieron a parecerse a la línea recta de la función identidad por lo que presentó menos discrepancia de datos. Por otro lado, las estaciones Bayunca, Cañaveral y El Porvenir presentaron un valor que se encuentra muy por fuera de la línea recta de la función identidad. Esto ocurrió porque presentaron en la serie histórica datos muy por encima y alejados de los demás en el año 1988 para las tres, coincidentemente.

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

Tabla 13. Comparación de distribuciones alternas para cada estación

Estación	Distribución	Parámetros Est.	Log Verosimilitud	¹ KS D/ d	² $\chi_c^2(0.95)/\chi_p^2$
Rafael Núñez	Gamma	2	-254.712	0.3814	0.3352
	Log-normal	2	-255.153	0.3010	0.5881
	Normal	2	-257.153	0.4595	0.5189
	Exponencial	1	-284.057	1.7200	2.6288
	Gumbel	2	-388.852	0.3767	0.4606
Santa Ana	Normal	2	-161.698	0.3586	0.8639
	Gamma	2	-162.86	0.5548	1.1926
	Log-normal	2	-164.065	0.6452	14.8245
	Exponencial	1	-190.925	1.7890	4.4123
	Gumbel	2	-273.379	0.6038	3.3229
Bayunca	Log-normal	2	-220.304	0.6381	3.6681
	Gamma	2	-222.031	0.6067	1.4344
	Normal	2	-231.689	0.8543	101.5530
	Exponencial	1	-248.436	1.7938	3.3822
	Gumbel	2	-318.247	0.5962	0.9615
Arjona	Normal	2	-190.934	0.4110	0.2338
	Gamma	2	-196.045	0.6367	1.2651
	Log-normal	2	-201.801	0.8248	16.6557
	Exponencial	1	-215.018	1.7352	4.7250
	Gumbel	2	-271.046	0.5514	8.7994
Cañaveral	Log-normal	2	-169.522	0.4090	15.3525
	Gamma	2	-170.349	0.3667	0.3046
	Normal	2	-174.625	0.5871	1.1494
	Exponencial	1	-194.194	1.8300	3.8479
	Gumbel	2	-264.440	0.3486	0.1959
Rocha	Gamma	2	-161.867	0.3919	0.2881
	Lognormal	2	-162.009	0.4462	12.3503
	Normal	2	-162.255	0.3681	0.4339
	Exponencial	1	-200.111	2.1952	3.0074
	Gumbel	2	-312.882	0.5176	0.3831
Berrugas	Normal	2	-208.097	0.3276	0.1682
	Gamma	2	-208.414	0.4229	0.1005
	Lognormal	2	-209.383	0.5167	7.5161
	Exponencial	1	-245.519	1.8719	5.0434
	Gumbel	2	-341.9	0.4762	0.4279
El Porvenir	Lognormal	2	-136.352	0.3908	22.5032
	Gamma	2	-136.58	0.4725	0.2692
	Normal	2	-138.348	0.5925	0.3728
	Exponencial	1	-159.897	1.7200	4.4580
	Gumbel	2	-233.005	0.2933	0.3315

¹ Los resultados presentados son la relación entre la prueba Kolmogorov-Smirnov y su valor límite “d” con un nivel de significancia de 0.05, de tal forma que si excede la unidad, se rechaza la hipótesis nula.

² Los resultados presentados son la relación entre la prueba ji-cuadrado y su valor límite con un nivel de significancia de 0.05, de tal forma que si excede la unidad, se rechaza la hipótesis nula.



Impacto de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias

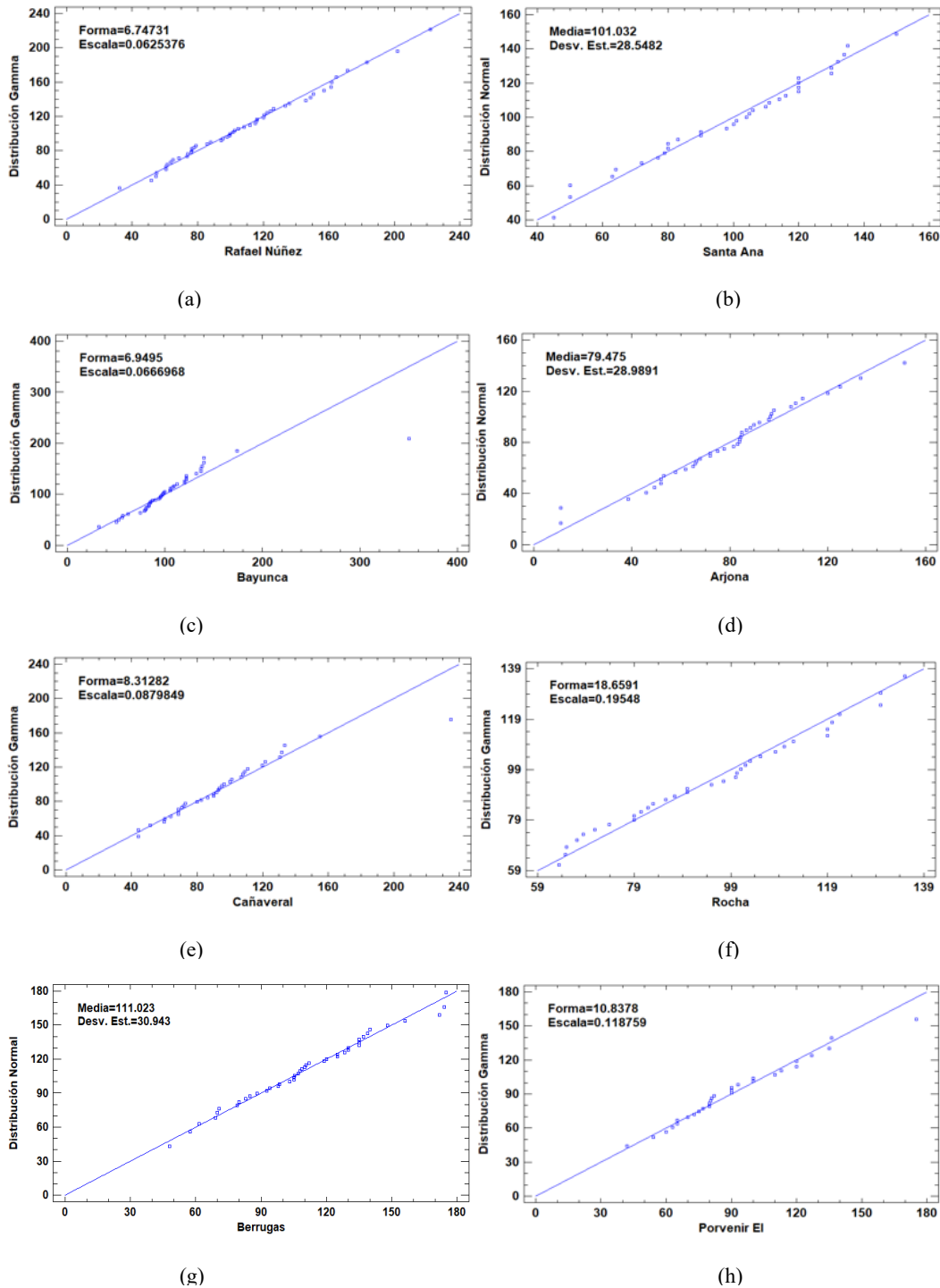


Figura 23. Gráficas de probabilidad de la mejor distribución Vs estación respectiva. (a) Rafael Núñez, (b) Santa Ana, (c) Bayunca, (d) Arjona, (e) Cañaveral, (f) Rocha, (g) Berrugas, (h) El Porvenir

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

Con la función que mejor se ajustó a los datos de cada estación se determinó la $P_{24h-Max}$ para cada frecuencia o diferentes periodos de retorno (T) como se presenta en la Tabla 14 donde se incluye además, un resumen de la función de mejor ajuste.

Tabla 14. $P_{24h-Max}$ para diferentes periodos de retorno en cada estación y mejor función de ajuste

Estación	Función de ajuste	Periodo de retorno, T (años)							
		2	3	5	10	20	25	50	100
Aeropuerto Rafael Núñez	Gamma	102.53	121.04	140.64	163.79	184.66	191.04	210.09	228.21
Santa Ana	Normal	101.03	113.33	125.06	137.62	147.99	151.01	159.66	167.45
Bayunca	Gamma	97.11	118.03	140.58	167.63	192.33	199.93	222.74	244.59
Arjona	Normal	78.71	91.13	103.01	115.72	126.22	129.27	138.02	145.90
Cañaveral	Gamma	89.94	105.88	122.72	142.60	160.49	165.96	182.27	197.78
Rocha	Gamma	93.73	103.53	113.49	124.84	134.74	137.72	146.48	154.66
Berrugas	Normal	111.02	124.35	137.07	150.68	161.92	165.19	174.57	183.01
El Porvenir	Gamma	88.20	101.04	114.38	129.90	143.69	147.88	160.30	172.02

Autores como González-Álvarez et al. (2019) realizaron ajustes para las estaciones de la Región Caribe, que algunos se recopilan en la Tabla 15, el autor señala que las funciones que mejor se ajustan a la frecuencia datos de la región caribe colombiana son GEV y Gumbel. Al comparar los datos de la Tabla 8 respecto a los de la Tabla 15 se obtuvo que las estaciones que más se asemejan son la de Santa Ana y Cañaveral con desviaciones estándar máxima de 7% y 6% para los periodos de retorno de 100 y 5 años respectivamente. Por otro lado, para el caso de Bayunca se encontraron desviaciones de hasta un 47% para 100 años de frecuencia.

Tabla 15. $P_{24h-Max}$ para diferentes periodos de retorno en las estaciones indicadas

Estación	Función de ajuste	Periodo de retorno, T (años)						
		2	5	10	20	25	50	100
Santa Ana	GEV	101.1	124.7	135.9	144.3	146.6	152.5	157.2
Bayunca		100.5	127.6	140.6	150.5	153.5	160.5	166.3
Cañaveral		86.6	115.7	136.4	157.2	164.1	185.8	208.5

Fuente: González-álvarez et al., 2019



Impacto de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias



Estudios de Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias (2009) realizaron análisis hidrometeorológicos con ocho estaciones cercanas al territorio usando las funciones de ajuste Gumbel y Logarítmica para calcular la probabilidad de ocurrencia de las $P_{24h-Max}$, los resultados se resumen en la Tabla 16, donde se observa que ambos métodos son muy semejantes, los resultados de las estaciones Cañaveral, Santa Ana, Bayunca, Arjona, Rocha y Aeropuerto Rafael Núñez se encuentran desviadas respecto a Gumbel con valores de 13%, 9%, 9%, 8%, 6% y 1% respectivamente. Comparando los resultados de la Tabla 16 respecto los de la Tabla 14, a pesar de ser bastante semejantes, se obtiene que la desviación para la función Gumbel es directamente proporcional respecto al periodo de retorno, iniciando sus valores significativos (del orden de 14% a 23%) a partir de 25 años hasta 100 años a excepción de la estación Aeropuerto Rafael Núñez que se encuentra una relación inversa (iniciando con 16% hasta 7%) y la estación Cañaveral, que obtuvo la menor desviación (8%).

Por otra parte, se encontró una relación directamente proporcional entre la tendencia de los datos de $P_{24h-Max}$ (pendiente de las Figuras 15 a 22) y la probabilidad de ocurrencia de un evento, es decir, para una pendiente positiva de datos, con el pasar de los años cierto evento aumentará su probabilidad de ocurrencia y viceversa, de este modo, un evento que tuvo un periodo de retoro de T años hace x años en el pasado, puede tener en el presente periodos de retorno menor o mayor. Las estaciones que cumplieron claramente con lo afirmado anteriormente son Aeropuerto Rafael Núñez, Arjona y Cañaveral, por otro lado, la estación Rocha fue muy neutra y las estaciones Bayunca y Santa Ana van en contra.

Los resultados de la Tabla 14 se graficaron como se presenta en la Figura 24, donde se observa la tendencia de los datos, manteniéndose constante la organización ordinal creciente de las estaciones a lo largo del aumento del periodo de retorno, a excepción de las estaciones Santa Ana y Berrugas que en una frecuencia dada (50 y 25 años respectivamente) son excedidas en cierta medida por las estaciones El Porvenir y Cañaveral respectivamente. De igual forma se aprecia que para períodos de retorno pequeños la diferencia de $P_{24h-Max}$ entre las estaciones es poca pero esta aumenta en la medida que aumenta el período de retorno. A su vez, se observa que los valores máximos se presentan en las estaciones que se encuentran más al Norte magnético y Oeste de Cartagena de Indias, y las menores en la parte más al Este y Sur-Este del territorio, es decir, existe una relación directamente proporcional entre la $P_{24h-Max}$ y la cercanía a la costa.

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

Tabla 16. $P_{24h-Max}$ calculada para diferentes periodos de retorno en cada estación y función de ajuste usada

Estación	Función de ajuste	Periodo de retorno, T (años)						
		2	5	10	20	25	50	100
Aeropuerto	Gumbel	85.77	119.54	141.89	163.34	170.14	191.10	211.90
Rafael Núñez	Logarítmico	89.26	118.28	140.23	162.18	169.25	191.20	213.15
Santa Ana	Gumbel	95.59	125.12	144.68	163.43	169.38	187.71	205.91
	Logarítmico	91.45	122.42	145.85	169.28	176.82	200.25	223.68
Bayunca	Gumbel	90.96	119.85	138.98	157.33	163.15	181.08	198.87
	Logarítmico	86.85	117.10	139.99	162.88	170.24	193.13	216.01
Arjona	Gumbel	78.33	101.88	117.47	132.42	137.17	151.78	166.29
	Logarítmico	74.88	99.58	118.27	136.96	142.98	161.67	180.36
Cañaveral	Gumbel	86.63	120.86	143.51	165.25	172.14	193.38	214.46
	Logarítmico	81.37	118.94	147.37	175.79	184.94	213.37	241.79
Rocha	Gumbel	93.14	115.88	130.94	145.39	149.97	164.09	178.10
	Logarítmico	90.16	113.32	130.84	148.36	154.00	171.52	189.04

Fuente: Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias, 2009

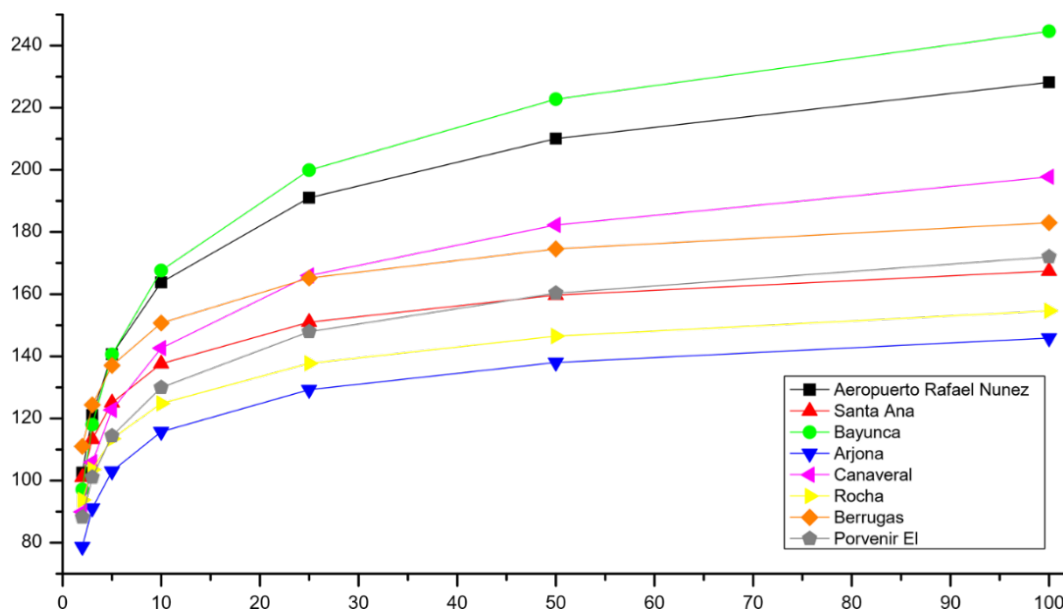


Figura 24. Relación entre las Precipitaciones Máximas anuales en 24h y los periodos de retorno para cada estación

5.3.1 Distribución espacial de $P_{24h-Max}$

Con la información de la Tabla 14, se trazaron mapas interpolados por el método de Kriging Ordinario utilizando el software ArcGIS Desktop que se presentan en las Figuras 28, 29, 30, 31, 32, 33 y 34 para los periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años respectivamente. En estas



Figuras se puede observar el modo en el que la $P_{24h-Max}$ se concentra en las parte Norte sobre las estaciones Aeropuerto Rafael Núñez y Bayunca y disminuyen distribuyéndose hacia el Noreste y Sur de estas. De igual forma, se construyó la Tabla 17 donde se presenta la desviación de cada estación respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez y se identifica que en su mayoría ninguna la excede, a excepción de las estaciones Bayunca a partir de $T=10$ años y Berrugas (pero solo hasta $T=3$ años). Las estaciones El Porvenir, Arjona y Cañaveral son las que se encuentran muy por debajo respecto a los demás resultados.

Con la información de la Tabla 17 se construyeron las Figuras 35, 36, 37 y 38, que corresponden a periodos de retorno de 2, 25, 50 y 100 años respectivamente, donde se observa para el caso de $T=2$ años la desviación se mantiene casi uniforme en todo el territorio con -8% a -9% y presenta puntos donde se concentra en forma de ojos de pescado en las estaciones Aeropuerto Rafael Núñez, Santa Ana y Bayunca, donde disminuye hasta -5% a -0.2% , lo que se presentó debido a que los datos son muy cercanos. Por otro lado, para los casos de $T=25, 50$ y 100 años, la distribución fue bastante semejante encontrando valores mínimos al Norte, y aumentando al Sur, encontrando valores respectivamente de 1.3% a -21% , 2% a -23% , y 2.4% a -25% .

Tabla 17. desviación de la $P_{24h-Max}$ de cada estación respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez

Estación	Función de ajuste	Periodo de retorno, T (años)							
		2	3	5	10	20	25	50	100
Aeropuerto									
Rafael Núñez	Gamma	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Santa Ana	Normal	-0.01	-0.06	-0.11	-0.16	-0.20	-0.21	-0.24	-0.27
Bayunca	Gamma	-0.05	-0.02	0.00	0.02	0.04	0.05	0.06	0.07
Arjona	Normal	-0.23	-0.25	-0.27	-0.29	-0.32	-0.32	-0.34	-0.36
Cañaveral	Gamma	-0.12	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13
Rocha	Gamma	-0.09	-0.14	-0.19	-0.24	-0.27	-0.28	-0.30	-0.32
Berrugas	Normal	0.08	0.03	-0.03	-0.08	-0.12	-0.14	-0.17	-0.20
El Porvenir	Gamma	-0.14	-0.17	-0.19	-0.21	-0.22	-0.23	-0.24	-0.25

La Figura 25 muestra la diferencia entre los diferentes métodos de interpolación. Las isoyetas realizadas por el método de Spline (Figura 25(a) y Figura 25(c)) evidencian que el comportamiento

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

de la lluvia es longitudinal a lo largo del territorio, y muestran inconsistencias. Para el caso de la Figura 25(a) las isolíneas presentan vacíos o grandes áreas sin isolíneas, en la parte Sur mientras que aumentan drásticamente en la parte Norte hasta valores de 810mm. Por otro lado, la Figura 25(b), realizada por el método IDW, presenta la aparición de un pequeño ovalo entre las isolíneas en la parte Norte.

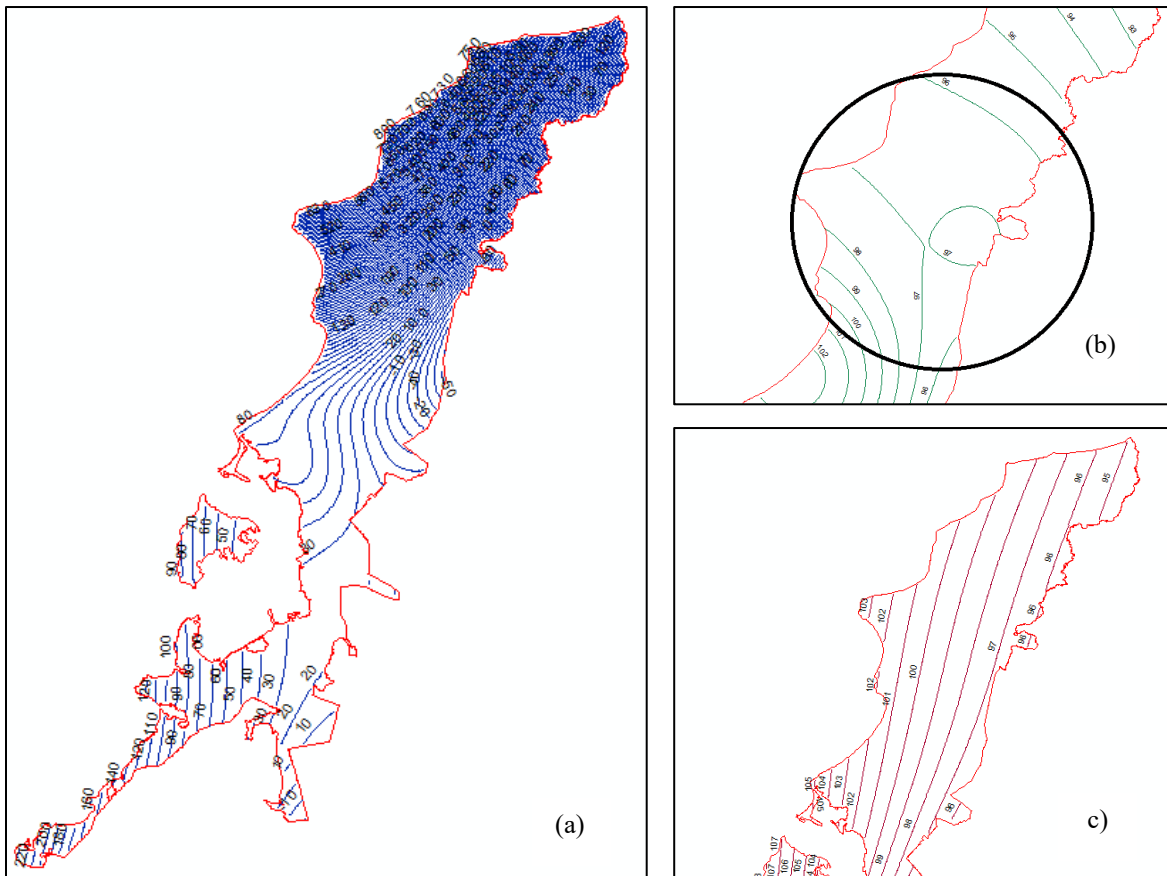


Figura 25. Comparación entre diferentes métodos de interpolación (a) Método de interpolación Spline $P_{24h-Max}$ 2019 (b) Método de interpolación IDW $T=2$ años, (c) Método de interpolación Spline $T=2$ años

Al comparar estos mapas interpolados con los realizados por González-álvarez et al. (2019), de los que se extrae parte de los mapas en la Figura 26 (puesto que estos son a escala regional), con las isoyetas realizadas para $P_{24h-Max}$, se observa que el comportamiento es muy semejante, a pesar de ser realizados con métodos diferentes de interpolación. En los periodos de retorno altos como 25, 50 y 100 años la tendencia de las isolíneas es un poco diferente lo que podría ser por el número de estaciones utilizadas y el área de estudio. Aún así, la tendencia sigue siendo igual.

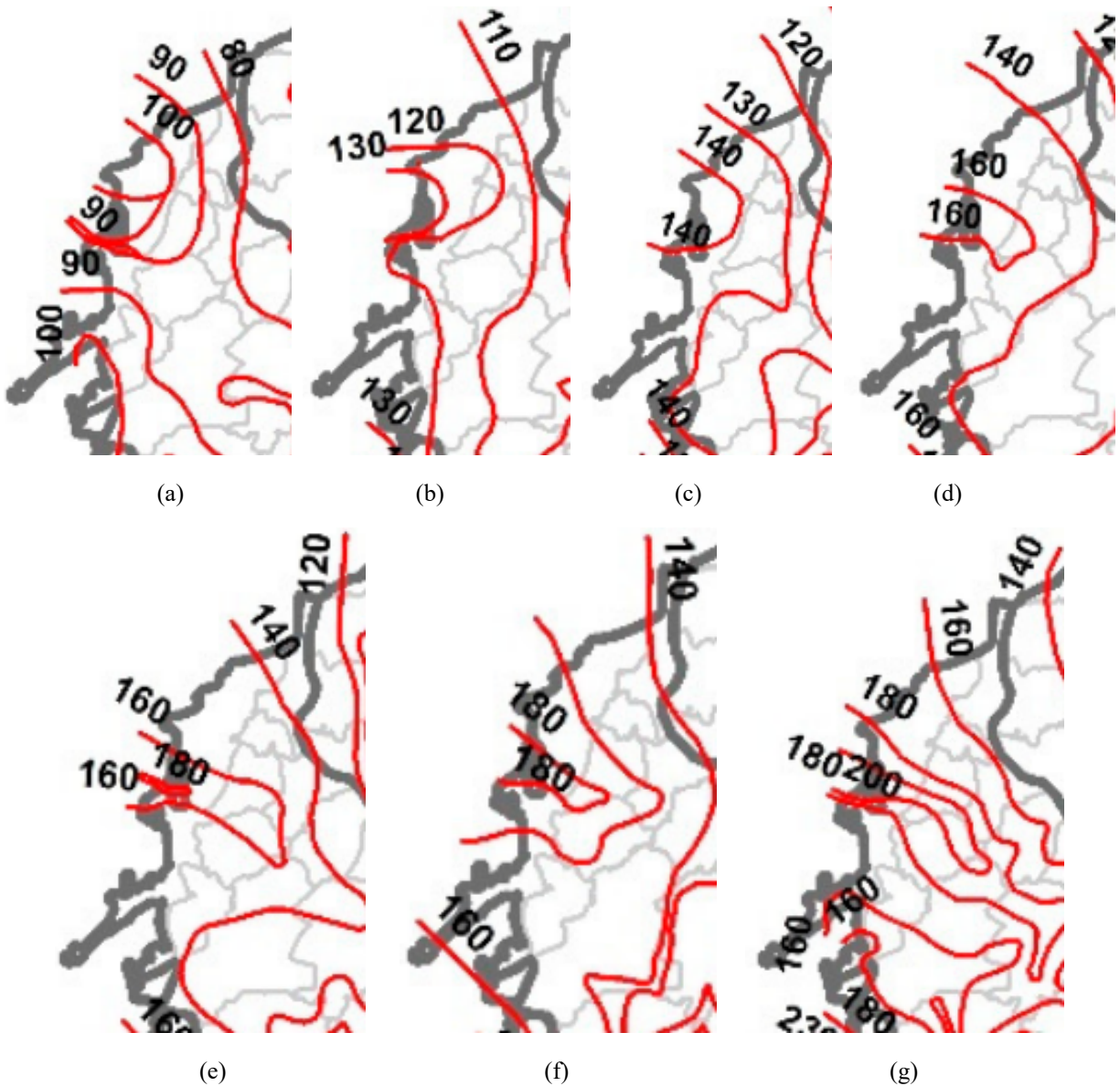


Figura 26. Isoyetas de $P_{24h-Max}$ para diferentes periodos de retorno. (a) 2 años. (b) 5 años. (c) 10 años. (d) 20 años. (e) 25 años. (f) 50 años. (g) 100 años. Métodos de ajuste IDW
Fuente: González-álvarez et al., 2019

5.4 Análisis espacial de Intensidad y Duración para estaciones en Cartagena de Indias

Con la información de las estaciones instaladas de las UDC, CIOH y UNAD (IDEAM) se identificaron las precipitaciones máximas para lluvias de diferentes duraciones, de esta forma se construyó la Tabla 18, donde se presentan las intensidades para diferentes duraciones de lluvia en cada estación. Para el caso de la estación Aeropuerto Rafael Núñez, al no tener datos desagrupados

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

de precipitación o gráficas pluviométricas se utilizó el estudio realizado por Chang Nieto & Bolívar Lobato (1997) donde se puede calcular a partir de un registro de 24h, la precipitación caída en una duración t (hora) menor; así sabiendo la precipitación para cierta duración se conoce la intensidad. Este método fue validado comparando las intensidades calculadas para las $P_{24h-Max}$ de cada T de la Tabla 14 y las intensidades de las curvas IDF mediante el método de regresión lineal simple para que de este modo con una $P_{24h-Max}$ con $T=2$ años se obtuvo la curva ID con el mismo periodo de retorno y así poder comparar con las curvas IDF. Los resultados de las regresiones lineales realizadas se resumen en la Tabla 19 para cada T indicado y la correlación obtenida donde se observa que las funciones se ajustaron bien obtenido como mínimo un 95% de correlación, además de encontrarse una relación inversamente proporcional entre la correlación y el factor lineal obtenido. En la Figura 39 se presenta el ajuste realizado para $T=2$ años y los límites de confianza para un 95% de confianza.

Tabla 18. Intensidades (mm/h) en cada estación para diferentes duraciones de lluvia (min) para el 2019

D (min)	A.Rafael Núñez	CIOH- DIMAR	UNAD	UDC	Tierra Bomba	Vivarium	UTB	Mamonal	Turbaco
5	70.41	-	-	151.20	139.20	122.40	76.80	105.60	96.00
10	66.55	158.70	154.80	145.20	134.40	110.40	63.60	85.20	84.00
15	63.61	-	-	135.20	124.80	96.80	63.20	64.80	80.80
30	56.14	100.54	120.40	110.00	114.40	86.40	42.00	40.80	63.20
45	49.73	-	-	82.13	89.33	81.87	29.60	29.33	46.13
60	44.14	56.15	66.00	62.60	70.40	77.20	22.80	22.20	35.60
90	35.03	37.67	44.13	41.87	47.20	65.60	15.73	14.80	24.00
120	28.33	28.28	33.10	31.40	35.40	52.40	12.00	11.10	18.00
240	17.34	14.14	16.55	15.70	17.70	37.05	6.10	5.55	9.05
360	12.56	9.45	11.03	10.47	12.37	25.30	4.47	3.70	6.03



Tabla 19. Resumen de regresión lineal simple de intensidades de curva IDF y las estimadas por Chang Nieto & Bolívar Lobato (1997)

T	a (IDF/estimado)	r ²	r
2	1.27	0.94	0.97
3	1.19	0.95	0.98
5	1.12	0.96	0.98
10	1.07	0.97	0.99
25	1.05	0.98	0.99
50	1.03	0.99	0.99
100	1.02	0.99	0.99

Las intensidades estimadas para la estación Rafael Núñez se corrigieron con la función de ajuste obtenida en la regresión lineal simple para el periodo de retorno de 2 años. La selección de este periodo de retorno obedece a que: a) las $P_{24h-Max}$ presentada en el 2019 representa un periodo de retorno de 2 años en la estación Aeropuerto Rafael Núñez a partir de la información de la Tabla 14 b) el año de recolección de lluvia se encuentra en un fenómeno de Niño débil (Golden Gate Weather Services, 2019) se notó en las precipitaciones encontradas en todas las estaciones por estar por debajo de la media; c) las intensidades estimadas del Aeropuerto Rafael Núñez para el 2019 se asemejan a las de las curvas IDF para el periodo de retorno de 2 años. En la Tabla 20 se presentan las intensidades corregidas del Aeropuerto Rafael Núñez ajustado para el año estudiado y su diferencia con cada una de las estaciones instaladas. Se encontró que las estaciones CIOH-DIMAR, UNAD, UDC y Tierra Bomba se encuentran por encima de la estación Aeropuerto Rafael Núñez para lluvias menores o iguales a una hora, para Mamonal lluvias menores a 10 min, para Turbaco menores a 5 min y por otro lado, la estación UTB no la superaron en ninguna de las duraciones y la estación Vivarium la superó en todas las duraciones. De igual forma, se encontró cuál es la relación lineal de cada una de las estaciones respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez, como se presenta en la Tabla 21, donde las correlaciones encontradas superaron el 80%.

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

Tabla 20. Diferencia entre Intensidades de la estación Aeropuerto Rafael Núñez y las registradas por cada estación para diferentes duraciones de lluvia (min) para el 2019

D (min)	R.N corregida	CIOH- DIMAR	UNAD	UDC	Tierra Bomba	Vivarium	UTB	Mamonal	Turbaco
5	89.57			-61.63	-49.63	-32.83	12.77	-16.03	-6.43
10	84.65	-74.05	-70.15	-60.55	-49.75	-25.75	21.05	-0.55	0.65
15	80.91			-54.29	-43.89	-15.89	17.71	16.11	0.11
30	71.41	-29.13	-48.99	-38.59	-42.99	-14.99	29.41	30.61	8.21
45	63.26			-18.87	-26.07	-18.61	33.66	33.93	17.13
60	56.14	-0.01	-9.86	-6.46	-14.26	-21.06	33.34	33.94	20.54
90	44.56	6.89	0.43	2.69	-2.64	-21.04	28.83	29.76	20.56
120	36.03	7.76	2.93	4.63	0.63	-16.37	24.03	24.93	18.03
240	22.06	7.92	5.51	6.36	4.36	-14.99	15.96	16.51	13.01
360	15.98	6.53	4.95	5.51	3.61	-9.32	11.51	12.28	9.95

Tabla 21. Correlación y factor lineal para las intensidades entre las estaciones instaladas y la estación Aeropuerto Rafael Núñez

Estación	r^2	r	a	a-1
CIOH-DIMAR	0.79	0.89	1.38	0.38
Aeropuerto Rafael Núñez	1.00	1.00	1.00	0.00
UNAD	0.85	0.92	1.50	0.50
UDC	0.88	0.94	1.50	0.50
UTB	0.74	0.86	0.65	-0.35
Turbaco	0.86	0.93	0.89	-0.11
Vivarium	0.96	0.98	1.31	0.31
Tierra Bomba	0.93	0.97	1.46	0.46
Mamonal	0.68	0.82	0.77	-0.23

Con la información de la Tabla 21 (columna: a-1), se realizó un mapa interpolado de desviación respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez, donde se encontró que las intensidades en la zona rural Norte superan a las registradas por la estación de comparación en un 30% y además de son máximas en la zona urbana en hasta un 50%. Por otro lado, las intensidades tienden a ser inferiores en la zona rural Sur y al este del territorio de un 10 a 20% menor.



Impacto de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias

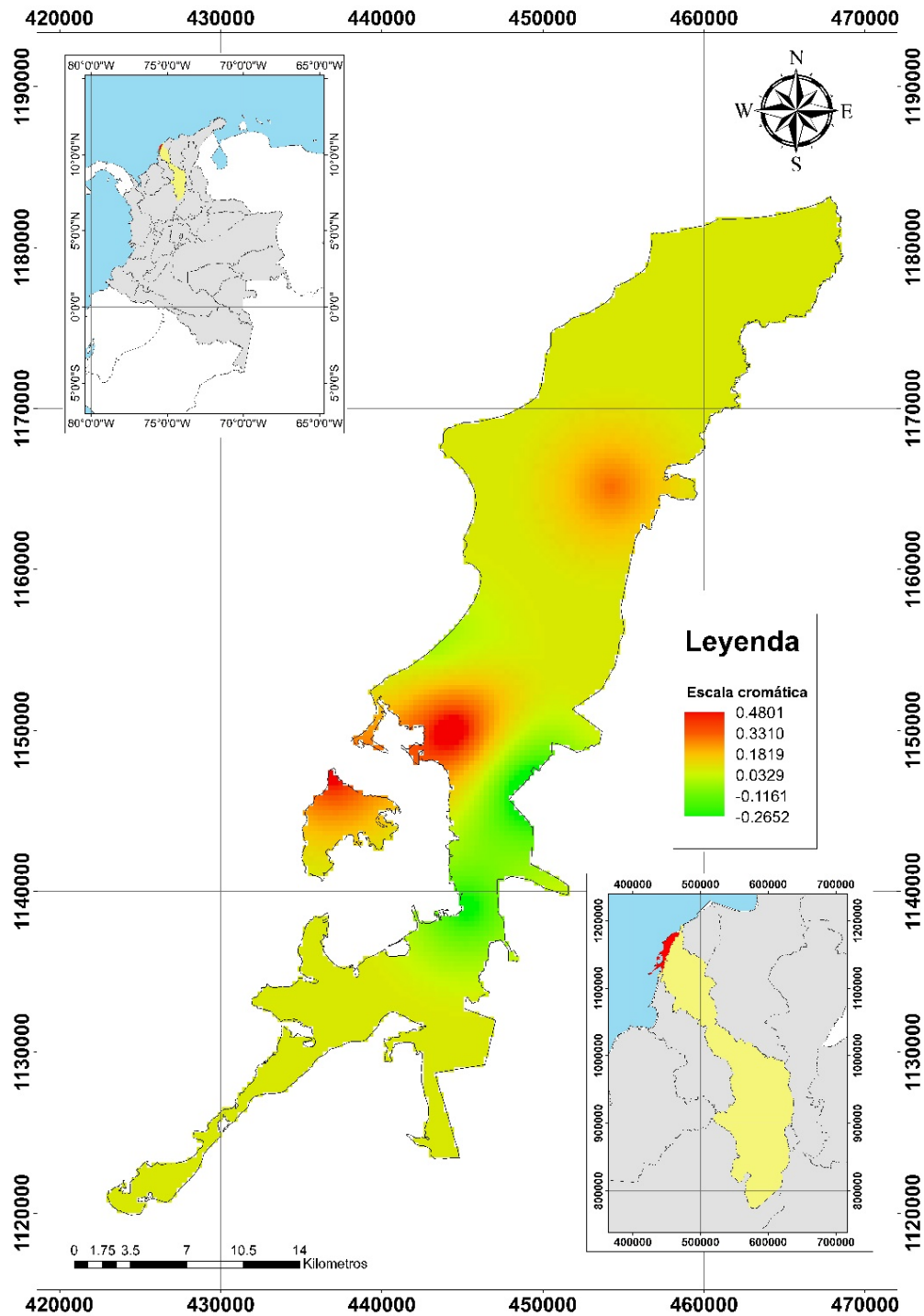


Figura 27. Distribución espacial del error en las intensidades respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

El análisis de regresión lineal simple también se realizó para la información de las curvas IDF de la estación Aeropuerto Rafael Núñez, comparando los datos de Intensidad-Duración entre diferentes periodos de retorno para obtener la relación lineal entre estos, así se puede encontrar el valor de cierta Intensidad-Duración de un período de retorno T_n superior estando en un período de retorno T_i inferior, claro está, avanzando entre los límites de los períodos de retorno señalados por las curvas IDF de 2, 3, 5, 10, 25, 50 o 100 años. Los resultados se presentan en forma de matriz y se resumen en la Tabla 22 con una correlación obtenida mínima de 99%. Al analizar las diagonales de la matriz se encuentra que los resultados son muy semejantes, así se pudo establecer con un 95% de confianza para la media que, estando en un periodo de retorno T_i y se aumenta a uno T_n ya sea 1, 2, 3, 4 o 5 veces, las relaciones lineales resultarían ser respectivamente de 1.1 ± 0.019 , 1.22 ± 0.04 , 1.35 ± 0.041 , 1.49 ± 0.062 , 1.63 ± 0.12 . Al comparar esta información con las diferencias calculadas en las intensidades de la Tabla 27, se encuentra que el período de diseño mínimo para la zona rural Norte y urbana sería de 10 y 25 años respectivamente tomando como referencia las curvas IDF de la estación Aeropuerto Rafael Núñez.

Tabla 22. Matriz de relación lineal entre la información de las curvas IDF de la estación Aeropuerto Rafael Núñez

$T_i \backslash T_n$	2	3	5	10	25	50	100
2	1.00	1.10	1.21	1.34	1.52	1.64	1.77
3		1.00	1.10	1.22	1.38	1.50	1.62
5			1.00	1.11	1.26	1.36	1.47
10				1.00	1.13	1.23	1.32
25					1.00	1.08	1.17
50						1.00	1.08
100							1.00



CONCLUSIONES

Históricamente se ha supuesto que la distribución de la lluvia es homogénea en la ciudad de Cartagena, al tener una única estación que tiene información de curvas IDF, que está ubicada en el Norte de la zona urbana, y además no posee información o evidencias que respalden lo contrario acerca de la variabilidad espacial de la lluvia. Este supuesto ha tomado gran fuerza y aceptación con el tiempo. A pesar de que existen diferentes estaciones que recopilan información de lluvia y tienen información histórica que puede ser comparada y contrastada para generar mapas en el territorio, estas son en una agregación temporal mínima de 24h, dejando como duda cómo es la distribución de la lluvia a lo largo del día y de qué forma se concentra en diferentes intervalos de tiempo horarios o minútales, haciendo que estos datos no sean suficientes para tomar decisiones de diseño en ingeniería. Debido a todo lo anterior, la importancia de esta investigación recae en que nunca se había realizado algo similar o a nivel de detalle para Cartagena de Indias en cuanto a la variación espacial de la lluvia en precipitación y sobre todo en intensidad.

Con los resultados obtenidos es evidente la existencia de la variabilidad espacial de la precipitación en Cartagena de Indias y su magnitud depende de la agregación temporal de los datos. Para lluvias diarias analizadas por el método de isoyetas por ejemplo, las $P_{24h-Max}$ se concentran en la parte Norte del territorio, y dependiendo del período de retorno, se pueden encontrar desviaciones respecto a la estación Rafael Núñez de hasta un +7% en la zona rural Norte, un -10% en la zona urbana y un -25% en la zona rural Sur. Por otro lado, para el caso de las intensidades registradas en el 2019 respecto a la estación Rafael Núñez en la parte rural Norte son un 30% mayor, en la zona urbana pueden excederla hasta un 50% y en la zona rural Sur resultaron ser entre el 10 al 20% menor. De igual forma, la variabilidad espacial de las lluvias se identificó al asumir que la precipitación es homogénea en el territorio utilizando los métodos de precipitación media. Para el 2019 por ejemplo, se encontró una desviación del 32% entre los métodos de media de Media Aritmética y Polígonos de Thiessen, además de que al comparar las precipitaciones respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez se encontraron lluvias con desviaciones del -68% hasta el 93% (es decir, menos de la mitad y casi el doble respectivamente), y coeficientes de variación entre estaciones de 46.47, un valor bastante alto para ser lluvias del mismo año.

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

Estas desviaciones encontradas, principalmente las realizadas por el método de isoyetas, presentan un impacto notablemente en los datos de la red nacional y su excedencia o no excedencia presenta una influencia directa en subdiseños o sobrediseños respectivamente dando impactos negativos para ambos casos, por reflejarse en obras peligrosas para las personas o más costosas de lo que deberían ser. Es por esto que la información de la estación Aeropuerto Rafael Núñez no es suficiente y no representa en su totalidad la información de lluvia en la ciudad.

De los resultados encontrados no se esperaba que las intensidades en la zona urbana fuesen mayores que en el resto de la ciudad. Si bien era predecible que las precipitaciones máximas (y en parte también las intensidades) se presentaran en la zona rural Norte, por encontrarse en el barlovento de la dirección de los vientos y cerca de la zona costera, opuesto en la zona rural Sur y Este por estar en el sotavento, tanto las precipitaciones como las intensidades fueron las más bajas encontradas. Este resultado indicaría que existe una aparente influencia de la zona urbana sobre la zona rural y se podría identificar como factor importante que aporta a la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad.

Debido a la ausencia de una guía metodológica institucional para estudios hidrológicos en el país, generalmente se cae en errores al momento de realizar el análisis de datos. Errores como el de asumir que la función de distribución que mejor se ajusta a los datos es la de Gumbel, o comparar unas pocas funciones de ajuste, dejando por fuera la gran variedad de estas que se han desarrollado para estos análisis. Seguido, la prueba que se le realiza en la mayoría de los casos a las funciones de ajuste es Chi-cuadrado (χ^2) omitiendo, nuevamente, pruebas ampliamente utilizadas en la literatura como lo son la Log Verosimilitud y la Kolmogorov-Smirnov (KS).

Al realizar los ajustes a las funciones de distribución de cada una de las estaciones analizadas, se encontró que en ninguno de los casos la distribución de Gumbel era la más adecuada, sino que por el contrario, las que mejor se ajustaron fueron la distribución Gamma (en cinco estaciones) y la distribución normal (en tres estaciones). Adicionalmente, al realizar cada una de las tres pruebas se observa que la prueba χ^2 es la más subjetiva de las tres por el hecho de que dependiendo de la agrupación de datos se tendrán resultados disímiles. Siguiendo metodologías encontradas en la literatura se le da prioridad la prueba Log Verosimilitud pero en los resultados se observa que la clasificación según la prueba KS no difiere en gran medida con esta anterior.



Impacto de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias



Para la elaboración de isoyetas se utilizaron tres métodos de interpolación con la ayuda del software ArcGis. De estos tres métodos, al realizar un examen visual, se encuentra que en el caso analizado las mejores isoyetas fueron arrojadas por el método Kriging Ordinario, por encima del método Spline e IDW. En estudios realizados en la Región Caribe, por el contrario, se observa que el método que mejor desempeño tiene es el IDW. Lo anterior da a entender la importancia de analizar por distintos métodos de interpolación en cada estudio hidrológico que tenga como finalidad trazar isoyetas debido a que dependiendo de la escala, la ubicación y la cantidad de datos, un método u otro tendrá mejor desempeño.

A nivel local no se ha estudiado a profundidad la variabilidad espacial de las lluvias. Es por esta razón que las isoyetas resultantes de la investigación fueron comparadas con isoyetas calculadas a nivel regional en donde se enfocó la parte de la ciudad de Cartagena de Indias. De esta comparación se observa que para períodos de retorno hasta de 25 años el comportamiento es muy similar en ambos estudios. Sin embargo, para períodos de retorno mayores se notó una pequeña variación que sea probablemente causada por la diferencia de cantidad de pluviómetros utilizados en ambos análisis.

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

RECOMENDACIONES

En los procesos metodológicos se recomienda siempre al realizar ajustes de datos, utilizar varios métodos, como mínimo tres y recomendable cinco, entre estas funciones se podría incluir la de dos poblaciones para analizar como es el comportamiento de las precipitaciones ante los fenómenos de El Niño y La Niña, además de realizar como mínimo dos pruebas de ajuste de las funciones utilizadas para obtener mayor confiabilidad en la selección de la que sería la mejor. En cuanto a la información registrada por las estaciones se recomienda siempre obtener en lo posible la información primaria y no utilizar métodos de ajuste, para estar seguros de los datos que se están analizando. Cuando se instalen estaciones se recomienda además de seguir las buenas prácticas de instalación de equipos, también ubicar la mayor cantidad posible, e informarse de las que se encuentran instaladas en el momento y si su información se puede obtener, para que la distribución sea en lugares representativos del territorio y se cuente con una red óptima de puntos de recolección. Para el caso de la distribución espacial de la lluvia, no se recomienda en ninguno de los casos asumir que es homogénea, a menos que (a) el lugar de estudio se encuentre próxima a una estación y la cuenca de estudio sea pequeña (b) existan estudios que respalden esa afirmación. Cuando se realicen mapas de isoyetas se recomienda utilizar varios métodos para contrastarlos, y validarlos tanto por métodos visuales como matemáticos.

Se recomienda extender este tipo de estudios y sobre todo no dejar de hacerlos, para obtener registros de precipitaciones, principalmente de intensidades en diferentes puntos de la ciudad para varios años y así obtener con mayor certeza la distribución de la lluvia, no solo espacial sino también temporal, para diferentes periodos de retorno. Esto es muy importante puesto a que los datos de lluvia y período de retorno representan la información principal de entrada para realizar diseños hidráulicos en ingeniería civil, además de que podría ser aprovechada para realizar modelaciones de eventos de lluvia y predicciones con mayor certeza, zonificar la ciudad en lugares con información de lluvia semejante, realizar proyectos sostenibles en lugares vulnerables y no vulnerable sobre la recolección, almacenamiento, tratamiento y distribución del agua lluvia para así afrontar temporadas de sequía, optimizar el aprovechamiento del agua lluvia en las actividades



Impacto de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias



económicas de agricultura y ganadería, y en general optimizar el aprovechamiento del agua lluvia para su buen uso.

Para estudios previos se recomienda analizar otras variables atmosféricas que posiblemente estén influyendo en la variabilidad espacial de la lluvia, como la temperatura, humedad, presión, radiación solar, o viento y su dirección. Asimismo el impacto de su ubicación en la costa Caribe y de su topografía con formaciones importantes como el Cerro de la Popa. Además, analizar qué sucede en la zona urbana donde se presentaron las intensidades mayores en el territorio y qué impacto está teniendo esta sobre la zona rural.

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Adhikary, S. K., Yilmaz, A. G., & Muttill, N. (2015). Optimal design of rain gauge network in the Middle Yarra River catchment, Australia. *Hydrological Processes*, 29(11), 2582–2599. <https://doi.org/10.1002/hyp.10389>
- Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias. (2009). *Estudios y diseños del plan maestro de drenajes pluviales del distrito de Cartagena de Indias D.T y C.* <https://doi.org/10.3726/978-3-0352-0094-2/1>
- Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias. (2015). MIDAS v3. Recuperado el 18 de abril de 2019, de <http://midas.cartagena.gov.co/>
- Aparicio Mijares, F. J. (1989). *Fundamentos De Hidrología De Superficie. Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Aranda Campo, D. (1992). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. San Luis de Potosí: Editorial Universitaria Potosina.
- Arrieta, A., & Guerrero, M. (2005). Regionalización de la precipitación máxima en 24 horas en la costa atlántica colombiana.
- Arrieta Pastrana, A., & Martínez Padilla, E. (2019). *Aplicaciones hidrológicas en la ingeniería* (Primera). Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.
- Ávila, Á., Guerrero, F. C., Escobar, Y. C., & Justino, F. (2019). Recent precipitation trends and floods in the Colombian Andes. *Water (Switzerland)*, 11(2), 1–22. <https://doi.org/10.3390/w11020379>
- Bekis, J., Brady, I. P., Bowen, G. J., Tulley-Cordova, C. L., & Strong, C. (2018). Navajo Nation, USA, Precipitation Variability from 2002 to 2015. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 163(1), 109–123. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704x.2018.03273.x>
- Benjamin, J. R., & Comell, C. A. (1970). *Probability, statistics and decision for civil engineers*.



New York: McGraw-Hill.

- Cajal, A. (2018). Investigación de Campo: Características, Tipos, Técnicas y Etapas - Lifeder. Recuperado el 17 de abril de 2019, de https://www.lifeder.com/investigacion-de-campo/#Tecnicas_e_instrumentos_de_recoleccion_de_datos
- Ceballos, A. B. (1998). Variabilidad espacial de la lluvia en una pequeña cuenca hidrográfica de la provincia de Cáceres. *Norba. Revista de geografía*, (10), 23–34.
- Chang Nieto, G., & Bolívar Lobato, M. (1997). *Establecimiento de relaciones entre las precipitaciones de 24 horas y las precipitaciones de una duración diferente Pt para la estación del Aeropuerto Rafael Nuñez de la ciudad de Cartagena*. Universidad de Cartagena.
- Chen, Y., Wei, C., & Yeh, H. (2008). Rainfall network design using kriging and entropy, 346(December 2007), 340–346. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- CIOH. (2011). Climatología de los principales puertos del Caribe colombiano. Cartagena de Indias, D.T. y C., 11.
- CIOH. (2018). Climatología en Cartagena. Recuperado de https://www.cioh.org.co/dev/proserv/boletines/climatologiaactg/CLIMATOLOGIA_CARTAGENA_DE_INDIAS.pdf
- Cortés, A. C. (2010). Análisis De La Variabilidad Espacial Y Temporal De La Precipitación En Una Ciudad De Media Montaña Andina Caso De Estudio: Manizales, 20–22. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/3584/1/anacristinacortescortes.2010.pdf>
- Dai, Q., Bray, M., Zhuo, L., Islam, T., Han, D., Dai, Q., ... Han, D. (2017). A Scheme for Rain Gauge Network Design Based on Remotely Sensed Rainfall Measurements. *Journal of Hydrometeorology*, 18(2), 363–379. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0136.1>

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

GISGeography. (2018). Kriging Interpolation - The Prediction Is Strong in this One - GIS Geography. Recuperado el 31 de julio de 2019, de <https://gisgeography.com/kriging-interpolation-prediction/>

Golden Gate Weather Services. (2019). El Niño and La Niña Years and Intensities. Recuperado el 18 de enero de 2020, de <https://ggweather.com/enso/oni.htm>

González, Á., Viloria, O., Coronado, Ó., Vélez, A., Tesfagiorgis, K., & Coronado, J. (2019). Isohyetal maps of daily maximum rainfall for different return periods for the Colombian Caribbean Region. *Water (Switzerland)*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/w11020358>

Haris, H., Chow, M. F., & Sidek, L. M. (2019). *Spatial Variability of Rainfall in Urban Catchment* (Vol. 9). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8016-6>

Herrera Herrera, J. B., LLamas Castro, A. de J., & Arrieta Pastrana, A. D. J. (2018). *Actualización de las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) para la estación Aeropuerto Rafael Nuñez de la ciudad de Cartagena De Indias D.T. y C. (1970 - 2016)*. Universidad de Cartagena.

Hurtado Montoya, A. F., & Mesa Sánchez, Ó. J. (2015). Climate change and space-time variability of the precipitation in Colombia. *Scielo.Org.Co*, 131–150. <https://doi.org/10.14508/reia.2015.12.24.131-150>

IDEAM. (2019). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Recuperado el 26 de marzo de 2019, de <http://www.ideam.gov.co/>

López, C. (2016). Análisis de la distribución espacial y temporal de la precipitación en la cuenca del río Chicú, Sabana de Bogotá, Colombia, 21(1), 63–90.

Maity, R. (2018). *Statistical Methods in Hydrology and Hydroclimatology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8779-0>

Martínez Alfaro, P. E., Martínez SantoLs, P., & Castaño Castaño, S. (2005). *Fundamentos de hidrogeología*.



- Naghattini, M. (2016). *Fundamentals of statistical hydrology. Fundamentals of Statistical Hydrology*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-43561-9>
- Nazaripour, H., Reza, M., & Daneshvar, M. (2016). Rain gauge network evaluation and optimal design using spatial correlation approach in arid and semi-arid regions of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1853-3>
- Observatorio Ambiental de Cartagena de Indias. (2019). Precipitación. Recuperado el 26 de marzo de 2019, de <http://observatorio.epacartagena.gov.co/gestion-ambiental/calidad-ambiental/sistema-urbano/precipitacion/>
- OMM. (2011). *Guía de prácticas climatológicas. Organización Meteorológica Mundial* (Vol. 100). <https://doi.org/OMM-Nº 168>
- Onset. (2010). *Data Logging Rain Gauge (RG3 and RG3-M) Manual*. Onset.
- Pabón, J., Eslava, J., & Gómez, R. (2001). Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 4, 47–59. Recuperado de http://www.geociencias.unal.edu.co/met/met4art5.html%5Cnhttp://datateca.unad.edu.co/contenidos/30157/AVA/2014/Unidad_2/05_Pabon_Eslava.pdf
- Panthi, J., Dahal, P., Shrestha, M., Aryal, S., Krakauer, N., Pradhanang, S., ... Karki, R. (2015). Spatial and Temporal Variability of Rainfall in the Gandaki River Basin of Nepal Himalaya. *Climate*, 3(1), 210–226. <https://doi.org/10.3390/cli3010210>
- Patrick, N. A., & Stephenson, D. (1990). Spatial variation of rainfall intensities for short duration storms. *Hydrological Sciences Journal*, 35(6), 667–680. <https://doi.org/10.1080/02626669009492471>
- POT. Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias (2001). Cartagena de Indias. Recuperado de <http://sigob.cartagena.gov.co/Cartagena/secplaneacion/Documentos/pages/pot2001/files/DI>

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

AGNOSTICO/SINTESIS_DEL_DIAGNOSTICO.pdf

- Rivas, J. (2014). *Análisis de la correlación de datos de precipitación entre el satélite TRMM y las estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca del Rio Bogotá*. Universidad Santo Tomas. Recuperado de shorturl.at/cflLW
- Ruiz, J. F., & Escobar, O. F. D. J. (2012). Alteraciones de la precipitación y la temperatura ante variabilidad y cambio climático para la ciudad de Bogotá, 22. Recuperado de <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/2592>
- Scopus. (2020). Analyze search results. Recuperado el 5 de febrero de 2020, de <https://bit.ly/2OrVuuc>
- Torreño, A., & Schnabel, S. (2017). Variación espacial de las precipitaciones en una pequeña cuenca hidrográfica del suroeste de España. *Geographicalia*, 65–91.
- Tsintikidis, D., Georgakakos, K. P., Asce, M., Sperflage, J. A., Smith, D. E., & Carpenter, T. M. (2002). Precipitation Uncertainty and Raingauge Network Design within Folsom Lake Watershed, 7(2), 175–184.
- World Meteorological Organization (WMO). (2008). *Guide to Hydrological Practices. Volume I. Hydrology - From Measurement to Hydrological Information (Vol. I)*.



ANEXOS

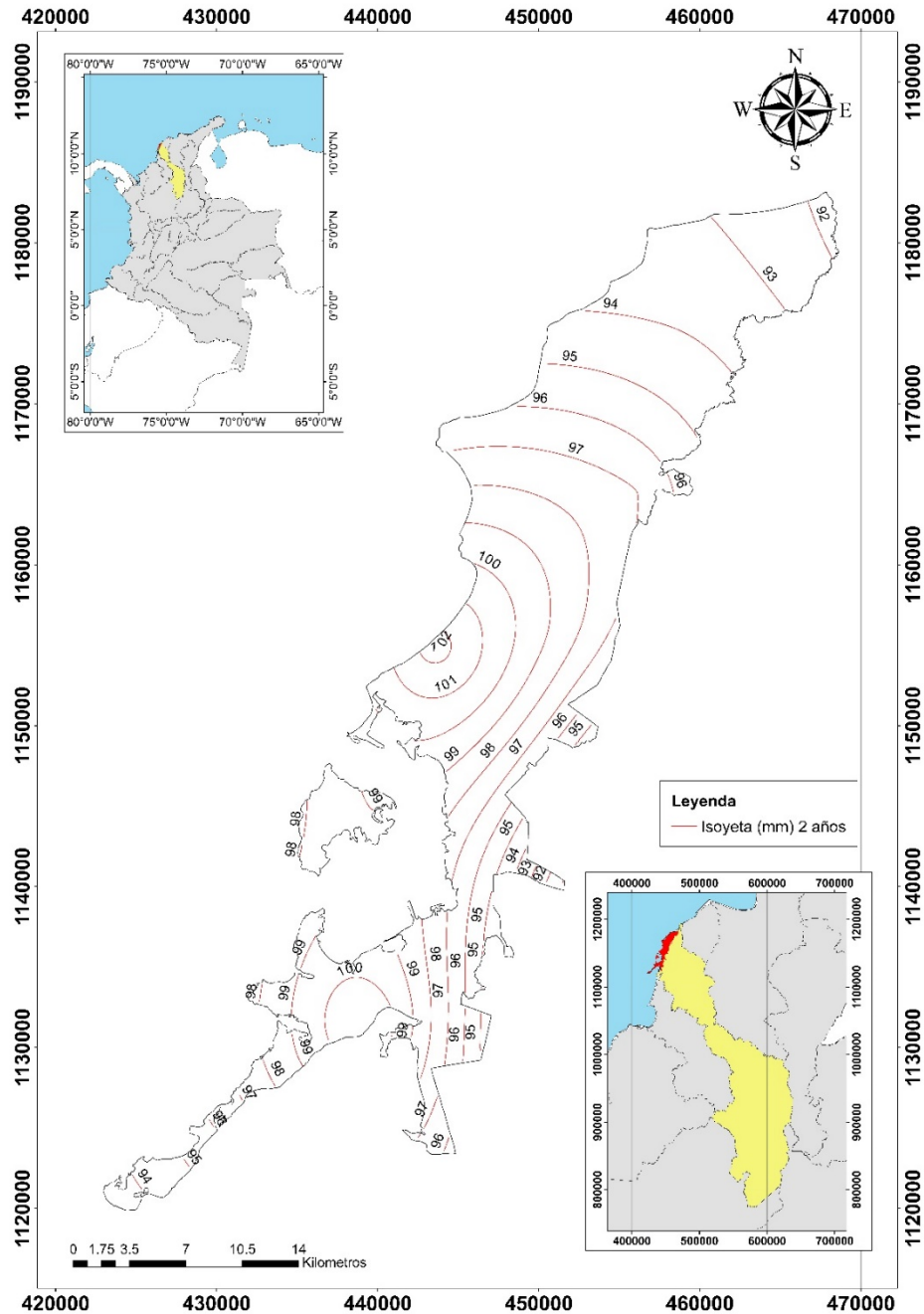


Figura 28. $P_{24h-Max}$ para $T=2$ años. Método de ajuste Kriging Ordinario

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

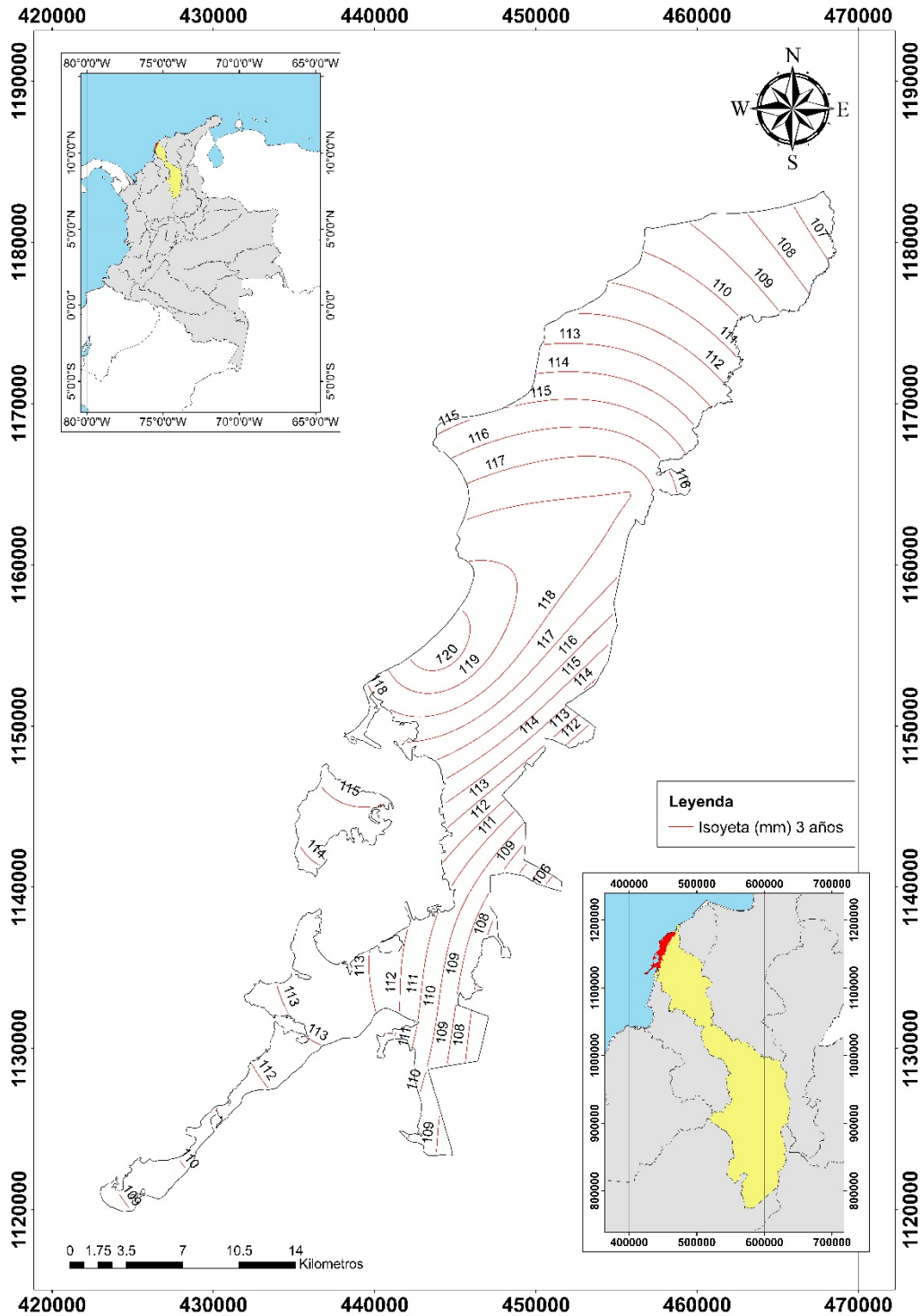


Figura 29. $P_{24h-Max}$ para $T=3$ años. Método de ajuste Kriging Ordinario



Impacto de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias

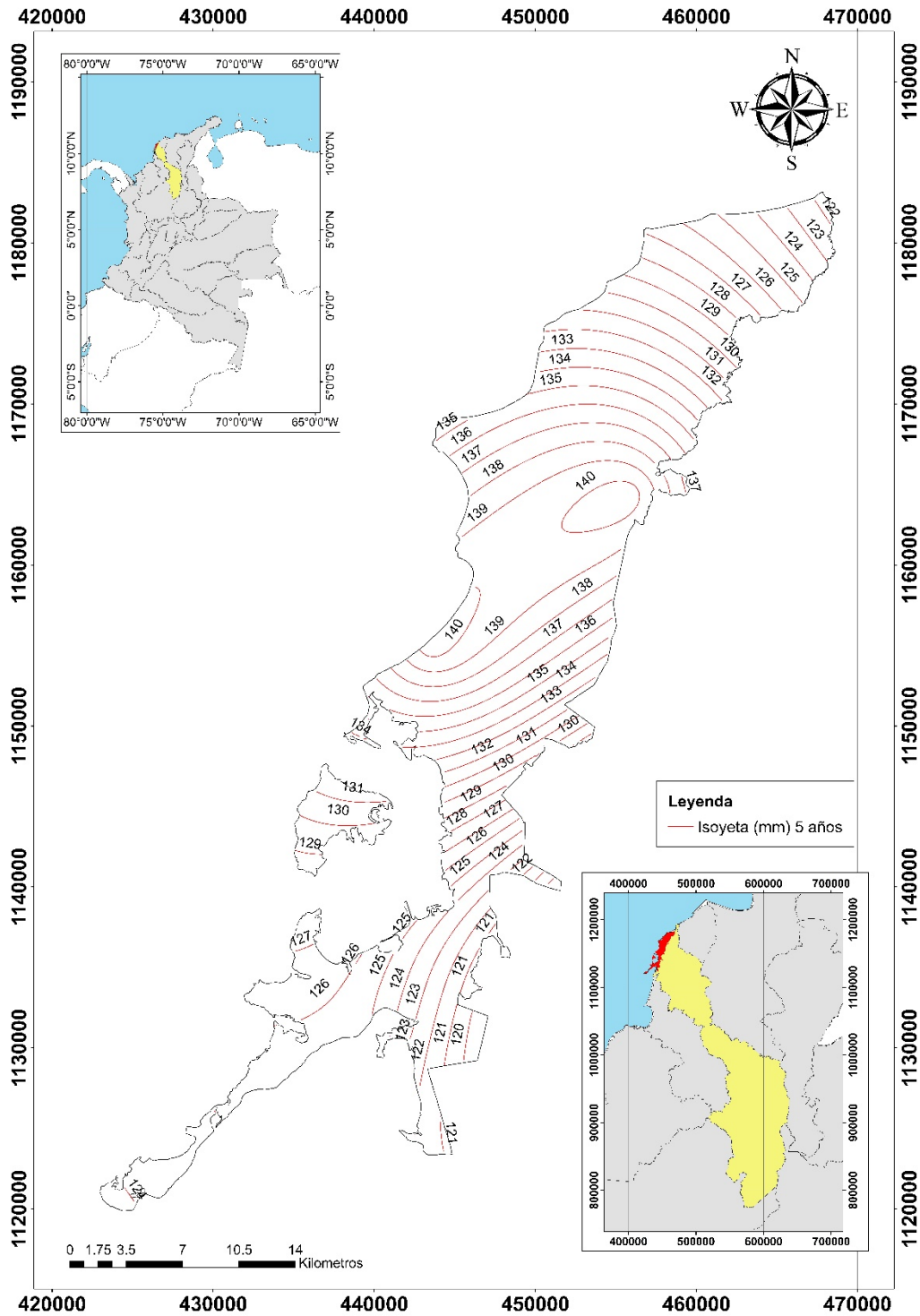


Figura 30. $P_{24h-Max}$ para $T=5$ años. Método de ajuste Kriging Ordinario

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

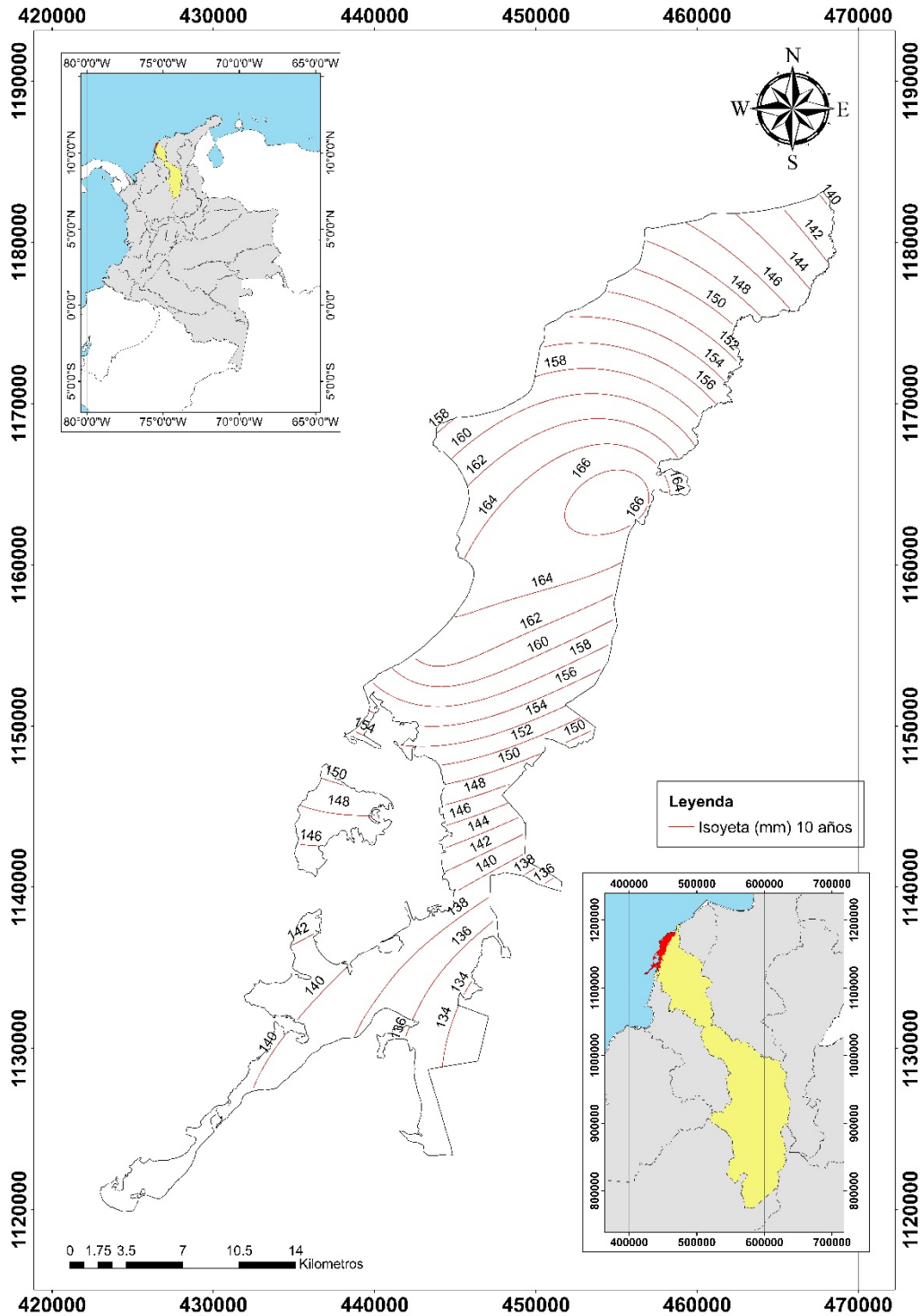


Figura 31. $P_{24h-Max}$ para $T=10$ años. Método de ajuste Kriging Ordinario



Impacto de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias

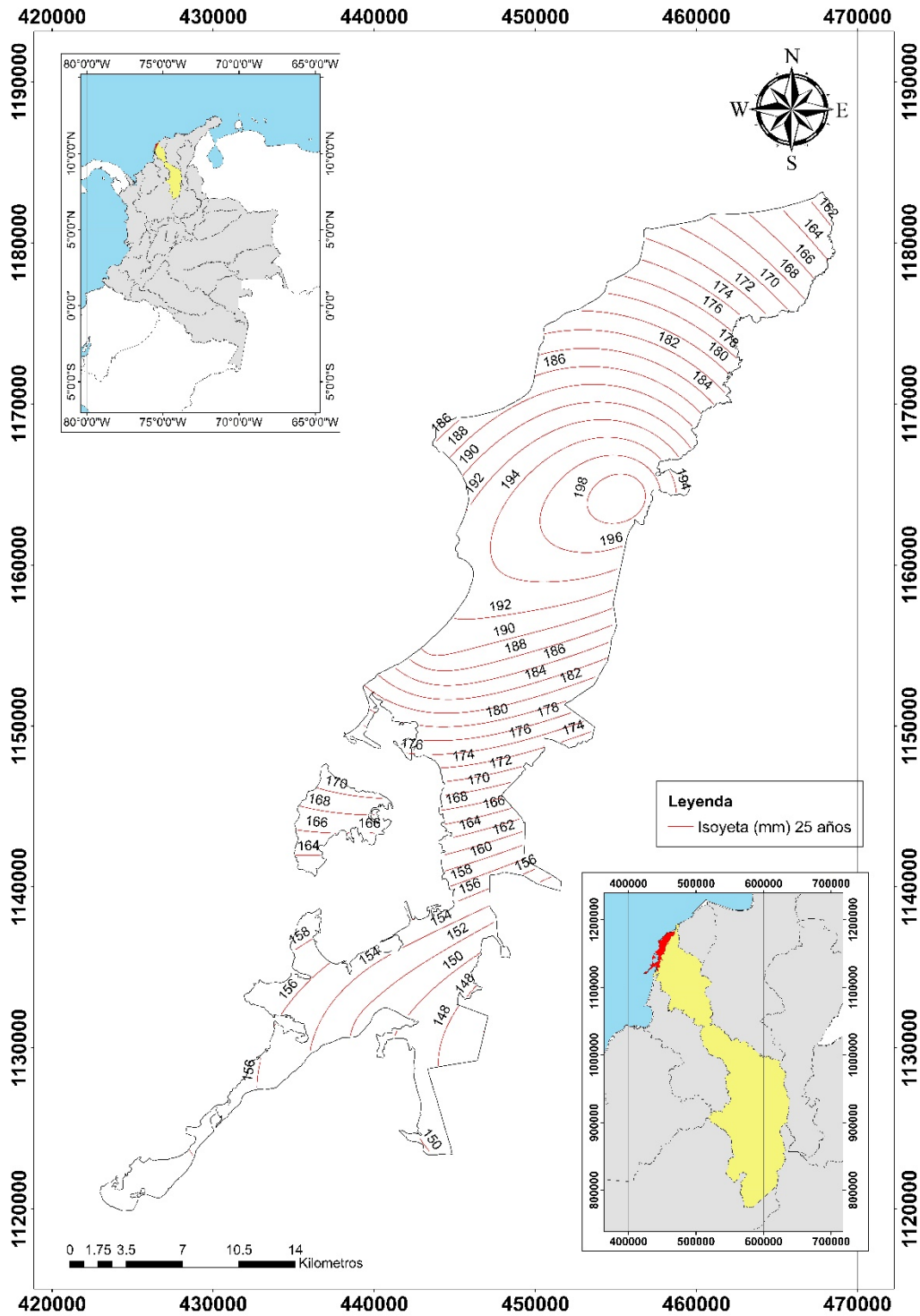


Figura 32. $P_{24h-Max}$ para $T=25$ años. Método de ajuste Kriging Ordinario

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

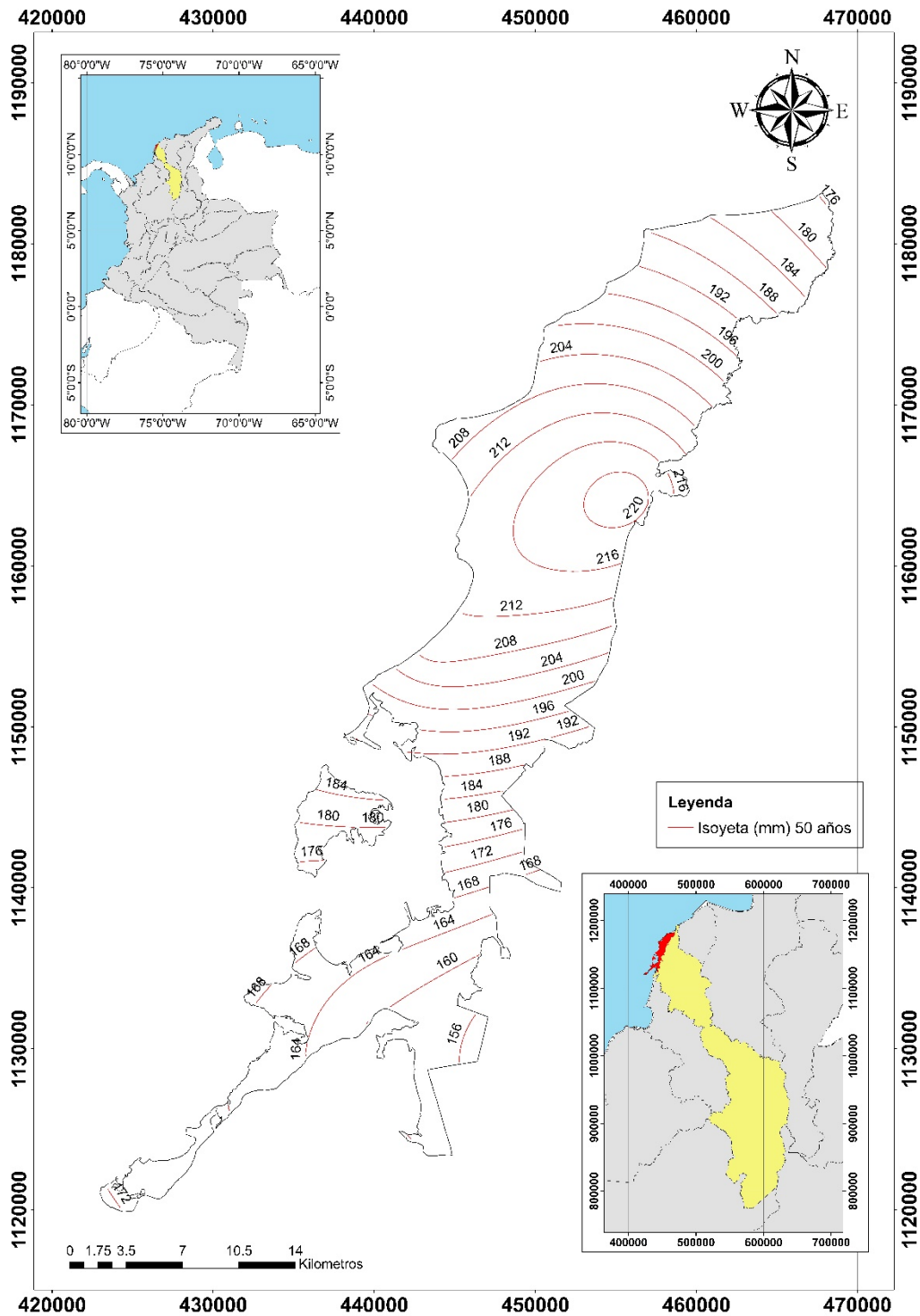


Figura 33. $P_{24h-Max}$ para $T=50$ años. Método de ajuste Kriging Ordinario



Impacto de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias

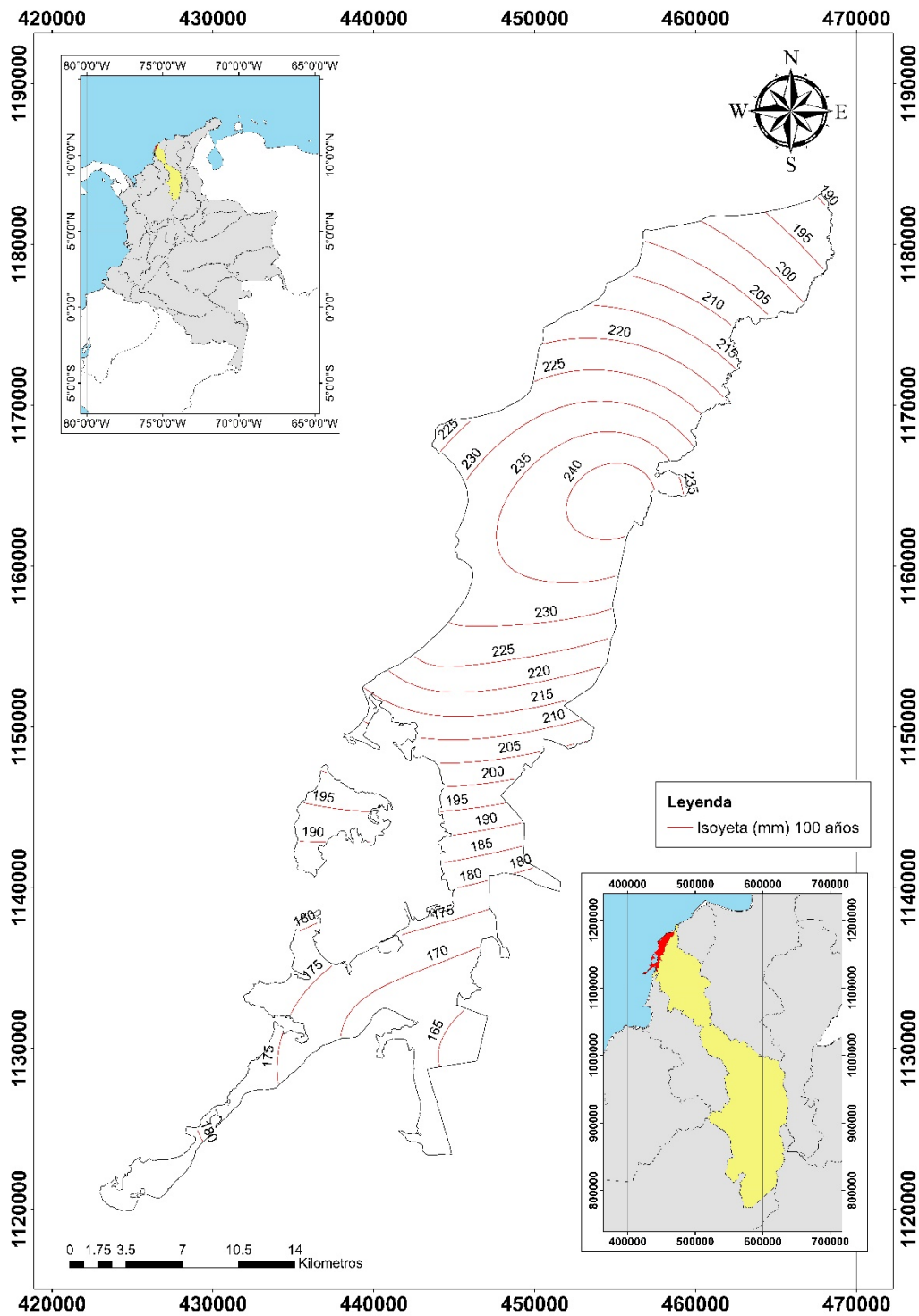


Figura 34. $P_{24h-Max}$ para $T=100$ años. Método de ajuste Kriging Ordinario

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

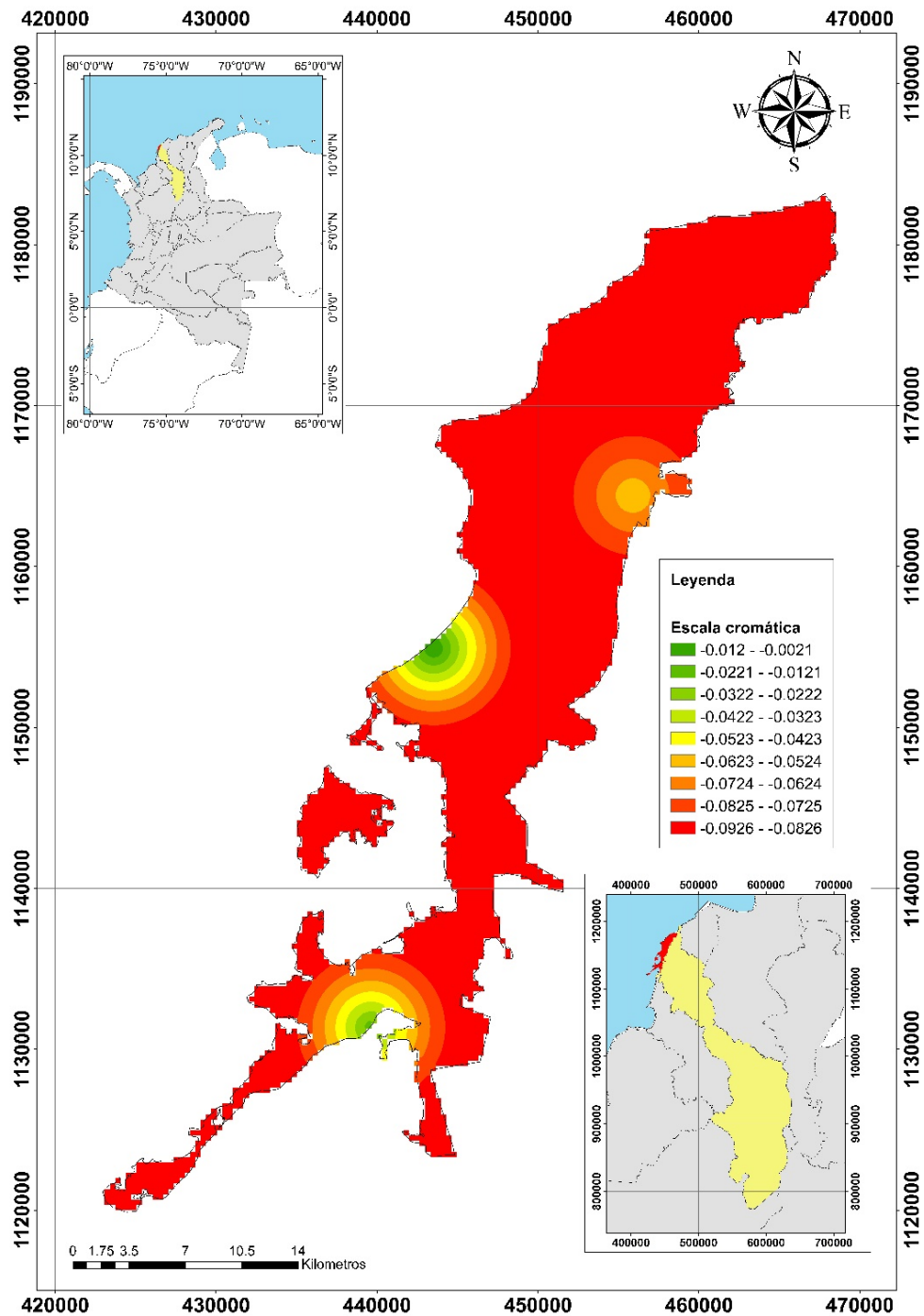


Figura 35. Distribución de la desviación respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez para T=2 años



Impacto de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias

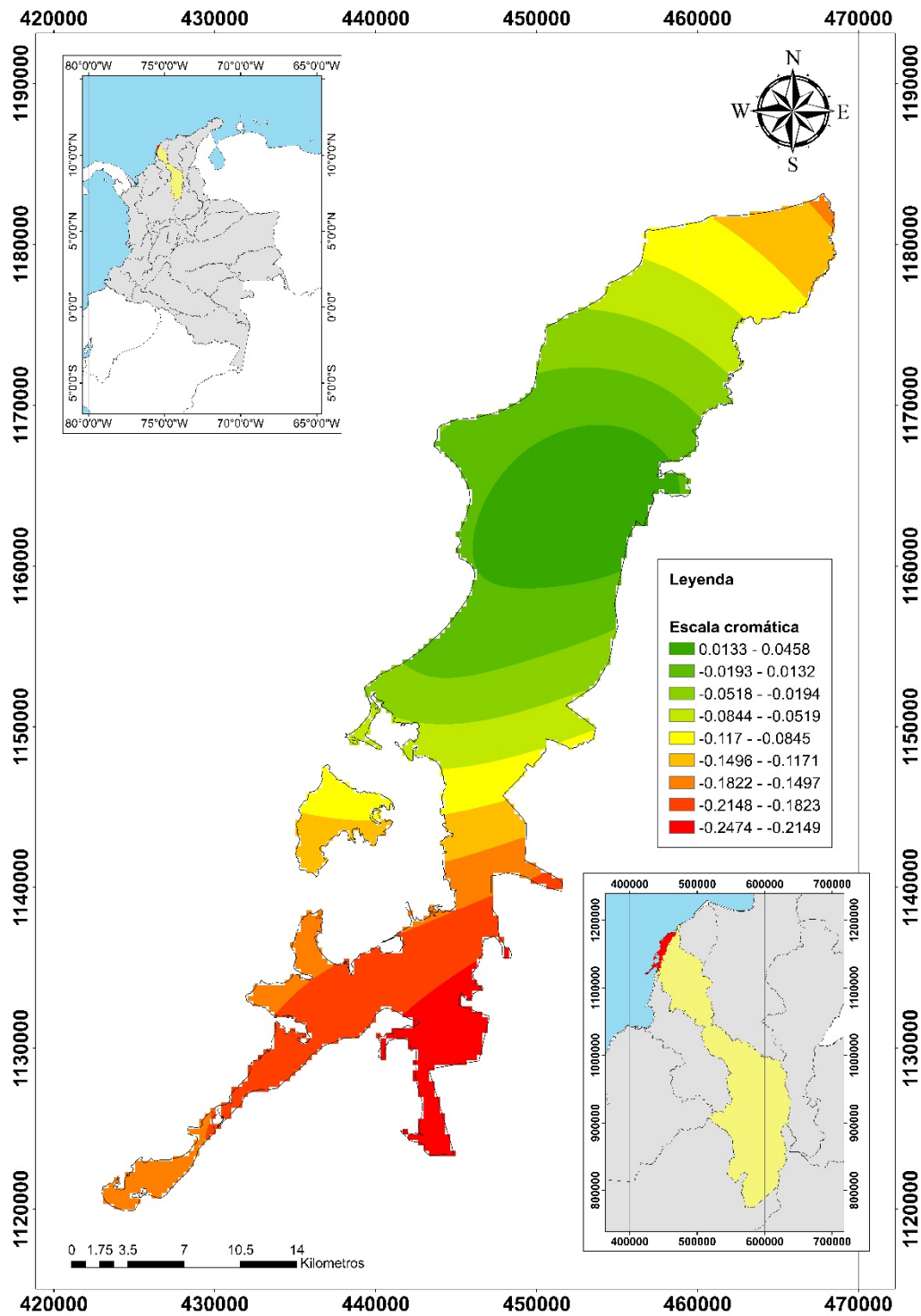


Figura 36. Distribución de la desviación respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez para T=25 años

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

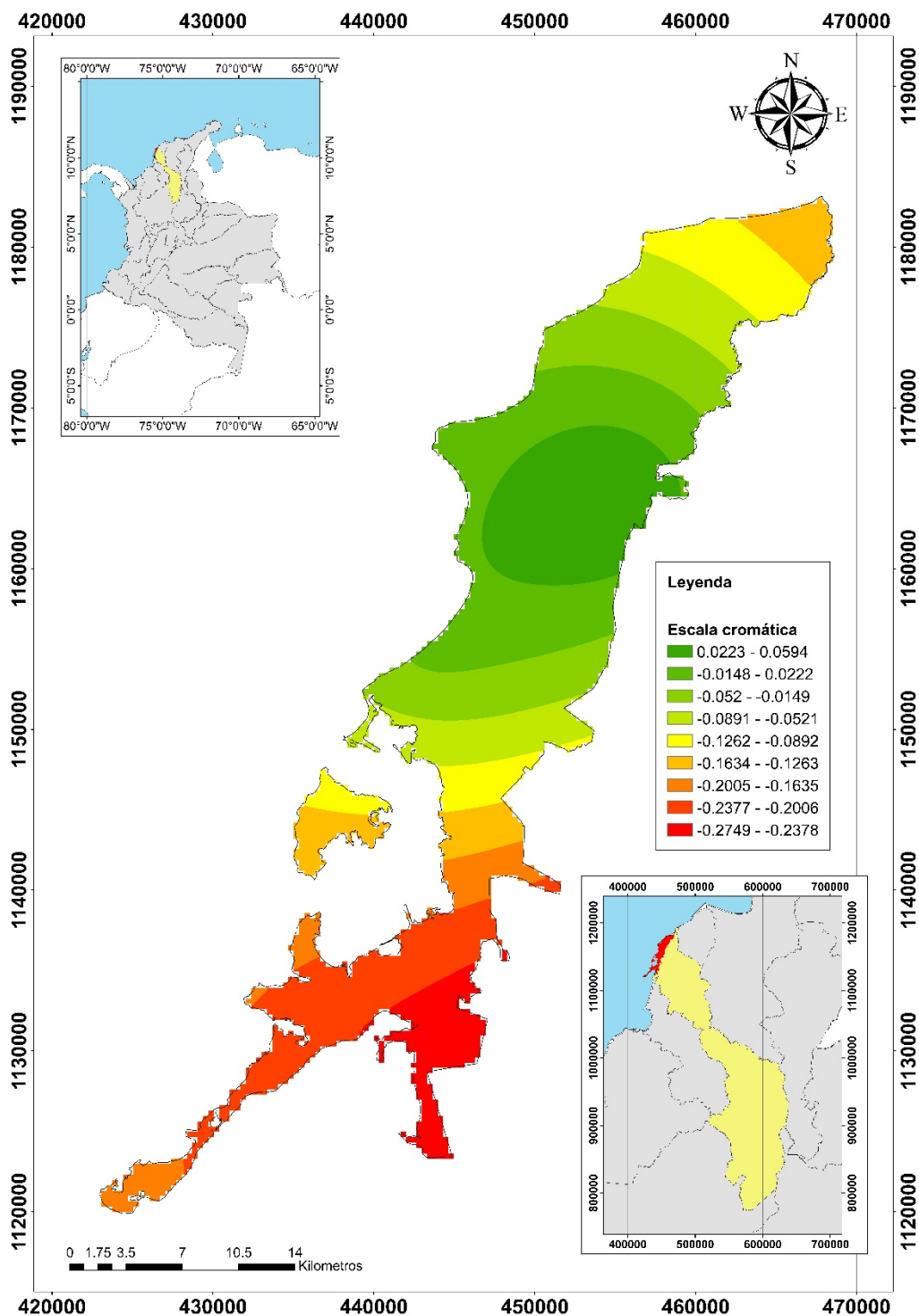


Figura 37. Distribución de la desviación respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez para T=50 años



Impacto de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias

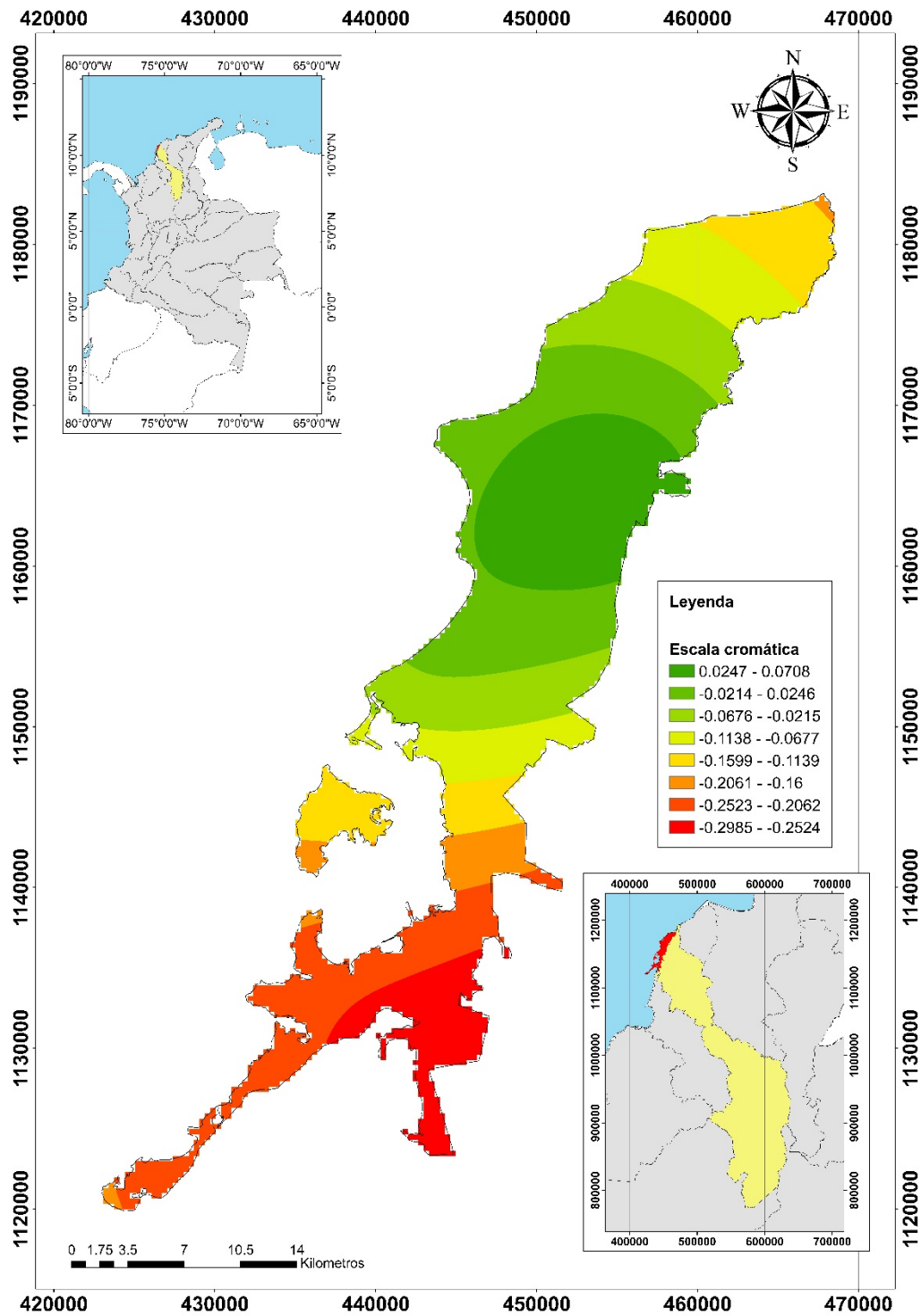


Figura 38. Distribución de la desviación el respecto a la estación Aeropuerto Rafael Núñez para T=50 años

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

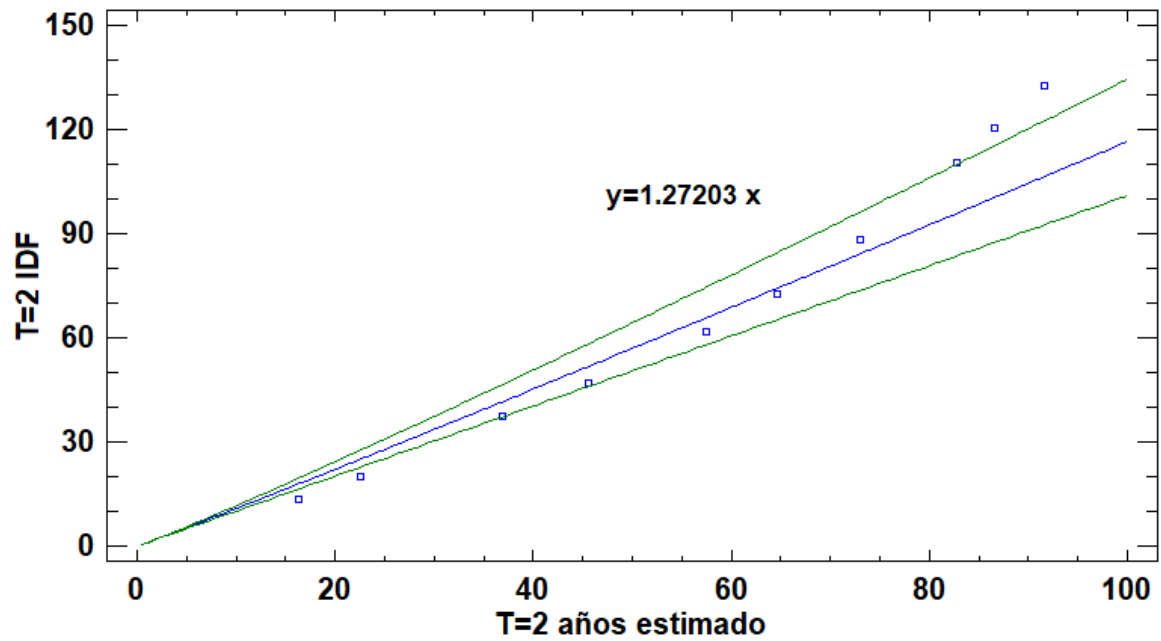


Figura 39. Regresión lineal simple entre la información IDF del IDEAM y la estimada calculada con Chan & Bolívar (1997) para un T=2 años

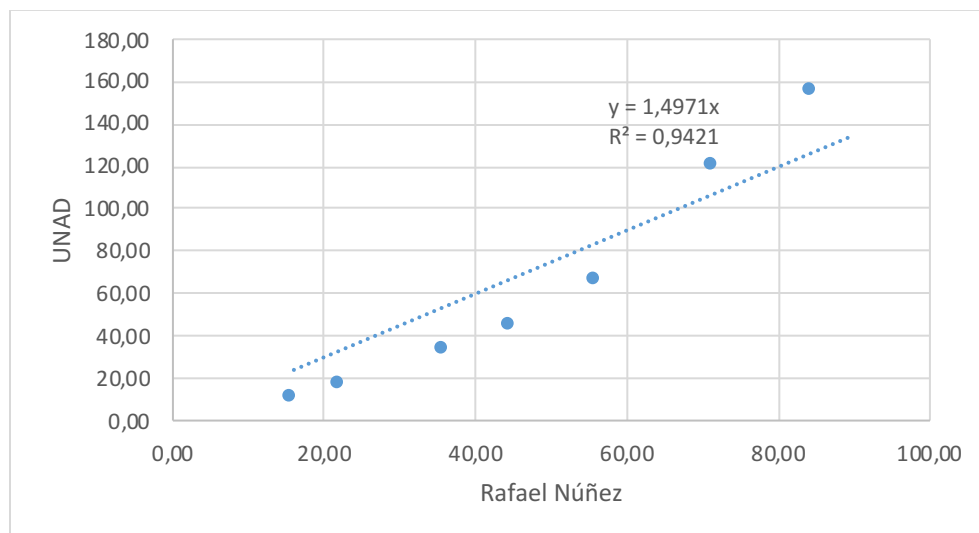


Figura 40. Intensidades de la estación UNAD Vs la estación Rafael Núñez para el 2019



Impacto de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias

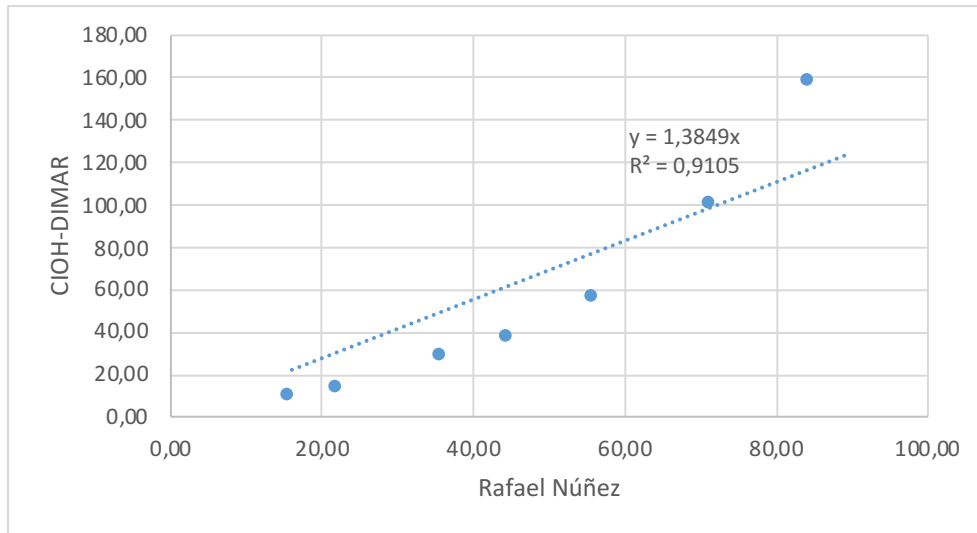


Figura 41. Intensidades de la estación CIOH Vs la estación Rafael Núñez para el 2019

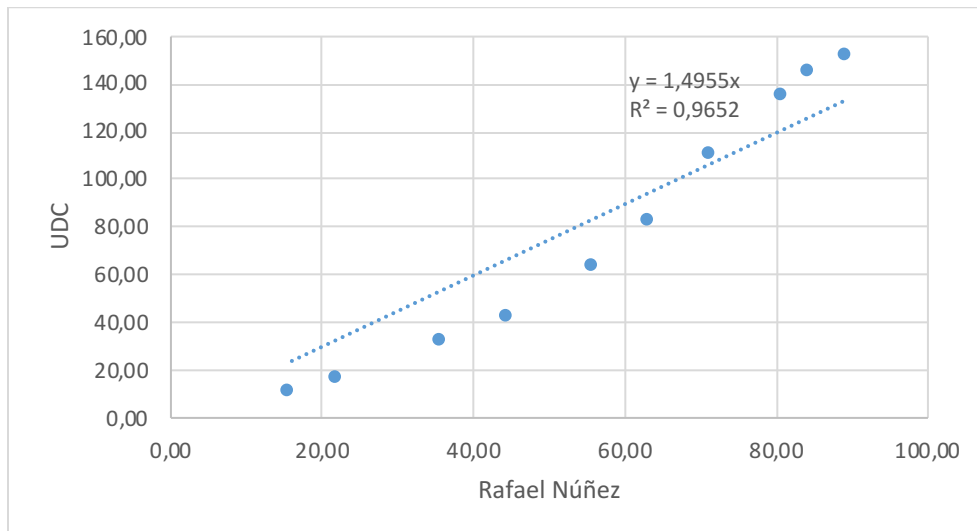


Figura 42. Intensidades de la estación UDC Vs la estación Rafael Núñez para el 2019

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

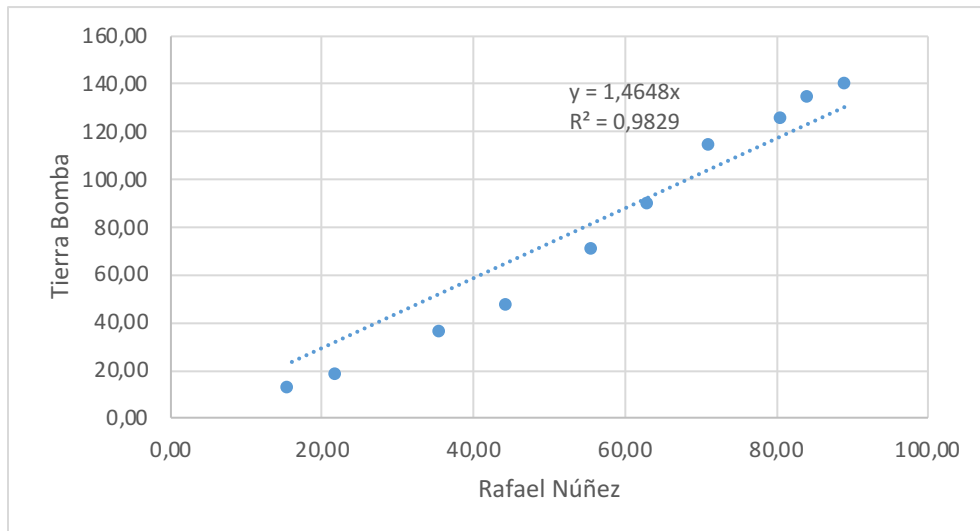


Figura 43. Intensidades de la estación Tierra Bomba Vs Rafael Núñez para el 2019

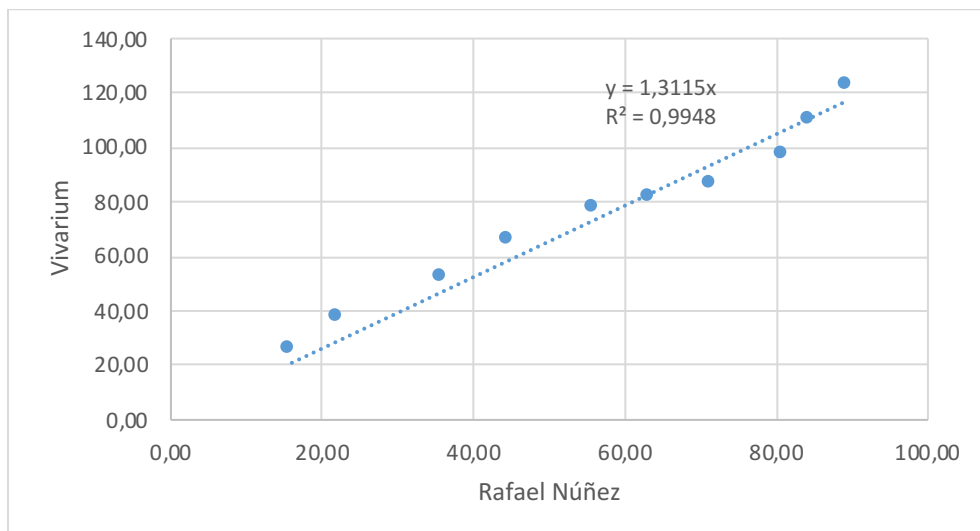


Figura 44. Intensidades de la estación Vivarium Vs Rafael Núñez para el 2019



Impacto de la variabilidad espacial de la lluvia en la ciudad de Cartagena de Indias

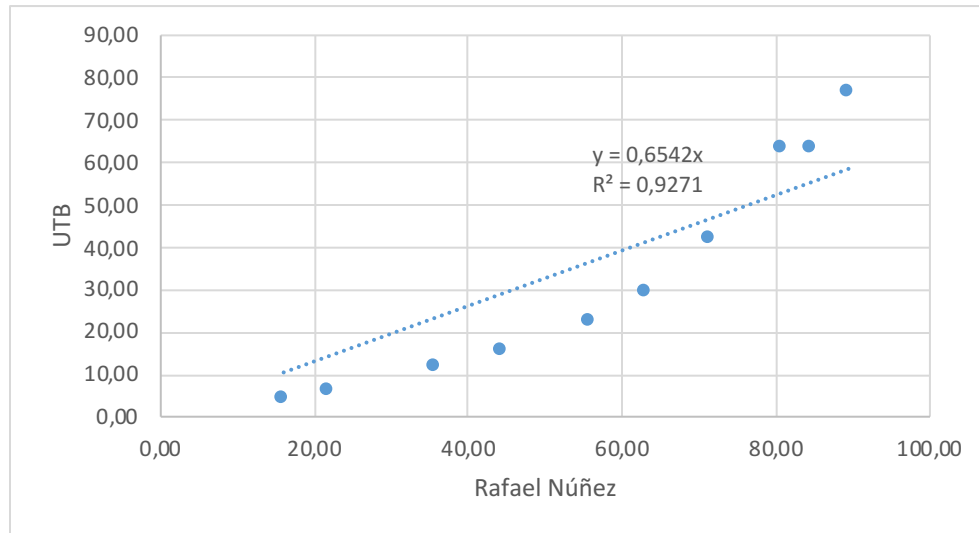


Figura 45. Intensidades de la estación UTB Vs Rafael Núñez para el 2019

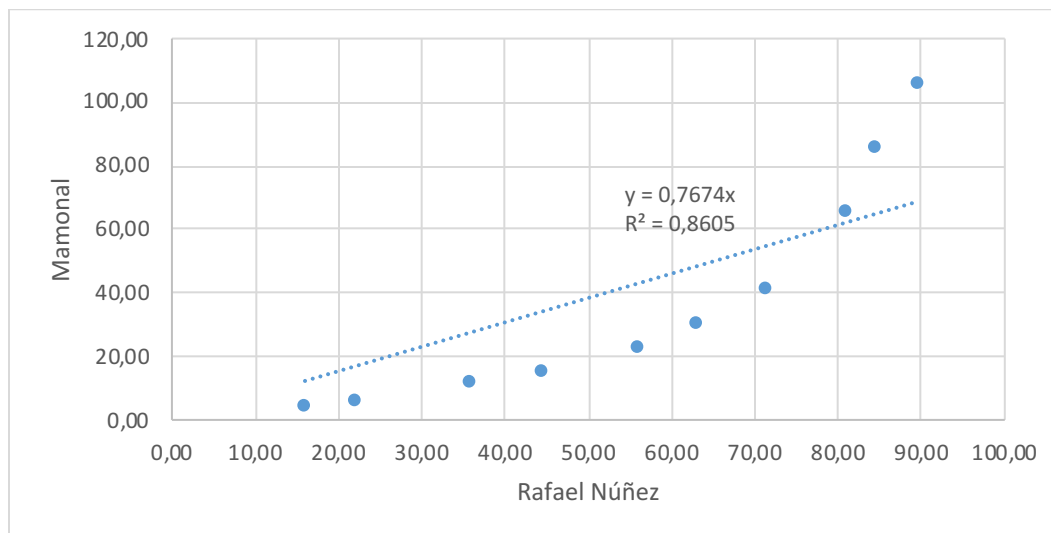


Figura 46. Intensidades de la estación Mamonal Vs Rafael Núñez para el 2019

Autores: Jairo Ortiz y Daniel Paternina

Director: Javier Mouthon, PhD

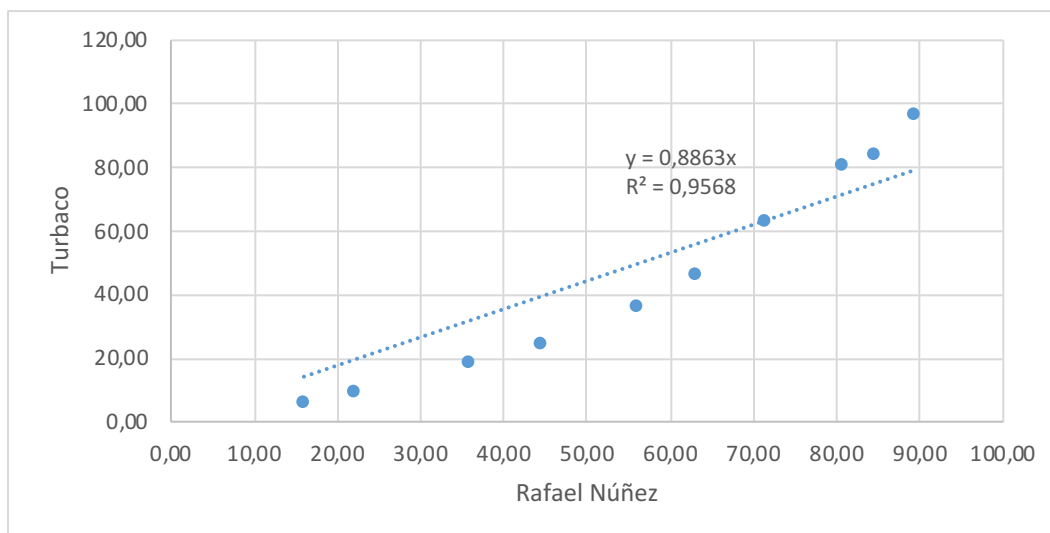


Figura 47. Intensidades de la estación Turbaco Vs Rafael Núñez para el 2019