

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI-

Programa Universitario de Investigación en Desarrollo Industrial

(nombre del programa universitario de investigación de la Digi)

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN DE LA
PRECIPITACIÓN EN GUATEMALA (1981-2019)**

nombre del proyecto de investigación

DES4-2021

código del proyecto de investigación

**FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE
GUATEMALA**

unidad académica o centro no adscrito a unidad académica avaladora

**DR. JOSÉ LUIS ARGUETA MAYORGA, MTRO. WALTER ARNOLDO
BARDALES ESPINOZA, SR. EUGENIO MIGUEL POLANCO SOTOJ**

nombre del coordinador del proyecto y equipo de investigación contratado por Digi

GUATEMALA, 22/11/2021

lugar y fecha de presentación del informe final dd/mm/año

Contraportada (reverso de la portada)

Autoridades

Dr. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera
Director General de Investigación

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar Pérez
Coordinador General de Programas

Inga. Liuba María Cabrera Ovalle
Nombre Coordinador(a) del Programa de Investigación

Autores

Dr. José Luis Argueta Mayorga

Mto. Walter Arnoldo Bardales Espinoza

Br. Eugenio Miguel Polanco Sotoj

Colaboradores:

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes, Unidad de Modelación Matemática e Investigación,
Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala

Lic. William Adolfo Polanco Anzueto, Unidad de Modelación Matemática e Investigación,
Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala

Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación (DIGI), 2021.
El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la DIGI de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de del código DES4-2021 en el Programa Universitario de Investigación en Desarrollo Industrial.

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.

1. Índice general

Contenido

1. Índice general.....	3
Índice de figuras.....	4
Índice de tablas.....	6
2. Resumen y palabras claves.....	7
método de interpolación, precipitación, validación cruzada.....	7
3. Introducción.....	8
4. Planteamiento del problema.....	10
5. Delimitación en tiempo y espacio.....	13
6. Marco teórico.....	14
7. Estado del arte.....	21
8. Objetivos (generales y específicos aprobados en la propuesta).....	26
9. Materiales y métodos.....	26
9.1 Enfoque de la investigación.....	27
9.2 Método.....	34
Set de datos.....	35
Transformación Box Cox.....	35
Interpolación espacial.....	35
Validación de métricas.....	35
9.3 Recolección de información.....	36
9.4 Técnicas e instrumentos.....	39
Thin plate splines.....	45
Transformaciones univariadas.....	46
Evaluación de técnicas de interpolación espacial.....	47
Método de validación cruzada.....	47
10. Resultados y discusión.....	54
11. CONCLUSIONES.....	¡Error! Marcador no definido.
12. BIBLIOGRAFÍA.....	74
13. ANEXOS.....	¡Error! Marcador no definido.

11.	Orden de pago final	131
12.	Declaración del coordinador(a) del proyecto de investigación	131
13.	Aval del director(a) del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario	131
14.	Visado de la Dirección General de Investigación	132

Índice de figuras

Figura 1. Fase inicial de la investigación. Fuente: elaboración propia.	20
Figura 2. Segunda fase de la investigación. Fuente: elaboración propia.	21
Figura 3. Metodología para el análisis comparativo de la investigación. Fuente: elaboración propia.	27
Figura 4. Algoritmo que demuestra la metodología empleada en la investigación. Se detalla la recolección de datos, clasificación de set de validación y entrenamiento, técnicas de interpolación y la validación cruzada. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 5. Localización de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 6. Relación lineal entre la elevación y la precipitación para el promedio del mes de octubre de 1981 a 2020. Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 7. Relación lineal entre la distancia hacia el Golfo de México y la precipitación para el promedio del mes de diciembre de 1981 a 2020. Fuente: Elaboración propia.	38
Figura 8. Relación lineal entre la distancia hacia el Océano Pacífico de cada estación meteorológica y la precipitación para el promedio del mes de enero de 1981 a 2020. Fuente: Elaboración propia.	38
Figura 9. Relación lineal entre la distancia hacia el océano Atlántico de cada estación meteorológica y la precipitación para el promedio del mes de diciembre de 1981 a 2020. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 10. Ilustración del método de interpolación IDW Fuente: Yang (2015)	40
Figura 11. Detalle y comportamiento de $L(\lambda)$, Fuente información: Díaz Monroy (2007)	47
Figura 12. Método de interpolación ANUSPLIN y comportamiento de la precipitación de Enero a Diciembre de 1981. Fuente: Elaboración propia.	54
Figura 13. Métrica Kling Gupta E y la interpolación de lluvia mensual de enero a diciembre de los métodos ANUSPLIN, IDW, SPE, SPS, OK, UK y KED. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 14. Métrica MAE y la interpolación de lluvia mensual de enero a diciembre de los métodos ANUSPLIN, IDW, SPE, SPS, OK, UK y KED. Fuente: Elaboración propia.	57
Figura 15. Métrica MSE y la interpolación de lluvia mensual de enero a diciembre de los métodos ANUSPLIN, IDW, SPE, SPS, OK, UK y KED. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 16. Métrica VE_{cv} y la interpolación de lluvia mensual de enero a diciembre de los métodos ANUSPLIN, IDW, SPE, SPS, OK, UK y KED. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 17. Métrica R^2 y la interpolación de lluvia mensual de enero a diciembre de los métodos ANUSPLIN, IDW, SPE, SPS, OK, UK y KED. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 18. Métrica NSE y la interpolación de lluvia mensual de enero a diciembre de los métodos ANUSPLIN, IDW, SPE, SPS, OK, UK y KED. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 19. Vinculación de las estaciones vecinas por mes de análisis y la frecuencia en relación de las estaciones vecinas cercanas. Fuente: Elaboración propia.	65

<i>Figura 20. Vinculación de la potencia para cada mes de análisis y la frecuencia de la potencia por cada mes. Fuente: Elaboración propia.</i>	66
<i>Figura 21. Mapas interpolados para 1981 en el mes de agosto a través de los métodos ANUSPLIN, IDW y SPLINE ELEVACIÓN. Fuente: Elaboración propia.</i>	67
<i>Figura 22. Interpolación del método ANUSPLIN para el año 1981. Fuente: Elaboración propia.</i>	80
<i>Figura 23. Interpolación del método ANUSPLIN para el año 1986. Fuente: Elaboración propia.</i>	81
<i>Figura 24. Interpolación del método ANUSPLIN para el año 1991. Fuente: Elaboración propia.</i>	82
<i>Figura 25. Interpolación del método ANUSPLIN para el año 1996. Fuente: Elaboración propia.</i>	83
<i>Figura 26. Interpolación del método ANUSPLIN para el año 2001. Fuente: Elaboración propia.</i>	84
<i>Figura 27. Interpolación del método ANUSPLIN para el año 2006. Fuente: Elaboración propia.</i>	85
<i>Figura 28. Interpolación del método ANUSPLIN para el año 2011. Fuente: Elaboración propia.</i>	86
<i>Figura 29. Interpolación del método ANUSPLIN para el año 2016. Fuente: Elaboración propia.</i>	87
<i>Figura 30. Interpolación del método IDW para el año 1981. Fuente: Elaboración propia.</i>	88
<i>Figura 31. Interpolación del método IDW para el año 1986. Fuente: Elaboración propia.</i>	89
<i>Figura 32. Interpolación del método IDW para el año 1991. Fuente: Elaboración propia.</i>	90
<i>Figura 33. Interpolación del método IDW para el año 1996. Fuente: Elaboración propia.</i>	91
<i>Figura 34. Interpolación del método IDW para el año 2001. Fuente: Elaboración propia.</i>	92
<i>Figura 35. Interpolación del método IDW para el año 2006. Fuente: Elaboración propia.</i>	93
<i>Figura 36. Interpolación del método IDW para el año 2011. Fuente: Elaboración propia.</i>	94
<i>Figura 37. Interpolación del método IDW para el año 2016. Fuente: Elaboración propia.</i>	95
<i>Figura 38. Interpolación del método SPLINE ELEVACIÓN para el año 1981. Fuente: Elaboración propia.</i>	96
<i>Figura 39. Interpolación del método SPLINE ELEVACIÓN para el año 1986. Fuente: Elaboración propia.</i>	97
<i>Figura 40. Interpolación del método SPLINE ELEVACIÓN para el año 1991. Fuente: Elaboración propia.</i>	98
<i>Figura 41. Interpolación del método SPLINE ELEVACIÓN para el año 1996. Fuente: Elaboración propia.</i>	99
<i>Figura 42. Interpolación del método SPLINE ELEVACIÓN para el año 2001. Fuente: Elaboración propia.</i>	100
<i>Figura 43. Interpolación del método SPLINE ELEVACIÓN para el año 2006. Fuente: Elaboración propia.</i>	101
<i>Figura 44. Interpolación del método SPLINE ELEVACIÓN para el año 2011. Fuente: Elaboración propia.</i>	102
<i>Figura 45. Interpolación del método SPLINE ELEVACIÓN para el año 2016. Fuente: Elaboración propia.</i>	103
<i>Figura 46. Gráficos de correlación entre elevación y la precipitación de enero a abril. Fuente: Elaboración propia.</i>	107
<i>Figura 47. Gráficos de correlación entre elevación y la precipitación de mayo a agosto. Fuente: Elaboración propia.</i>	108
<i>Figura 48. Gráficos de correlación entre elevación y la precipitación de septiembre a diciembre. Fuente: Elaboración propia.</i>	109
<i>Figura 49. Gráficos de correlación entre golfo de México y la precipitación de enero a abril. Fuente: Elaboración propia.</i>	110
<i>Figura 50. Gráficos de correlación entre golfo de México y la precipitación de mayo a agosto. Fuente: Elaboración propia.</i>	111
<i>Figura 51. Gráficos de correlación entre golfo de México y la precipitación de septiembre a diciembre. Fuente: Elaboración propia.</i>	112
<i>Figura 52. Gráficos de correlación entre el océano pacífico y la precipitación de enero a abril. Fuente: Elaboración propia.</i>	113
<i>Figura 53. Gráficos de correlación entre el océano pacífico y la precipitación de mayo a agosto. Fuente: Elaboración propia.</i>	114

Figura 54. Gráficos de correlación entre el océano pacífico y la precipitación de septiembre a diciembre. Fuente: Elaboración propia.	115
Figura 55. Gráficos de correlación entre el océano atlántico y la precipitación de enero a abril. Fuente: Elaboración propia.	116
Figura 56. Gráficos de correlación entre el océano atlántico y la precipitación de mayo a agosto. Fuente: Elaboración propia.	117
Figura 57. Gráficos de correlación entre el océano atlántico y la precipitación de septiembre a diciembre. Fuente: Elaboración propia.	118
Figura 58. Gráficos de correlación entre la pendiente y la precipitación de enero a abril. Fuente: Elaboración propia.	119
Figura 59. Gráficos de correlación entre la pendiente y la precipitación de mayo a agosto. Fuente: Elaboración propia.	120
Figura 60. Gráficos de correlación entre la pendiente y la precipitación de septiembre a diciembre. Fuente: Elaboración propia.	121
Figura 61. Gráficos de correlación entre longitud y la precipitación de enero a abril. Fuente: Elaboración propia.	122
Figura 62. Gráficos de correlación entre longitud y la precipitación de mayo a agosto. Fuente: Elaboración propia.	123
Figura 63. Gráficos de correlación entre longitud y la precipitación de septiembre a diciembre. Fuente: Elaboración propia.	124
Figura 64. Gráficos de correlación entre latitud y la precipitación de enero a abril. Fuente: Elaboración propia.	125
Figura 65. Gráficos de correlación entre latitud y la precipitación de mayo a agosto. Fuente: Elaboración propia.	126
Figura 66. Gráficos de correlación entre latitud y la precipitación de septiembre a diciembre. Fuente: Elaboración propia.	127
Figura 67. Gráficos de correlación entre elevación, distancia océano pacífico, distancia océano atlántico, distancia Golfo de México y la precipitación anual. Fuente: Elaboración propia.	128
Figura 68. Gráficos de correlación entre pendiente, longitud, latitud y la precipitación anual. Fuente: Elaboración propia.	129

Índice de tablas

Tabla 1. Base de la métrica VE_{cv} en función de MSE, RMSE, RRMSE, MSRE.	51
Tabla 2. Medida de precisión del error.	52
Tabla 3. Validación y método de interpolación en los doce meses del año. Fuente: Elaboración propia	62
Tabla 4. Validación y método de interpolación en época de precipitación intensa. Fuente: Elaboración propia	63
Tabla 5. Validación y método de interpolación en época de precipitación reducida. Fuente: Elaboración propia	64
Tabla 6. Base de datos estaciones promedio de precipitación mensual de 1981-2020. Fuente: elaboración propia.	104

2. Resumen y palabras claves

Es muy importante en la actualidad estudiar el comportamiento de la precipitación, puesto que la precipitación es una variable de la cual dependen diferentes fenómenos naturales y es a partir del comportamiento de la precipitación que se planifican o se plantean diferentes programas gubernamentales (sequía, irrigación, predicción de desastres, administración del recurso hídrico, modelos ecológicos, entre otros). Sin embargo, a nivel mundial, aún se discute el método de interpolación que mejor representa el fenómeno de la precipitación para cada región geográfica. En Guatemala no se ha realizado algún análisis o propuesta de algún método que mejor represente la precipitación en todo el territorio; por tanto, el presente trabajo consiste en el análisis comparativo entre los métodos de interpolación *IDW*, *Co-Kriging*, *Ordinary Kriging*, *Universal Kriging*, *Drifted External Kriging*, *ANUSPLIN* y *Spline*. Entre los principales resultados se obtuvieron que los métodos ANUSPLIN e IDW representan mejor la interpolación de la precipitación a lo largo del año; sin embargo, se observó que para época con menor precipitación el método IDW y SPLINE Elevación fueron los que mejores resultados demostraron y para la época con mayor precipitación los métodos IDW y ANUSPLIN demostraron mejores resultados.

método de interpolación, precipitación, validación cruzada

Abstract and keyword

It is currently very important to study the behavior of precipitation, since the precipitation is a variable on which different natural phenomena depend and the behavior of precipitation is the based from different government programs are planned or proposed (drought, irrigation, prediction of disasters, water resource management, ecological models, among others). However, worldwide, the interpolation method that best represents the phenomenon of precipitation for each geographic region is still debated. In Guatemala, there has not been an analyzed or proposal of a method that better represents precipitation throughout the territory; therefore, the present research consists of the comparative analysis between the IDW, Co-Kriging, Ordinary Kriging, Universal Kriging, Drifted External Kriging, ANUSPLIN and spline interpolation methods. The main results obtained, shows that ANUSPLIN and IDW were the methods which better represent the interpolation of precipitation throughout the

year; however, it was observed that for the season with less precipitation the IDW and SPLINE Elevation method were the ones that showed the best results and for the season with the highest rainfall the IDW and ANUSPLIN methods showed better results.

Interpolation method, precipitation, Cross validity

3. Introducción

Los mapas con datos de precipitación interpolados y los datos de precipitación son importantes dado que se utiliza en la planificación de ciudades, cultivos o planes de gobierno, predicción de desastres, irrigación, sequía, calidad y cantidad de agua subterránea; además, la determinación de la precipitación se perfila como un problema de actual trascendencia debido a los avances de la tecnología disponible para la investigación de la precipitación y que se han desarrollado limitados estudios en Guatemala o a nivel de Centroamérica.

Uno de los fenómenos poco estudiados a nivel global es el de la selección de los métodos de interpolación de la precipitación, así como el método que mejor se adapta al contexto geográfico sobre latitudes y longitudes del globo terráqueo e inclusive existen diferentes factores que aún no se han estudiado a profundidad como: los métodos que actualmente se están utilizando, las variables independientes que afectan a la precipitación, la topografía, los métodos de validación, los métodos para mejorar las bases de datos, los modelos de elevación digital y su influencia sobre la precipitación.

El fin primordial de la interpolación de la precipitación radica en estimar la precipitación en lugares donde no se tienen mediciones a partir de lugares donde sí se cuenta con información. Por lo que, el proceso de interpolación parte de una metodología que establece las relaciones o vinculación con distintos fenómenos o comportamientos climáticos por división geográfica, político-social o latitud y longitud. Es decir, la delimitación geográfica parte de la división de cuenca de río, sub-cuenca o cuenca de un lago o laguna; la delimitación político-social se refiere a la división de una ciudad, país, área metropolitana u otra y la delimitación de latitud o longitud ha sido una de las formas en cómo se ha delimitado el área de estudio.

Prevalece la discusión de qué metodología y método determina la precipitación y su representación para las delimitaciones geográfica, político-social o latitud-longitud que se han planteado como base para delimitar el área de estudio. De esta cuenta, se ha observado que inclusive en una misma región se ha obtenido métodos de interpolación diferentes que representan mejor la precipitación en dicha región, por lo que, aún se sigue encontrando nuevos hallazgos, nuevos métodos, nuevas bases de datos y nuevas metodologías que como resultado brindan una mejor representación de la precipitación. Por lo que, la aportación al conocimiento sobre la precipitación es importante, dado que, existen diferentes resquicios y vacíos al conocimiento desde donde se puede aportar; e inclusive se debe de particularizar el comportamiento por región o delimitación socio-política, ya que, la precipitación se ve influida por diferentes factores como la topografía, efectos orográficos, elevación, pendiente, distancia hacia el mar, dirección de los vientos, latitud y altitud, que necesita de una específica metodología y de la escala temporal de la precipitación (horaria, diaria, mensual, anual, lustro, década, decalustro u otras).

En Guatemala no existe ningún estudio que compare los métodos de interpolación de la precipitación a nivel de país. Sin embargo, se ha observado que el método de interpolación de la precipitación más utilizado es el método de Isoyetas (Ambiental, 2003; Cahuex Cotí, 2005; Chavez Soto, 2016). En Guatemala se generaliza el método de Isoyetas, debido a que la institución de gobierno INSIVUMEH lo utiliza; no obstante, no hay propuestas o críticas a ese método y no se comparan los resultados con los nuevos métodos de interpolación de la precipitación existentes. El método de Isoyetas en la actualidad no se utiliza o sobresale como el método de interpolación que mejor determina la precipitación y sobresalen en otros estudios los siguientes métodos de interpolación Kriging, IDW, Thiessen y spline (T. Chen et al., 2017; Di Piazza, Conti, Noto, Viola, & La Loggia, 2011; Dirks, Hay, Stow, & Harris, 1998; Keblouti, Ouerdachi, & Boutaghane, 2012; Kim et al., 2010; Vicente-Serrano, Saz-Sánchez, & Cuadrat, 2003; Wijemannage, Ranagalage, & Perera, 2016).

A nivel internacional algunos estudios (D. Chen et al., 2010; Daly, Neilson, & Phillips, 1994; Ly, Degré, & Charles, 2013; Xu, Zou, Zhang, & Linderman, 2014) han demostrado la importancia de estudiar por región o la clasificación espacial que se plantee, pero se debe particularizar cada estudio y se debe apoyar con mejoras a los procesos de validación de las

interpolaciones y exclusión y selección de los datos provenientes de las estaciones meteorológicas.

La presente investigación propone un estudio comparativo de los métodos de interpolación *Ponderación de Distancia Inversa (IDW)*, *Co-Kriging*, *Ordinary Kriging*, *ANUSPLIN*, *External Drift Kriging*, *Spline Simple* y *Spline Elevación*. Los datos para utilizar dentro de este estudio provienen de las bases de datos de estaciones meteorológicas del INSIVUMEH y se plantea una metodología que haría la verificación y descarte de incongruencia de los datos. Los datos de precipitación se analizaron bajo la escala mensual, por lo que fue necesario la tabulación y clasificación dentro del período de 1981 al 2020.

Luego se obtuvo un Modelo de Elevación Digital proveído por el Instituto Geográfico Nacional de Guatemala que permitió realizar la correlación entre la elevación con la precipitación; la distancia a los océanos se midió través del uso del Sistema de Información Geográfica (SIG) para determinar las distancias hacia las estaciones meteorológicas y su correlación con la precipitación y la pendiente en dónde se encuentra la estación meteorológica se obtuvo a través del uso del SIG y su correlación con la precipitación.

Se procedió a realizar la interpolación de la precipitación a través de los métodos propuestos (*IDW*, *Co-Kriging*, *Ordinary Kriging*, *ANUSPLIN*, *External Drift Kriging*, *Spline Simple* y *Spline Elevación*) y se corroboró los resultados a través de la validación estadística de los resultados (KED, Media de Error Absoluto: *MAE* sus siglas en inglés, Error de Sesgo Medio: *MSE* sus siglas en inglés, *Vecv*, *Kling Gupta Efficiency*, *Nash Sutcliffe Efficiency* y *Coeficiente de Determinación R^2*). Se realizaron los mapas de la interpolación de cada uno de los métodos de interpolación por el período de un año y con escala de cinco años. Se discutió los resultados obtenidos durante el proceso de interpolación de cada uno de los métodos y, sobre todo, con la mejora de factores estadísticos y matemáticos para la validación de cada método de interpolación.

4. Planteamiento del problema

La interpolación de la precipitación es un área de conocimiento muy extensa y profunda, que en la actualidad ha retomado mayor relevancia; dado que, es de vital importancia el conocimiento sobre el comportamiento de la precipitación en un determinado territorio. La

interpolación de la precipitación es un proceso complejo, dado que tiene injerencia en la estimación de la distribución espacial y la cantidad de precipitación horaria, diaria, mensual, anual, estacional, cíclico, tormentas o casos extremos que se utilizan en la planificación gubernamental (Eldrandaly & Abu-Zaid, 2011), en la modelación y procesos hidrológicos (T. Chen et al., 2017; Cheng, Hsieh, & Wang, 2007; Di Piazza et al., 2011; Keblouti et al., 2012; Knight, Yu, Jenkins, & Morris, 2005; Ly et al., 2013; Y. Wang et al., 2017; Wijemannage et al., 2016; Zhang, Leon, & Migliaccio, 2018), predicción de desastres y en la administración de recursos de agua (Cheng et al., 2007; Di Piazza et al., 2011; Keblouti et al., 2012; Mair & Fares, 2011), proyección de inundaciones (Keblouti et al., 2012; Knight et al., 2005), subcuencas de ríos (T. Chen et al., 2017), evaluación de recarga y calendarización de la irrigación (Mair & Fares, 2011), la estimación de la cantidad y calidad de la superficie del agua y el agua subterránea (Keblouti et al., 2012), la toma de decisiones (Eldrandaly & Abu-Zaid, 2011), en los modelos ecológicos (Daly et al., 1994; Earls & Dixon, 2007; Plouffe, Robertson, & Chandrapala, 2015; Wijemannage et al., 2016; X. Yang, Xie, Liu, Ji, & Wang, 2015), en los datos de climas que son necesarios para la modelación de enfermedades infecciosas emergentes (Plouffe et al., 2015) y en la escorrentía, evaporación y humedad del suelo (Y. Wang et al., 2017).

La interpolación de una variable climática como la precipitación se describe como un procedimiento que determina la distribución espacial de los puntos o vacíos donde no se tienen datos medibles de la precipitación o variable climática (Delrieu et al., 2014; Earls & Dixon, 2007). Además, la interpolación versa en un principio de autocorrelación espacial o dependencia espacial, donde se miden los grados de relación y dependencia entre objetos cercanos y distantes (Wijemannage et al., 2016). Por tanto, la interpolación espacial, además, es el proceso de trabajo inteligente donde se busca la continuidad de campos en lugares donde los datos no han sido medidos (Eldrandaly & Abu-Zaid, 2011) y formula un postulado con una función de interpolación que incluye la explicitud o implícitud del proceso de interpolación de una variable (Newlands, Davidson, Howard, & Hill, 2011).

Existen diferentes problemas asociados al proceso de la interpolación de la precipitación y muchas veces se enfocan en la metodología, por ejemplo, es habitual para un determinado territorio contar con bases de datos con registros de lluvias incompletos para diferentes

períodos (Tabios & Salas, 1985; Wagner, Fiener, Wilken, Kumar, & Schneider, 2012; Wijemannage et al., 2016; X. Yang et al., 2015); el desconocimiento del desempeño de los métodos de interpolación de la precipitación en la determinación de los campos o datos faltantes de precipitación para un determinado territorio (Earls & Dixon, 2007); la variabilidad espacial en la precipitación afecta la estimación de los parámetros del modelo de precipitación y los datos de salida del modelo hidrológico para la verificación de los resultados de la interpolación de los datos de precipitación (Ly et al., 2013) y una de las características de la precipitación es su intermitencia y que espacialmente es discontinua, frecuentemente con acumulaciones cero, por lo que, la confianza de la interpolación espacial de la precipitación es inherentemente más difícil que muchas otras variables (Dirks et al., 1998).

En la actualidad los métodos de interpolación utilizan nuevas herramientas de interpolación o herramientas complementarias a los métodos actuales; se incorporan nuevas metodologías de verificación del resultado de interpolación; se correlaciona la precipitación con variables de fenómenos climáticos del territorio (orográficos, topográficos, elevación, pendiente, distancia hacia el mar, dirección de los vientos, latitud y altitud); se analizan durante fenómenos extremos para determinar el modelo que mejor describe su comportamiento; se incluyen análisis a diferentes escalas de tiempo (horarios, diarios, mensuales, anuales, lustros, década, decalustros u otras) por cada método de interpolación; se verifica el número de estaciones meteorológicas que mejor encajan para cada modelo; se utilizan diferentes fuentes de información o bases de datos (radar, satelital y estación meteorológica de diferentes modelos, entre otras); se explora en las escalas territoriales (cuena, subcuena, país, región, montaña, área urbana, área rural, entre otras), y existen diferentes enfoques y lógicas que denotan las nuevas aportaciones al conocimiento sobre la interpolación de la precipitación.

En Guatemala a nivel gubernamental (INSIVUMEH) y académicamente utilizan el método de IDW, sin especificar las estaciones vecinas, los datos de análisis y la potencia IDP; sin embargo, no se ha definido o propuesto algún otro método de interpolación de la precipitación que valide el comportamiento de la precipitación en el territorio de Guatemala. Por ello, es de vital importancia, que se estudien los métodos de interpolación de la

precipitación que mejor distribuyen el comportamiento de precipitación en Guatemala, de hecho, aún persiste en distintos lugares del mundo la discusión sobre cuál es el método de interpolación que mejor distribuye la precipitación en el área espacial demarcada.

Uno de los problemas con los que llegan a lidiar los investigadores radica en la base de datos que proviene de estaciones meteorológicas, puesto que, las bases de datos suelen tener inconsistencias o datos incompletos; por tanto, en esta investigación se propone un método de ajuste de los datos de precipitación y, otro de los problemas es que en Guatemala se utiliza métodos de interpolación que no reflejan la distribución y el comportamiento de la precipitación, por lo que, se propone el análisis de diferentes métodos de interpolación de la precipitación y se analizarían los datos arrojados por los estudios.

5. Delimitación en tiempo y espacio

En relación con la escala de tiempo se plantea dos rutas a seguir: la primera está asociada al análisis de la variable precipitación mensual y la segunda, con la periodicidad de análisis por períodos de cinco años, los cuales fueron los siguientes: 1981, 1986, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011 y 2016. Es decir, se analizó para el año 1981 la precipitación promedio mensual, luego se analizaría el año 1986, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011 y 2016 con la precipitación mensual y así, sucesivamente, hasta llegar al año 2020.

Se divide el análisis de la precipitación por cada mes; por lo que, la división temporal permitió demarcar la primera escala de tiempo de análisis que se refiere a la precipitación por la precipitación mensual, que hasta el momento no se ha abordado bajo el contexto de Guatemala.

La categorización espacial de los estudios para la interpolación de la precipitación se pueden categorizar con base física, política-social o conceptual, el grado de complejidad y física de la distribución espacial del análisis de la precipitación (Ly et al., 2013). Por lo que se propone el caso de la división política-social, puesto que representa a la república de Guatemala y se busca obtener un análisis completo de toda la delimitación espacial que incluyeron las estaciones meteorológicas de distintas bases de datos.

El área de estudio se enfoca a la república de Guatemala y corresponde a un área de 108,889 kilómetros cuadrados, se encuentra entre las latitudes de 13°44'19.86" N y 17°48'55.67"N y longitud 88°14'04.55"O y 92°12'38.32"O.

6. Marco teórico

Con el incremento de la demanda de la determinación de la precipitación en tiempo real y la modelación hidrológica distribuida es fundamental la precisión y cambio de la estimación de la precipitación espacial (Cheng et al., 2007). La precipitación cumple un rol importante en los fenómenos climáticos, además, es la variable de mayor relevancia en todos los fenómenos hidrológicos, tanto en áreas urbanas como rurales. No obstante, la precipitación denota de una alta variabilidad espacio-temporal, lo que genera una alta incertidumbre; por tanto, al no contar con una alta resolución espacio-temporal cualquier modelación hidrológico que se realice denotaría demasiados errores y no reflejaría la realidad sobre la cuenca que se analice, lo que denota una carencia de múltiples análisis pormenorizados en las ciudades latinoamericanas (Vargas, Santos, Cardenas, & Obregon, 2011).

Para la determinación de la distribución espacial de la precipitación se necesita de una metodología pormenorizada que se documente a partir de la recolección de datos en estaciones meteorológicas u otro método como el satelital o radar, datos o mapas con la Modelación de Elevación Digital (*DEM en sus siglas en inglés*), la selección de la escala espacial y temporal de análisis, determinación de correlaciones de variable dependiente (precipitación) y variables independientes (distancia hacia el mar, elevación, latitud, longitud, viento, pendiente, aspecto y circulación de escala larga, entre otras) (T. Chen et al., 2017), métodos de interpolación numéricos, topográficos y geoestadísticos (Jones, Wang, & Fawcett, 2009), métodos de validación o verificación de los métodos de interpolación.

Recolección de la precipitación, análisis y ajuste de la base de datos:

El principal problema, previo a escoger el método de interpolación que más encaja, es la disponibilidad de datos de precipitación, algunas veces, los datos son registrados continuamente, pero los pluviómetros están dispersos (Ly et al., 2013). Por lo que, es indispensable considerar que cada fuente de información de datos de precipitación es propensa a errores sistemáticos y aleatorios durante el proceso de medición de la

precipitación en estaciones sobre el suelo (Di Piazza et al., 2011). Los errores sistemáticos y aleatorios suelen ser de diferentes tipos, como por ejemplo: la pérdida de agua durante la medición, adhesión de pérdida sobre la superficie del calibrador y por la dispersión de agua debido al colector o recipiente (Teegavarapu & Chandramouli, 2005).

Los puntos o datos de series de tiempo de la precipitación para una ubicación específica se caracteriza como datos por puntos y en lugares desconocidos donde se busca que los datos sean espacialmente continuos (datos de cuadrícula) (Zhang et al., 2018). Es decir, los datos de precipitación se pueden obtener a partir de los puntos o de la espacialidad continua como resultado de la interpolación de la precipitación y de los instrumentos de medición en una ubicación específica. No obstante, se presenta un vínculo importante con relación a la variabilidad de los datos de la precipitación y la variabilidad espaciotemporal. Por lo que, la determinación del método de interpolación depende en buena medida de su incertidumbre y los datos existentes que provienen de los instrumentos utilizados para su medición en campo y durante su interpolación (F. W. Chen & Liu, 2012).

La continuidad de la representación de la precipitación en un proceso hidrológico permite analizar los patrones espaciales de variación de tales procesos, por lo que la interpolación espacial es necesaria en la hidrología en áreas a través de la transposición de datos, estudios de balance de agua, la relación de la escorrentía-precipitación y la predicción del flujo y el diseño de redes hidrometeorológica (Tabios & Salas, 1985). Uno de los enfoques necesarios en la interpolación de la precipitación es la generación de continuidad y datos ordenados, que pueden determinar los datos en puntos desconocidos que son requeridos a partir del uso de los métodos de interpolación espacial (Xu et al., 2014).

Existe una necesidad de mejorar los análisis de precipitación de lluvia diaria en ciertas regiones del mundo, puesto que se posee muy poca información acerca de la precisión de los métodos de interpolación de precipitación. Por ello, está clara la necesidad de mantener de manera consistente las redes de datos con alta calidad (Jones et al., 2009) que demuestra que con una declinación temporal en todas las redes de precipitación se tienen impactos sustanciales en la habilidad de monitorear el clima. Otra de las tensiones teóricas en los

modelos de precipitación radica en contar una base de datos completa y, principalmente, confiable de precipitación a partir de una base temporal y espacial (Di Piazza et al., 2011).

Mientras que los datos de estaciones diarias son ahora regularmente usados como un dato de ingreso para los modelos biofísicos y biogeoquímicos, algunas preguntas se mantienen a un nivel de incertidumbre en el uso de datos diarios, especialmente, para hacer predicciones de modelos de interpolación espacial. Los modelos de interpolación proveen de información donde los datos observacionales no están disponibles y provee de una medición cuantificable de la precisión en la estimación y predicción (Newlands et al., 2011).

Las observaciones climáticas a través de instrumentos de medición son importantes para la investigación del clima y los estudios de su impacto. Por lo que, es necesario previo al hacer el uso de base de datos se debe realizar la selección de los datos congruentes y descartar aquellos que denotan errores (Jeffrey, Carter, Moodie, & Beswick, 2001), por tanto, se mejorará la calidad del control de los datos antes de que ellos sean usados (D. Chen et al., 2010). La forma en cómo se maneja la información faltante es partir de dos ópticas: la primera se asocia al registro continuo e ignorar los eventos subsecuentes, mientras que otros acercamientos sugieren ignorar las brechas al asumir que los datos se adaptan a series continuas de registros (Di Piazza et al., 2011). Uno de los mayores problemas metodológicos que se presentan en las bases de datos es detectar y remover los errores, por lo que, se recomienda que se centren diferentes esfuerzos en relación con los datos y registros, así como el planteamiento de una metodología que permita mantener el control y el comportamiento de los datos provenientes de estaciones meteorológicas.

Correlación de la variable dependiente con las variables independientes

La fase de la determinación de la correlación de la precipitación y las variables independientes (elevación, distancia hacia el océano atlántico y océano pacífico y pendiente) es importante debido a que a partir de las variables independientes se puede interpolar la precipitación, puesto que la interpolación necesita de una variable dependiente e independiente para determinar los vacíos o lugares donde no se tienen mediciones. Esta fase de la investigación es otro de los aportes al conocimiento que realiza esta investigación, puesto que, aún no se detalla variables que en otras regiones del globo terráqueo han denotado

una correlación y a partir de ello, se ha demarcado el método de interpolación que mejor distribuye la precipitación en el territorio.

La consideración de covarianzas espaciales no estacionarias son fundamentales durante el proceso de interpolación, dado que las mediciones de rangos de correlación espacial ayuda considerablemente en la reducción de la incerteza en la predicción de la interpolación (Newlands et al., 2011). Es decir, existen diferentes variables y sus procedencias plantean para diferente latitud y longitud del mundo diferente relación con la variable de precipitación. Por lo que, la reducción de la incerteza es fundamental, como un proceso previo a la interpolación de la precipitación y con base en el comportamiento del clima y la relación con variables orográficas, topográficas u de otra índole.

Se presentan diversos factores que generan incertidumbres dentro de la interpolación de la precipitación tales como la latitud, longitud, altitud, pendiente, aspecto y circulación del viento, tienen efectos variables sobre la distribución espacial de precipitación (Xu et al., 2014). De hecho, se menciona que sería indispensable profundizar en factores topográficos de manera pormenorizada para mejorar la certeza de la determinación de la precipitación (T. Chen et al., 2017). La topografía impacta en los patrones de precipitación a través de los efectos orográficos, los cuales están asociados con la elevación; ya que las tasas de precipitación inducidas son influenciadas por la altitud debido al levantamiento, enfriamiento adiabático y resulta en la condensación de masas de aire húmedo sobre algunos lados de montañas (Ly et al., 2013). En los últimos años, diversos trabajos han explorado los posibles beneficios para la interpolación de datos climáticos del uso de variables geográficas relacionadas, como la altura o la orientación (Izquierdo & Márquez, 2006). Además, existen diferentes métodos para la interpolación de la precipitación y la temperatura, así como, la diversidad de métodos que reflejan la naturalezas multivariada del clima que varía con la transición del terreno, la proximidad del agua, la cobertura vegetal o de tierra, y las condiciones del viento (Newlands et al., 2011).

Métodos de interpolación de la precipitación

Las técnicas de interpolación predicen un valor idéntico a un valor medible hacia una ubicación definida y que es conocido como un interpolador exacto (Kebblouti et al., 2012).

Existen muchos métodos de interpolación espacial de la precipitación que dependen de su efectividad y el uso de variables; por lo que, la selección de alguno de ellos depende del objetivo del estudio, así como del contexto del área (superficie, densidad de redes, entre otros) (Kablouti et al., 2012).

La dificultad de reproducir adecuadamente la precipitación espacial continua ha propiciado errores notables como el resultado de modelos de respuesta hidrológica, los cuales son sensitivos al ingreso de volumen a cualquier escala de cuenca. Para mejorar las limitaciones que tienen diferentes métodos, otros tipos de métodos geoestadísticos son actualmente probados para preparar información de precipitación horaria para modelos hidrológicos durante los eventos de inundaciones. Muchas veces, se prefiere el uso de los métodos geoestadísticos con base en la precipitación anual y mensual y, particularmente, los métodos geoestadísticos multivariados los cuales pueden brindar mayores beneficios y que se utilizan los datos de elevación como una variable secundaria (Ly et al., 2013).

Existen tres principales técnicas para la estimación de datos meteorológicos faltantes, se pueden utilizar los métodos empíricos, métodos estadísticos y métodos de ajuste de funciones (Edmond Moeletsi, Phumlani Shabalala, De Nysschen, & Walker, 2016).

Entre las categorizaciones que se realizan en los estudios prevalecen las que se analizan por país, donde, en ocasiones, por el área que cubre cada país pueden presentar diferentes retos y objetivos por realizar. Por ejemplo, en uno de los estudios analizados, se justificó su abordaje a partir, del poco esfuerzo que se ha realizado para crear una cuadrícula de precipitación diaria para China y que se han creado diferentes productos de interpolación específicamente para el análisis de algunas regiones de China (D. Chen et al., 2010). Es decir, el planteamiento de un estudio a futuro puede radicar en ausencias de análisis tanto desde la perspectiva espacial, como de particularizar métodos que permitan adentrar en dinámicas de los métodos de interpolación de la precipitación.

Cada método de interpolación tiene su propia funcionalidad: se tiene que diferenciar entre los métodos a partir de su propósito o necesidad, se pueden mejorar los métodos de interpolación al utilizar diferentes valores constantes que ponderen los resultados, el número de estaciones de precipitación es otro parámetro de influencia y la diferencia entre la

precisión de la precipitación en temporadas seca y de lluvia (F. W. Chen & Liu, 2012). El método de interpolación que se seleccione toma como base las variables geográficas, climáticas, espaciales u otras, en la continuidad espacial de la base de datos y se demarcará, principalmente, por las características topográficas (Díaz Padilla et al., 2008).

Entre los numerosos métodos de interpolación, ningún método es únicamente óptimo, y que el mejor método de interpolación para una situación específica puede únicamente ser obtenido al comparar sus resultados. El abordaje de algunos estudios se ha justificado a partir de la carencia de estudios previos desarrollados en el área de estudio de interés y en ocasiones se introduce un solo método para la estimación. La interpolación espacial puede ser usada para estimar la variable de la precipitación en otras ubicaciones. Sin embargo, existen diferentes métodos para realizar la interpolación, y puede ser difícil para determinar cuál produce las mejores condiciones (Kebblouti et al., 2012).

Cada método de interpolación tiene sus ventajas y desventajas y depende considerablemente de las características de las bases de datos: un método que puede encajar bien con algunos datos y puede no encajar para una diferente base de datos. Los criterios que se utilizan para determinar cuál es el método para interpolar la precipitación y que normalmente se encaja a la base de datos existentes, por lo que es importante definir o determinar los objetivos que requieren de diferentes criterios de evaluación de la interpolación (Kebblouti et al., 2012). El método de validación cruzada es una técnica común que permite evaluar los resultados de los métodos de interpolación (T. Chen et al., 2017).

La metodología de la interpolación de la variable precipitación requiere de diferentes procesos, datos y herramientas para su determinación, por tanto, se detalla la fase inicial de la investigación, que consiste en la clasificación y tabulación de los datos provenientes, así como el descarte de los datos incompletos o incongruentes; posteriormente, se traslada la fase a la correlación de la variable precipitación con variables independientes como elevación, pendiente y distancia hacia al mar. La elevación del territorio de Guatemala se obtendrá a partir del Modelo de Elevación Digital que se obtendrá en el Instituto de Geográfico Nacional, la pendiente se obtendrá a partir de la elevación y la distancia hacia al mar será calculado a partir del uso del Sistema de Información Geográfica.

Métodos de validación de los métodos de interpolación

El método de validación cruzada es una técnica común que permite evaluar los resultados de los métodos de interpolación (T. Chen et al., 2017). Otra de las dificultades asociadas con los esquemas de la interpolación con su aplicación en regiones con datos escasos es la evaluación de la precisión. Usualmente los resultados de la interpolación son evaluados aplicando métodos de validación cruzada. Desafortunadamente, la certeza de la validación del método depende del número y la ubicación de los pluviómetros dentro del área estudiada, el cual debería de ser representativa de la distribución de la precipitación en el espacio (Wagner et al., 2012). La verificación de la consistencia de la base de datos de la precipitación, así como de variables climáticas, se realiza a partir de la interpolación y eso necesita de la estimación de la precisión a través del error de interpolación (Jeffrey et al., 2001).



Figura 1. Fase inicial de la investigación. Fuente: elaboración propia.

Para las fases de la investigación que se observa en la Figura 1 se detalla la fase de ejecución del análisis y obtención de resultados. Por lo que, se debe interpolar los datos que se obtuvieron en la fase inicial y se trasladan para realizar la interpolación que está asociada con las variables de elevación, pendiente y distancia hacia los dos océanos en Guatemala. Posteriormente, se obtuvo la interpolación a través de los métodos IDW, Co-Kriging, Ordinary Kriging, ANUSPLIN, External Drift Kriging, Spline Elevación y Spline Simple, por cada método se analizó la precipitación mensual para los años 1981, 1986, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011 y 2016.

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI-

DIARIA	3	4	1	2	1	1	0	0	0	12
MENSUAL	0	7	0	0	0	0	0	0	0	7
ANUAL	1	3	1	0	0	0	0	1	1	7
TEMPORAL	1	3	0	0	0	0	1	0	0	5
TOTAL	6	18	2	2	1	1	1	1	1	

De la Tabla 1 se puede concluir que existe carencia de información relacionada con la escala horaria, que los enfoques de la interpolación de la precipitación se han centrado a partir de las escalas diarias, mensuales y anuales. Las escalas de tiempo horaria y temporales han sido las escalas de análisis que menos se han utilizado; sin embargo, los análisis de las precipitaciones en escalas de tiempo horario demandan de algoritmos complejos y el uso de equipo y máquinas potentes que puedan procesar todos numerosos datos. Por otro lado, la escala mensual sólo se ha analizado bajo el método de Kriging, no se ha utilizado para el IDW, ANUSPLIN o Spline; por lo que, al enfocarse en la escala mensual permitiría obtener otra perspectiva del comportamiento de los métodos de interpolación.

Tabla 2. Clasificación escala espacial de la literatura sobre el método de interpolación de la precipitación y sobre la región o país de estudio. Fuente: elaboración propia.

FUENTE DE LITERATURA	ESCALA ESPACIAL	REGIÓN O PAÍS DE ESTUDIO
(Abtew, Obeysekera, & Shih, 1993)	Área delimitada política y socialmente (región, estado, ciudad, municipio, etcétera)	Sur de Florida, Estados Unidos de América
(D. Chen et al., 2010)	Área delimitada por país	China
(Cheng et al., 2007)	Cuenca de río	Cuenca del río Tanshui, Taiwan
(Díaz Padilla et al., 2008)	Área delimitada por latitud y longitud	Golfo de México, México
(Dirks et al., 1998)	Isla	Isla de Norfolk, Australia
(Di Piazza et al., 2011)	Isla	Isla de Sicilia, Italia
(Izquierdo & Márquez, 2006)	Cuenca de río	Tenerife Islas Canarias, España
(Kebblouti et al., 2012)	Área delimitada política y socialmente (región, estado, ciudad, municipio, etcétera)	Ciudad de Annaba, Algeria
(Kim et al., 2010)	Área delimitada por país	Corea del Sur
(Mair & Fares, 2011)	Área delimitada por montaña	Isla O'ahu, Hawaii, Estados Unidos de América
(Newlands et al., 2011)	Área delimitada por país	Canadá
(Ponte Ramírez & Bosque Sendra, 1997)	Área delimitada política y socialmente (región, estado, ciudad, municipio, etcétera)	Jacetania, Provincia de Huesca, Aragón, España
(Portalés, Boronat-Zarceño, Pardo-Pascual, & Balaguer-Beser, 2008)	Área delimitada política y socialmente (región, estado, ciudad, municipio, etcétera)	Valencia, España
(Plouffe et al., 2015)	Isla	Sri-Lanka
(Price, McKenney, Nalder, Hutchinson, & Kesteven, 2000)	Área delimitada política y socialmente (región, estado, ciudad, municipio, etcétera)	British Columbia / Alberta y Ontario / Québec
(Tabios & Salas, 1985)	Área delimitada política y socialmente (región, estado, ciudad, municipio, etcétera)	región II del centro norte de Estados Unidos de América (Nebraska y norte de Kansas)
(Taesombat & Sriwongsitanon, 2009)	Cuenca de río	Río aguas altas Ping, Norte de Tailandia
(Vargas et al., 2011)	Cuenca de río	Bogotá, Colombia
(Vicente-Serrano et al., 2003)	Cuenca de río	Valle medio del Ebro, España

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI-

(Wagner et al., 2012)	Cuenca de río	Río Mula y Mutha, India
(Y. Wang et al., 2017)	Cuenca de río	Río Heihe, Tibet, China
(Wijemannage et al., 2016)	Isla	Sri-Lanka
(Xu et al., 2014)	Área delimitada política y socialmente (región, estado, ciudad, municipio, etcétera)	Provincia Sichuan, China
(X. Yang et al., 2015)	Área delimitada política y socialmente (región, estado, ciudad, municipio, etcétera)	Region Grande de Sidney, Australia
(Zhang et al., 2018)	Área delimitada política y socialmente (región, estado, ciudad, municipio, etcétera)	Florida, Estados Unidos de América
(T. Chen et al., 2017)	Cuenca de río	Cuenca de río Xinxie, China
(Delrieu et al., 2014)	Área delimitada por latitud y longitud	Francia
(Knight et al., 2005)	Cuenca de río	Cuenca de río Brisbane, Australia
(Rivera, Hinrichs, & Marianetti, 2019)	Área delimitada por latitud y longitud	Región semiárido centro-oeste, Argentina
(Edmond Moeletsi et al., 2016)	Área delimitada política y socialmente (región, estado, ciudad, municipio, etcétera)	Estado Province, Sur África
(Wagner et al., 2012)	Cuenca de río	Ríos Mula y Mutha, India
(Eldrandaly & Abu-Zaid, 2011)	Área delimitada política y socialmente (región, estado, ciudad, municipio, etcétera)	Oeste de Arabia Saudita
(Jones et al., 2009)	Área delimitada por país	Australia
(Daly et al., 1994)	Cuenca de río	Río Willamette, Estados Unidos
(Tomczak, 1998)	Área delimitada política y socialmente (región, estado, ciudad, municipio, etcétera)	Frontera con Suiza
(Jeffrey et al., 2001)	Área delimitada por país	Australia
(Teegavarapu & Chandramouli, 2005)	Área delimitada política y socialmente (región, estado, ciudad, municipio, etcétera)	Kentucky, Estados Unidos
(Earls & Dixon, 2007)	Cuenca de río	Río Charlie, Florida, Estados Unidos
(Taesombat & Sriwongsitanon, 2009)	Cuenca de río	Cuenca del Río alto Ping, Norte de Tailandia

Fuente: elaboración propia.

Es importante dentro del estudio del Estado del Arte la clasificación de los artículos a partir de la escala espacial y la región o país estudiado. Por lo que, en la Tabla 2 se puede observar la clasificación de la literatura a partir de la escala espacial y la región o país que se estudió; la clasificación de escala espacial se dividió a partir de la delimitación política-social, país, cuenca, latitud y longitud y área delimitada por montaña. Es decir, la delimitación de escala espacial fue una categorización realizada durante la lectura del Estado del Arte y que al final, era la tendencia y clasificación que los autores utilizaron para especificar el área de estudio y el lugar dónde se realizó.

Se puede observar que a nivel latinoamericano los únicos estudios existentes fueron los que se elaboraron en México (Díaz Padilla et al., 2008), Argentina (Rivera et al., 2019) y Colombia (Vargas et al., 2011); no obstante, los estudios realizados en Latinoamérica presentan diferentes esquemas metodológicos y diferentes fuentes de información. Por lo

que, aún persiste la necesidad de retroalimentar de los casos en diferentes países y sus propias metodologías.

Se observa en la Tabla 3 que las escalas espaciales de análisis que más se utiliza es el área delimitada por medio de la concepción político-social y la cuenca de un río. Sin embargo, el contexto de país es la tercera opción que suele aparecer. El contexto de escala espacial por país es un reto para los investigadores, porque depende en buena medida de la distribución de las estaciones meteorológicas y de la información que permita abarcar la mayoría del territorio de un país, eso cuando un país es muy grande en área.

Tabla 3. Detalle de la escala espacial de estudios actuales. Fuente: elaboración propia.

ESCALA ESPACIAL	NÚMERO DE ESTUDIOS
ISLA	4
ÁREA DELIMITADA POLITICA Y SOCIALMENTE (REGIÓN, ESTADO, CIUDAD, MUNICIPIO, ETC.)	13
CUENCA DE RÍO	13
ÁREA DELIMITADA POR PAÍS	5
ÁREA DELIMITADA LATITUD Y LONGITUD	3
ÁREA DELIMITADA POR MONTAÑA	1
TOTAL	39

Se observó que los países que más estudios presentan son Estados Unidos (6), Australia (5), España (4) y China (4); y cada uno de los estudios denota diferentes escalas espacial y área de estudio diferente. También, las diferentes escalas denotan resultados diferentes que denotan que los métodos de interpolación utilizados en sus estudios presentan hallazgos totalmente diferente y, en ocasiones, opuestos.

Los hallazgos de cada artículo demostraron desde los métodos de interpolación que denoto mejor comportamiento el territorio analizado y los resultados varían a lo largo de todos los estudios, de hecho, se encontró una asociación entre el número de estaciones meteorológicas y los métodos de interpolación utilizados. Por otro lado, se observó una tendencia de los métodos de interpolación con relación al área de estudio seleccionado; lo mismo ocurre con la escala temporal de análisis de la precipitación, puesto que se observó una relación directa con esas escalas. Sin embargo, se pudo observar que para China a diferentes escalas

temporales y espaciales el *Ordinary Kriging* fue el método que obtuvo una mayor validación; para los estudios efectuados en Estados Unidos de América, se obtuvo que a diferentes escalas el método *Kriging* denotó un mejor comportamiento; para los estudios latinoamericanos se obtuvo que el *TSPLINE* (Díaz Padilla et al., 2008), *Ordinary Kriging* (Izquierdo & Márquez, 2006) y el *IDW* (Vargas et al., 2011) fueron los métodos que menor error estadístico demostraron, por lo que se puede considerar, que puede existir variaciones con base en la base de datos, temporalidad de análisis, escala de análisis, entre otros.

En cuanto al método de validación que se ha utilizado para verificar los resultados obtenidos de los métodos de interpolación de la precipitación se puede observar en la Tabla 4, que los métodos *RMSE* y *MAE* han sido los métodos de validación cuantitativa que más se han utilizado. La validación de la interpolación radica en revisar la consistencia de los resultados obtenidos y que con base en sus resultados podrán determinar los errores que posee cada uno de los resultados obtenidos de cada método de interpolación.

Tabla 4. Método de validación utilizados en la literatura leída para esta investigación.

MÉTODO DE VALIDACIÓN	CANTIDAD
<i>RMSE (STANDARDIZED ROOT MEAN SQUARE ERRORS)</i>	15
<i>MAE (MEAN ABSOLUTE ERRORS)</i>	17
<i>POD (PROBABILITY OF DETECTION)</i>	2
<i>FAR (FALSE ALARM RATIO)</i>	2
<i>CSI (CRITICAL SUCCESS INDEX)</i>	1
<i>SE (STADISTICAL ERROR)</i>	2
<i>MDPE (MEDIAN PERCENT ERROR)</i>	1
<i>ETS (EQUITABLE THEAT SCORE)</i>	1
<i>R² (COEFFICIENT OF DETERMINATION)</i>	3
<i>PBIAS (PERCENTAGE BIAS)</i>	1
<i>MBE (MEAN BIAS ERROR)</i>	2
<i>EF (MODEL OF EFFICIENCY)</i>	1
<i>R (PEARSON CORRELATION COEFFICIENT)</i>	1
<i>Pf (COEFFICIENT OF VARIATION)</i>	1
<i>RMAE (RELATIVE MAE)</i>	1
<i>RMBE (RELATIVE MBE)</i>	1
<i>G (GOODNESS OF PREDICTION MEASURE)</i>	1

Fuente: elaboración propia.

8. Objetivos (generales y específicos aprobados en la propuesta)

OBJETIVOS GENERALES

Determinar el método de interpolación de la precipitación que denota el comportamiento de la precipitación en Guatemala (entre los métodos *IDW*, *Co-Kriging*, *Ordinary Kriging*, *Kriging External Drift*, *ANUSPLIN*, *Spline Simple* y *Spline Elevación*).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analizar, tabular y ajustar los datos de precipitación provenientes de las estaciones meteorológicas que estén incompletos o carezcan de congruencia
- b) Determinar la correlación de la precipitación promedio mensual y las siguientes variables independientes: elevación, pendiente, distancia hacia el océano pacífico, distancia hacia el Golfo de México, océano atlántico, longitud y latitud
- c) Validar cada método de interpolación de la precipitación (*IDW*, *Co-Kriging*, *Ordinary Kriging*, *Kriging External Drift*, *ANUSPLIN*, *Spline Simple* y *Spline Elevación*) desde la óptica estadística
- d) Comparar y analizar los resultados arrojados en la validación de cada método de interpolación y el comportamiento de la precipitación en el territorio de la República de Guatemala

9. Materiales y métodos

El aporte al conocimiento de la presente propuesta de investigación radica en aportaciones metodológicas y empíricas. Es decir, se cubrirá el vacío del conocimiento del método de interpolación que mejor detalla la precipitación en Guatemala, se obtendrán datos importantes de precipitación, correlación de variables independientes como la elevación, pendiente y distancia hacia el océano pacífico y océano atlántico, incluirá la aportación de un método de validación de las diferentes técnicas de interpolación de la precipitación.

Además, incluirá un método que descartará los datos de la precipitación provenientes de las estaciones meteorológicas y de las incongruencias de las estaciones.

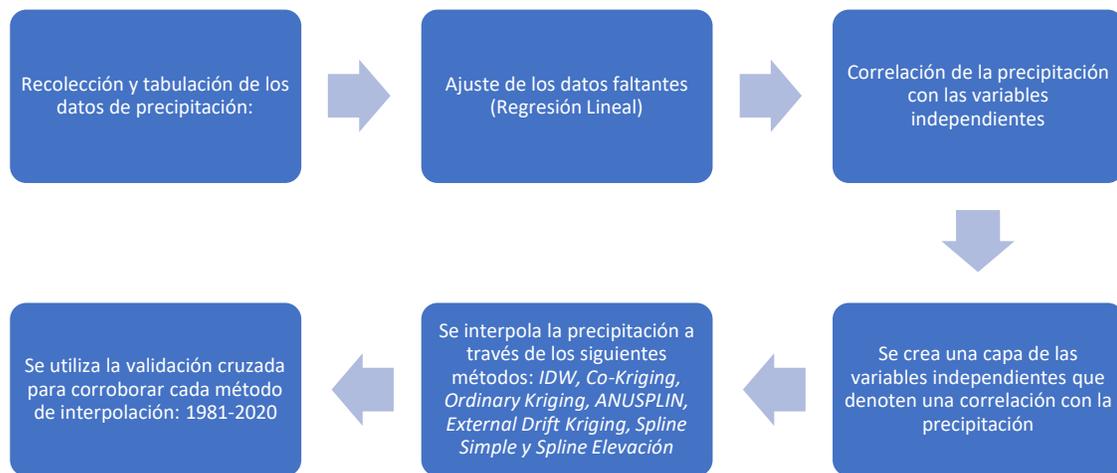
Los resultados, metodologías y métodos utilizados en el presente estudio encajan dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible dado que se adapta a lo siguiente: con el mapeo de la precipitación que las metas del objetivo 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible indican en su sección 6.4 que se debe de asegurar, en primer lugar, la sostenibilidad de la extracción de las aguas dulce, así como su abastecimiento; lo que ayudaría a enfrentar la carencia y escasez de agua. Es decir, la precipitación es fundamental para definir los niveles de agua dulce disponible para ciertas regiones y con los mapeos con exactitud de la precipitación en Guatemala, se logrará determinar el agua de escorrentía, el agua de lagos, lagunas o agua de subterránea; Además, en la sección 11.5 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible se busca reducir, las muertes que se han ocasionado por causa de desastres; principalmente, sobre los efectos que están relacionados con el agua y para ello, la información que se obtenga de esta investigación se puede utilizar para determinar áreas que pueden presentar áreas de inundaciones o de deslave que con la información precisa de la precipitación se podrá modelar áreas de riesgo.

Se utilizaron hojas de cálculo de Excel para almacenar los datos de precipitación, posteriormente se utilizó el software R para realizar los grupos de entrenamiento y validación de datos, análisis espacial y validación mediante métricas. También se utilizó el software Anusplin V 4.0.

9.1 Enfoque de la investigación

El enfoque cuantitativo es el esquema es la base principal de la metodología que se plantea para esta propuesta de investigación (Figura 3). Es decir, la información que se recolectará de datos será a través de los datos de la meteorología de las estaciones existentes se depurarán los datos y se rectificarán los datos analizados.

Figura 3. Metodología para el análisis comparativo de la investigación. Fuente: elaboración propia.



El proyecto de investigación realizado fue factible en el tiempo y económicamente. Además, los insumos y equipos necesarios radican en equipo de cómputo y programas de matemática y los Sistemas de Información Geográfica están disponibles y se utilizó el personal técnico y especializado para realizar la tabulación, análisis e interpretación de los resultados. Se recopiló la información mensual de precipitación del periodo enero de 1981 a diciembre de 2020, para ello se integró la información de varias redes de observación que existen en Guatemala, siendo estas: la red climática del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología -INSIVUMEH-, Instituto Nacional de Electrificación -INDE-, -EMPAGUA-, Instituto de Cambio Climático Privado -ICC- y estaciones fronterizas de los servicios meteorológicos de El Salvador, Honduras, Belice y México. También, se integraron los datos de Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations (CHIRPS) de la versión 2.0, estos datos sirvieron para completar, extender o rellenar los vacíos de información.

La categorización espacial de los estudios para la interpolación de la precipitación se pueden categorizar con base física, política-social o conceptual, de acuerdo con el grado de complejidad y física de la complementación presente en la formulación de la estructura de análisis de la precipitación (Ly et al., 2013). Se realizó una clasificación espacial con base en las delimitaciones establecidas en cada uno de los estudios analizados, lo que se pudo

observar que las clasificaciones que más prevalecen son las áreas delimitadas política y socialmente, y la delimitada por medio de algún río. Entre las áreas delimitadas política y socialmente se consideran los estados, regiones, ciudades, municipios u otro tipo de división demarcada en el estudio.

El recurso humano calificado que participó es capaz y tiene el conocimiento necesario para realizar todos los procesos y métodos de interpolación, interpretación de los resultados, uso de los programas matemáticos y de los Sistemas de Información Geográfica.

En la Tabla 5 se puede observar la literatura que sirvió de base para las metodologías a seguir en cuanto a las técnicas de interpolación dependerán de lo que han propuesto los autores, en ese sentido, se definió bajo el método establecido por los autores los lineamientos y técnicas establecidas por ellos.

Tabla 5. Literatura de base para los métodos de interpolación de la precipitación. Fuente: elaboración propia

Método de Interpolación	Referencia de la metodología y método
Co-Kriging, Universal Kriging, External Drift Kriging	(Abtew et al., 1993; D. Chen et al., 2010; Cheng et al., 2007; Díaz Padilla et al., 2008; Dirks et al., 1998; Izquierdo & Márquez, 2006; Mair & Fares, 2011; Portalés et al., 2008; Tabios & Salas, 1985; Vicente-Serrano et al., 2003; Wagner et al., 2012; Wijemannage et al., 2016; Xu et al., 2014; X. Yang et al., 2015; Zhang et al., 2018)
Ordinary Kriging, Universal Kriging, External Drift Kriging	(Abtew et al., 1993; D. Chen et al., 2010; Cheng et al., 2007; Díaz Padilla et al., 2008; Dirks et al., 1998; Izquierdo & Márquez, 2006; Keblouti et al., 2012; Mair & Fares, 2011; Plouffe et al., 2015; Portalés et al., 2008; Tabios & Salas, 1985; Vicente-Serrano et al., 2003; Wagner et al., 2012; Wijemannage et al., 2016; Xu et al., 2014; X. Yang et al., 2015; Zhang et al., 2018)
IDW	(Abtew et al., 1993; D. Chen et al., 2010; Diaz Padilla et al., 2008; Dirks et al., 1998; Keblouti et al., 2012; Kim et al., 2010; Mair & Fares, 2011; Plouffe et al., 2015; Ponte & Bosque, 1997; Portalés et

	al., 2008; Vargas et al., 2011; Vicente-Serrano et al., 2003; Wijemannage et al., 2016; Yang et al., 2015; Zhang et al., 2018)
Spline Simple, Spline Elevación	(Kebblouti et al., 2012; Vicente-Serrano et al., 003; Wijemannage et al., 2016; Yang et al., 2015)
ANUSPLIN	(Díaz Padilla et al., 2008; Newlands et al., 2011; Price et al., 2000; Taesombat & Sriwongsitanon, 2009; Zhang et al., 2018)

Mientras que el método de validación se realizó bajo la propuesta que incluyen a diferentes autores que han utilizado la metodología de la validación cruzada, la cual utiliza como base la estadística y los errores en los resultados obtenidos por cada método de interpolación utilizado. Por ello, se utilizaría la literatura de cada método de validación RMSE (Newlands et al., 2011; Plouffe et al., 2015; Price et al., 2000; Taesombat & Sriwongsitanon, 2009; Zhang et al., 2018), MAE y MBE (Newlands et al., 2011; Taesombat & Sriwongsitanon, 2009) y R^2 (Portalés et al., 2008).

El ajuste de los valores ante la ausencia o incongruencia de los datos se realizó a través de la regresión lineal, por tanto, en los espacios ausentes de datos o que no poseen alguna consistencia se reemplazó por los datos que provienen de la regresión lineal. Normalmente, los ajustes permiten eliminar datos que dentro de los programas detalle como algún error operativo o ante la ausencia de los datos no se pueda obtener correctamente la información.

En relación con la operatividad de la precipitación se plantea que la variable dependiente es la precipitación en milímetros y las variables independientes serían la elevación, las distancias de la estación meteorológica hacia el océano pacífico, océano atlántico, Golfo de México, la pendiente, longitud y latitud en donde se encuentra la estación meteorológica.

Tabla 6. Coherencia de la propuesta de investigación. Fuente: elaboración propia.

Objetivos específicos	Métodos, técnicas, instrumentos	Resultados o productos esperados, alcances, hallazgos o conocimientos teóricos.
Tabular y ajustar los datos de precipitación	Se realizará el análisis y la tabulación de los datos de precipitación mensual de los	En esta parte se aporta al conocimiento en la metodología de análisis y ajuste de los datos de precipitación que presenten algún problema

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI-

<p>provenientes de las estaciones meteorológicas que estén incompletos o carezcan de congruencia</p>	<p>siguientes años: 1981, 1986, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011 y 2016. Se ajustarán los datos ante la carencia o inconsistencia de alguno de los datos del mes, que, por razones inherentes, presenten errores.</p>	<p>o inconsistencia. Esta metodología podría aplicarse en un futuro en bases de datos que estén incompletas o carentes de sentido.</p>
<p>Determinar la correlación de la precipitación promedio mensual y las siguientes variables independientes: elevación, pendiente, distancia hacia el océano pacífico y océano atlántico)</p>	<p>En esta fase se propone la revisión de la correlación de variables independientes con la precipitación.</p>	<p>Esta fase es clave para el avance de la investigación puesto que puede complementar los procesos de interpolación que se usaría. Asimismo, se debe de definir si existe la correlación y las variables que denoten una mayor correlación, serán las variables que se utilizarán en cada uno de los métodos de interpolación. Este objetivo arrojaría resultados o hallazgos importantes que pueden ser determinantes para futuras investigaciones.</p>
<p>Validar cada método de interpolación de la precipitación (<i>IDW</i>, <i>Co-Kriging</i>, <i>Ordinary Kriging</i>, <i>External Drift Kriging</i> <i>ANUSPLIN</i>, <i>Spline Simple</i> y <i>Spline Elevación</i>) desde la óptica estadística</p>	<p>Se estarían utilizando los métodos que determinan los errores a partir de los resultados provenientes de la interpolación de la precipitación: MAE, MSE, KLING GUPTA E, NASH SUTCLIFFE, VE_{cv} y R^2</p>	<p>Estos métodos cuantitativos permiten comparar y determinar cuál de los métodos de interpolación de la precipitación denotan errores menores. Asimismo, esta fase es clave, puesto que este objetivo definirá cuál es el método de interpolación que refleja resultados importantes a discutir.</p>
<p>Comparar y analizar los resultados arrojados en la</p>	<p>Este último objetivo, busca la comparación de resultados, la comparación de los mapas</p>	<p>Esta fase es trascendental, puesto que es la fase donde se discuten los hallazgos, se</p>

validación de cada método de interpolación y el comportamiento de la precipitación en el territorio de la República de Guatemala	obtenidos a través del proceso de interpolación. Por tanto, en este objetivo se buscará la interpretación, reflexiones finales y propuestas de trabajos futuros a realizar.	concluye de todo el proceso analizado y se redactan las conclusiones.
--	---	---

Se realizarron mapas mensuales por cada uno de los años de análisis propuestos (1981, 1986, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011, 2016 y 2020), además, se obtendrán bases de datos depuradas y ajustadas metodológicamente de los períodos de precipitación analizados (Tabla 6). Se establece una metodología con el ajuste de la precipitación y se brinda una metodología de análisis con índices que se utilizan dentro del método de interpolación.

Se espera con este trabajo que repercuta en el uso del método de interpolación de la precipitación en Guatemala; ya que muchos planes y programas del Gobierno de Guatemala emplea información que no se ha discutido y sustituido por resultados y datos que arrojan datos apegados a la realidad de la precipitación. Además, en este proyecto de investigación se está aportando en una metodología que ayuda a procesar los datos y sus inconsistencias a partir de una propuesta de ajuste que se relaciona con la Regresión Lineal.

Asimismo, el presente estudio influiría en las metodologías para la irrigación, predicción de las inundaciones, ofrece datos verídicos para el diseño de elementos de puentes o bóvedas por la escorrentía, ofrecería datos para proyectar cosechas o planificaciones de la agricultura. Por tanto, esta investigación pondría en discusión a nivel mundial los métodos de interpolación de la precipitación y aportaría en la forma en cómo se depuran y procesan los datos de precipitación que provienen de las estaciones meteorológicas.

Como estrategia de difusión y divulgación se proponen en primer lugar realizar la publicación de dos artículos (el primer artículo tendrá una visión heurística de los modelos de

interpolación de la precipitación y el segundo presentará los resultados y hallazgos de esta investigación) científicos en revista indexada y se participaría en un congreso en dónde se presentarán los hallazgos y las metodologías que se incluyeron dentro de la investigación. Además, se desplegará en la página de la Unidad de Modelación Matemática los hallazgos, mapas, datos y artículos publicados; ya que, una de las aportaciones de esta investigación es que los expertos en hidrología, administrador del agua, planificadores, estudiantes, investigadores, gobiernos locales y el Estado de Guatemala utilicen los mapas y recursos que se reprodujeron. También, es importante, detallar que otro de los aportes de esta investigación radica en la metodología; dicha metodología podría aplicarse a regiones pequeñas o grandes, o se puede replicar en otras latitudes.

9.2 Método

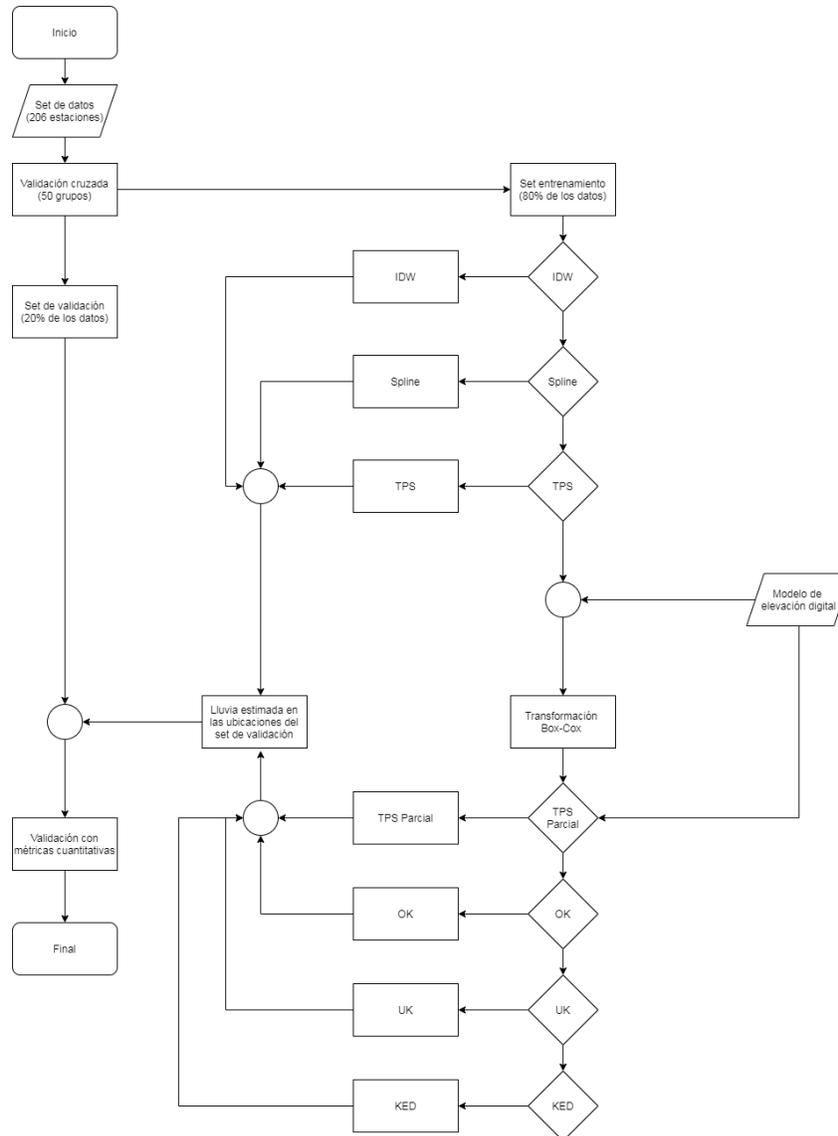


Figura 4. Algoritmo que demuestra la metodología empleada en la investigación. Se detalla la recolección de datos, clasificación de set de validación y entrenamiento, técnicas de interpolación y la validación cruzada. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4 se observa la metodología establecida para la presente investigación. La primera fase contempló la recopilación y proceso de los datos con base en las estaciones y la información que cada uno posee. Posteriormente, se establecen los 50 grupos para la validación cruzada de los resultados y los datos, por lo que se dividió en un set de 80% como

datos de entrenamiento y el 20% se estableció como los datos que servirían para los datos de validación. Los procesos de los métodos de interpolación se establecieron a partir del requerimiento y los procesos necesarios a realizarse y se buscó la comparación a partir de la validación con métricas cuantitativas. Las métricas cuantitativas sirven para demarcar cuál es el método que mejor ajusta o representa los datos evaluados dentro del proceso de interpolación de la precipitación.

Set de datos

El set de datos se dividió en dos grupos, el 80% de los datos para entrenamiento y el 20% de los datos para validación, debido a que se utilizó la técnica de validación cruzada, se repitió el proceso 50 veces de forma aleatoria, de tal manera que cada mes contó con 50 grupos de entrenamiento y validación diferentes.

Transformación Box Cox

Se utilizó la transformación de Box Cox para normalizar los datos de precipitación, debido a que métodos como Kriging (OK, UK y KED) y TPS requiere que los datos sigan una distribución normal.

Interpolación espacial

En R se desarrollaron los algoritmos para la interpolación de IDW, Spline, Spline covariable elevación, OK, UK y KED, para ello se usaron los siguientes paquetes: sp, raster, gstats, automap y fields.

Para ejecutar la interpolación TPS se utilizó el software Anusplin versión 4.0 desarrollado por la Universidad de Australia (Hutchinson & Xu, 2013)

Validación de métricas

Con las estaciones del grupo de validación se procedió a comparar los valores estimados versus los observados, para ellos se utilizaron varias métricas que describen en el marco teórico. Este proceso se realizó en R, para ello se utilizaron los paquetes: metrics e hydroGOF.

9.3 Recolección de información

Las observaciones climáticas a través de instrumentos de medición son importantes para la investigación del clima y los estudios de su impacto. Por lo que, es necesario previo al hacer el uso de base de datos se debe realizar la selección de los datos congruentes y descartar aquellos que denotan errores (Jeffrey et al., 2001), por tanto, se mejorará la calidad del control de los datos antes de que ellos sean usados (D. Chen et al., 2010). La forma en cómo se maneja la información faltante es partir de dos ópticas: la primera se asocia al registro continuo e ignorar los eventos subsecuentes, mientras que otros acercamientos sugieren el ignorar las brechas al asumir que los datos se adaptan a series continuas de registros (Di Piazza et al., 2011). Uno de los mayores problemas metodológicos que se presentan en las bases de datos es detectar y remover los errores, por lo que, se recomienda que se centren diferentes esfuerzos en relación con los datos y registros, así como el planteamiento de una metodología que permita mantener el control y el comportamiento de los datos provenientes de estaciones meteorológicas.

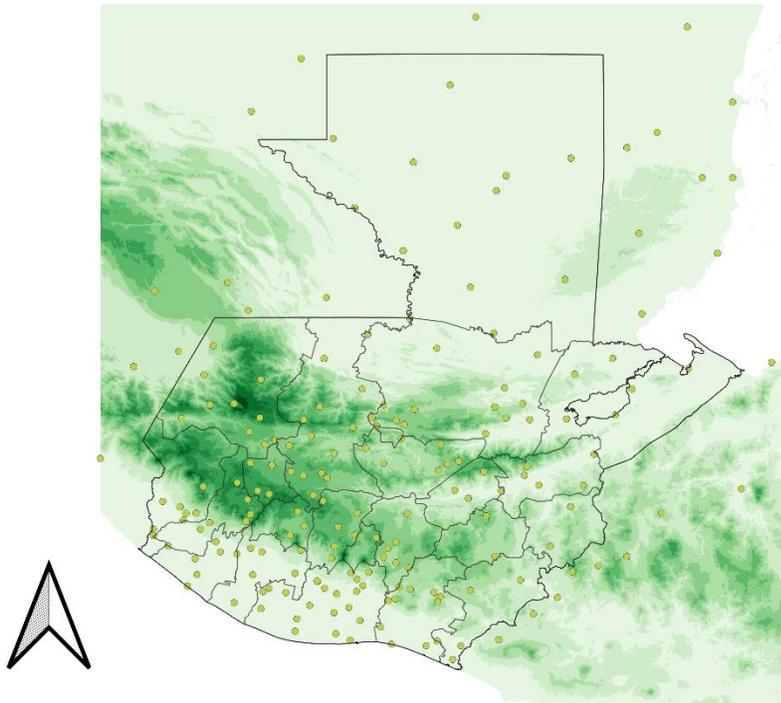


Figura 5. Localización de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. Fuente: Elaboración propia.

Las estaciones utilizadas para obtener los datos de precipitación no sólo se encerraron dentro del territorio de Guatemala, sino, que se utilizaron estaciones que se encuentran en países cercanos al país (Figura 5); lo que contribuyó a recrear escenarios fuera de la frontera de interpolación de la precipitación y a profundidad de dónde se encuentra cada una de las estaciones seleccionadas. Las estaciones se complementaron de diferentes fuentes de información que permitieron recrear una base de datos completa y densa.

La importancia de las variables que pueden influir en la precipitación se analizaron las variables Elevación, Distancia al Golfo de México, Distancia al Océano Pacífico, Distancia al Océano Atlántico, Pendiente, Elevación, Longitud y Latitud. Las variables se establecieron en función de la precipitación mensual y a partir del promedio de las precipitaciones por mes a lo largo del análisis de los años de 1981 al 2020.

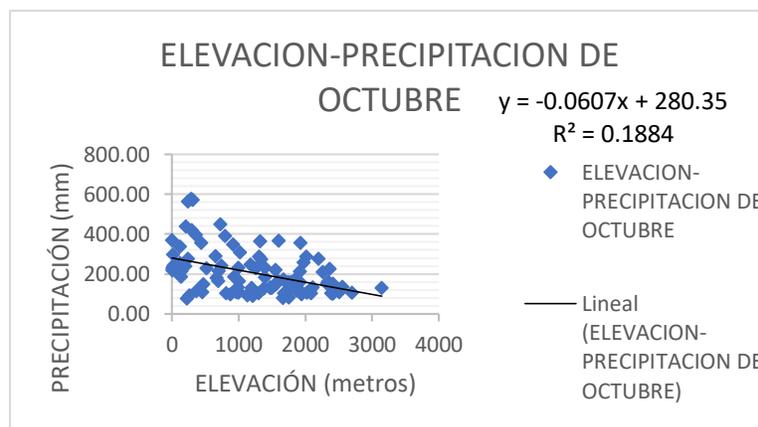


Figura 6. Relación lineal entre la elevación y la precipitación para el promedio del mes de octubre de 1981 a 2020. Fuente: Elaboración propia.

En relación con la Elevación y su vinculación con la Precipitación se puede observar Figura 6 cómo a nivel de la correlación lineal existen comportamientos diversos para los diferentes meses; lo que puede demarcar la necesidad de estratificar los datos por regiones que permitan establecer parámetros o tendencias con los datos. Puesto que, la influencia de otras variables puede influir en la precipitación.

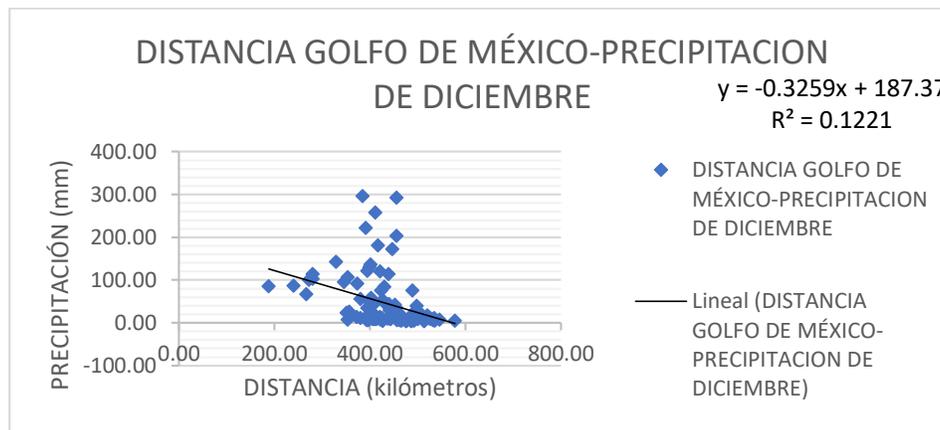


Figura 7. Relación lineal entre la distancia hacia el Golfo de México y la precipitación para el promedio del mes de diciembre de 1981 a 2020. Fuente: Elaboración propia.

Otra de las variables que se exploró fue la Distancia de cada una de las estaciones meteorológicas hacia el Golfo de México Figura 7, puesto que los cuerpos de agua tienen influencia sobre la precipitación. De igual forma, se observa la necesidad de demarcar áreas y crear sub-regiones para que se pueda obtener alguna ecuación lineal que permita describir el comportamiento en función de otras variables.

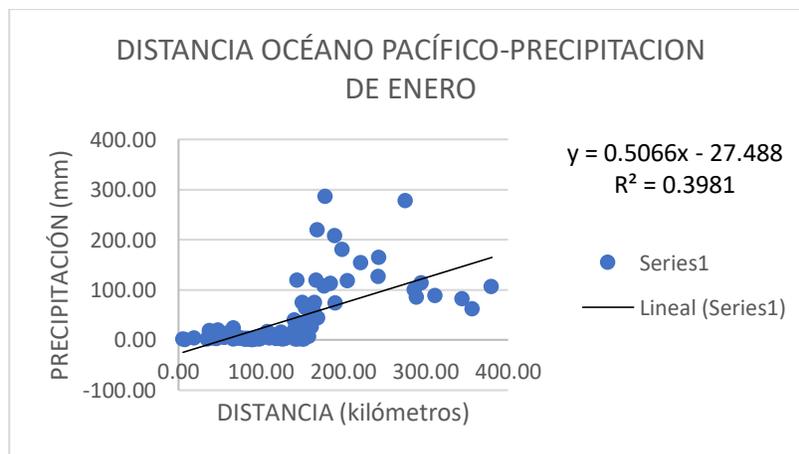


Figura 8. Relación lineal entre la distancia hacia el Océano Pacífico de cada estación meteorológica y la precipitación para el promedio del mes de enero de 1981 a 2020. Fuente: Elaboración propia.

La variable de la distancia hacia el océano Pacífico denota diferentes comportamientos a lo largo de la distancia de cada estación; se observa Figura 8 que un grupo de estaciones es uniforme en distancias muy cercanas al océano Pacífico. Asimismo, se observa que los datos requieren de clasificación en relación con las influencias o áreas que puedan demarcar distintos comportamientos.

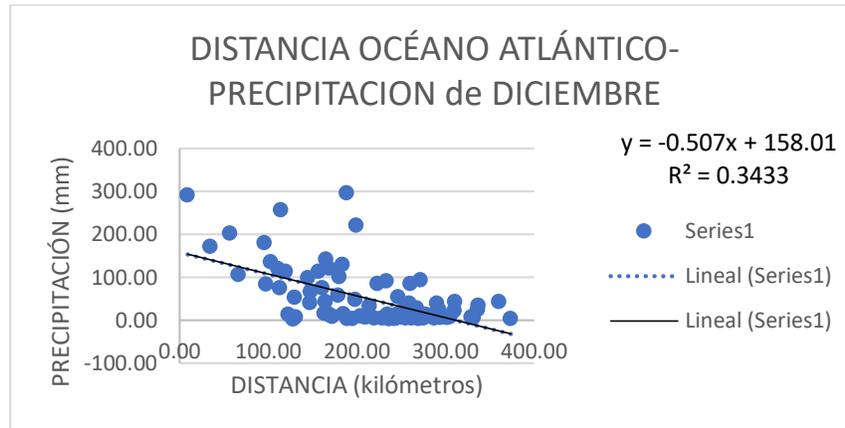


Figura 9. Relación lineal entre la distancia hacia el océano Atlántico de cada estación meteorológica y la precipitación para el promedio del mes de diciembre de 1981 a 2020. Fuente: Elaboración propia.

Se observan comportamientos diversos sobre las distancias alejadas a los 100 kilómetros del océano Atlántico Figura 9, sin embargo, requiere que se reclasifiquen los valores en función de variables espaciales con relación a la precipitación. Lo que puede ayudar a incrementar la correlación de la variable de distancia hacia el océano y la precipitación.

9.4 Técnicas e instrumentos

Ponderación Inverso la Distancia (*IDW* en sus siglas en inglés):

El método Ponderación Inverso la Distancia es un método determinístico de interpolación que es ampliamente aplicado en los programas sobre interpolación espacial. Este método se desarrolló con base en la presunción de que los puntos interpolados se ven más afectados por los puntos cercanos y se afectan menos los puntos más distantes (Hadi & Tombul, 2018; S. Wang et al., 2014). La fórmula comúnmente utilizada como base para la determinación de la ponderación de las variables en análisis se describe a continuación:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_i)^p} Z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_i)^p}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde Z es el valor determinado de un punto interpolado; Z_i es el valor de punto recolectado i ($i= 1,2, \dots, n$); n es el número de puntos recolectados; d_i es la distancia entre los valores interpolados y recolectados; p representa el parámetro de poder el cual es un número real

positivo (S. Wang et al., 2014). Se aplicó para esta investigación en una variación de números de poder para determinar la interpolación de la precipitación con un número de 1 a 4.

Este método asume que el valor del punto a estimar está influenciado por los valores de los puntos cercanos; por lo tanto, cada punto observado tiene un peso asociado que es inversamente proporcional a la distancia al punto a estimar (Sheikhhasan, 2006). Figura 10 ilustra la interpolación IDW, los puntos de dispersión (p1, p2, p3, p4, p5) están dentro del radio de búsqueda del punto z estimado.

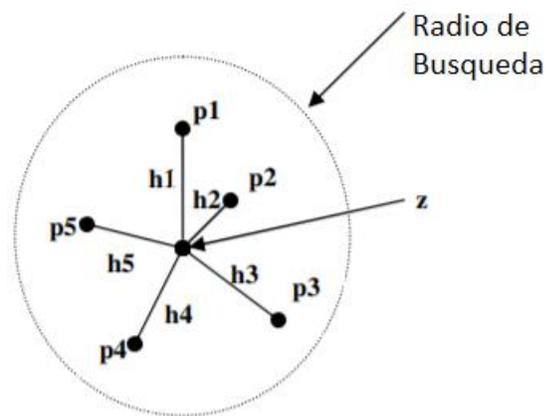


Figura 10. Ilustración del método de interpolación IDW Fuente: Yang (2015)

Shepard (1968) presenta por primera vez el método de interpolación IDW como el más simple, donde, se identifica una vecindad alrededor del punto interpolado y se toma un promedio ponderado de los valores de observación dentro de esta vecindad. La forma matemática depende de la forma matemática de la función de ponderación, el tamaño del vecindario (lo que se representa a través de un radio o a partir del número de puntos) y la potencia inversa tiene dos funciones de ponderación diferentes. La función de ponderación predeterminada por Shepard (1968) es un exponente de 2 o un exponente de 4.

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^n W_i f_i \quad \text{Ecuación 2}$$

donde n es el número total de observaciones, i son los valores observados, y wi es el ponderado asociado con cada punto de observación, en relación con una observación en (x, y). Los pesos se calculan utilizando la siguiente función:

$$w_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{i=1}^n h_i^{-p}} \quad \text{Ecuación 3}$$

donde p es el parámetro de potencia que define la tasa de reducción de los pesos a medida que aumenta la distancia, y h es la distancia entre el punto observado y el punto estimado:

$$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde (x, y) y (x_i, y_i) corresponden a las coordenadas del punto de interpolación y de dispersión. En relación con la función que demarca peso se acerca a cero cuando la distancia desde la dispersión de los puntos aumenta.

Método Kriging Ordinario (*OK* en sus siglas en inglés):

El método Kriging Ordinario es un método geoestadístico de interpolación que se basa sobre la teoría de variograma y análisis estructural, en la cual se utiliza mejor predicción no sesgada de las variables regionales dada en un área determinada. El principio del método es que el cambio espacial continuo debe describirse apropiadamente dentro de una superficie determinada, a diferencia de un modelo matemático uniforme porque el cambio espacial es irregular (Xu et al., 2014).

El método Kriging es una estimación lineal no sesgada óptima en los puntos de muestra desconocidos después de considerar la forma, el tamaño, la posición y las relaciones espaciales entre cada par de puntos conocidos y la información de estructura proporcionada por el variograma. El valor de los puntos desconocidos se calcula mediante una estimación lineal no sesgada óptima.

La ecuación de cálculo del método OK se expresa de la siguiente forma:

$$\check{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde $\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$ es el valor determinado en x_0 y $Z(x_i)$.

Método Co-Kriging (*CK* en sus siglas en inglés):

El método Co-Kriging se basa en el método OK e introduce más de un factor ambiental regionalizado relevante que afecta los resultados de la interpolación. Teóricamente, no existe una diferencia esencial entre los métodos OK y CK. Sin embargo, el Co-Kriging toma en cuenta los efectos combinados de múltiples variables que afectan la información espacial y pueden derivarse del Kriging Ordinario, aunque parece bastante complicado cuando se calculan las funciones de semivariograma cruzado y covarianza cruzada. Cuando se incorpora una variable ambiental del área de estudio, la información se introduce en Co-Kriging como el segundo tipo de factores de influencia (Xu et al., 2014). Por ejemplo, si se toma como variable la elevación se establece la ecuación siguiente:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{ui} + \lambda [y(x) - m_y + m_z] \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde $Z(x)$ es el estimado de precipitación por la interpolación en el punto X ; Z_{ui} es la actual medida de precipitación en la estación i ; $y(x)$ es la elevación del punto x ; n es el número de estaciones meteorológicas; λ y λ_i son los coeficientes de ponderación de Co-Kriging; m_y es el promedio de elevaciones y m_z es el promedio de atributos meteorológicos.

Método Kriging con desviación externa (KED en sus siglas en inglés):

El método de Kriging con desviación externa es una variante del Kriging universal para la cual la variable $Z(x)$ a interpolar es estimado como la suma de un término estocástico $y(x)$ y un término determinístico $m(x)$ (Delrieu et al., 2014), también denominado la desviación:

$$Z(x) = Y(x) + m(x) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde x denota una posición dada. En la aplicación del método de Kriging con desviación externa, se establece que la desviación tiende a ser una función lineal de $R(x)$. Un estimador lineal $Z_{KED}(x_0)$, corresponde a la suma ponderada de las medidas de las estaciones $G(x_i)$, que es usado para la estimación en un punto dado o sobre un dominio X_0 dado:

$$Z_{KED}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i^{KED} G(X_i) \quad \text{Ecuación 8}$$

La ponderación λ_i^{KED} es estimado para minimizar la estimación de desviación estándar:

$$\sigma_{KED}(x_0) = \sqrt{E(Z(x_0) - Z_{KED}(x_0))} \quad \text{Ecuación 9}$$

En consideración de constante imparcial

$$E(Z(x_0)) = E(Z_{KED}(x_0)) \quad \text{Ecuación 10}$$

MÉTODO SPLINE:

El método Spline es una técnica general para alisar o suavizar una superficie continua minimizando la curvatura de la superficie (Taesombat & Sriwongsitanon, 2009). Para un planteamiento bivariado de spline para medir los puntos $i=1 \dots N$, se calcula como sigue (Hadi & Tombul, 2018) :

$$Z(s_i) = f(S_i) + \epsilon(S_i) \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde $\epsilon(S_i)$ representa los errores aleatorios, los cuales pueden ser asumidos a ser errores aleatorios no correlacionados e independiente con un promedio de cero y una varianza σ^2 y $f(S_i)$ representa una función suavizadora determinística, el cual puede ser estimado por minimización siguiente:

$$\sum_{i=1}^n [Z(S_i) - f(S_i)] + \lambda J_m^d \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde $f(s_i)$ corresponde a los valores correspondientes a la función que encaja en cada uno de los puntos i ; λ es el también llamado regularizador o parámetro suavizante, que controla la compensación entre los datos que encajan lo más cercanos posibles sin perder el aspecto suavizante (por ejemplo si $\lambda = 0$ el modelo de la función de los puntos exactamente poseen un ruido cercano a cero, donde si λ es más largo, la función será un hiper-plano); y J_m^d es una medida de lo suavizante de la función f . La forma J_m^d depende de dos parámetros: el número de variables independientes d y el orden de las derivadas m .

Según Wu & Hung (2016) Spline es un método determinista para representar curvas bidimensionales en superficies tridimensionales. Sterling (2003) indica que a los splines también se les conoce como funciones de base radial (RBF). Los splines ajustan una superficie flexible por medio de un set de puntos conocidos utilizando una función matemática. Una de las principales ventajas de spline es que puede crear superficies bastante precisas y visualmente atractivas basadas en solo unos pocos puntos de muestra. Las desventajas de spline son que la superficie resultante puede tener valores mínimos y máximos

diferentes del conjunto de datos de entrada, es sensible a valores atípicos y no hay indicios de errores. Spline funciona mejor para superficies que varían suavemente, como la elevación y temperatura (Wu & Hung, 2016).

Los splines son funciones polinomiales por partes que se unen para proporcionar una representación completa, pero compleja, de la superficie entre los puntos de medición. Las funciones se ajustan exactamente a un pequeño número de puntos y, al mismo tiempo, se asegura que las uniones entre las diferentes partes de la curva sean continuas y no tengan disyunciones. Los splines suelen ser útiles para calcular superficies suaves a partir de una gran cantidad de puntos de datos de entrada y, a menudo, producen buenos resultados para superficies que varían suavemente, como la elevación. Los splines de placa delgada son una forma especial de spline, que tienen un valor particular en la interpolación. Estos, en efecto, reemplazan la superficie de spline exacta con un promedio suavizado localmente que pasa lo más cerca posible a través de los puntos de datos. Se pueden utilizar para eliminar artefactos resultantes de variación y error de medición en los datos de entrada. Spline crea una superficie que pasa por los puntos de control y tiene los menores cambios posibles de pendiente en todos los puntos (UDA, 2018).

Hay dos tipos de splines:

Una spline regularizada produce una superficie lisa y primeras derivadas suaves, donde la regularización corresponde a los valores altos (peso) que reproducen superficies con un suavizado muy marcado. En relación con los valores que se utilizan, deben de ser aquellos valores que serán igual o menor a cero. En cuanto a los típicos datos a utilizar, se pueden demarcar y utilizar 0, 0.001, 0.01, 0.1 y 0.5 (UDA, 2018).

Un Tension Spline es más plano que un Regularized Spline de los mismos puntos de muestra, lo que obliga a la estimación a manténgase más cerca de los datos de la muestra. Produce una superficie más rígida según el carácter del fenómeno modelado (UDA, 2018). Las superficies más gruesas se suelen obtener a partir de la opción de tensión, que demarca los valores muy altos que sirven y funcionan como el peso. Entre los datos que se ingresan se debe de manejar siempre el parámetro de igual o mayor que el valor cero, donde los valores comunes derivan en 0, 1, 5 y 10.

Hurst (2014) describe la ecuación de Spline como:

$$Q(x, y) = \sum A_i d_i^2 * \log(d_i) + a + bx + cy \text{ Ecuación 13}$$

donde x e y son las coordenadas del punto desconocido que se están interpolando, $d_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2$ siendo d_i la distancia, y x_i , y y_i son las coordenadas x , y de los puntos muestrales $i \dots$. A , a , b y c son coeficientes que están determinados por un sistema lineal de ecuaciones.

MÉTODO SPLINE CON BASE EN LA ELEVACIÓN:

El método spline con base en la elevación se asemeja al método simple, sin embargo, incluye variables independientes que coadyuvan al análisis del alisamiento o suavizado de una superficie continua. Para esta investigación se propuso la variable elevación como variable independiente que actuaría como un parámetro de la función en análisis.

Thin plate splines

Hay dos inconvenientes al utilizar splines de regresión. Primero, se debe seleccionar el número y la ubicación de los nudos para cada base, lo que introduce una subjetividad adicional en las estimaciones.

En segundo lugar, las bases se eligen para suavizar un predictor, e incluso para el producto tensorial, la base se construye a partir de las dos funciones de base de rango bajo. Los splines de placa delgada (Duchon, 1977) discutidos en esta sección permiten estimar una función suave de múltiples covariables, por lo que se utilizan de manera prominente para el análisis espacial. Otra propiedad elegante de las ranuras de placa delgada es que no requieren la selección de posiciones de nudos o funciones de base.

MÉTODO ANUSPLIN:

El método ANUSPLIN fue desarrollado y utilizado en diferentes años y ha sido uno de los métodos de interpolación de mayor uso. El ANUSPLIN se basa sobre el suavizado del SPLINE. Normalmente hay al menos dos variables de spline independientes, longitud y

latitud, en este orden y en unidades de grados decimales. A la tercera variable independiente, la elevación sobre el nivel del mar, es normalmente apropiada cuando se ajustan superficies a temperatura o precipitación. Esto normalmente se incluye como una tercera variable spline independiente, en cuyo caso se debe escalar en unidades de kilómetros. Algunas veces, las mejoras menores pueden ser había alterado ligeramente esta escala de elevación.

Transformaciones univariadas

Las transformaciones de logaritmo, inversa multiplicada, raíz, entre otras opciones, se obtienen a partir de valores relacionados con λ , y se utiliza la siguiente expresión:

$$X^{(\lambda)} = \begin{cases} x^\lambda, & \lambda \neq 0 \\ \ln x, & \lambda = 0 \text{ y } x > 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 14}$$

La propuesta de Box y Cox que resulta de una alteración a la transformación de logaritmo, permite remover la discontinuidad de $\lambda = 0$ (Díaz Monroy, 2007), la cual se expresa de la siguiente forma:

$$X^{(\lambda)} = \begin{cases} \frac{x^\lambda - 1}{\lambda}, & \lambda \neq 0 \\ \ln x, & \lambda = 0 \text{ y } x > 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 15}$$

Para un set de datos, el problema que se enfrentan es en la definición de un valor adecuado para λ , por lo que, los pasos para la determinación de λ , se describe a continuación:

- Asumir que las nuevas observaciones x_i^λ se distribuyen independientemente conforme a una $N(\mu, \sigma^2)$ y obtener los estimadores máximos verosímiles para μ y σ^2 .
- Se reemplazan los resultados obtenidos y se busca la maximización del logaritmo en relación con la verosimilitud

- La maximización se obtiene a partir de la ecuación iterativa $\frac{dL_{max}(\lambda)}{d\lambda} = 0$; o se puede determinar mediante la gráfica de $L(\lambda)$ Figura 11 encontrando el óptimo valor de λ .

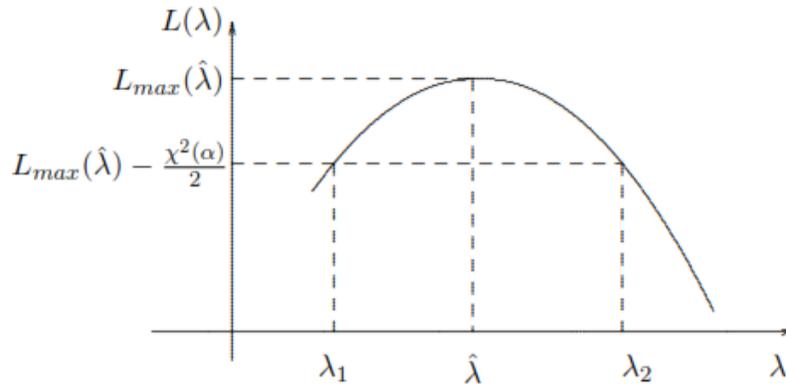


Figura 11. Detalle y comportamiento de $L(\lambda)$, Fuente información: Díaz Monroy (2007)

Evaluación de técnicas de interpolación espacial

Seaman (1988) explica que el rendimiento y eficacia de cada una de las técnicas de interpolación se puede evaluar mediante la comparación del punto observado, a lo que hoy en día se conoce como validación cruzada. Estas técnicas de evaluación y validación de desempeño son ampliamente utilizadas por geoestadísticos para evaluar los métodos de interpolación espacial (Hancock & Hutchinson, 2006; Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis, 2005).

Método de validación cruzada

La validación cruzada resulta ser un método estadístico que permite comparar y evaluar diferentes algoritmos que se suelen dividir la base de datos a partir de dos grupos: un grupo se usa para aprender o de entrenamiento de un modelo y, se utiliza el otro set de datos para la validación del modelo. En la validación cruzada típica, los conjuntos o subdivisiones de entrenamiento, así como de la validación, deben cruzarse en rondas sucesivas para que cada punto de datos tenga la posibilidad de ser validado; por lo que, la forma básica de la validación cruzada es de k veces (k -folds) (Kohavi, 1995). En geoestadística, generalmente,

el conjunto de entrenamiento son los valores medidos de todos los puntos de muestra, que se validan utilizando la técnica de interpolación espacial designada.

MÉTODOS DE VALIDACIÓN

Con la finalidad de seleccionar el método de interpolación más adecuado entre las siete técnicas detalladas dentro de la metodología de la investigación, por lo que, se realizaron los análisis de error absoluto medio (MAE), Error Cuadrático Medio Estandarizado (RMSE), MSE, Varianza Equivalente, Kling Gupta E, Nash Sutcliffe.

MAE

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \tilde{Y}_i| \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde y_i es un valor observado en la posición i y \tilde{Y}_i es un valor estimado para la posición i , n es el número de puntos de datos.

MSE

El Error Cuadrático Medio de predicción determina la diferencia cuadrática media entre la verdadera precipitación y su estimado a partir de los puntos de validación, el cual se puede expresar a partir de la siguiente fórmula (Di Piazza et al., 2011):

$$MSE = \frac{1}{N_V} \sum_{i=1}^{N_V} |z(x_i) - \check{Z}(x_i)|^2 \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde $\check{Z}(x_i)$ es el valor estimado de lluvia y $z(x_i)$ es el valor de lluvia medido en N_V puntos de validación a analizar.

NASH SUTCLIFFE EFFICIENCY (NSE)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde O_i es el valor de punto observado i , M_i es el valor estimado en i , y N es el total de número de observaciones y \bar{O} es el promedio del valor observado (T. Chen et al., 2017; Wagner et al., 2012).

$NSE = 1$ indica correspondencia perfecta entre las simulaciones y observaciones; $NSE=0$ indica que las simulaciones del modelo tienen el mismo poder explicativo como el promedio de las observaciones; y $NSE < 0$ indica que el modelo es un mal predictor que la media de las observaciones. El $NSE=0$ se utiliza regularmente como el punto de referencia que distingue los modelos buenos y malos (Knoben, Freer, & Woods, 2019).

KLING GUPTA EFFICIENCY

El Kling Gupta Efficiency (en sus siglas en inglés) es un indicador integrado que representa la correlación y el sesgo, y similitud en la variabilidad entre los datos observados y cuadrículados (Nashwan, Shahid, & Wang, 2019).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(1 - \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}}\right)^2 + \left(\frac{\frac{\sigma_{sim}}{\mu_{sim}}}{\frac{\sigma_{obs}}{\mu_{obs}}}\right)^2} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde r es la correlación de Pearson; μ y σ representan el promedio y la desviación estándar, respectivamente, de los datos simulados (sim) y observados (obs); n se refiere al número de puntos dentro de la grilla.

Así como el método NSE, el $KGE = 1$ indica el perfecto acuerdo entre la simulación y lo observado. A partir del enfoque análogo de $NSE=0$, algunos autores establecen que $KGE < 0$ significa que la media de las observaciones provee mejores estimados que las simulaciones, no obstante, otros establecen que esta interpretación no está asociada al $KGE=0$. Se menciona que el uso de valores positivos de KGE como indicador de simulaciones de modelo bueno, sin embargo, valores negativos de KGE son considerados malos, sin la puntualidad de que se maneja al $KGE=0$ como aquel que establece el límite entre el comportamiento bueno y malo (Knoben et al., 2019).

Esta medida de bondad de ajuste fue desarrollada (Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez, 2009) los cuales indica que sirve para proporcionar un diagnóstico de la eficiencia de Nash-Sutcliffe

(y por lo tanto de MSE), lo que facilita el análisis de la importancia de sus diferentes componentes (correlación, sesgo y variabilidad) en el contexto del modelado hidrológico.

Se propuso una versión revisada del índice Nash-Sutcliffe (Kling, Fuchs, & Paulin, 2012) para asegurar que las razones de sesgo y variabilidad no estén correlacionadas de forma cruzada. Las eficiencias de Kling-Gupta (KGE) varían de menos infinito a 1. Esencialmente, cuanto más cerca de 1, más preciso es el modelo, como se muestra en la siguiente ecuación (Gupta et al., 2009):

$$KGE = 1 - \frac{\sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2}}{\sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{k_1}{r} - 1\right)^2 + \left(\frac{k_0}{\mu_0} + k_1 - 1\right)^2}} \quad \text{Ecuación 20}$$

Se demostró que en la variabilidad del fluido no se toma en cuenta correctamente en el criterio NSE basado en la correlación (Gupta et al., 2009), el sesgo y la proporción de varianzas. Combinando estos tres componentes de NSE (es decir, correlación, sesgo, relación de varianzas o coeficientes de variación) de una manera más equilibrada, la eficiencia de Kling-Gupta (KGE) y su extensión KGE' (Kling et al., 2012) están siendo más utilizados para la calibración de modelos hidrológicos según reportan en la literatura reciente.

R^2

El factor R^2 es denominado la varianza esperada, el cual menciona el grado de predicción de un modelo. El R^2 es por definición un número menor o igual a 1, y entre más se acerque a 1, mejor la forma en cómo encajan los datos calculados y medidos. Pero, si R^2 es igual a 0, el método tiene la misma predictibilidad del promedio de los puntos de datos, mientras que si es negativo, se dice que tiene una correlación negativa (Caruso & Quarta, 1998)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (v_i^f - v_i^0)^2}{\sum_{i=1}^N (v_i^f - \bar{v}_i^0)^2} \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde v_0 son los valores observados y v_c son los valores calculados, y \bar{u} indica el promedio de los valores.

MÁXIMA VARIANZA – VECV:

Para la interpretación de la varianza explicada (Li, 2016) la define como una medida de precisión basada en los valores predichos que se derivaron de la validación cruzada.

Menciona también que VE_{cv} es diferente de la proporción de la variación explicada por covariables, como sucede en los modelos de regresión y esto es debido a que en los valores predichos no se considera el número de covariables utilizadas por los modelos predictivos. Con VE_{cv} se espera una relación lineal con una pendiente de 1 entre los valores predichos y observados, esto cuando se generan predicciones perfectas, también refiere que VE_{cv} se calcula como:

$$VE_{cv} = \left(1 - \frac{SSD}{SST}\right) * 100(\%) = \left(1 - \frac{\sum_1^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}\right) * 100(\%) \quad \text{Ecuación 22}$$

con $SSD = \sum_1^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ y con $SST = \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2$

En un artículo publicado por (Li, 2017) presenta las relaciones que hay entre VE_{cv} y las medidas relacionadas con el error MSE, RRMSE, RMSE, MSRE, que son valores de los cuales depende la máxima varianza (Tabla 7).

Tabla 7. Base de la métrica VE_{cv} en función de MSE, RMSE, RRMSE, MSRE.

$VE_{cv} = \left(1 - \frac{n}{(n-1)s^2} MSE\right) * 100\%$	$VE_{cv} = \left(1 - \frac{n}{(n-1)(CV)^2} (RRMSE)^2\right) * 100\%$
---	--

$VEcv = \left(1 - \frac{n}{(n-1)s^2}(RMSE)^2\right) * 100\%$	$VEcv = \left(1 - \frac{n}{(n-1)MSRE}\right) * 100\%$
--	---

Se puede observar entonces, que el error absoluto promedio (MAE) depende de cada punto y_i y de \hat{y}_i que están asociados a los valores y datos promedios; además, depende del número de valores existentes. Asimismo, en la Tabla 8 se puede observar la dependencia del error cuadrático medio a los mismos valores que dependen del MAE y la varianza explicada que denota valores del promedio de la base de datos que se ha evaluado.

Tabla 8. Medida de precisión del error.

Error / Medida de precisión	Definición
Error absoluto promedio (MAE)	$\sum_1^n \frac{ y_i - \hat{y}_i }{n}$
Error cuadrático medio (MSE)	$\sum_1^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}$
Varianza explicada (VEcv)	$\left(1 - \frac{\sum_1^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}\right) * 100(\%)$

También da un criterio sobre la base de los hallazgos sobre el VEcv promedio, clasificando el desempeño de los modelos predictivos en las ciencias ambientales en las siguientes cinco categorías:

- 1) muy deficiente si $VEcv \leq 10\%$;
- 2) pobre si $10\% < VEcv \leq 30\%$;
- 3) promedio si $30\% < VEcv \leq 50\%$;
- 4) bueno si $50 < VEcv 80\%$; y

5) excelente si $VE_{cv} > 80\%$

10. Resultados

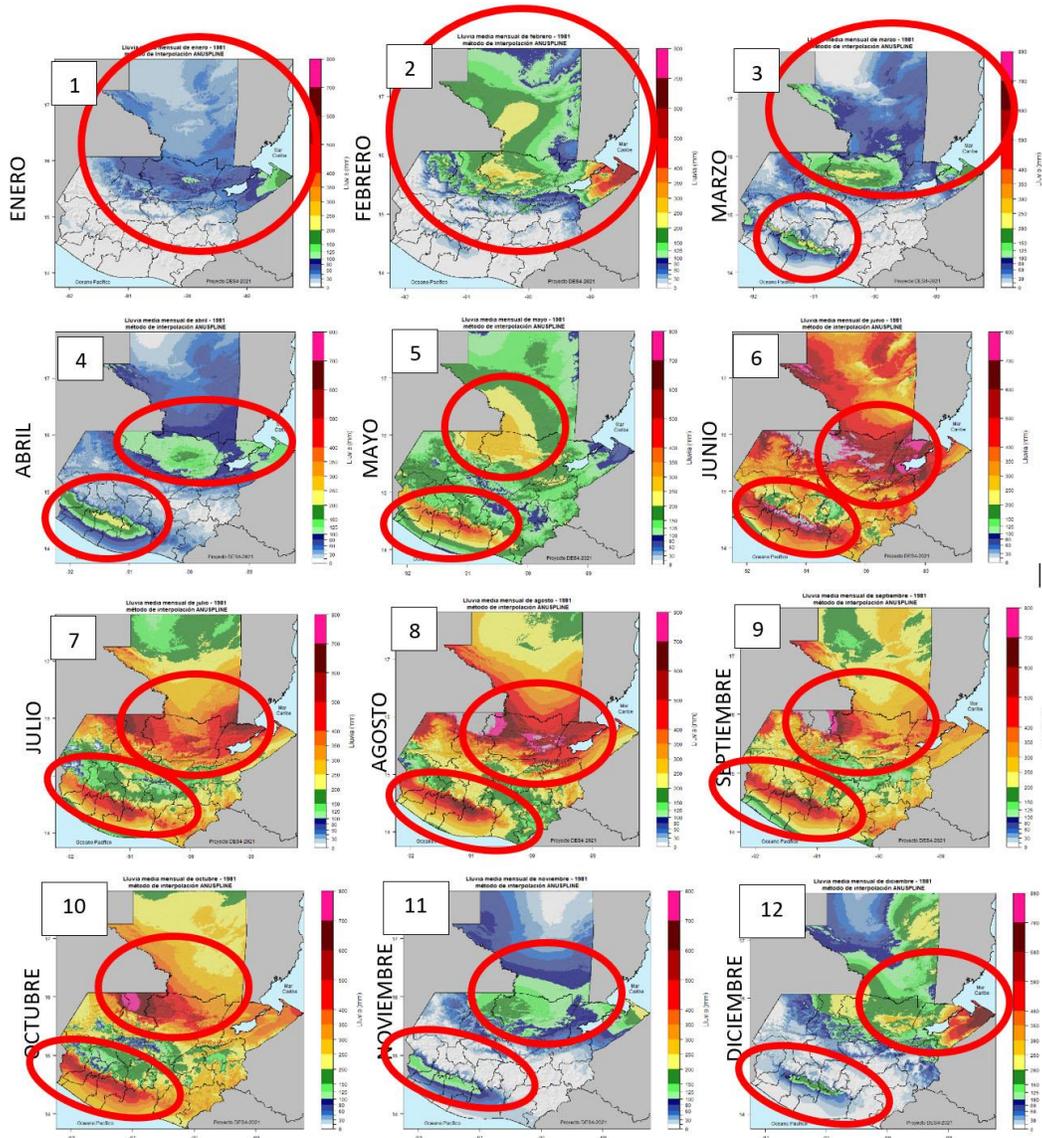


Figura 12. Método de interpolación ANUSPLIN y comportamiento de la precipitación de Enero a Diciembre de 1981. Fuente: Elaboración propia.

Se recopiló la información mensual de precipitación del periodo enero de 1981 a diciembre de 2020, para ello se integró la información de varias redes de observación que existen en Guatemala, siendo estas: la red climática del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología -INSIVUMEH-, Instituto Nacional de Electrificación -INDE-, -EMPAGUA-, Instituto de Cambio Climático Privado -ICC- y estaciones fronterizas de los servicios meteorológicos de El Salvador, Honduras, Belice y México. También, se integraron

los datos de Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations (CHIRPS) de la versión 2.0, estos datos sirvieron para completar, extender o rellenar los vacíos de información.

El comportamiento de la precipitación en Guatemala en enero (Figura 12) se observa que las precipitaciones prevalecen en el norte del país en dirección hacia el Este, lo que denota una fuerte influencia del océano Atlántico. Asimismo, sobre la región donde prevalece la lluvia en el mes de enero no supera de los 200 milímetros de lluvia y lo interesante es la demarcación de las áreas montañosas como las áreas que demarcan y delimitan la precipitación.

La distribución de la precipitación en Guatemala para febrero demarca comportamientos aislados al norte del país, que denota una influencia del océano Atlántico y se delimita la precipitación a lo largo de la topografía del país. Sin embargo, se observa dispersión y comportamiento de la precipitación hacia la frontera con México.

Para marzo sigue prevaleciendo la precipitación al norte del país, pero en el área montañosa del sur se observa el incremento de precipitación. No obstante, las altas precipitaciones del sur de Guatemala se encuentran a elevaciones intermedias y no sobre las altas elevaciones.

En el caso de las lluvias de abril se puede observar que las áreas de mayor precipitación en el país se concentran en el área cercana al océano Atlántico y que la delimita el área montañosa que demarca el área de la Franja Transversal del Norte. Por otro lado, la cordillera que delimita el área del suroeste de Guatemala.

Para la época de mayo se observa una tendencia de precipitación al norte que se inclina hacia el Oeste del país, siempre demarcado por la cordillera norte que colinda con la Franja Transversal del Norte. Por otro lado, la precipitación al sur del país se concentra en el franja volcánica y cordillera que divide el país con el lado del océano pacífico.

En el caso de la precipitación de junio, julio, agosto, septiembre y octubre se puede observar que a nivel de todo el país se incrementó considerablemente la precipitación; no obstante, se observa cómo la precipitación se sigue centrando en dos regiones muy marcadas que en los meses anteriores también registran grandes precipitaciones.

En el caso de noviembre y diciembre las precipitaciones del país disminuyen, pero se sigue observando en menor medida la influencia de la precipitación y la delimitación de la precipitación a partir de las cordilleras y montañas que delimitan el norte y sur del país.

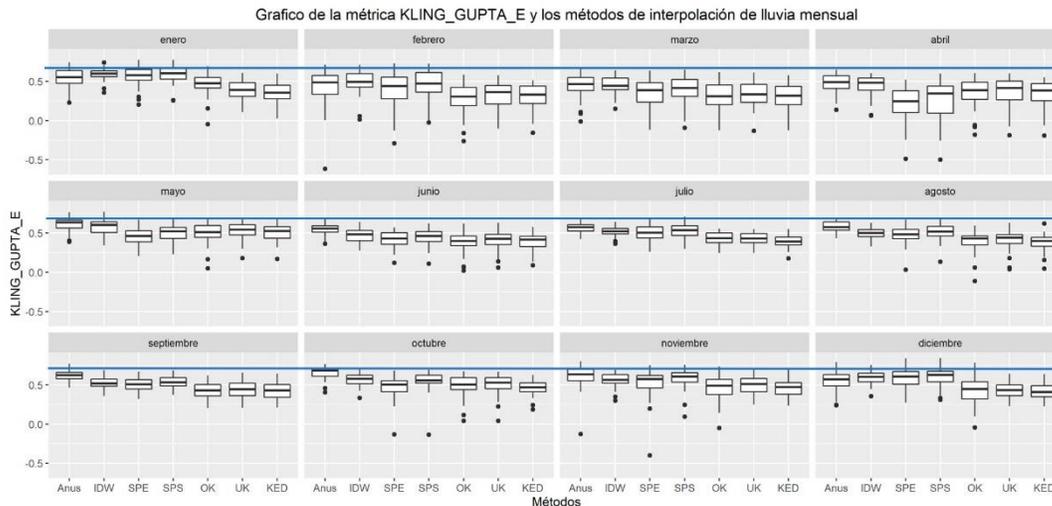


Figura 13. Métrica Kling Gupta E y la interpolación de lluvia mensual de enero a diciembre de los métodos ANUSPLIN, IDW, SPE, SPS, OK, UK y KED. Fuente: Elaboración propia.

Con relación a la métrica Kling Gupta E y la interpolación de la lluvia mensual (Figura 13), se puede observar cómo el método ANUSPLIN denota ser el método que mejor comportamiento tiene a lo largo del año. El método IDW y el método Spline Simple denota ser los métodos que le siguen con base en la métrica Kling Gupta E. Se observa que para los meses de la época con más lluvia denotaron menores variaciones de la métrica Kling Gupta E y para los meses de la época con menos lluvia denotan comportamientos mucho más variables. El método que denota menor variación de la métrica Kling Gupta E a lo largo del año es el método IDW. Los métodos KED y UK demostraron mejor resultado que el método OK, aunque la variación no es considerable en comparación de esos métodos.

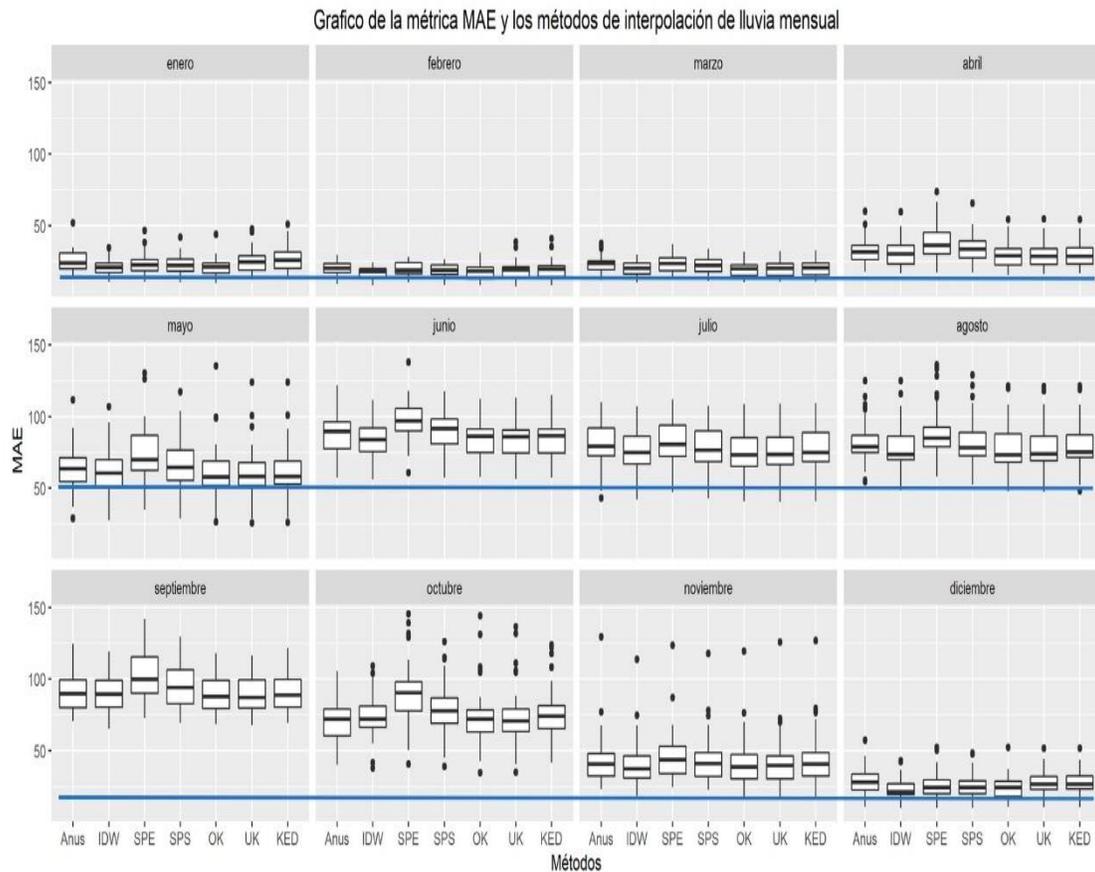


Figura 14. Métrica MAE y la interpolación de lluvia mensual de enero a diciembre de los métodos ANUSPLIN, IDW, SPE, SPS, OK, UK y KED. Fuente: Elaboración propia.

Para la métrica MAE, con los métodos de interpolación para la precipitación mensual (Figura 14), se observó para la época con mayor precipitación (de mayo a octubre) que los métodos Anusplin e IDW, son los que presentan menor variación y mantienen los valores más bajos. Los métodos spline simple y spline elevación se comportan de manera parecida, es decir, varían en magnitudes con valores más altos que Anusplin e IDW. Los valores de los

métodos OK, KED y UK se encuentran por arriba de lo presentado por Anusplin e IDW, pero por debajo de los valores Spline (elevación y simple). Se observó también un patrón que, en cada mes de esta época, fueron en aumento los valores de los residuos, siendo más bajos al inicio de la época lluviosa-mayo y terminando con valores notables altos al final de la época lluviosa-octubre, que se puede interpretar como va en aumento la variabilidad en la precisión de los métodos empleados.

Para la época con menor lluvia (de noviembre al mes de abril) con base en la métrica MAE ocurre lo contrario con relación al comportamiento de los residuos en todos los métodos de interpolación aplicados, las magnitudes disminuyen y presentan valores altos al inicio de la época con menos lluvia (en noviembre) y termina con valores bajos al finalizar la época con menos lluvia (abril). Las métricas indican los métodos Anusplin e IDW los que presentan los valores más bajos en los residuos, aunque con poca diferencia de los demás métodos (UK, KED y Spline-elevación y simple), el resultado del patrón de cada uno de los métodos denota poca variabilidad en su precisión y se caracterizan por contar con valores muy bajos en los residuos y muy parecidos.

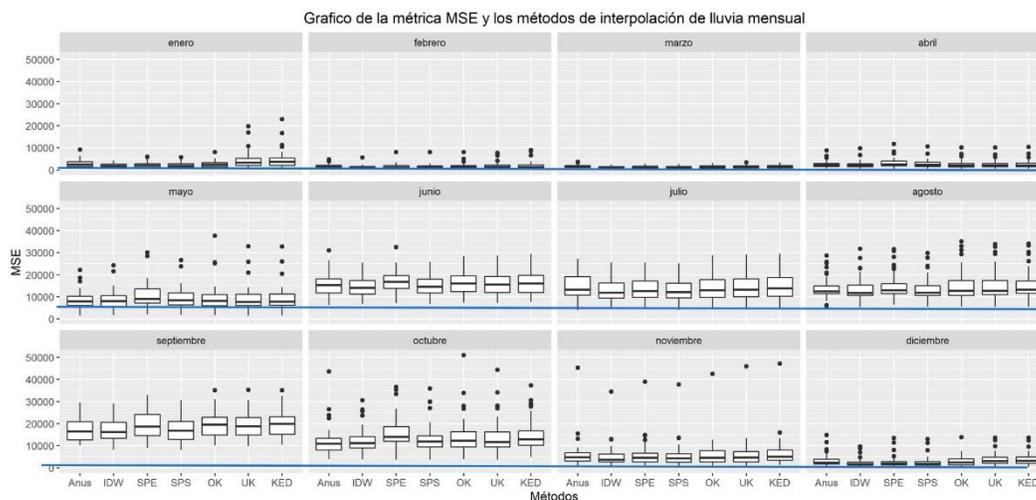


Figura 15. Métrica MSE y la interpolación de lluvia mensual de enero a diciembre de los métodos ANUSPLIN, IDW, SPE, SPS, OK, UK y KED. Fuente: Elaboración propia.

Con relación a la métrica MSE se observa que se demarca diferente comportamiento para la época con menor precipitación (Figura 15), lo que denota que disminuye el MSE y para la época lluviosa se observa comportamientos diversos en cuanto a la variación de la

precipitación. Los métodos de interpolación Anusplin e IDW denotan menor variación para la época lluviosa y demarca ser los métodos que menor magnitud o valor poseen. Los métodos Spline Elevación y Spline simple presentan los mayores valores en residuos que IDW y Anusplin. La distribución de los residuos en los métodos OK, KED y UK en algunos meses (junio, julio, agosto) presentan una distribución de valores muy parecidos a los del método Spline Elevación y Spline Simple, aunque la tendencia en residuos generados por los distintos métodos es aumentar desde el inicio de la época con mayor precipitación (mayo hasta septiembre), es en el mes de octubre donde se comienza a observar un descenso.

La métrica MSE denota que para la época con menor lluvia (de noviembre al mes de abril) los valores de los residuos para los distintos métodos siguen descendiendo hasta el mes de marzo, y para el mes de abril comienzan a subir sus magnitudes. Las métricas indican que el método IDW presenta los valores más bajos en los residuos, aunque en los meses de noviembre y diciembre los valores presentan valores más extremos para todos los métodos. Por último, se observó muy poca diferencia entre los métodos en los meses de febrero y marzo.

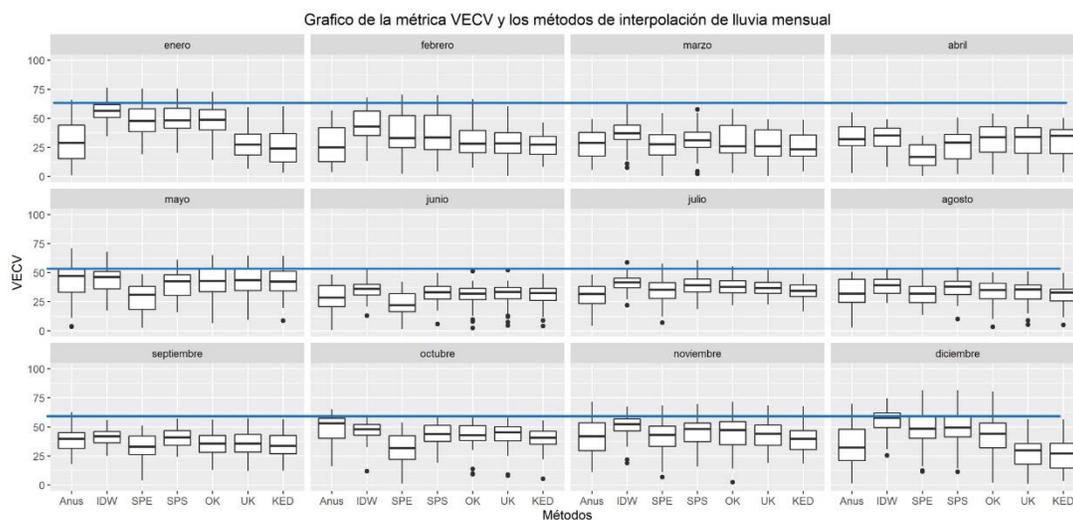


Figura 16. Métrica VECv y la interpolación de lluvia mensual de enero a diciembre de los métodos ANUSPLIN, IDW, SPE, SPS, OK, UK y KED. Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la métrica Máxima Varianza Explicada-VEcv que denota que los valores cercanos al 100%, sugiere predicciones perfectas (); un 0% indica que las predicciones son

tan precisas como usar el promedio de los datos de validación y que valores negativos indican que las predicciones son menos precisas que usar el promedio para predicciones (Li, 2016). Para la época con mayor precipitación (de mayo a octubre) se observó que el método IDW es el que mejor predice la precipitación, seguido por el método Anusplin que en el mes de octubre cae en el rango de bueno mientras IDW no. En la época con considerable precipitación ningún método de interpolación supera el rango de predicciones promedio y los métodos OK, KED y UK presentan valores extremos muy bajos hasta caer al rango de pobre y muy pobre (junio, agosto y octubre).

Para la época con una reducida precipitación (noviembre al mes de abril) se observó que el método IDW es el que posee el porcentaje más alto; luego recae el rango de bueno para los meses de noviembre, diciembre y enero. Para los meses de febrero, marzo y abril el método de interpolación IDW baja su rango promedio; mientras que el método Anusplin en época con reducida precipitación mantiene el rango promedio. Por otro lado, los métodos Spline Elevación y Spline Simple y OK se comportan de manera similar en el rango inferior del promedio y los métodos UK y KED recae en el rango de pobre.

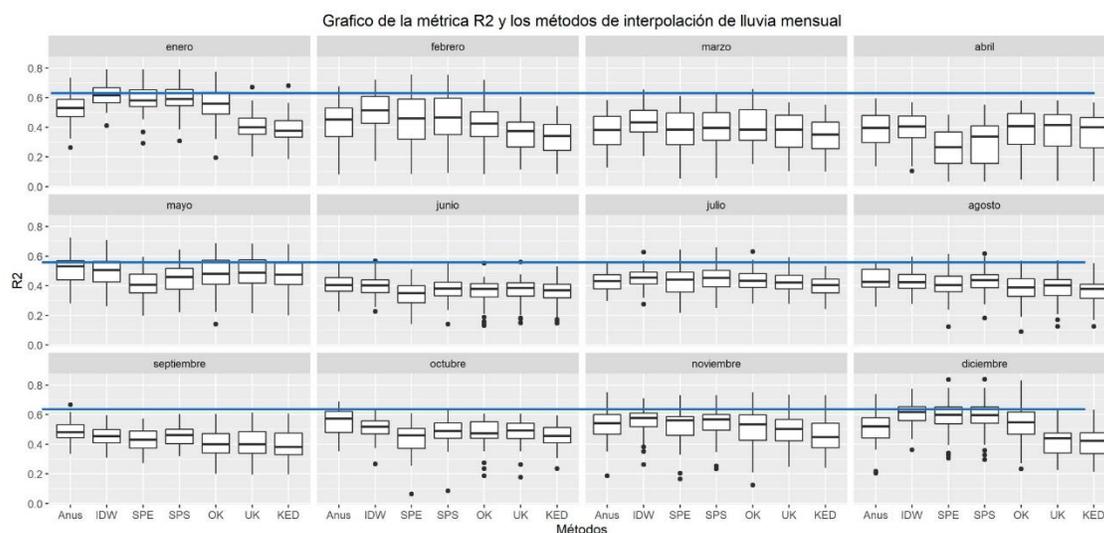


Figura 17. Métrica R2 y la interpolación de lluvia mensual de enero a diciembre de los métodos ANUSPLIN, IDW, SPE, SPS, OK, UK y KED. Fuente: Elaboración propia.

Sobre la distribución del coeficiente de determinación R2, para la época lluviosa (de mayo a octubre) se observó que, presenta los valores más altos (entre 0.4 y 0.6) en los meses de

mayo, septiembre y octubre, siendo los métodos Anusplin e IDW con los que alcanza estos valores (Figura 17), es decir, con éstos métodos se podría replicar los resultados con la proporción de variación de los mismos de un 40% hasta un 60% o también interpretarse como la proporción de la varianza explicada por éstos métodos se ajusta a la distribución de los datos entre un 40% a 60%; los métodos que le siguen son OK, UK y Spline (elevación y simple) en los meses de junio y julio alrededor de un 40% de la proporción de la varianza explicada. También se observa en esta época una tendencia en la disminución de este coeficiente, empezando por mayo y terminando en septiembre, ya que en el mes de octubre presenta un aumento cercano al 0.6.

Con respecto a la época seca (de noviembre al mes de abril), es el método IDW el que presenta los valores más altos, arriba de 0.6 en noviembre, diciembre y enero, son también en estos meses en donde se observa mayor presencia en sus valores extremos; para los meses de febrero, marzo y abril varía entre 0.4 y 0.5. Los demás métodos (OK y SP-elevación y simple) tienen coeficientes parecidos para los meses noviembre, diciembre y marzo (entre 0.35 y 0.6), también se observó mayor variabilidad en todos los métodos para los meses de febrero, marzo y abril, es decir la precisión de los métodos oscila más en estos meses.

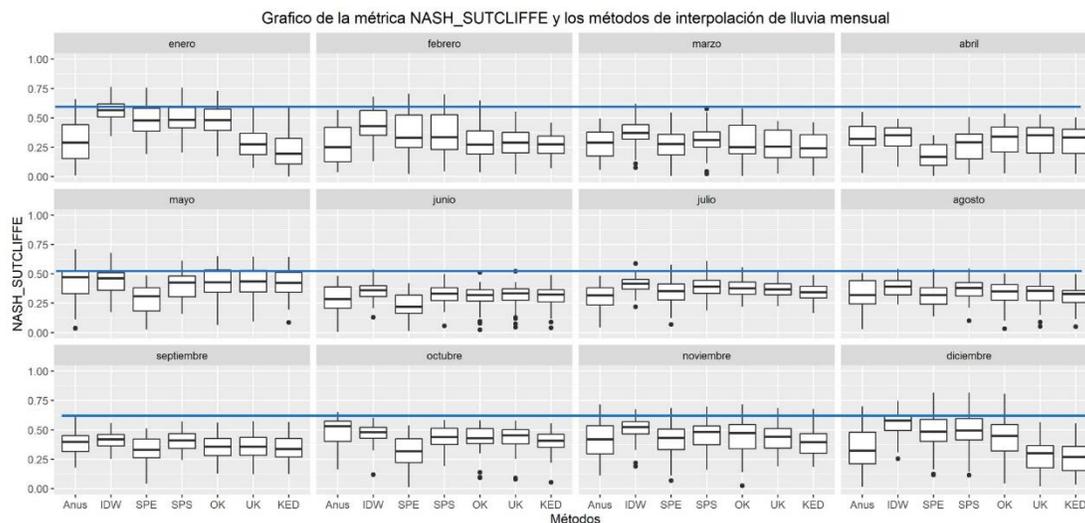


Figura 18. Métrica NSE y la interpolación de lluvia mensual de enero a diciembre de los métodos ANUSPLIN, IDW, SPE, SPS, OK, UK y KED. Fuente: Elaboración propia.

Con base en la métrica NSE se puede observar que el método IDW sobresale considerablemente (Figura 18), seguido de los métodos Spline Elevación y Spline Simple, luego en una categoría de promedio el método Anusplin y entre pobre y muy deficiente estarían los métodos UK, OK y KED. Mientras que para la época con menor precipitación se observa que el método IDW sobresale y tienen un comportamiento similar a lo largo del año; por otro lado, en la época lluviosa el método Spline Elevación baja a la categoría de promedio junto con Anusplin, mientras que el Spline Simple se mantiene en la categoría de bueno. Los métodos OK, UK y KED se mantienen entre la calidad de pobre a muy deficiente.

Tabla 9. Validación y método de interpolación en los doce meses del año. Fuente: Elaboración propia

MÉTODO DE INTERPOLACIÓN EFECTIVO A LO LARGO DEL AÑO					
MÉTODO DE VALIDACIÓN	EXCELENTE	BUENO	PROMEDIO	POBRE	MUY DEFICIENTE
MAE	ANUSPLIN, IDW	SPLINE SIMPLE SPLINE ELEVACIÓN		OK, UK	KED
MSE	ANUSPLIN, IDW	SPLINE SIMPLE SPLINE ELEVACIÓN		KED	OK, UK
NASH SUTCLIFFE	IDW	SPLINE SIMPLE SPLINE ELEVACIÓN	ANUSPLIN	OK	UK, KED
KLING GUPTA E	ANUSPLIN	IDW, SPLINE SIMPLE	SPLINE ELEVACIÓN		OK, UK, KED
R2	IDW, ANUSPLIN	SPLINE SIMPLE	SPLINE ELEVACIÓN	OK	UK, KED
Vecv	IDW, ANUSPLIN	SPLINE SIMPLE	SPLINE ELEVACIÓN	OK	UK, KED

De acuerdo con los métodos de validación se puede observar que las técnicas de interpolación que mejores resultados denotan son los métodos IDW y ANUSPLIN (Tabla 9), seguidos por los métodos de Spline Simple y Spline Elevación como los que métodos que no denotan tan

bajo resultados y se encuentran dentro de la categoría de bueno; mientras que los métodos OK, UK y KED demostraron ser los métodos de interpolación con muy deficiente resultado.

Por otro lado, es importante demarcar la temporalidad de la precipitación y los métodos que puedan demarcar tendencia en relación con una alta y baja precipitación. En ese sentido, se elaboró una tabla donde se demuestra cómo ha sido el comportamiento para cada uno de los meses con época lluviosa, y denota qué métodos representan de mejor manera la interpolación de la precipitación. Donde se observa que los métodos que sobresalen dentro de una categoría de excelente para la época con mayor precipitación son: IDW y ANUSPLIN; mientras que el método Spline Simple y Spline Elevación denotan un comportamiento entre bueno y promedio; no obstante, los métodos OK, UK y KED demuestran comportamientos entre pobre y muy deficiente.

Tabla 10. Validación y método de interpolación en época de precipitación intensa. Fuente: Elaboración propia

MÉTODO DE INTERPOLACIÓN EFECTIVO EN ÉPOCA PRECIPITACIÓN INTENSA					
MÉTODO DE VALIDACIÓN	EXCELENTE	BUENO	PROMEDIO	POBRE	MUY DEFICIENTE
MAE	IDW, ANUSPLIN	OK, UK, KED	SPS		SPE
MSE	IDW	ANUSPLIN	SPLINE SIMPLE	SPLINE ELEVACIÓN, UK	OK, KED
NASH SUTCLIFFE	IDW	SPLINE SIMPLE	SPLINE ELEVACIÓN, ANUSPLIN	OK, UK	KED
KLING GUPTA E	ANUSPLIN	IDW, SPLINE SIMPLE	SPLINE ELEVACIÓN	OK, UK	KED
R2	ANUSPLIN	IDW	SPLINE SIMPLE, SPLINE ELEVACIÓN		OK, UK, KED
Vecv	IDW	SPLINE SIMPLE, ANUSPLIN	OK, UK	KED	SPLINE ELEVACIÓN

Se observa para la época con menor precipitación que el método que sobresale dentro de una categoría de excelente para la época con menor precipitación es: IDW (Tabla 10); mientras

que los métodos Spline Simple, Anusplin, OK y Spline Elevación denotan un comportamiento entre bueno y promedio; no obstante, los métodos OK y KED demuestran comportamientos entre pobre y muy deficiente. Es importante, resaltar que para la época sin tanta precipitación el método Anusplin que toma como base la elevación no denota sobresalir de los demás métodos.

Tabla 11. Validación y método de interpolación en época de precipitación reducida. Fuente: Elaboración propia

MÉTODO DE INTERPOLACIÓN EFECTIVO EN ÉPOCA CON REDUCIDA PRECIPITACIÓN					
MÉTODO DE VALIDACIÓN	EXCELENTE	BUENO	PROMEDIO	POBRE	MUY DEFICIENTE
MAE	IDW, OK	ANUSPLIN	SPLINE ELEVACIÓN, SPLNIE SIMPLE		UK, KED
MSE	IDW, SPLINE ELEVACIÓN	ANUSPLIN	SPLINE SIMPLE	OK	UK, KED
NASH SUTCLIFFE	IDW	SPLINE SIMPLE, SPLINE ELEVACIÓN	ANUSPLIN		OK, UK, KED
KLING GUPTA E	SPLINE ELEVACIÓN, SPLNIE SIMPLE	ANUSPLIN, IDW	OK		UK, KED
R2	IDW	SPLINE SIMPLE, SPLINE ELEVACIÓN	OK, ANUSPLIN	UK	KED
Vecv	IDW	SPLINE SIMPLE	SPLINE ELEVACIÓN	ANUSPLIN, OK	UK, KED

En el sentido, de que el método IDW es el que sobresale para la época seca y lluviosa, así como para todo el año (Tabla 11), es importante entonces, adentrar en el número de estaciones vecinas y el número de potencia que con la base de datos de las estaciones

utilizadas demarcarían los mejores resultados. En ese sentido, para el análisis de la interpolación se establecieron diferentes números de estaciones vecinas que van de la 5 a la 20 y diferentes números de potencia que van desde el 1.2 a 4.0.

En la Figura 19 se observa la frecuencia con los mejores resultados del número de vecinos por mes de interpolación, se logra apreciar, que para la época con menor precipitación (noviembre a abril) la cantidad de estaciones vecinas debe estar entre 15 a 20 estaciones, mientras que en los meses con la época con más precipitación (mayor a octubre) la cantidad de vecinos necesaria osciló entre 8 a 10.

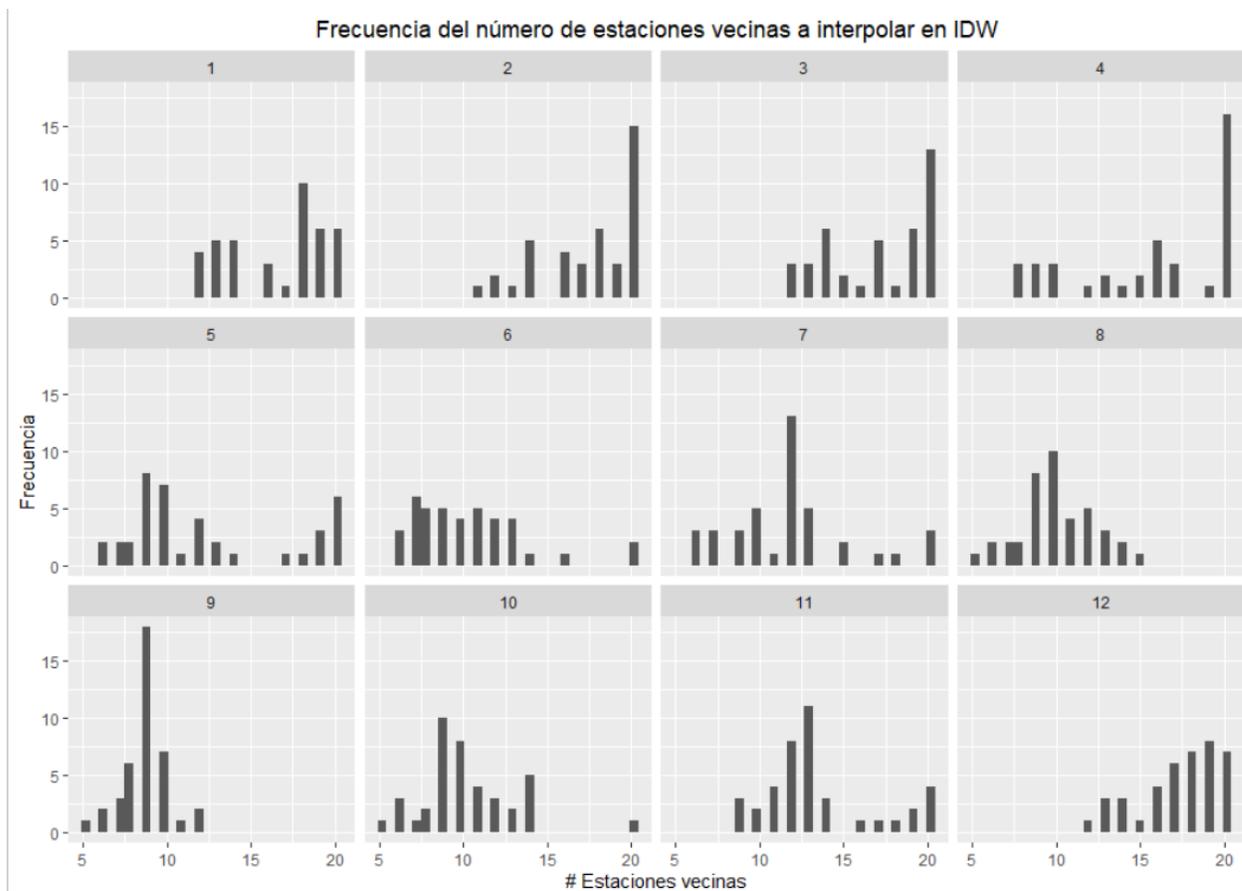


Figura 19. Vinculación de las estaciones vecinas por mes de análisis y la frecuencia en relación de las estaciones vecinas cercanas. Fuente: Elaboración propia.

Al seleccionar los valores de IDP (Figura 20), se concluye que para los meses de época con menor precipitación (noviembre a abril) el mejor valor es 1.4, mientras que para los meses

de mayo, junio y octubre estos valores oscilan entre 1.4 a 1.8, y para los meses de julio a septiembre los valores que mejores resultados para potencia oscilaron entre 2 a 2.4.

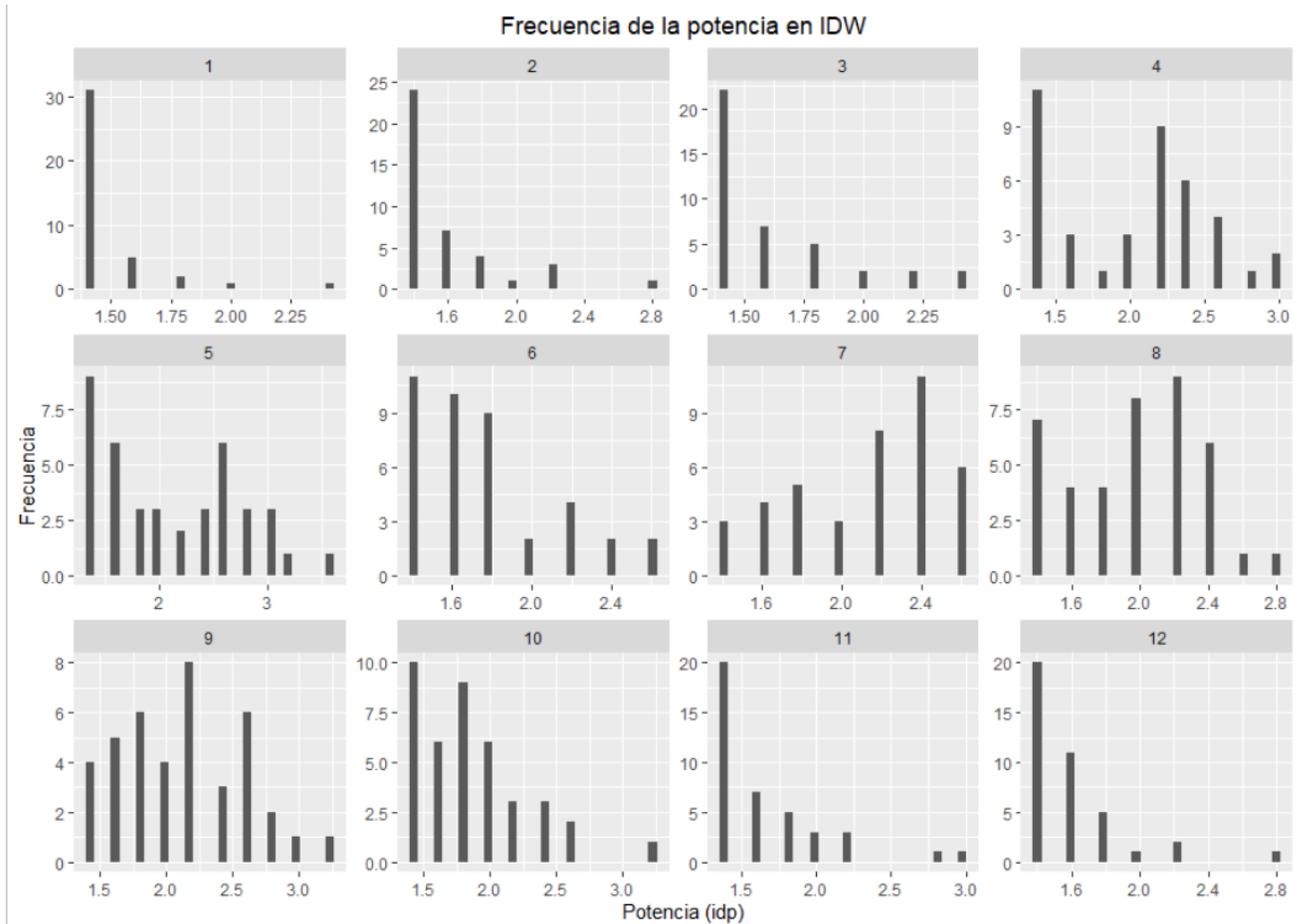
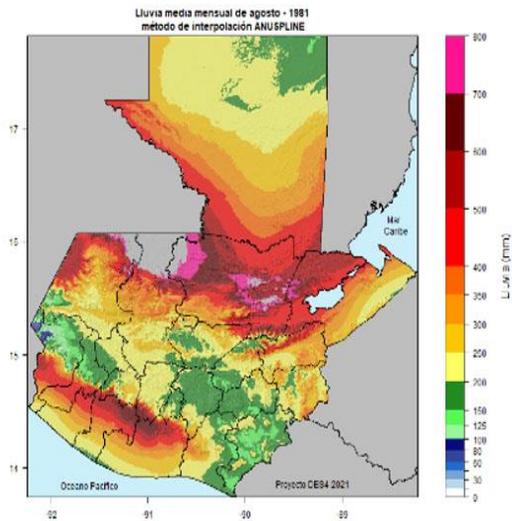
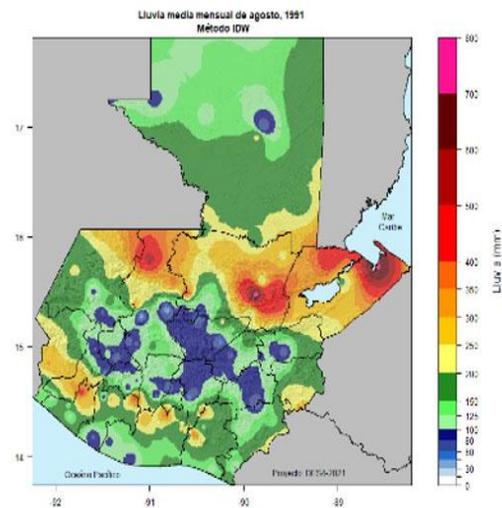


Figura 20. Vinculación de la potencia para cada mes de análisis y la frecuencia de la potencia por cada mes. Fuente: Elaboración propia.

ANUSPLIN (AGOSTO)



IDW (AGOSTO)



SPLINE ELEVACIÓN (AGOSTO)

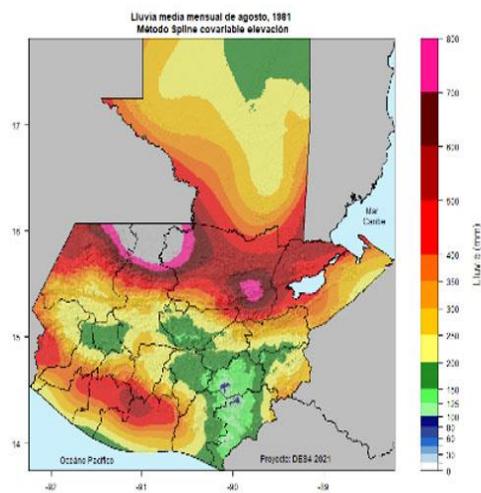


Figura 21. Mapas interpolados para 1981 en el mes de agosto a través de los métodos ANUSPLIN, IDW y SPLINE ELEVACIÓN. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar en las imágenes el suavizado de la interpolación de la precipitación con el método ANUSPLIN (Figura 21) y esto se debe a que se adapta a la elevación y topografía del territorio de Guatemala. Mientras que el método IDW se asocia con la localización de las estaciones, por lo que se observa que la interpolación tiene el comportamiento de anillos o círculos que demarcan áreas de precipitación. Por otro lado, el método Spline elevación es un método que denota suavizado y demarcación a partir de la elevación y demarca comportamiento similar en relación con el método ANUSPLIN.

11. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se observó en la exploración de variables independientes como la distancia hacia el océano atlántico, distancia hacia el océano pacífico, distancia hacia el Golfo de México, elevación, latitud, longitud y pendiente en relación con la variable dependiente precipitación, que existe la necesidad de distribuir las variables en función de una regionalización. Es decir, en el proceso de exploración se observaba que estaciones que se encontraban más cercanas hacia el océano pacífico pero el océano pacífico no tendría la misma influencia en lugares de convergencia o donde el océano atlántico podría influir considerablemente. Por lo que, una de las vertientes a futuro es explorar estadísticamente la base de datos que se depuró que puede influir en las diferentes áreas del país, lo que puede arrojar ecuaciones de correlación entre las variables dependientes e independientes. También, en el proceso de regionalización sería importante la consideración de modelos multivariantes y que permita profundizar en el comportamiento estadístico de cada región o de cada distribución.

Fue fundamental y trascendental la base de datos que se recopiló de información mensual de precipitación del periodo enero de 1981 a diciembre de 2020, para ello se integró la información de varias redes de observación que existen en Guatemala, siendo estas: la red climática del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología -INSIVUMEH-, Instituto Nacional de Electrificación -INDE-, -EMPAGUA-, Instituto de Cambio Climático Privado -ICC- y estaciones fronterizas de los servicios meteorológicos de El Salvador, Honduras, Belice y México. También, se integraron los datos de *Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations* (CHIRPS en sus siglas en inglés) de la versión 2.0, estos datos sirvieron para completar, extender o rellenar los vacíos de información. Es decir, uno de los aportes fundamentales de este trabajo de investigación fue el proceso de recopilación e integración coherente de una base de datos actualizada; puesto que, se integraron vacíos o intersticios que se carecía de estaciones meteorológicas y la composición de estaciones en fronteras ayudan al relleno de información sobre la precipitación.

Con la integración de la base de datos se puede generar diferentes investigaciones futuras, puesto que, es una base de datos que se compone de diferentes bases de datos y que debido a la composición de bases de datos disponibles, permite profundizar en el trabajo sobre la precipitación, programas, planes, estudios, entre otros. En el área del anexo de la presente

investigación se adjunta la base de datos promediadas como resultado del trabajo obtenido y se observa la base de datos como la base que permitió adentrar en la investigación actual.

La metodología que la presente investigación demarcó es una aporte al conocimiento puesto que denota la metodología seguida para integrar una base de datos, establecer datos para la creación del set de validación que se acerca al 20% de la base de datos y el 80% como set de entrenamientos que permitieron evaluar el comportamiento a través de cada uno de los métodos de interpolación, los métodos de interpolación seleccionados y los métodos de validación estadística que permitieron definir el método que mejor representa la precipitación en el territorio de la república de Guatemala.

Otro de los aportes importantes de la presente investigación son los mapas de interpolación que se realizaron para los doce meses del año y a partir de los 1981, 1986, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011 y 2016; se interpoló para los métodos ANUSPLIN, Spline Elevación e IDW. Los tres métodos de interpolación seleccionados para los mapas corresponden a los tres métodos que a lo largo del año demostraron mejores comportamientos. Y la realización de la base de mapas correspondientes a distintos métodos de interpolación corresponde uno de los productos importantes de la investigación, puesto que, con los mapas se pueden realizar diferentes análisis en investigaciones futuras que puedan predecir o demarcar comportamientos a partir de diferentes escalas temporales.

Las tablas de la correlación lineal de la precipitación con relación a las variables distancia hacia el océano pacífico, distancia hacia el océano atlántico, distancia hacia el Golfo de México, elevación, pendiente, longitud y latitud sirve de base para la exploración o investigación futura en relación de variables desde una óptica estadística de correlación. Sin embargo, los trabajos futuros deben de considerar la distribución o estratificación de las variables dependientes e independientes; asimismo, es importante la consideración de la época con mayor precipitación durante el año y la época con menor precipitación durante el año. Es decir, existen diferentes resultados de la precipitación en diferentes épocas del año y es importante separar por regiones.

De acuerdo con los métodos de validación a lo largo del año se puede observar que las técnicas de interpolación que mejores resultados denotan son los métodos IDW y ANUSPLIN, seguidos por los métodos de Spline Simple y Spline Elevación como los que métodos que se encuentran dentro de la categoría de bueno; mientras que los métodos OK, UK y KED demostraron ser los métodos de interpolación con muy deficiente resultado.

Por otro lado, es importante demarcar la temporalidad de la precipitación y los métodos que puedan demarcar tendencia en relación con una alta y baja precipitación. Donde se observa que los métodos que sobresalen dentro de una categoría de excelente para la época con mayor precipitación son: IDW y ANUSPLIN; mientras que el método Spline Simple y Spline Elevación denotan un comportamiento entre bueno y promedio; no obstante, los métodos OK, UK y KED demuestran comportamientos entre pobre y muy deficiente. Sin embargo, cuando se presenta una menor precipitación el método que sobresale dentro de una categoría de excelente es: IDW mientras que los métodos Spline Simple, ANUSPLIN, OK y Spline Elevación denotan un comportamiento entre bueno y promedio; no obstante, los métodos OK y KED demuestran comportamientos entre pobre y muy deficiente. Es importante, resaltar que para la época sin tanta precipitación el método ANUSPLIN toma como base la elevación no denota sobresalir de los demás métodos.

Dado que el método IDW demostró mejor comportamiento en distintas épocas de intensidad de lluvia en el territorio de la república de Guatemala se observó la frecuencia con los mejores resultados del número de vecinos por mes de interpolación, se logra apreciar, que para la época con menor precipitación (noviembre a abril) la cantidad de estaciones vecinas debe estar entre 15 a 20 estaciones, mientras que en los meses con la época con más precipitación (mayor a octubre) la cantidad de vecinos necesaria osciló entre 8 a 10.

Para el método IDW es necesario la consideración de valores de potencia (IDP) de acuerdo a la época de mayor o menor precipitación, por ejemplo, se concluye que para los meses de época con menor precipitación (noviembre a abril) el mejor valor es 1.4, mientras que para los meses de mayo, junio y octubre estos valores oscilan entre 1.4 a 1.8, y para los meses de julio a septiembre los valores que mejores resultados para potencia oscilaron entre 2 a 2.4.

Se observó que la variable Elevación denota un mejor comportamiento en métodos como el ANUSPLIN y el Spline Elevación; es decir, las variables ambientales denotan un comportamiento importante y vital en el desarrollo de la interpolación de la precipitación. Por lo que, se recomienda explorar los análisis con otras variables ambientales como las distancias a los océanos o cuerpos de agua importantes que inciden en Guatemala, las pendientes, usos de suelo, regionalización por microclimas de Guatemala, latitud, longitud, áreas boscosas, cuerpos de agua, entre otros.

Al comparar los mapas de interpolación se puede observar en las imágenes el suavizado de la interpolación de la precipitación con el método ANUSPLIN; es decir, la base del método ANUSPLIN depende de la elevación y eso influye en la interpolación de la precipitación, ya que, se adapta a la superficie existente. Lo mismo ocurre con el método Spline Elevación ya que su interpolación depende de la elevación de cada uno de los lugares y se adapta a la superficie del territorio de Guatemala. Mientras que el método IDW se asocia con la localización de las estaciones, por lo que se observa que la interpolación tiene el comportamiento de anillos o círculos que demarcan áreas de precipitación; por lo que, los anillos de interpolación del método IDW están asociadas a la localización de las estaciones y se puede encontrar vacíos debido a carencia de estaciones en lugares donde pueden demarcar otro comportamiento de precipitación.

En relación con los mapas de interpolación del método IDW sería importante observar los puntos de anillos que demarcan comportamientos de precipitación aislados y nutrir la base de datos a partir de otras estaciones meteorológicas que permitan brindar continuidad al mapa IDW o bien, que se pueda adecuar o alinear los datos, esto previo a utilizar el método IDW. Esto a pesar de que el método IDW demostró mejor comportamiento a partir del análisis estadístico de validación de resultados.

Con relación al método IDW se observó que para los meses de abril a noviembre (reducida precipitación) el número de estaciones vecinas que arrojan mejor resultado son las que se encuentran entre las 15 a 20 estaciones; no obstante, para la época de mayo a octubre el número de vecinos que arrojaron mejor resultado osciló entre 8 a 10. La potencia del método IDW demarcó para los meses de abril a noviembre como mejor valor el 1.4; de mayo, junio

y octubre los valores oscilaron de 1.4 a 1.8; mientras que para los meses de julio a septiembre se obtuvieron potencias de 2 a 2.4 como los que arrojaron mejores resultados. Es decir, con los valores que se describe en esta investigación demarca valores que denotarían mejores resultados y estimaciones de la precipitación.

Se puede concluir que la presente investigación logró alcanzar cada uno de los objetivos establecidos y, principalmente, en la aportación a llenar vacíos al conocimiento que no se habían realizado anteriormente. Además, pone en discusión sobre métodos de interpolación que cada vez se van sofisticando o toman como base nuevas herramientas o instrumentos que permiten profundizar en comportamientos que anteriormente no se alcanzaban. Asimismo, la presente investigación arroja diferentes caminos a seguir para aportar al vacío al conocimiento, por lo que, genera nuevas brechas y discusiones metodológicas que se deben de seguir discutiendo en el futuro.

Las escalas espaciales de análisis de los métodos de interpolación de la precipitación demarcan nuevos horizontes que se deben de estudiar; es decir, por el momento se sigue delimitando la espacialidad de los métodos de interpolación en función de delimitación geográfica, delimitación política y social, por área montañosa, latitud y longitud, pero no se ha estudiado los métodos de interpolación en relación con una demarcación sobre el comportamiento o regionalización a partir de comportamientos climáticas o variables orográficos que demarquen delimitación espacial.

La conformación y delimitación de bases de datos de precipitación demarcan un reto a futuro; puesto que, los datos están propensos a errores sistemáticos y aleatorios durante la medición, además, la pérdida de agua en la medición, errores en los calibradores, ausencia o carencia de estaciones meteorológicas que permita contar con series de datos de tiempo de la precipitación continuos y congruentes. La búsqueda final de una base de datos es la continuidad de la representación de la precipitación que ayudará a mejorar la base de estudios o planes de diferentes entidades estatales, académicas, técnicos, ingenieros, expertos en meteorología, entre otros.

El presente trabajo arroja mapas, bases de datos, tablas e información de vital importancia que servirá como base para la estimación de la distribución espacial y la cantidad de

precipitación horaria, diaria, mensual, anual, estacional, cíclico, tormentas o casos extremos que se utilizan en la planificación gubernamental, en la modelación y procesos hidrológicos predicción de desastres y en la administración de recursos de agua, proyección de inundaciones, subcuencas de ríos, evaluación de recarga y calendarización de la irrigación, la estimación de la cantidad y calidad de la superficie del agua y el agua subterránea, la toma de decisiones, en los modelos ecológicos, en los datos de climas que son necesarios para la modelación de enfermedades infecciosas emergentes y en la escorrentía, evaporación y humedad del suelo.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Abtew, W., Obeysekera, J., & Shih, G. (1993). Spatial Analysis for Monthly Rainfall in South Florida. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 29(2), 179–188. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1993.tb03199.x>
- Ambiental, I. de I. (2003). *Estado actual del clima y la calidad del aire en Guatemala*. Guatemala.
- Cahuex Cotí, A. A. (2005). *Evaluación de caudales de crecida en la cuenca del Río Samalá: Modelos Lluvia-Escorrentía, con fines de evaluación de amenazas de origen hidrometeorológico*. UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.
- Caruso, C., & Quarta, F. (1998). Interpolation methods comparison. *Computers and Mathematics with Applications*, 35(12), 109–126. [https://doi.org/10.1016/S0898-1221\(98\)00101-1](https://doi.org/10.1016/S0898-1221(98)00101-1)
- Chavez Soto, E. A. (2016). *Homogeneización de información de precipitación de estaciones del Insivumeh de la vertiente del pacífico del período de 1960 a 1970, Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Chen, D., Ou, T., Gong, L., Xu, C. Y., Li, W., Ho, C. H., & Qian, W. (2010). Spatial interpolation of daily precipitation in China: 1951-2005. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27(6), 1221–1232. <https://doi.org/10.1007/s00376-010-9151-y>
- Chen, F. W., & Liu, C. W. (2012). Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. *Paddy and Water Environment*, 10(3), 209–222. <https://doi.org/10.1007/s10333-012-0319-1>
- Chen, T., Ren, L., Yuan, F., Yang, X., Jiang, S., Tang, T., ... Zhang, L. (2017). Comparison of spatial interpolation schemes for rainfall data and application in hydrological modeling. *Water (Switzerland)*, 9(5), 1–18. <https://doi.org/10.3390/w9050342>
- Cheng, S., Hsieh, H.-H., & Wang, Y.-M. (2007). Geostatistical interpolation of space–time rainfall on Tamshui River basin, Taiwan. *Hydrological Processes*, 21, 3136–3145. <https://doi.org/10.1002/hyp>

- Daly, C., Neilson, R. P., & Phillips, D. L. (1994). A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology*, 33(2), 140–158. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1994\)033<0140:ASTMFM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1994)033<0140:ASTMFM>2.0.CO;2)
- Delrieu, G., Wijbrans, A., Boudevillain, B., Faure, D., Bonnifait, L., & Kirstetter, P. E. (2014). Geostatistical radar-raingauge merging: A novel method for the quantification of rain estimation accuracy. *Advances in Water Resources*, 71, 110–124. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.06.005>
- Di Piazza, A., Conti, F. Lo, Noto, L. V., Viola, F., & La Loggia, G. (2011). Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(3), 396–408. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.01.005>
- Díaz Monroy, L. G. (2007). *Estadística multivariada : inferencia y métodos* (2da. Edici). Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias.
- Díaz Padilla, G., Sánchez Cohen, I., Quiroz, R., Payán, J. G., Thorp, C. W., & Cruz Medina, I. R. (2008). Interpolación Espacial De La Precipitación Pluvial En La Zona De Barlovento Y Sotavento Del Golfo De México. *Agricultura Técnica En México*, 34(3), 279–287.
- Dirks, K. N., Hay, J. E., Stow, C. D., & Harris, D. (1998). High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island Part II : Interpolation of rainfall data. *Journal of Hydrology*, 208, 187–193.
- Duchon, J. (1977). Splines minimizing rotation-invariant semi-norms in Sobolev spaces. *Lecture Notes in Mathematics*, 571, 85–100.
- Earls, J., & Dixon, B. (2007). Spatial Interpolation of Rainfall Data Using ArcGIS: A Comparative Study. *Annual ESRI International User Conference*, (January 2007), 1–9.
- Edmond Moeletsi, M., Phumlani Shabalala, Z., De Nysschen, G., & Walker, S. (2016). Evaluation of an inverse distance weighting method for patching daily and dekadal rainfall over the free state province, South Africa. *Water SA*, 42(3), 466–474. <https://doi.org/10.4314/wsa.v42i3.12>
- Eldrandaly, K. A., & Abu-Zaid, M. S. (2011). Comparison of six GIS-based spatial interpolation methods for estimating air temperature in Western Saudi Arabia. *Journal of Environmental Informatics*, 18(1), 38–45. <https://doi.org/10.3808/jei.201100197>
- Gupta, H., Kling, H., Yilmaz, K., & Martinez, G. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Hadi, S. J., & Tombul, M. (2018). Comparison of Spatial Interpolation Methods of Precipitation and Temperature Using Multiple Integration Periods. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(7), 1187–1199. <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0783-1>
- Hancock, P. A., & Hutchinson, M. F. (2006). Spatial interpolation of large climate data sets using bivariate thin plate smoothing splines. *Environmental Modelling & Software*, 21(12), 1684–1694. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2005.08.005>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution

- interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/JOC.1276>
- Hurst, P. J. (2014). *A comparison of interpolation methods for estimating mountaintop removal*. University of North Carolina at Greensboro, North Carolina.
- Hutchinson, M. F., & Xu, T. (2013, August). ANUSPLIN. Canberra: Fenner School of Environment and Society.
- Izquierdo, T., & Márquez, A. (2006). Comparación de métodos de interpolación para la realización de mapas de precipitación para el acuífero de Icod-Cañadas (Tenerife, Islas Canarias). *Geogaceta*, (40), 307–310.
- Jeffrey, S. J., Carter, J. O., Moodie, K. B., & Beswick, A. R. (2001). Using spatial interpolation to construct a comprehensive archive of Australian climate data. *Environmental Modelling and Software*, 16(4), 309–330. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00008-1](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00008-1)
- Jones, D. A., Wang, W., & Fawcett, R. (2009). High-Quality spatial climate data-sets for Australia. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal* 58, 58, 233–248.
- Kablouti, M., Ouerdachi, L., & Boutaghane, H. (2012). Spatial interpolation of annual precipitation in Annaba- Algeria - Comparison and evaluation of methods. *Energy Procedia*, 18, 468–475. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.058>
- Kim, S. N., Lee, W. K., Shin, K. Il, Kafatos, M., Seo, D. J., & Kwak, H. Bin. (2010). Comparison of spatial interpolation techniques for predicting climate factors in Korea. *Forest Science and Technology*, 6(2), 97–109. <https://doi.org/10.1080/21580103.2010.9671977>
- Kling, H., Fuchs, M., & Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424–425, 264–277. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011>
- Knight, Y., Yu, B., Jenkins, G., & Morris, K. (2005). Comparing rainfall interpolation techniques for small subtropical urban catchments. *MODSIM05 - International Congress on Modelling and Simulation: Advances and Applications for Management and Decision Making, Proceedings*, 1674–1680.
- Knoben, W. J. M., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323–4331. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>
- Kohavi, R. (1995). A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection.
- Li, J. (2016). Assessing spatial predictive models in the environmental sciences: Accuracy measures, data variation and variance explained. *Environmental Modelling and Software*, 80, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.004>
- Li, J. (2017). Assessing the accuracy of predictive models for numerical data: Not r nor r2, why not? Then what? *PLoS ONE*, 12(8), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183250>
- Ly, S., Degré, A., & Charles, C. (2013). Different methods for spatial interpolation of rainfall data for operational hydrology and hydrological modeling at watershed scale. A review.

Biotechnology, Agronomy and Society and Environment, 17(2), 392–406.

<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.1225842.v1>

Mair, A., & Fares, A. (2011). Comparison of rainfall interpolation methods in a mountainous region of a tropical island. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(4), 371–383.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000330](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000330)

Nashwan, M. S., Shahid, S., & Wang, X. (2019). Uncertainty in estimated trends using gridded rainfall data: A case study of Bangladesh. *Water (Switzerland)*, 11(2), 5–8.

<https://doi.org/10.3390/w11020349>

Newlands, N. K., Davidson, A., Howard, A., & Hill, H. (2011). Validation and inter-comparison of three methodologies for interpolating daily precipitation and temperature across Canada.

Environmetrics, 22(2), 205–223. <https://doi.org/10.1002/env.1044>

Plouffe, C. C. F., Robertson, C., & Chandrapala, L. (2015). Comparing interpolation techniques for monthly rainfall mapping using multiple evaluation criteria and auxiliary data sources: A case study of Sri Lanka. *Environmental Modelling and Software*, 67, 57–71.

<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.01.011>

Ponte Ramírez, R. R., & Bosque Sendra, J. (1997). Comparación de métodos de cálculo para la obtención de la variable precipitación en un sig. *Estudios Geograficos*, 58(226), 227–255.

<https://doi.org/10.3989/egeogr.1997.i227.627>

Portalés, C., Boronat-Zarceño, N., Pardo-Pascual, J., & Balaguer-Beser, A. (2008). Un nuevo método para el cálculo de precipitaciones medias mediante técnicas de interpolación geoestadística considerando las características geográficas y topográficas del terreno (pp. 1–8). Valencia: CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA GEOMÁTICA Y TOPOGRÁFICA.

Price, D. T., McKenney, D. W., Nalder, I. A., Hutchinson, M. F., & Kesteven, J. L. (2000). A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 101(2–3), 81–94.

[https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00169-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00169-0)

Rivera, J. A., Hinrichs, S., & Marianetti, G. (2019). Using CHIRPS Dataset to Assess Wet and Dry Conditions along the Semiarid Central-Western Argentina. *Advances in Meteorology*, 2019.

<https://doi.org/10.1155/2019/8413964>

Seaman, R. S. (1988). Some real data tests of the interpolation accuracy of Bratslet h's successive correction method, 40, 173–176. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v40i2.11791>

Sheikhasan, H., & Belloum, A. (2006). A Comparison of Interpolation Techniques for Spatial Data Prediction.

Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data.

Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference, ACM 1968, 517–524.

<https://doi.org/10.1145/800186.810616>

Sterling, D. L. (2003). *A Comparison of Spatial Interpolation Techniques For Determining Shoaling Rates of The Atlantic Ocean Channel Approved*. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

- Tabios, G. Q., & Salas, J. D. (1985). A Comparative Analysis of Techniques for Spatial Interpolation of Precipitation. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 21(3), 365–380. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1985.tb00147.x>
- Taesombat, W., & Sriwongsitanon, N. (2009). Areal rainfall estimation using spatial interpolation techniques. *ScienceAsia*, 35(3), 268–275. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2009.35.268>
- Teegavarapu, R. S. V., & Chandramouli, V. (2005). Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *Journal of Hydrology*, 312(1–4), 191–206. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.015>
- Tomczak, M. (1998). Spatial Interpolation and its Uncertainty Using Automated Anisotropic Inverse Distance Weighting (IDW) - Cross-Validation/Jackknife Approach. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 2(2), 18–30.
- UDA, C. (2018). *Spatial interpolation methods*. Ankara, Turkia.
- Vargas, A., Santos, A., Cardenas, E., & Obregon, N. (2011). Análisis de la distribución e interpolación espacial de las lluvias en Bogotá, Colombia. *Dyna-Colombia*, 78(167), 151–159.
- Vicente-Serrano, S. M., Saz-Sánchez, M. A., & Cuadrat, J. M. (2003). Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): Application to annual precipitation and temperature. *Climate Research*, 24(2), 161–180. <https://doi.org/10.3354/cr024161>
- Wagner, P. D., Fiener, P., Wilken, F., Kumar, S., & Schneider, K. (2012). Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions. *Journal of Hydrology*, 464–465, 388–400. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.07.026>
- Wang, S., Huang, G., Lin, Q., Li, Z., Zhang, H., & Fan, Y. (2014). Comparison of interpolation methods for estimating spatial distribution of precipitation in Ontario, Canada. *International Journal of Climatology*, 34(14), 3745–3751. <https://doi.org/10.1002/joc.3941>
- Wang, Y., Yang, H., Yang, D., Qin, Y., Gao, B., & Cong, Z. (2017). Spatial Interpolation of Daily Precipitation in a High Mountainous Watershed Based on Gauge Observations and a Regional Climate Model Simulation. *Journal of Hydrometeorology*, 18(3), 845–862. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-16-0089.1>
- Wijemannage, A. L. K., Ranagalage, M., & Perera, E. N. C. (2016). Comparison of spatial interpolation methods for rainfall data over Sri Lanka. In *37th Asian Conference on Remote Sensing, ACRS 2016* (Vol. 3, pp. 1723–1732).
- Wu, Y.-H. (Eva), & Hung, M.-C. (2016). Comparison of Spatial Interpolation Techniques Using Visualization and Quantitative Assessment. *Applications of Spatial Statistics*. <https://doi.org/10.5772/65996>
- Xu, W., Zou, Y., Zhang, G., & Linderman, M. (2014). A comparison among spatial interpolation techniques for daily rainfall data in Sichuan Province, China. *International Journal of Climatology*, 35(10), 2898–2907. <https://doi.org/10.1002/joc.4180>
- Yang, M. (2015). BENCHMARKING RAINFALL INTERPOLATION OVER THE NETHERLANDS.
- Yang, X., Xie, X., Liu, D. L., Ji, F., & Wang, L. (2015). Spatial Interpolation of Daily Rainfall Data for

Local Climate Impact Assessment over Greater Sydney Region. *Advances in Meteorology*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/563629>

Zhang, M., Leon, C. de, & Migliaccio, K. (2018). Evaluation and comparison of interpolated gauge rainfall data and gridded rainfall data in Florida, USA. *Hydrological Sciences Journal*, 63(4), 561–582. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1444767>

13. Apéndice

MÉTODO ANUSPLIN - 1981

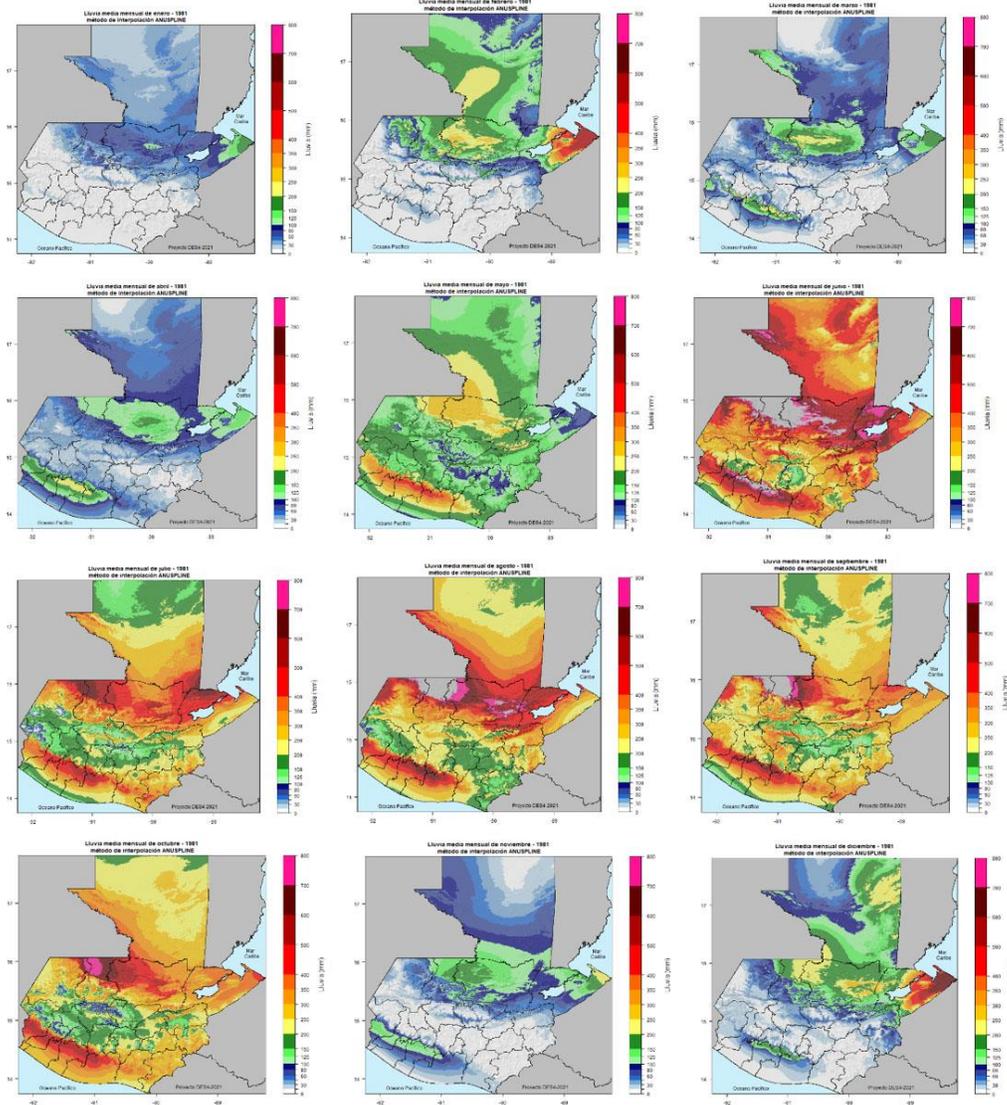


Figura 22. Interpolación del método ANUSPLIN para el año 1981. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO ANUSPLIN - 1986

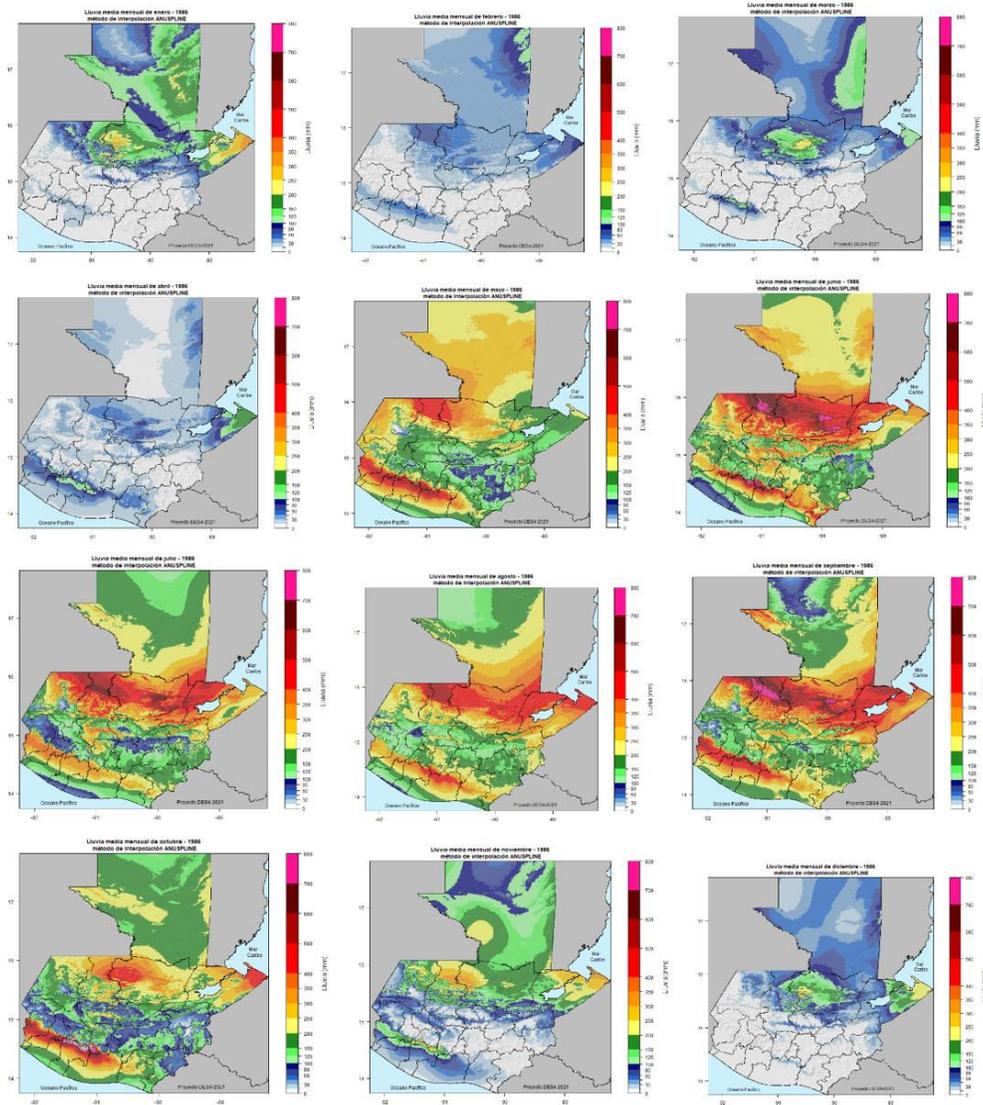


Figura 23. Interpolación del método ANUSPLIN para el año 1986. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO ANUSPLIN – 1991

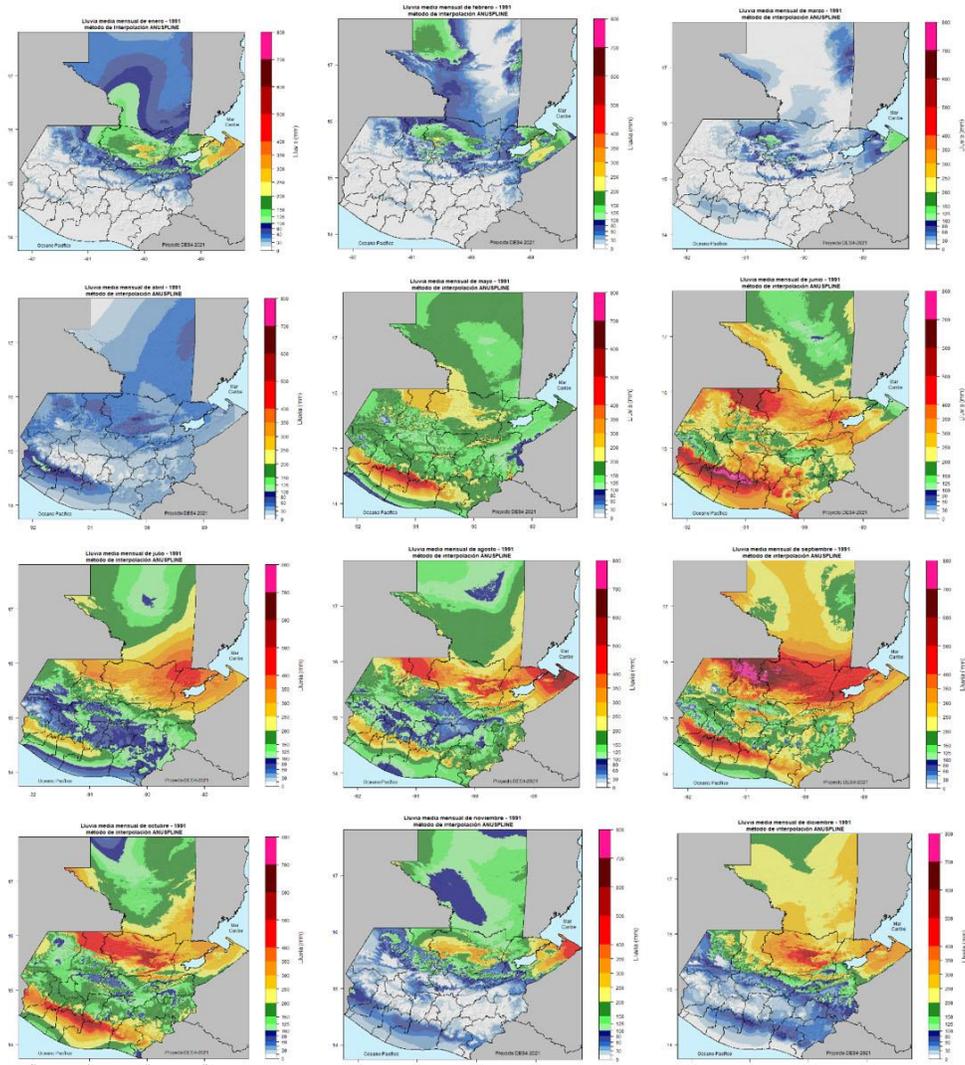


Figura 24. Interpolación del método ANUSPLIN para el año 1991. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO ANUSPLIN – 1996

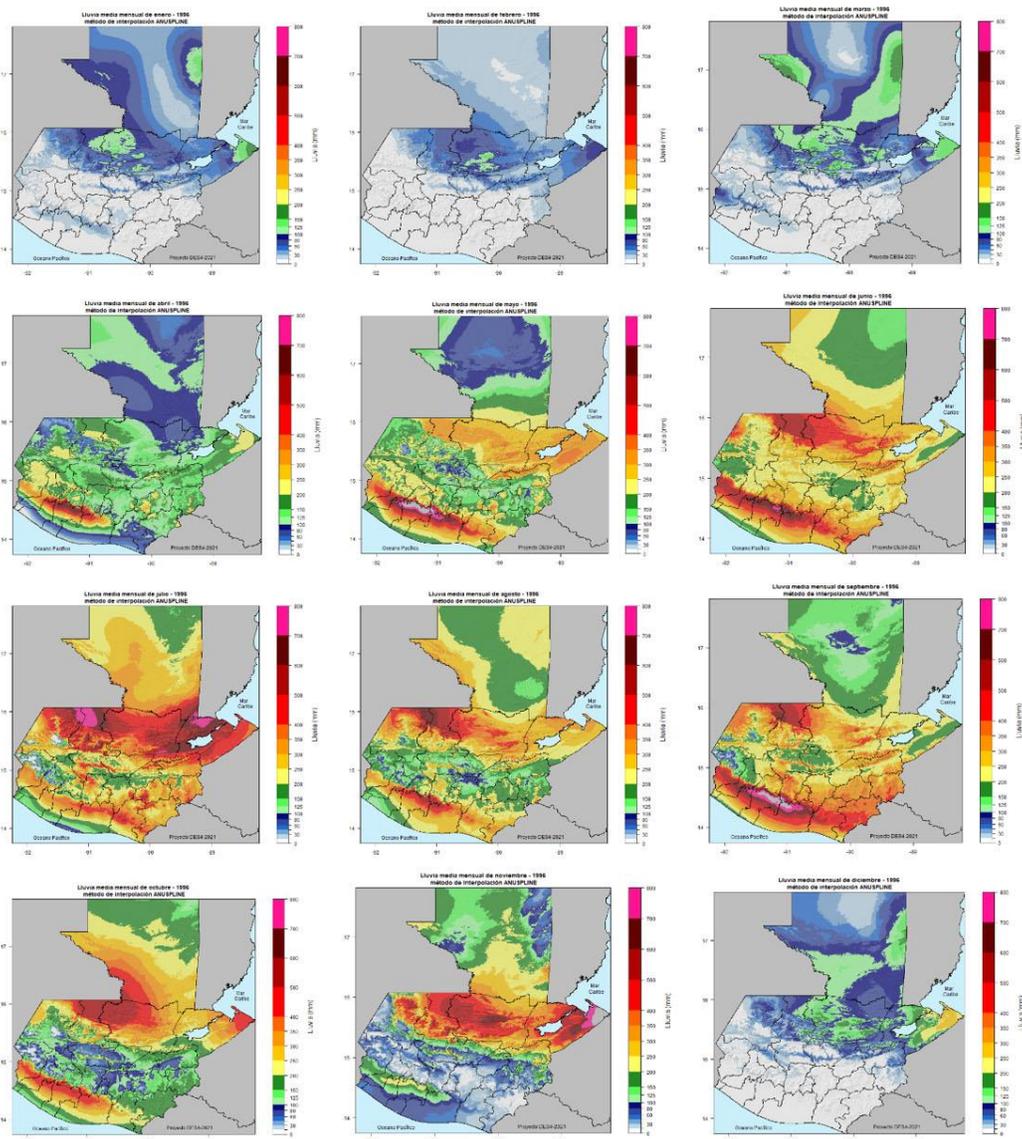


Figura 25. Interpolación del método ANUSPLIN para el año 1996. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO ANUSPLIN – 2001

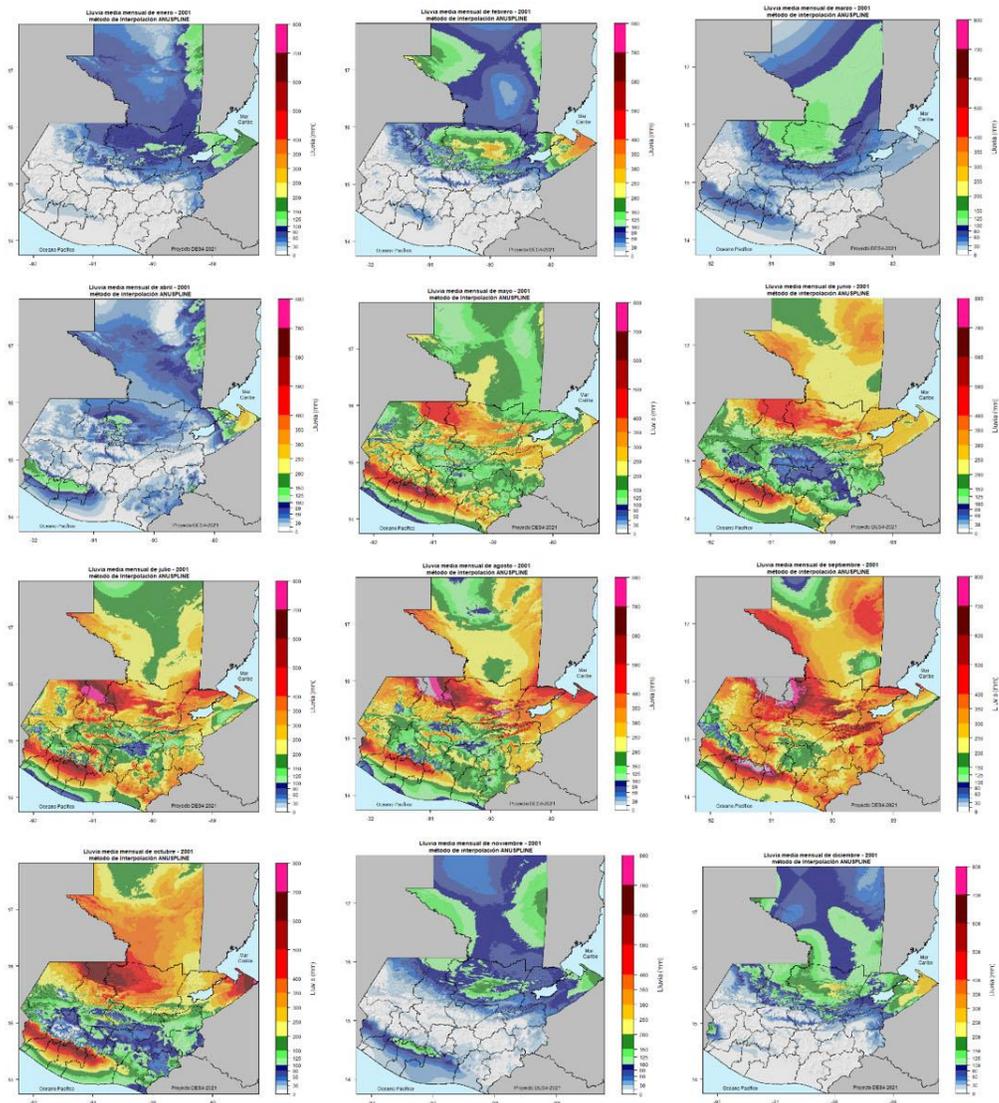


Figura 26. Interpolación del método ANUSPLIN para el año 2001. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO ANUSPLIN – 2006

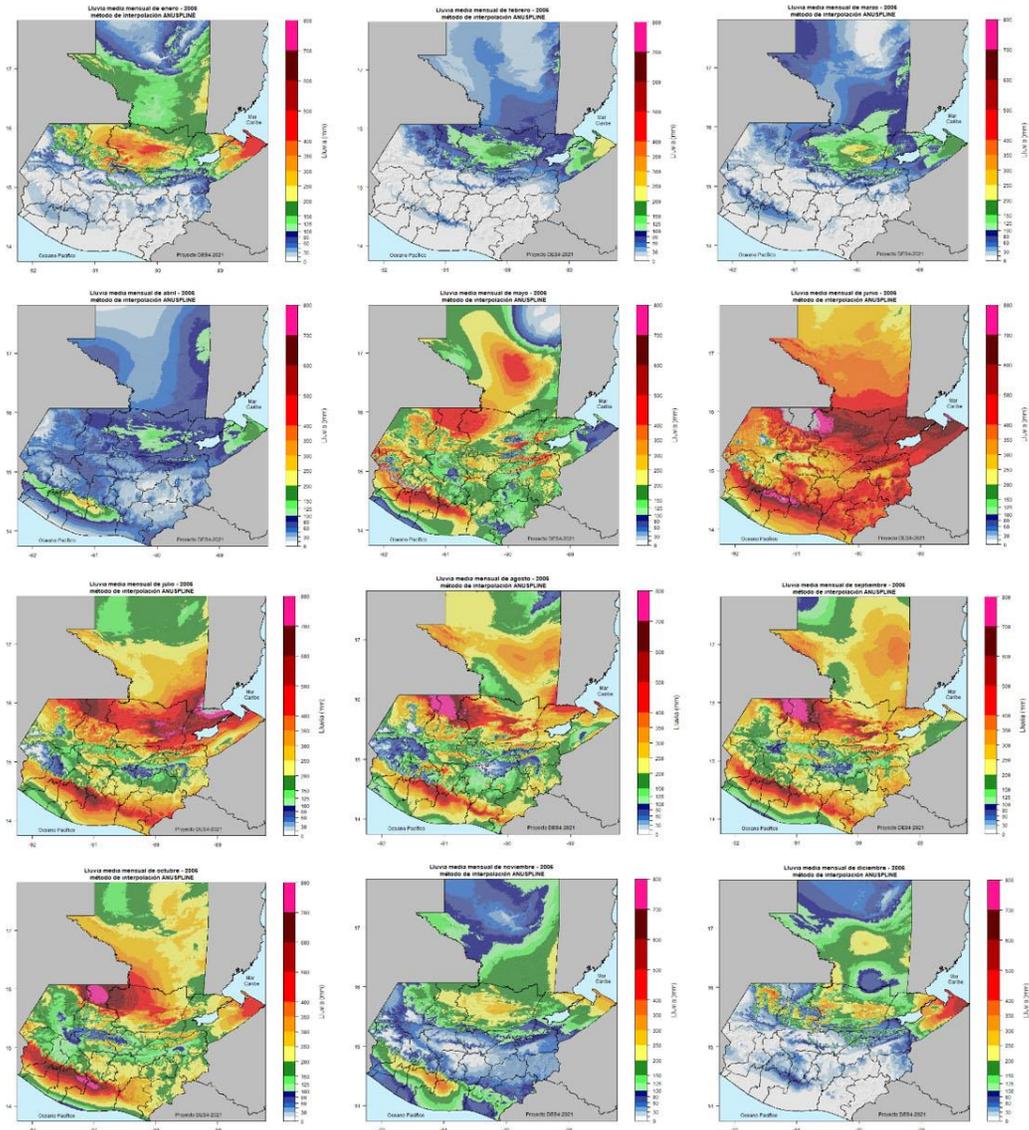


Figura 27. Interpolación del método ANUSPLIN para el año 2006. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO ANUSPLIN – 2011

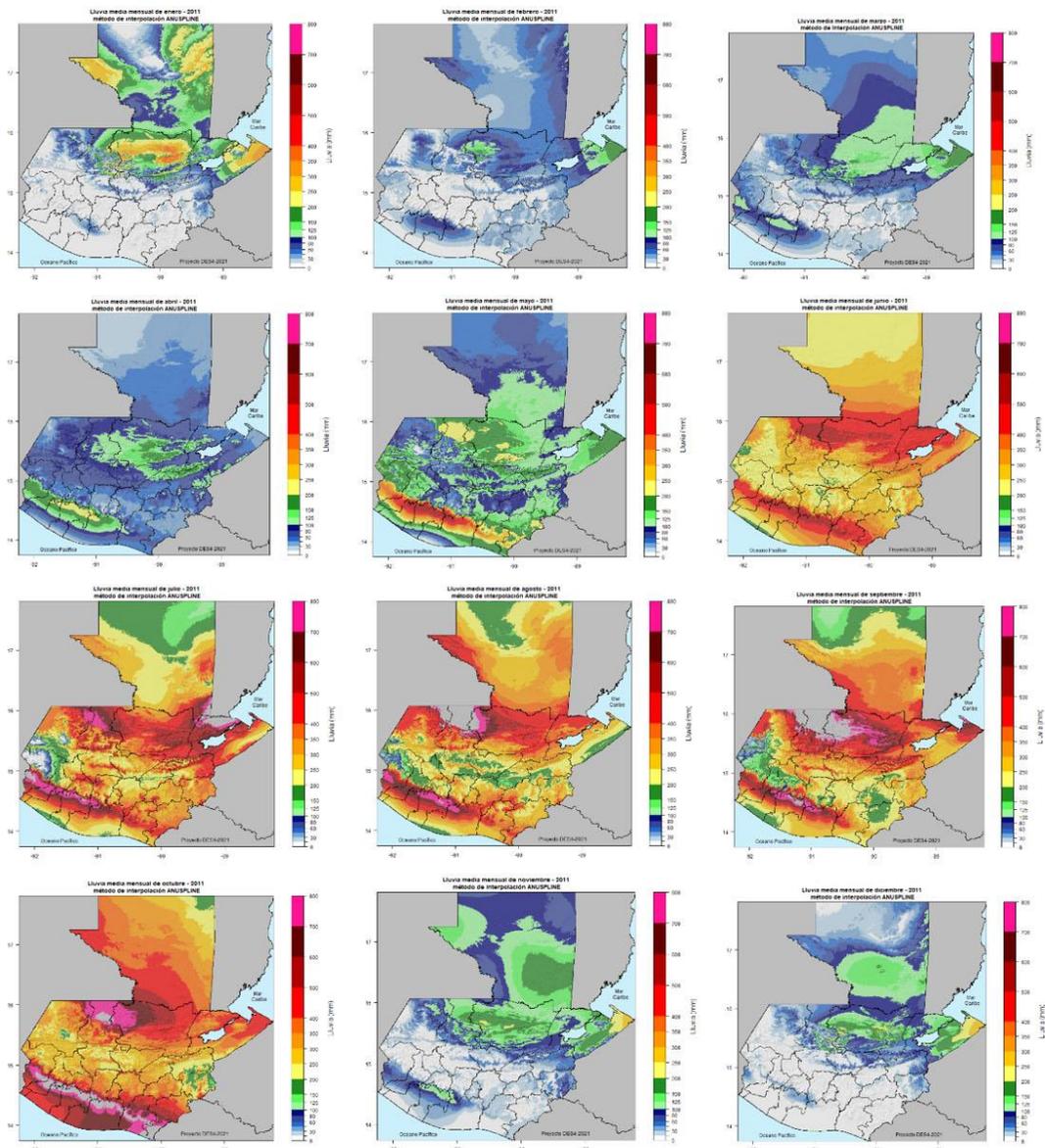


Figura 28. Interpolación del método ANUSPLIN para el año 2011. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO ANUSPLIN – 2016

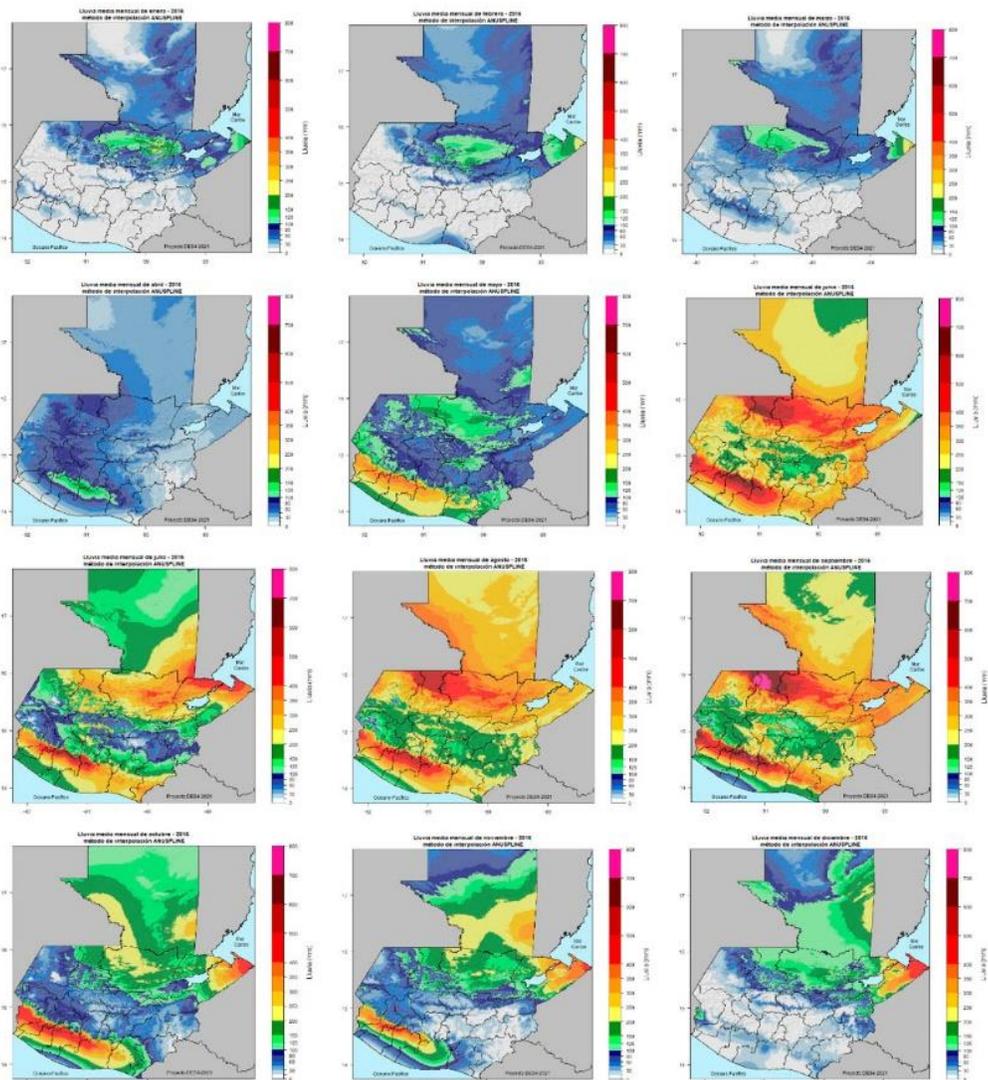


Figura 29. Interpolación del método ANUSPLIN para el año 2016. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO IDW – 1981

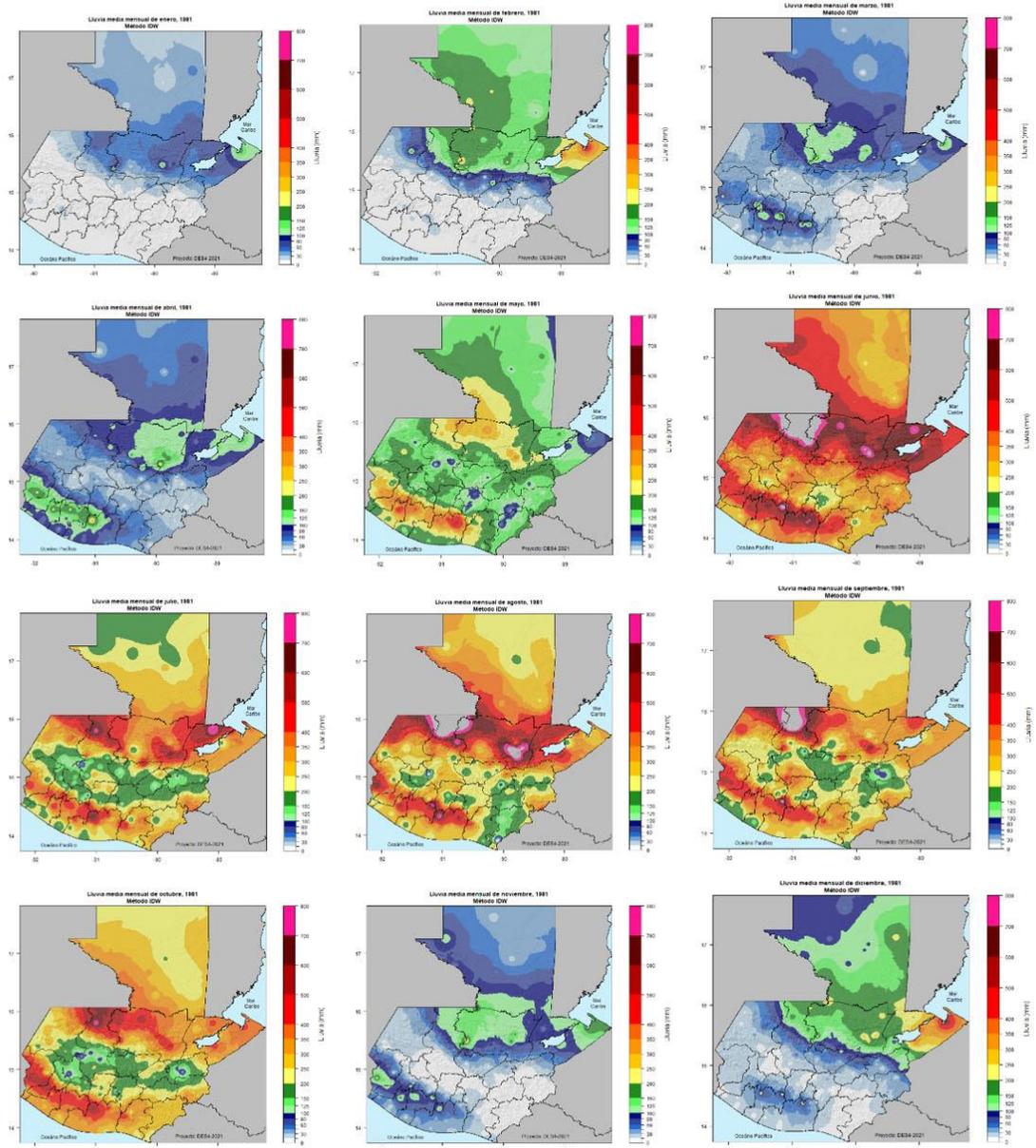


Figura 30. Interpolación del método IDW para el año 1981. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO IDW – 1986

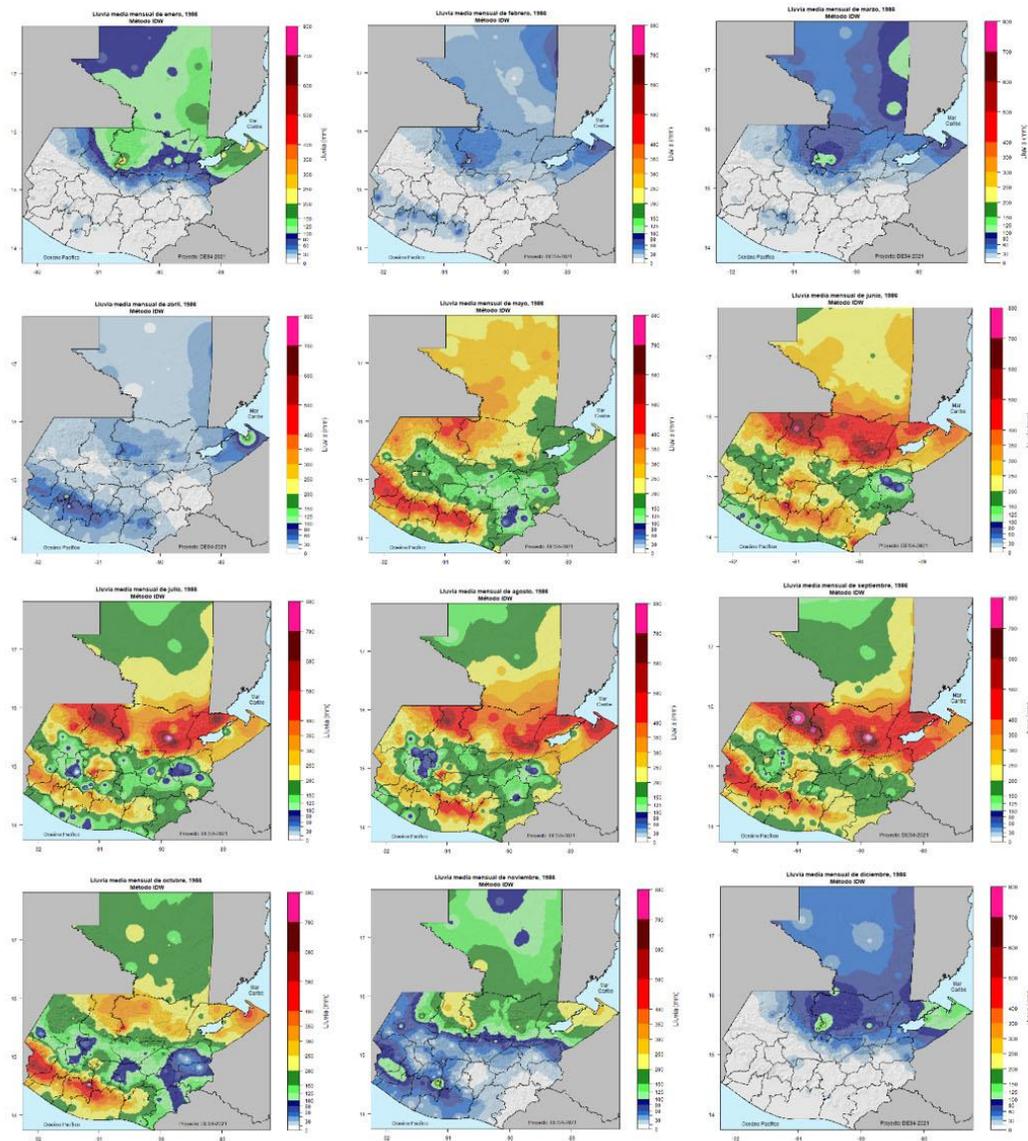


Figura 31. Interpolación del método IDW para el año 1986. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO IDW – 1991

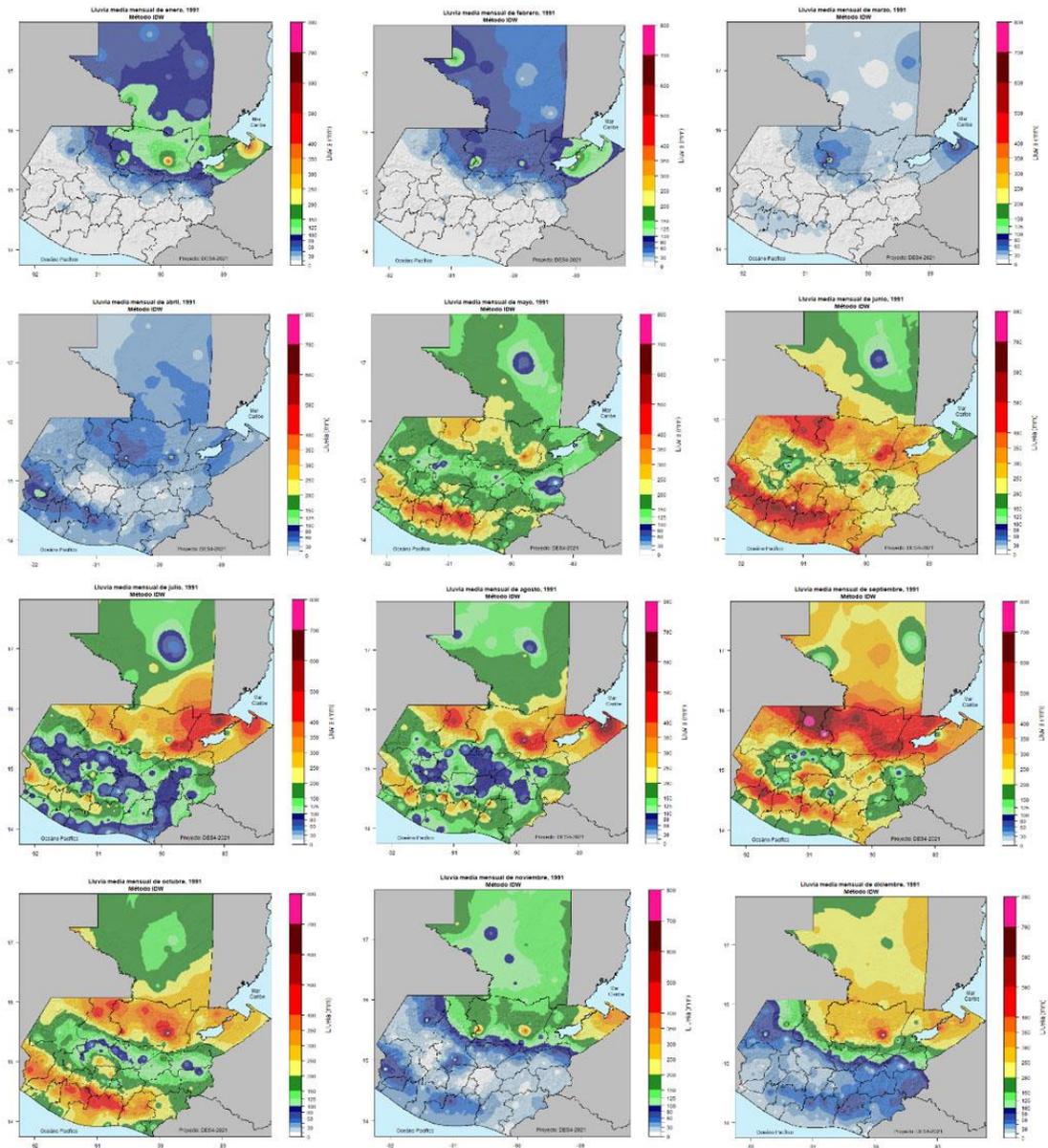


Figura 32. Interpolación del método IDW para el año 1991. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO IDW – 1996

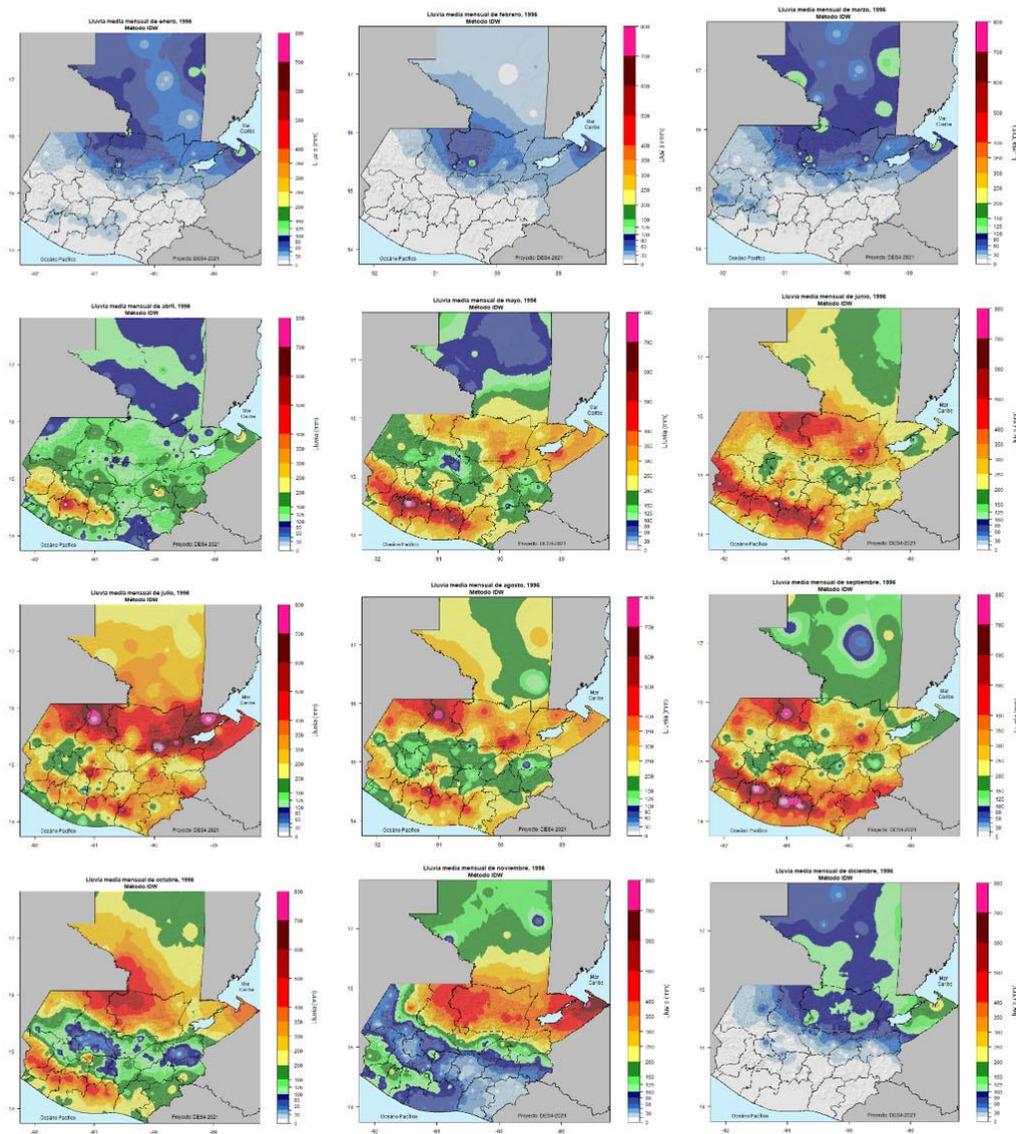


Figura 33. Interpolación del método IDW para el año 1996. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO IDW – 2001

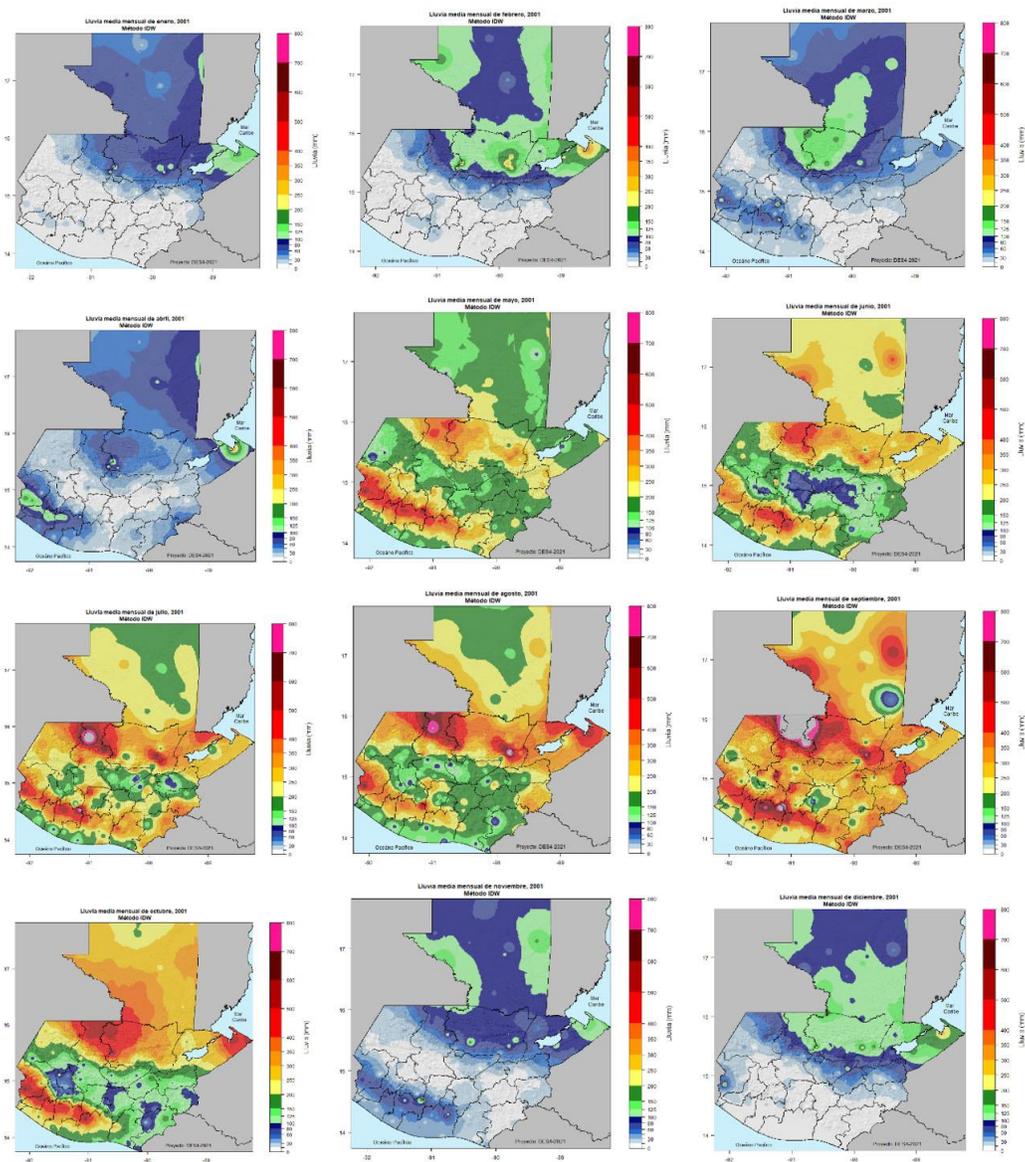


Figura 34. Interpolación del método IDW para el año 2001. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO IDW – 2006

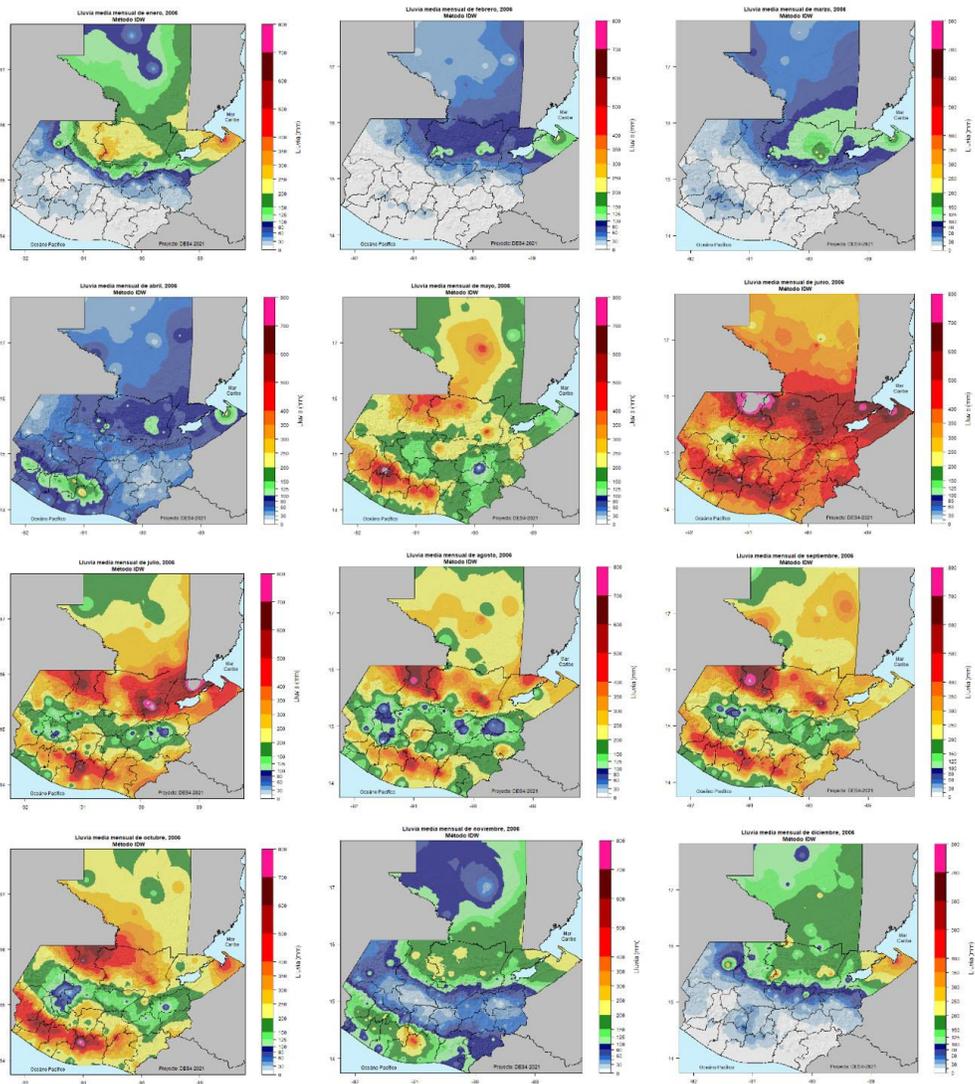


Figura 35. Interpolación del método IDW para el año 2006. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO IDW – 2011

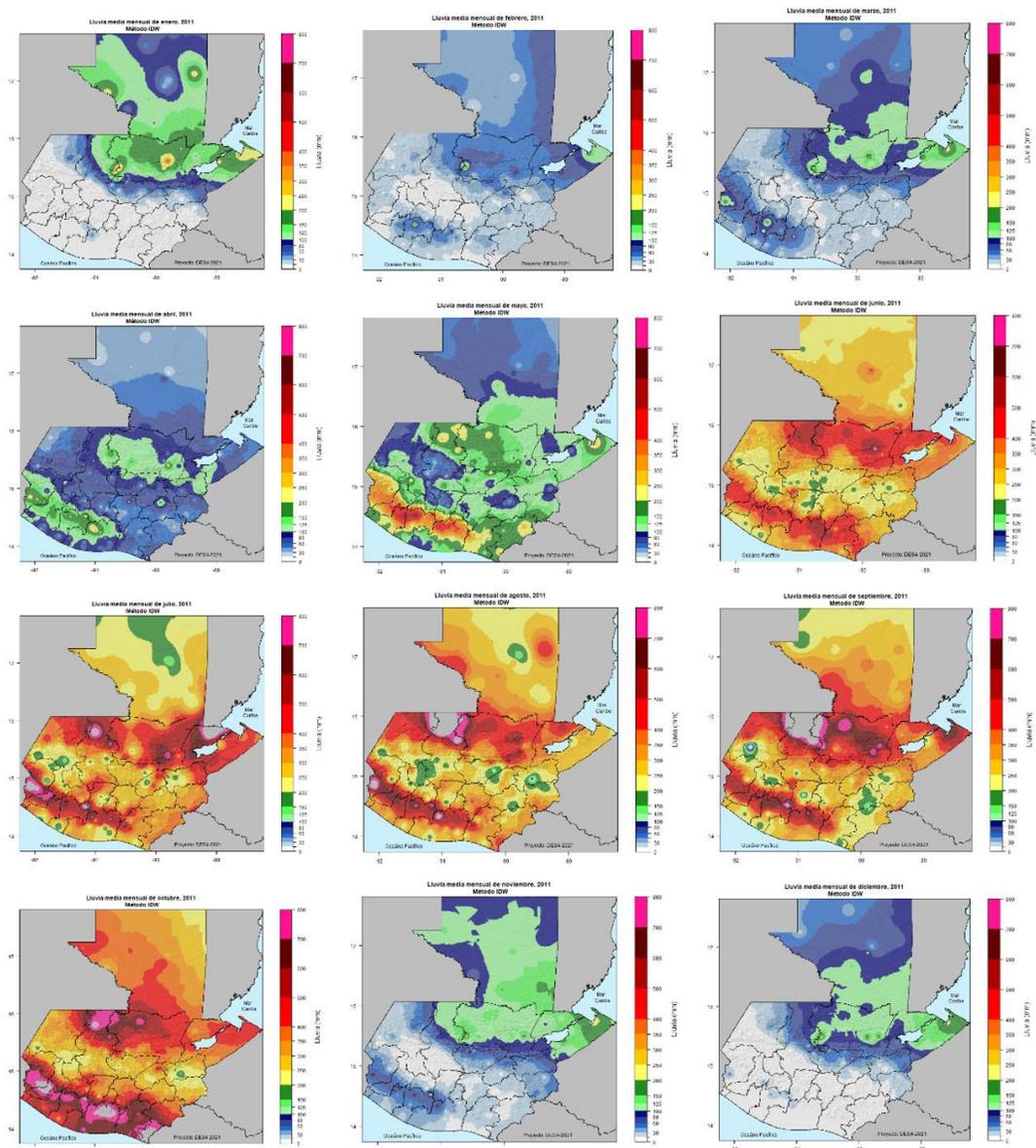


Figura 36. Interpolación del método IDW para el año 2011. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO IDW – 2016

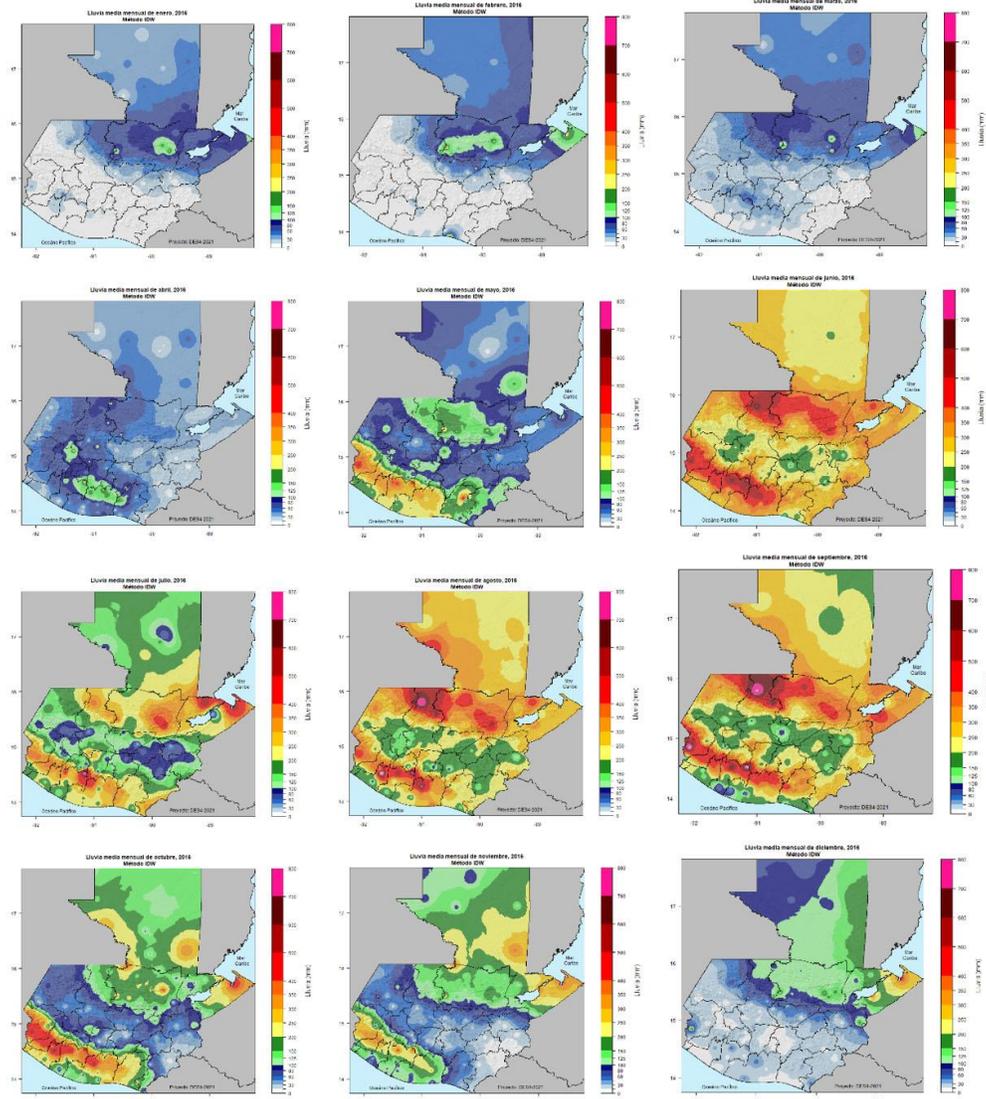


Figura 37. Interpolación del método IDW para el año 2016. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO SPLINE ELEVACIÓN – 1981

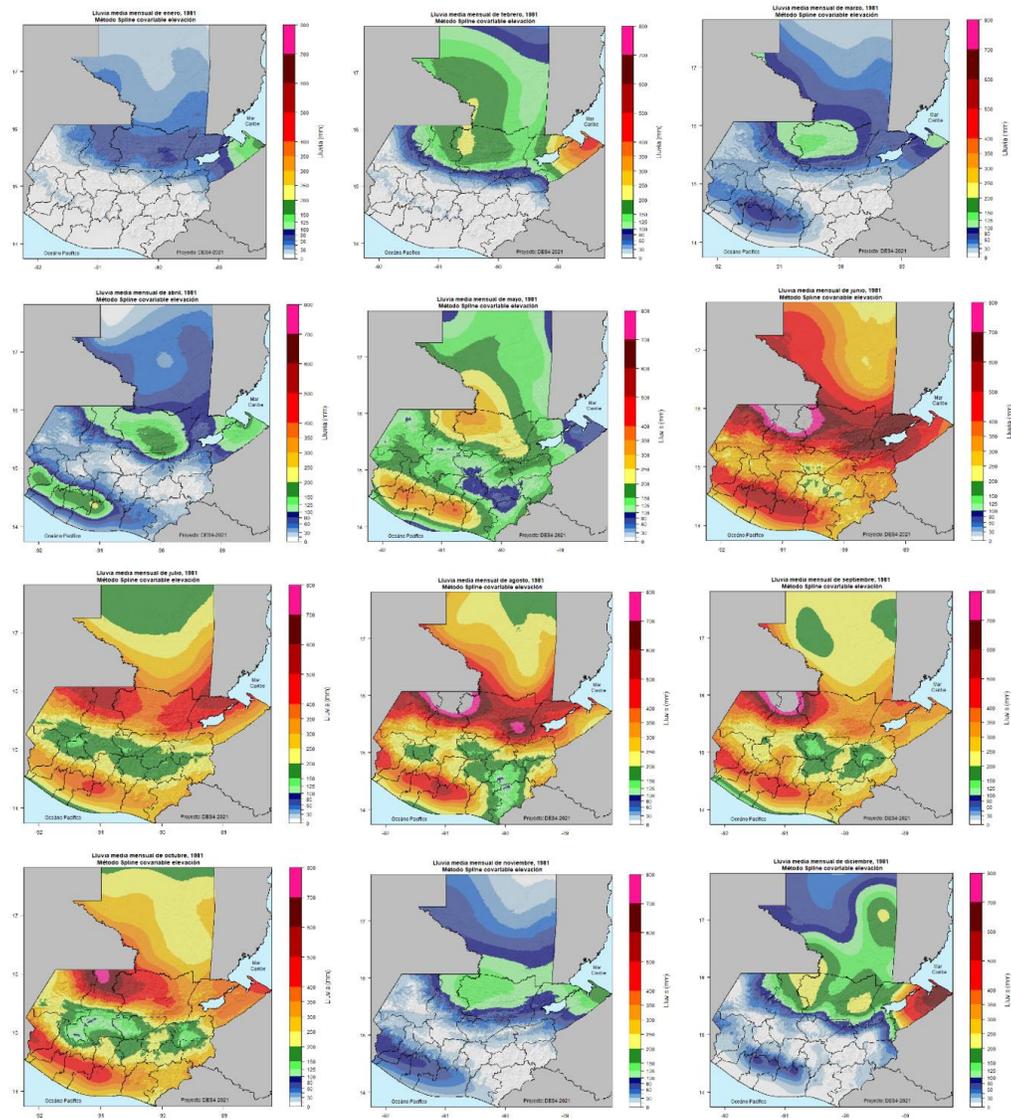


Figura 38. Interpolación del método SPLINE ELEVACIÓN para el año 1981. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO SPLINE ELEVACIÓN – 1986

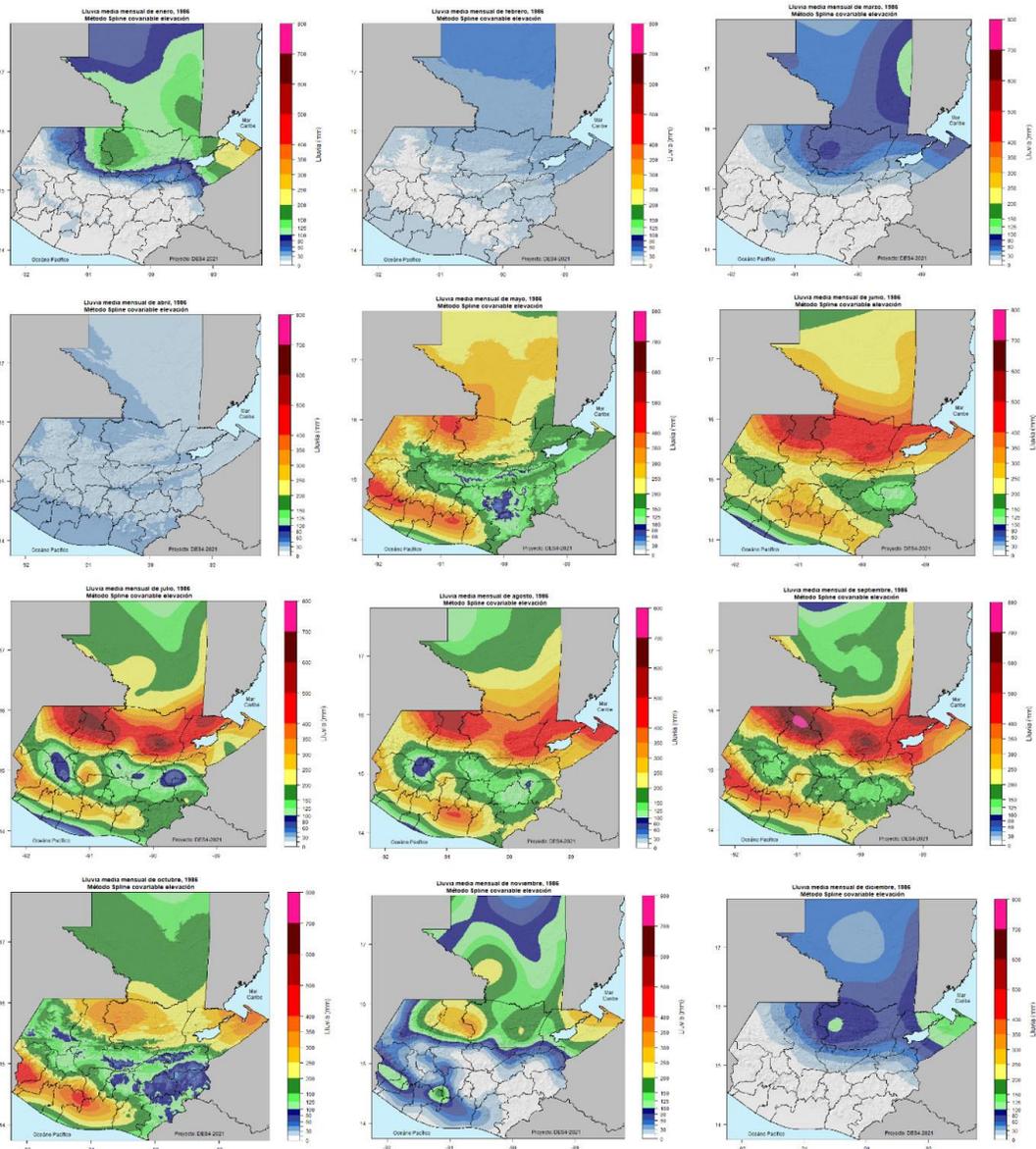


Figura 39. Interpolación del método SPLINE ELEVACIÓN para el año 1986. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO SPLINE MÉTODO SPLINE ELEVACIÓN – 1991

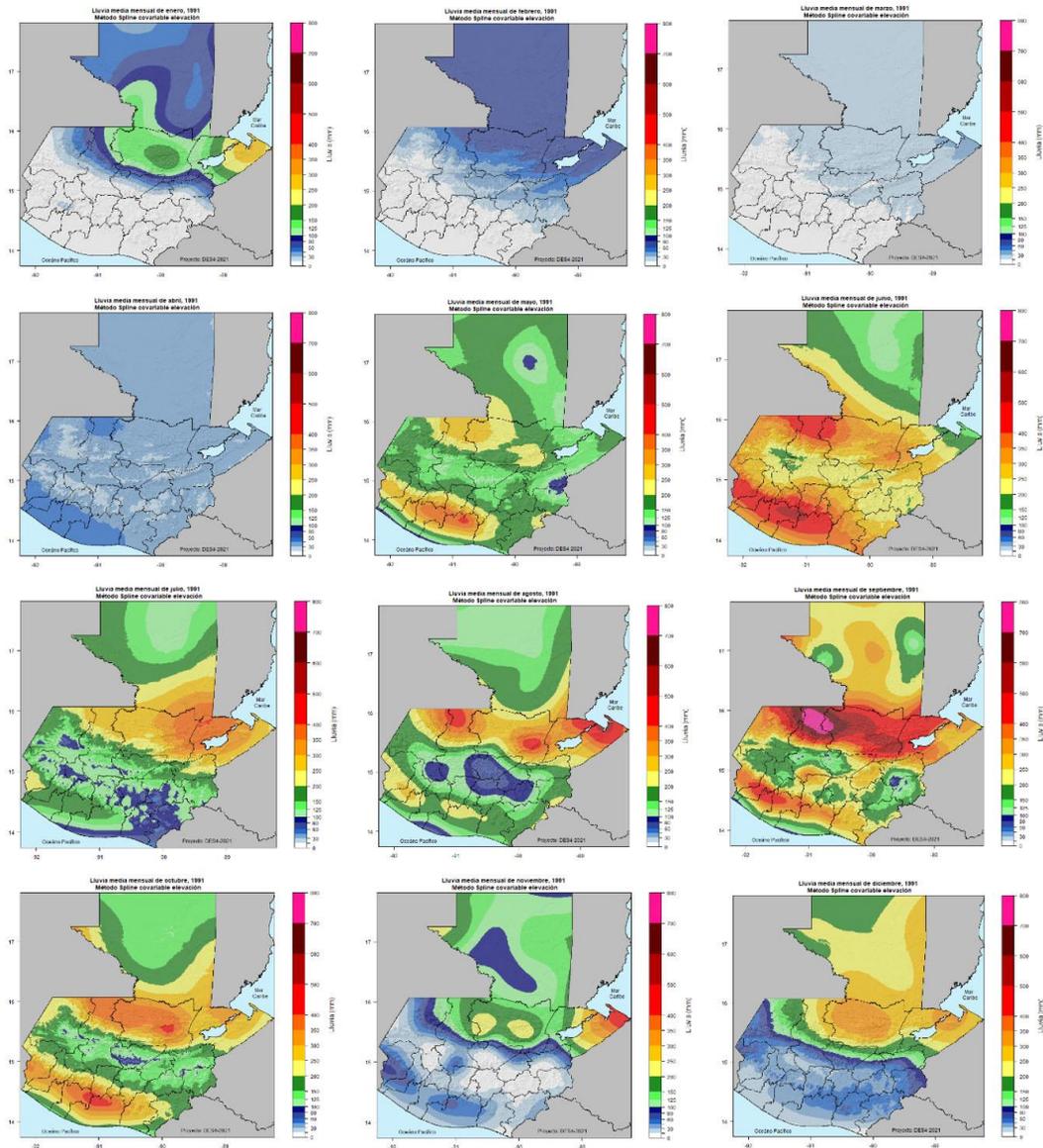


Figura 40. Interpolación del método SPLINE ELEVACIÓN para el año 1991. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO SPLINE ELEVACIÓN – 1996

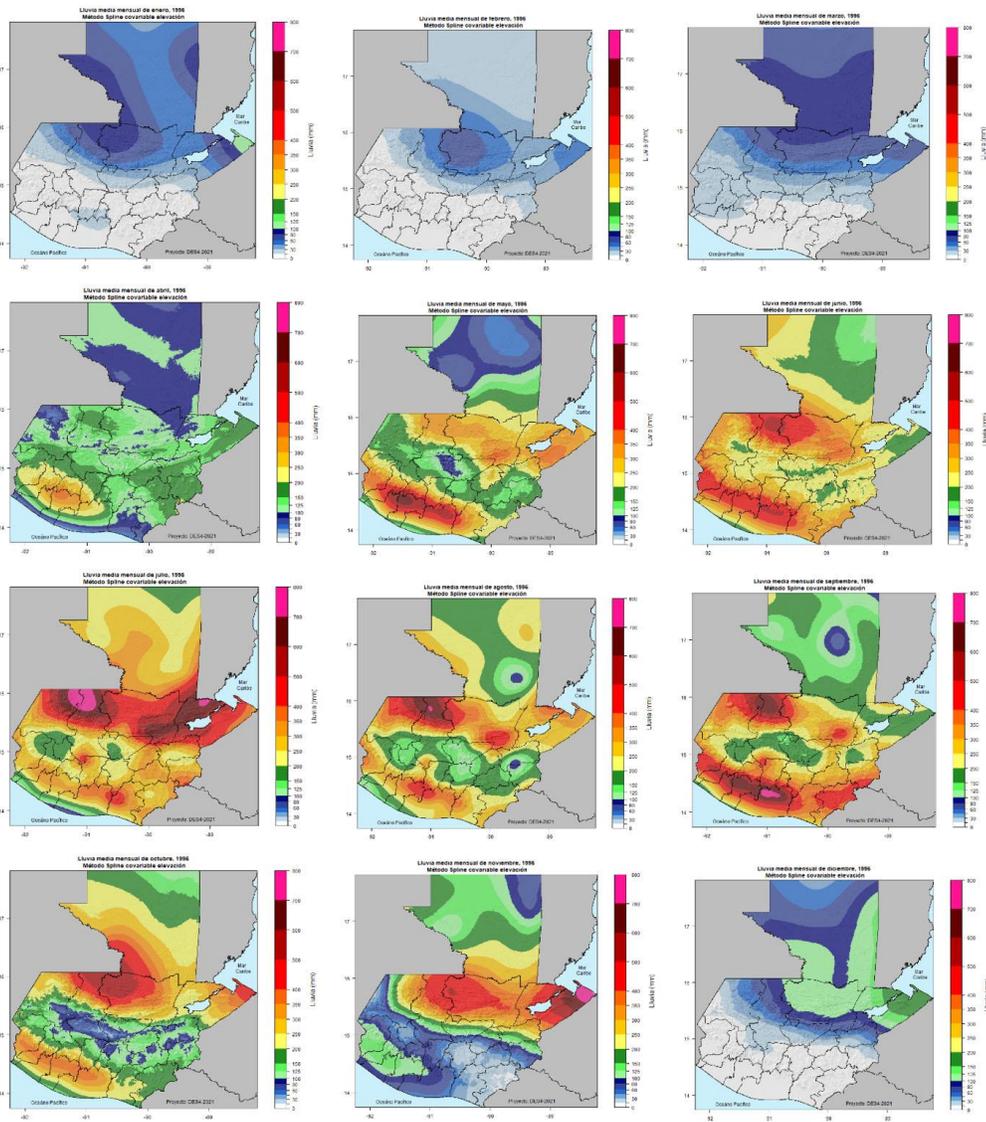


Figura 41. Interpolación del método SPLINE ELEVACIÓN para el año 1996. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO SPLINE ELEVACIÓN – 2001

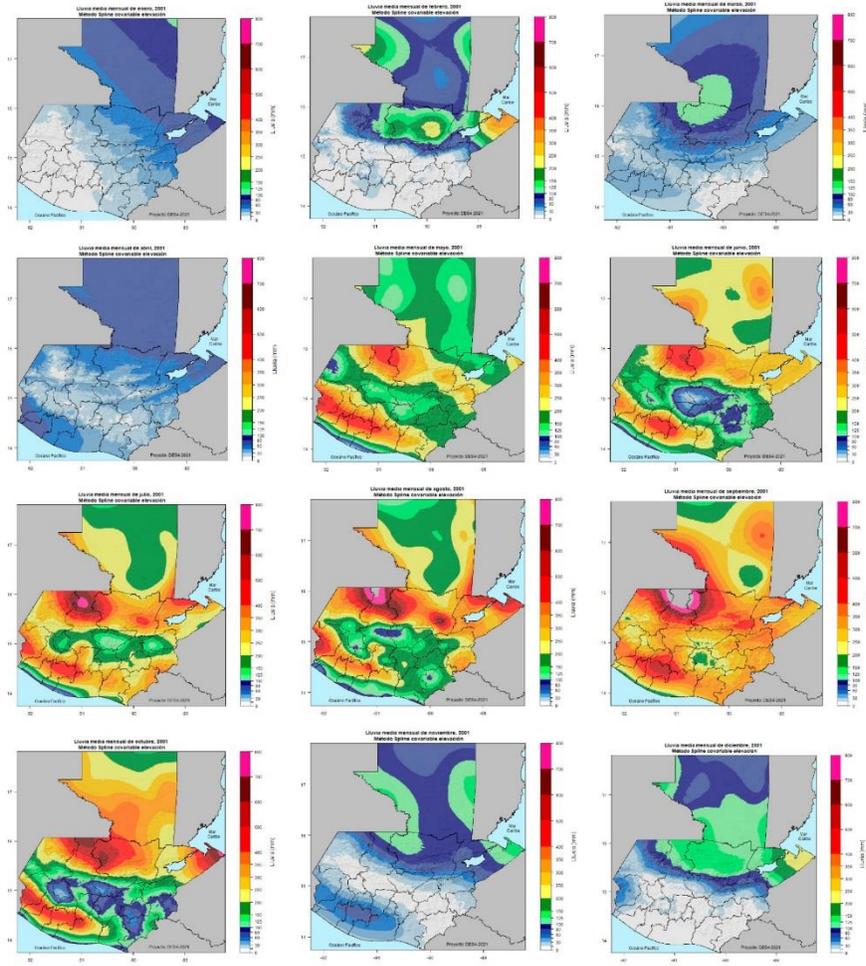


Figura 42. Interpolación del método SPLINE ELEVACIÓN para el año 2001. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO SPLINE ELEVACIÓN – 2006

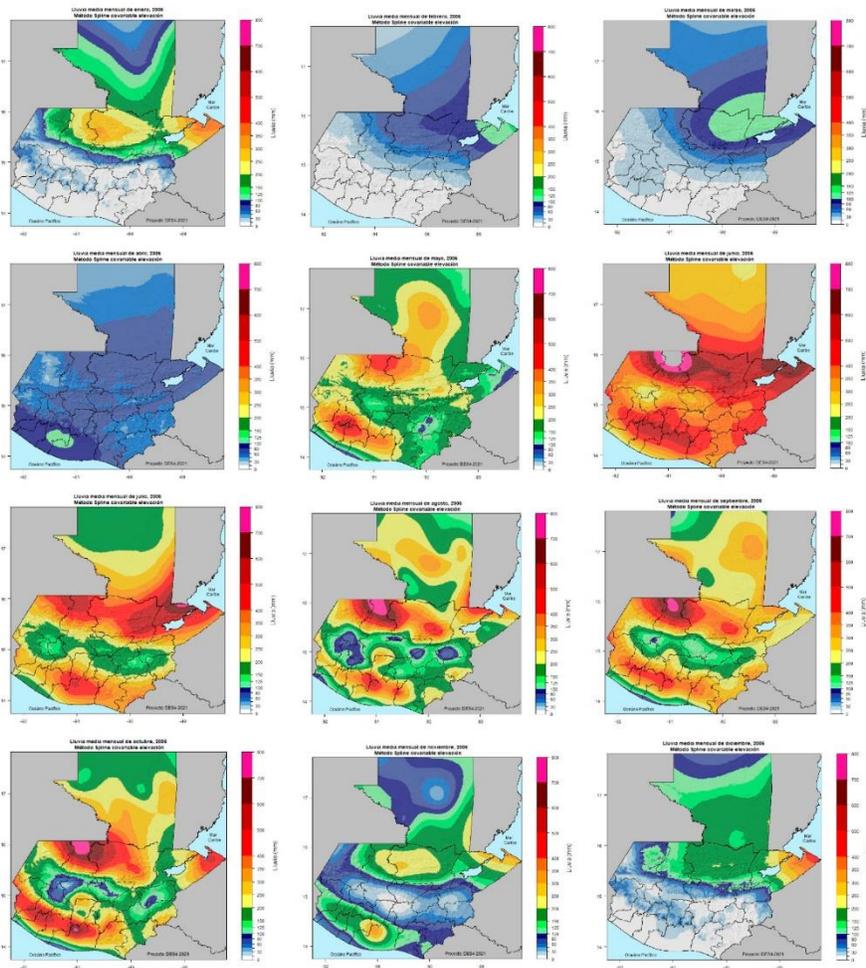


Figura 43. Interpolación del método SPLINE ELEVACIÓN para el año 2006. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO SPLINE ELEVACIÓN – 2011

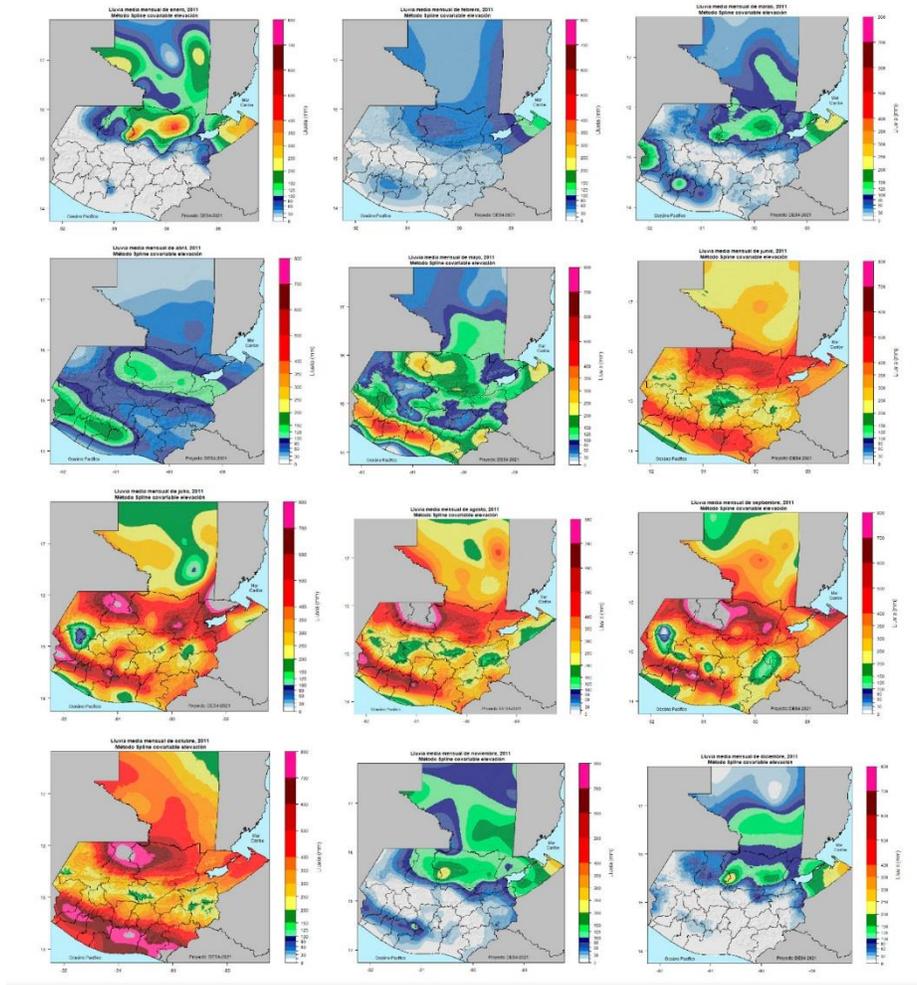


Figura 44. Interpolación del método SPLINE ELEVACIÓN para el año 2011. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO SPLINE ELEVACIÓN – 2016

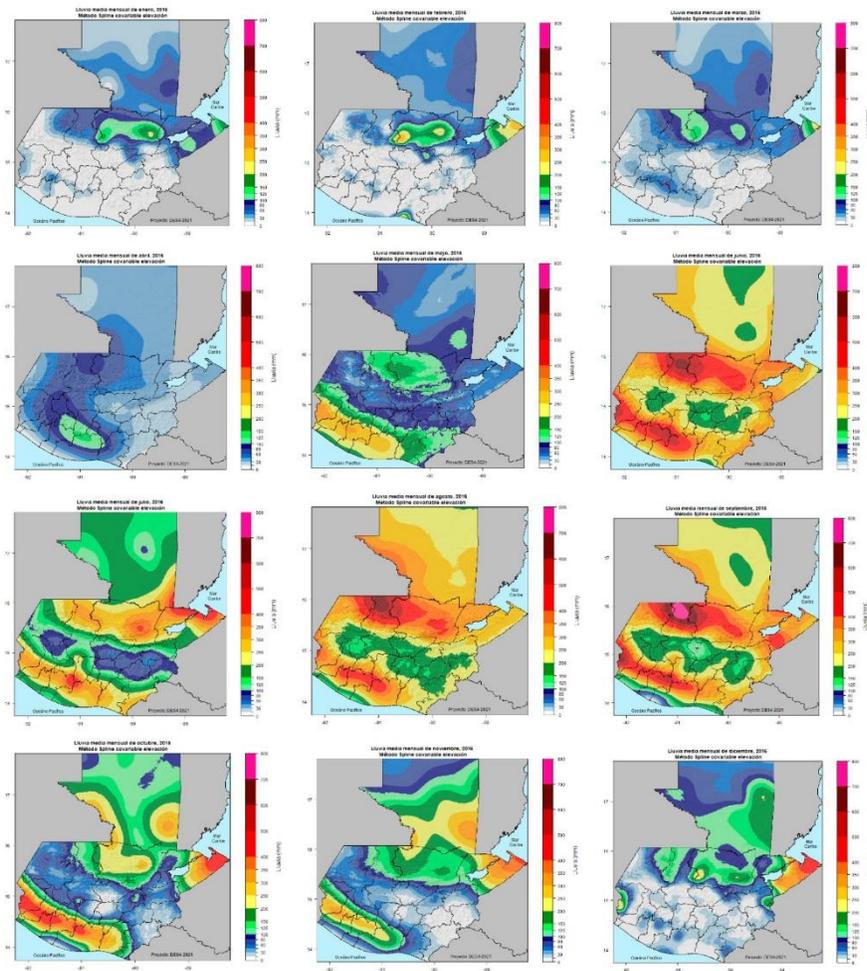


Figura 45. Interpolación del método SPLINE ELEVACIÓN para el año 2016. Fuente: Elaboración propia.

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI-

Tabla 12. Base de datos estaciones promedio de precipitación mensual de 1981-2020. Fuente: elaboración propia.

ID	Estación	Longitud	Latitud	ELEVACION (METROS)	DISTANCIA GOLFO DE MEXICO (KMS)	DISTANCIA PACIFICO (KMS)	DISTANCIA ATLANTICO (KMS)	PENDIENTE	ENERO (mm)	FEBRERO (mm)	MARZO (mm)	ABRIL (mm)	MAYO (mm)	JUNIO (mm)	JULIO (mm)	AGOSTO (mm)	SEPTIEMBRE (mm)	OCTUBRE (mm)	NOVEMBRE (mm)	NOVIEMBRE (mm)	DICIEMBRE (mm)	ANUAL (mm)
31	Chixoy_quiche	-90.6606	15.3561	670	399.21	162.98	198.44	17.50	45.14	33.73	41.46	62.94	126.96	264.15	187.23	200.20	252.88	181.80	92.98	49.05	127.82	
33	Agua_Caliente	90.50861111	14.28888889	700	517.34	46.68	249.56	62.69	2.34	4.45	12.89	45.62	167.89	321.11	252.09	282.87	329.02	217.21	46.88	8.00	139.72	
35	Los_Escavos	-90.2783	14.2528	739	527.94	47.00	236.24	82.73	4.44	6.58	11.92	48.23	229.12	327.16	234.66	284.00	353.28	243.98	48.64	9.06	149.17	
37	Pueblo_Viejo	90.49583333	15.27222222	816	412.96	154.65	185.14	77.46	10.46	8.81	15.17	41.46	107.26	198.73	143.95	153.63	188.72	102.93	49.51	15.01	85.51	
38	El_Cebollal	90.73055556	15.20833333	879	412.90	146.54	211.16	44.96	3.73	3.63	11.33	34.42	105.43	194.39	146.92	167.91	194.19	98.09	36.56	7.86	82.9	
43	Cubulco	-90.614167	15.108889	990	426.90	135.70	204.23	87.23	8.25	5.29	12.33	55.66	145.22	228.66	154.69	177.34	197.89	115.71	29.32	10.35	94.41	
44	San_Jeronimo	-90.25	15.0611	992	442.62	135.37	172.81	87.03	11.38	6.45	15.18	35.58	84.95	200.27	143.85	161.52	199.76	108.19	27.58	8.55	82.77	
45	La_Pastoria	90.43611111	14.27444444	998	521.01	46.26	245.43	78.00	2.65	7.83	20.16	67.28	231.01	317.06	235.97	255.16	319.44	232.99	49.26	14.02	145.12	
47	Jurun_Marinala	90.71277778	14.38833333	1017	500.75	55.81	257.83	80.88	4.40	15.72	49.21	104.72	327.51	480.07	277.88	335.70	458.59	310.38	67.74	16.11	203.01	
50	San_Pedro_ayampuc	-90.454722	14.776389	1194	466.99	100.91	209.06	48.72	3.61	3.56	14.28	41.31	124.38	244.06	152.12	176.08	235.51	130.22	30.13	8.28	96.32	
51	Amatitlán	90.61277778	14.48666667	1199	493.22	66.90	242.54	82.68	1.82	1.79	12.57	32.05	114.52	230.31	170.94	188.36	219.85	120.57	18.60	4.47	92.32	
52	Chuitinamit	-91.0922	15.2911	1207	393.70	145.27	244.81	13.79	1.31	3.08	11.99	34.17	82.12	191.78	116.08	129.88	187.07	91.39	24.74	5.84	72.67	
54	San_Andres_Sajcabaja	90.94222222	15.17472222	1296	410.27	142.07	233.70	70.36	1.90	3.19	9.00	51.83	116.94	234.22	164.46	166.91	205.88	105.23	25.35	8.57	90.34	
55	La_Pampa	90.44861111	14.41472222	1309	505.70	61.42	235.06	44.98	6.53	8.38	22.41	61.77	252.06	473.38	295.44	346.84	464.99	287.61	60.74	14.51	189.81	
58	Guate_sur	90.58555556	14.54444444	1378	487.86	73.52	236.15	71.07	3.15	4.19	12.92	29.20	121.71	237.48	172.99	198.95	237.12	128.28	18.58	3.70	96.65	
59	San_Cristobal	90.47583333	15.36527778	1390	403.63	165.13	179.37	87.42	49.18	37.74	45.19	72.36	140.24	286.64	252.93	252.26	292.56	182.86	107.79	58.29	146.84	
60	Los_Albores	-89.949167	15.0525	1391	453.25	142.32	147.48	18.32	24.11	22.00	27.31	42.92	157.35	332.94	243.42	277.76	350.16	231.12	96.33	41.39	152.33	
61	Matanzas	90.19138889	15.10305556	1473	439.90	140.93	164.99	58.25	39.20	30.12	33.97	45.33	113.49	190.89	147.53	152.47	193.74	132.97	60.34	43.45	97.94	
62	Chicaman	90.81527778	15.34583333	1477	395.78	161.67	214.60	36.33	25.71	19.68	31.53	46.76	106.94	232.31	155.74	178.56	218.18	131.78	70.55	33.80	103.31	
63	INSIVUMEH	-90.5328	14.5864	1500	484.94	78.86	228.81	74.01	2.57	5.58	12.79	27.76	130.88	254.48	187.59	192.46	244.06	129.60	33.43	5.86	101.63	
65	El_Capitán	-91.140556	14.693056	1556	457.14	84.83	275.88	0.00	1.31	6.71	18.19	34.20	151.02	257.25	143.54	153.88	241.15	146.01	34.29	5.80	98.77	
66	Santiago_Attilán	-91.231389	14.631667	1592	461.78	74.41	287.75	42.91	4.54	12.12	34.19	56.29	162.52	261.80	138.96	151.25	244.52	164.28	42.36	12.08	106.3	
73	Alameda_icta	-90.803333	14.633889	1759	471.95	82.89	248.68	79.50	2.38	3.17	12.87	25.75	131.43	226.55	156.51	142.93	206.54	130.21	23.97	8.58	88.61	
75	San_Martin_Jilotepeque	-90.7886	14.7786	1785	456.96	98.92	238.49	15.40	1.61	3.64	10.51	36.77	157.57	259.30	205.71	213.63	280.54	158.84	34.57	9.29	113.4	
77	Choaxan	90.98833333	15.01333333	1851	426.24	123.87	245.14	62.00	2.48	4.62	11.13	35.75	150.24	253.74	208.12	196.01	259.38	150.45	28.86	7.90	108.03	
80	Chinique	-91.024444	15.043889	1918	422.00	125.17	247.33	88.36	6.03	7.81	14.08	48.55	137.78	287.29	241.89	242.39	299.93	160.59	39.25	13.37	123.75	
81	La_Navidad	90.69027778	15.41166667	1926	392.43	169.10	199.63	67.46	219.28	167.11	162.73	141.03	190.78	368.54	370.49	332.97	391.92	357.39	302.87	221.64	267.4	
87	Santa_Cruz_Balanya	-90.9153	14.6867	2063	463.21	88.62	255.46	79.16	1.64	3.48	12.09	25.73	123.40	197.96	151.66	146.25	206.06	115.31	27.29	5.71	84.04	
88	Suíza_Contenta	-90.6611	14.6169	2086	477.93	81.16	237.45	81.05	2.14	5.36	8.35	21.47	128.17	243.61	191.56	192.08	225.22	105.41	29.56	4.22	85.85	
90	Chipaca	91.07805556	14.89722222	2199	436.46	108.07	259.35	84.53	16.85	15.48	25.82	43.81	199.02	397.41	382.18	367.12	456.26	278.17	102.46	40.16	191.88	
93	El_Tablon	-91.1819	14.7903	2337	445.72	92.50	274.66	72.42	2.22	2.84	20.15	39.72	169.10	291.81	167.81	196.22	297.29	162.26	34.87	10.03	115.91	
94	Palama	91.01388889	14.85944444	2367	442.10	107.39	255.08	45.69	12.24	13.84	20.67	49.71	209.65	349.99	307.68	310.51	389.56	225.86	65.29	28.99	163.9	
16	Retalhuleu	-91.6958	14.5219	208	455.95	38.23	337.47	87.96	11.54	12.96	34.39	146.06	406.26	465.18	376.22	402.25	524.50	438.86	129.82	34.45	247.61	
18	Catarina	-92.0772	14.8556	238	409.60	38.33	360.45	83.61	18.27	26.09	63.19	202.46	456.33	567.24	483.08	531.49	617.28	565.39	182.07	43.67	312.98	

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI-

21	Camantulul	-91.0508	14.325	284	498.98	48.46	290.45	87.78	19.57	34.73	59.84	198.24	436.68	559.65	492.18	564.63	624.34	579.43	182.54	39.62	314.31
22	El_Salto	-90.75	14.29861111	293	509.26	45.84	267.44	79.46	11.76	15.97	42.27	158.80	444.04	503.04	344.70	413.49	545.97	421.77	90.27	17.51	249.39
24	El_Asintal	-91.72444	14.588333	359	448.02	42.12	336.89	79.68	15.40	17.77	43.17	146.63	414.66	464.79	374.65	393.90	524.02	396.46	145.59	25.34	245.89
34	Sabana_Grande	-90.8292	14.3828	724	498.09	55.07	267.78	49.06	10.76	16.20	50.23	143.91	458.96	539.06	367.46	450.36	584.80	451.30	121.38	28.89	267.67
56	El_Mirador	-90.5375	14.21111111	1320	524.78	37.70	257.98	14.67	3.16	10.12	21.74	92.82	326.42	518.95	405.64	452.17	566.33	364.95	77.77	11.63	235.54
67	Santa_María_de_Jesus	-91.525	14.725	1602	440.49	67.26	310.97	48.58	23.81	33.70	97.79	154.88	372.23	552.20	342.09	364.35	570.10	367.44	138.43	43.13	253.75
1	Puerto_Barríos	-88.5917	15.7378	5	455.92	275.62	9.22	89.06	277.64	193.73	153.34	140.05	190.39	245.70	423.05	382.40	327.80	369.66	379.98	291.72	278.87
3	Las_Vegas	-88.9667	15.6	12	447.11	243.78	34.66	85.25	164.04	112.07	76.11	69.03	99.66	189.77	209.22	207.10	201.18	217.64	220.99	171.77	160.15
5	Mariscos	-89.07781	15.42866	14	456.42	221.42	56.88	73.91	154.07	105.37	78.33	83.33	157.83	313.94	325.44	296.13	326.69	298.75	233.99	202.41	212.51
48	Cuilco	-91.952778	15.406389	1128	354.30	90.90	331.85	86.50	1.64	3.74	8.44	19.60	93.25	188.59	131.64	163.58	200.49	92.41	22.72	6.61	76.94
68	El_Paradillo	-91.33166667	15.26305556	1667	391.33	126.89	270.37	40.13	1.44	6.57	20.58	55.82	102.96	208.47	111.36	132.54	184.41	79.69	27.86	10.32	77.92
69	San_Pedro_Nectá	-91.763333	15.495278	1673	351.70	112.22	310.17	17.75	11.59	10.45	16.86	38.30	163.13	259.14	223.93	262.94	286.58	174.28	57.95	22.92	125.93
70	Serchil	-91.4	15.23333333	1677	393.33	119.37	278.34	64.02	2.59	6.34	21.05	54.49	130.47	217.25	116.57	142.12	225.94	104.53	28.01	11.94	87.78
72	Comitancillo	-91.23888889	15.22555556	1753	397.29	129.83	262.00	59.21	2.22	4.35	14.33	50.19	96.22	194.68	104.78	131.43	175.90	82.94	22.89	5.95	73.26
78	Huehuetenango	-91.5031	15.3172	1873	380.57	118.07	286.65	87.99	5.16	6.56	21.08	55.43	123.89	210.89	100.34	130.16	230.56	117.55	27.35	10.92	85.97
82	San_Antonio_Ilotenango	-91.22722222	15.05472222	1942	416.07	115.74	267.06	86.13	5.08	6.23	15.05	40.96	135.88	222.93	123.46	130.70	190.10	99.16	28.48	9.72	83.45
83	Xequemeya	-91.3525	15.09638889	1943	409.11	111.05	278.09	14.56	3.97	4.03	21.86	68.32	168.51	235.62	138.49	160.45	220.42	110.03	30.15	14.36	97.54
86	El_Quiché	-91.14388889	15.02805556	2021	420.78	117.90	259.85	87.01	3.41	4.37	11.31	36.66	122.13	207.37	156.88	159.90	232.57	106.28	23.91	12.15	88.96
89	Zunil	-91.49444444	14.76944444	2110	437.03	73.16	305.90	60.19	3.29	11.30	27.45	42.02	134.35	220.21	124.99	129.53	222.37	133.12	34.13	8.97	90.55
92	Tierra_Blanca	-91.49583333	15.11055556	2326	401.90	102.48	292.18	79.92	9.17	11.45	25.31	76.10	203.21	287.66	164.25	200.55	303.49	152.24	40.59	23.89	124.13
95	Labor_ovalle	-91.5139	14.87	2385	425.89	80.63	303.32	88.80	1.59	5.32	14.76	36.56	133.38	165.30	103.37	117.43	159.63	104.01	18.75	7.71	71.93
96	Tonicapán	-91.37222222	14.90555556	2409	427.96	93.13	287.75	86.55	1.70	4.72	14.24	47.96	143.64	175.14	104.91	124.50	177.59	100.32	22.46	5.01	76.47
97	San_Marcos	-91.809444	14.954167	2415	406.65	66.40	329.67	78.48	3.18	8.29	28.93	58.16	187.07	294.62	154.89	184.91	270.77	151.09	33.83	7.81	114.64
98	Cuatro_Caminos	-91.44722222	14.92777778	2511	422.58	90.08	294.24	26.87	0.64	3.67	14.32	47.36	153.34	187.25	116.94	124.34	199.41	108.74	22.69	6.76	81.7
100	Pachute	-91.583056	14.980556	2702	411.81	85.66	305.76	71.53	2.12	5.00	13.52	53.43	160.97	203.91	116.10	134.22	199.87	106.58	28.99	9.02	85.82
2	Puerto_San_José	-90.8344	13.9361	7	546.00	5.63	302.12	88.96	1.81	5.81	8.80	39.64	176.72	289.06	237.45	275.77	292.94	232.96	76.78	6.33	135.89
4	Montufar	-90.155	13.8089	12	578.86	8.69	269.53	87.73	0.73	1.43	7.34	40.81	180.43	272.59	218.79	233.37	285.95	222.92	53.91	4.70	126.5
7	Tecun_Uman	-92.139444	14.673611	29	427.83	19.34	373.85	88.38	3.52	0.67	6.87	53.02	181.92	274.88	217.12	209.00	316.94	245.88	46.05	4.37	129.02
8	San_Pedro_Mactún	-90.948611	17.259722	44	188.07	311.83	260.52	84.13	87.78	53.21	36.54	47.88	128.66	269.20	188.83	209.91	259.57	227.29	123.74	85.44	142.08
9	Bethel	-90.80444444	16.80111111	110	241.10	286.84	223.55	87.43	99.78	51.43	53.59	54.84	145.04	301.73	221.13	256.01	299.23	234.65	142.29	85.78	161.07
10	El_Porvenir	-90.48333333	16.51666667	119	281.30	289.10	180.47	81.41	84.93	59.95	37.39	62.12	151.34	283.11	230.47	241.69	294.09	254.91	142.77	101.92	160.64
11	Flores	-89.8664	16.9147	124	272.53	344.57	145.25	86.66	82.09	49.03	47.10	59.81	143.43	246.80	202.41	227.65	276.50	241.18	149.00	99.45	150.56
13	Chachaclun	-89.80111	17.01443889	133	267.84	356.69	148.14	60.75	62.26	42.21	41.10	47.01	101.77	191.19	124.30	165.50	200.31	187.65	107.94	66.75	110.77
15	tikal	-89.3711	17.13	196	280.91	380.24	120.05	87.49	106.24	53.24	58.62	62.23	143.94	276.10	212.19	240.32	294.75	239.43	150.02	113.78	161.54
29	Poptun	-89.41043	16.32566	521	353.95	294.73	66.55	87.02	113.26	61.68	79.46	74.29	130.18	195.89	196.51	200.56	231.63	230.53	167.87	105.97	148.12
6	Panzos	-89.6439	15.3972	26	430.31	190.39	98.02	73.69	73.90	59.18	57.14	70.51	198.48	364.78	499.31	434.70	424.76	243.10	127.40	83.93	217.47
12	San_Agustín_Chixoy	-90.438889	16.066667	124	330.09	242.77	165.29	90.00	125.88	73.11	67.84	65.88	190.39	357.36	277.81	289.34	410.24	337.63	216.61	142.34	211.14
14	Papalha	-89.936944	15.305555	142	427.38	169.25	129.87	71.39	43.72	33.53	39.73	68.27	192.59	336.76	448.95	381.12	370.52	215.09	91.06	53.19	187.49
19	Cahabón	-89.8106	15.6083	242	401.58	205.33	103.04	78.22	117.78	92.77	93.86	78.37	142.80	317.38	372.39	306.16	304.95	276.40	200.95	135.63	202
23	Quixal	-90.61111111	15.49583333	314	385.77	178.53	188.95	59.32	286.16	211.97	221.67	204.25	316.73	513.18	508.24	494.87	549.56	572.60	434.53	296.13	381.95
30	Sepamac	-89.69305556	15.50444444	652	417.31	199.03	96.15	34.20	180.63	111.12	108.47	105.12	216.83	412.77	470.27	392.85	387.96	290.85	230.87	180.21	255.56
36	El_volcan	-89.87444444	15.4825	793	411.65	189.96	114.66	19.38	208.24	133.22	130.62	129.47	259.99	538.25	657.00	533.56	532.86	390.85	303.84	257.20	337.16

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI-

39	Seamay	-	15.40833333	915	422.21	184.75	111.64	73.76	113.14	100.27	103.74	140.03	375.06	696.11	691.08	671.88	600.18	349.56	190.66	119.48	343.36
		89.80277778																			
57	Cobán	-90.4075	15.4667	1337	394.81	177.24	168.81	85.94	107.27	90.71	107.73	113.80	173.48	269.84	228.08	251.26	280.19	273.69	192.47	121.20	183.19
64	Purulha	-	15.23388889	1554	424.71	154.54	161.53	83.55	64.06	49.93	55.01	80.08	197.63	375.64	409.77	376.38	353.18	222.72	115.61	75.14	196.48
		90.23388889																			
76	Salto_chilasco	-	15.12222222	1842	440.26	144.61	157.00	74.22	118.89	87.43	81.31	82.04	145.15	213.52	184.98	178.24	209.92	171.78	124.79	113.35	142.07
		90.11527778																			
79	Nebaj	-91.1422	15.3981	1916	380.92	151.26	246.88	79.85	33.57	27.21	38.28	69.79	147.51	344.89	307.65	331.26	357.93	213.17	100.34	54.97	167.02
84	Chajul	-	15.48333333	1974	374.67	165.73	233.64	33.94	74.88	51.90	67.17	74.25	143.10	288.08	289.57	285.55	325.68	257.66	153.56	91.57	173.66
		91.03583333																			
85	Cerro_La_Laguna	-	15.39138889	2014	399.32	167.45	183.70	43.40	119.28	94.50	110.08	114.47	191.35	300.49	260.84	253.21	329.83	287.88	219.99	129.96	199.67
		90.52805556																			
91	San_Pedro_solomá	-91.427222	15.663889	2258	345.86	150.92	271.95	68.07	74.87	51.39	43.67	54.97	124.56	300.57	339.89	355.74	336.79	212.05	143.27	94.54	175.52
99	Todos_Santos	-91.6036	15.5047	2552	357.24	125.09	293.08	22.27	15.20	15.15	25.18	65.99	186.95	231.78	136.76	157.47	226.84	135.96	53.13	25.08	106.33
101	Capellania	-	15.41055556	3144	373.40	130.67	277.05	80.14	3.83	6.62	17.16	56.84	125.57	257.14	149.62	198.75	255.08	129.88	29.00	12.71	102.51
		91.43333333																			
17	La_Fragua	-89.5844	14.9642	222	476.69	150.65	128.31	88.26	1.67	1.63	4.63	21.84	87.67	183.52	111.94	119.27	165.62	78.75	15.95	2.82	65.67
20	Pasabien	-89.68	15.03	262	465.96	152.40	128.77	60.90	1.61	1.91	5.95	23.48	92.07	203.12	99.57	130.46	170.45	94.43	19.69	4.84	69.97
25	Morazan	-90.141944	14.930278	369	459.75	123.26	172.08	83.94	4.55	4.70	10.64	29.30	102.06	153.05	94.62	134.11	198.76	115.10	32.74	9.79	73.56
26	La_Union	-	14.19722222	435	524.91	35.45	262.48	25.52	1.67	5.28	14.12	79.03	278.86	467.80	390.00	428.98	541.99	358.02	60.75	9.79	217.83
		90.58333333																			
27	Camotán	-89.3728	14.8206	453	500.54	146.97	131.37	60.54	3.66	4.35	8.27	34.36	110.89	254.84	156.36	185.40	237.60	110.87	24.36	7.91	94.06
28	Asunción_Mita	-89.7058	14.3344	469	536.99	82.63	195.32	87.94	1.22	3.93	6.49	32.01	169.94	282.44	204.38	217.04	283.40	150.39	25.98	4.42	115.06
32	Sacpulub	-	14.87722222	697	468.22	120.34	168.62	35.48	3.36	5.83	15.09	39.12	168.38	273.28	228.48	218.68	302.73	164.65	38.13	14.45	127.79
		90.05111111																			
40	Esquipulas	-89.5086	14.5589	932	521.25	114.49	163.82	40.05	8.88	6.81	14.09	49.96	161.46	311.29	261.26	284.20	342.57	185.66	37.53	16.83	138.97
41	La_Ceibita	-89.8756	14.4928	960	514.52	89.85	189.16	89.25	0.41	1.47	4.75	17.89	107.25	207.89	150.67	165.49	185.07	110.03	22.91	3.53	80.85
42	Quezada	-90.0378	14.2661	984	533.56	59.52	219.76	81.90	12.69	2.76	6.87	29.82	116.05	232.80	167.59	195.15	223.09	134.70	23.45	5.14	95.56
46	La_Unión	-89.2911	14.9633	1004	490.14	165.06	113.34	35.40	55.61	40.25	31.27	46.99	145.28	303.59	237.51	258.04	293.75	165.88	91.31	75.49	144.28
49	La_Providencia	-	14.22416667	1178	532.25	45.69	235.91	86.19	5.40	11.43	16.04	60.91	209.81	302.19	232.49	261.06	344.18	248.42	41.19	7.06	143.75
		90.23555556																			
53	Media_legua	-	14.19111111	1255	535.18	41.47	240.14	80.92	3.56	7.41	13.40	54.63	214.34	316.49	233.28	265.12	323.84	228.47	40.78	10.88	141.44
		90.25555556																			
71	San_lorenzo	-	15.08555556	1747	460.99	158.71	122.92	50.25	6.77	6.89	13.78	38.24	159.02	298.65	158.39	207.55	297.08	160.93	49.84	13.98	116.63
		89.66305556																			
74	Potrero_Carrillo	-89.9322	14.7606	1767	484.44	113.43	169.11	83.79	10.99	10.12	18.34	40.00	122.91	249.61	170.06	188.49	244.50	127.17	36.53	13.71	102.15

ELEVACIÓN – PRECIPITACIÓN

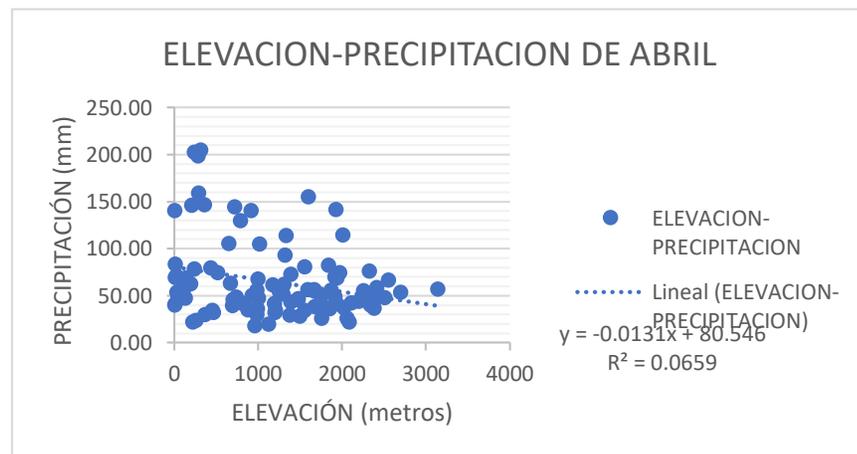
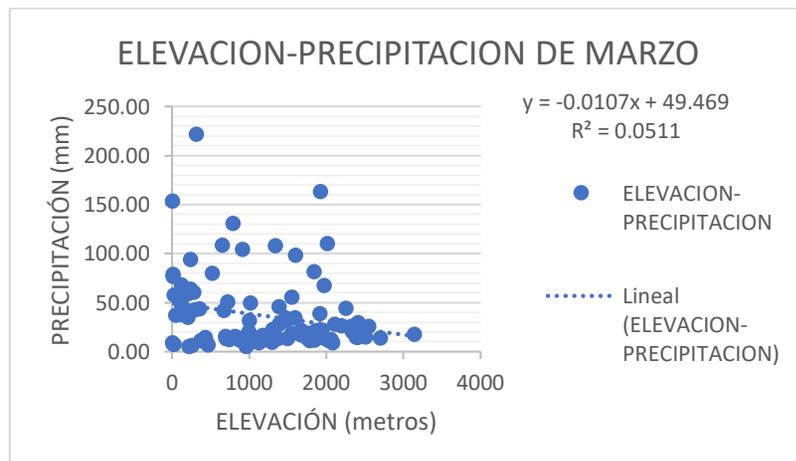
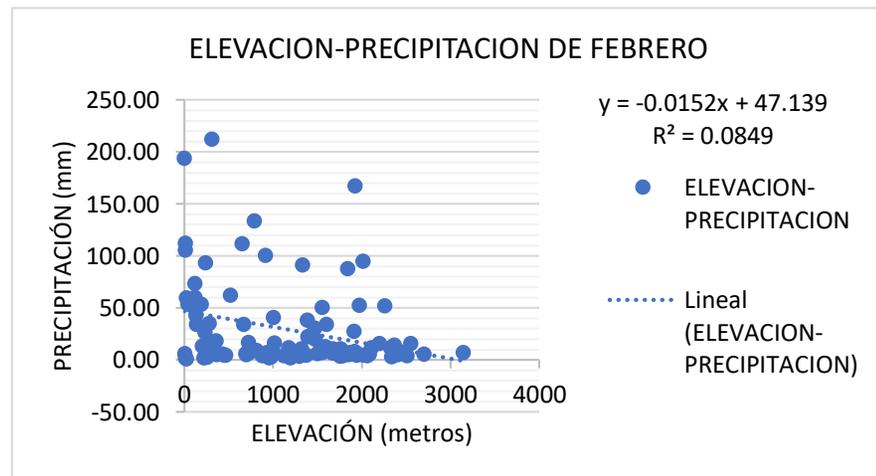
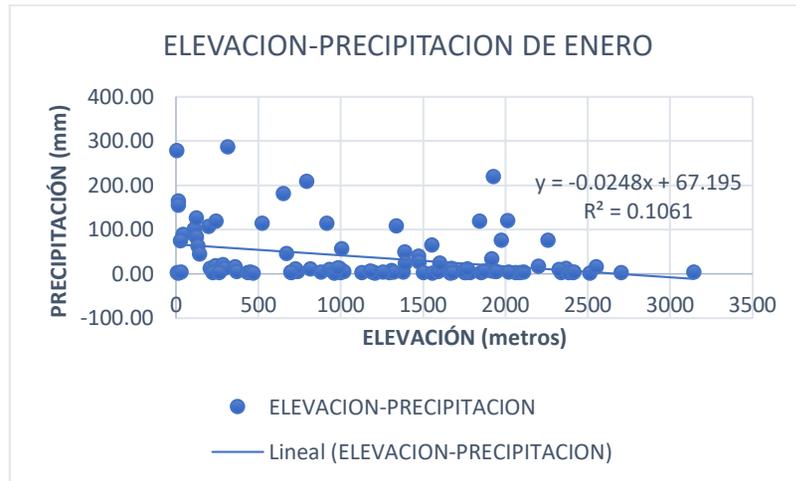


Figura 46. Gráficos de correlación entre elevación y la precipitación de enero a abril. Fuente: Elaboración propia.

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI–

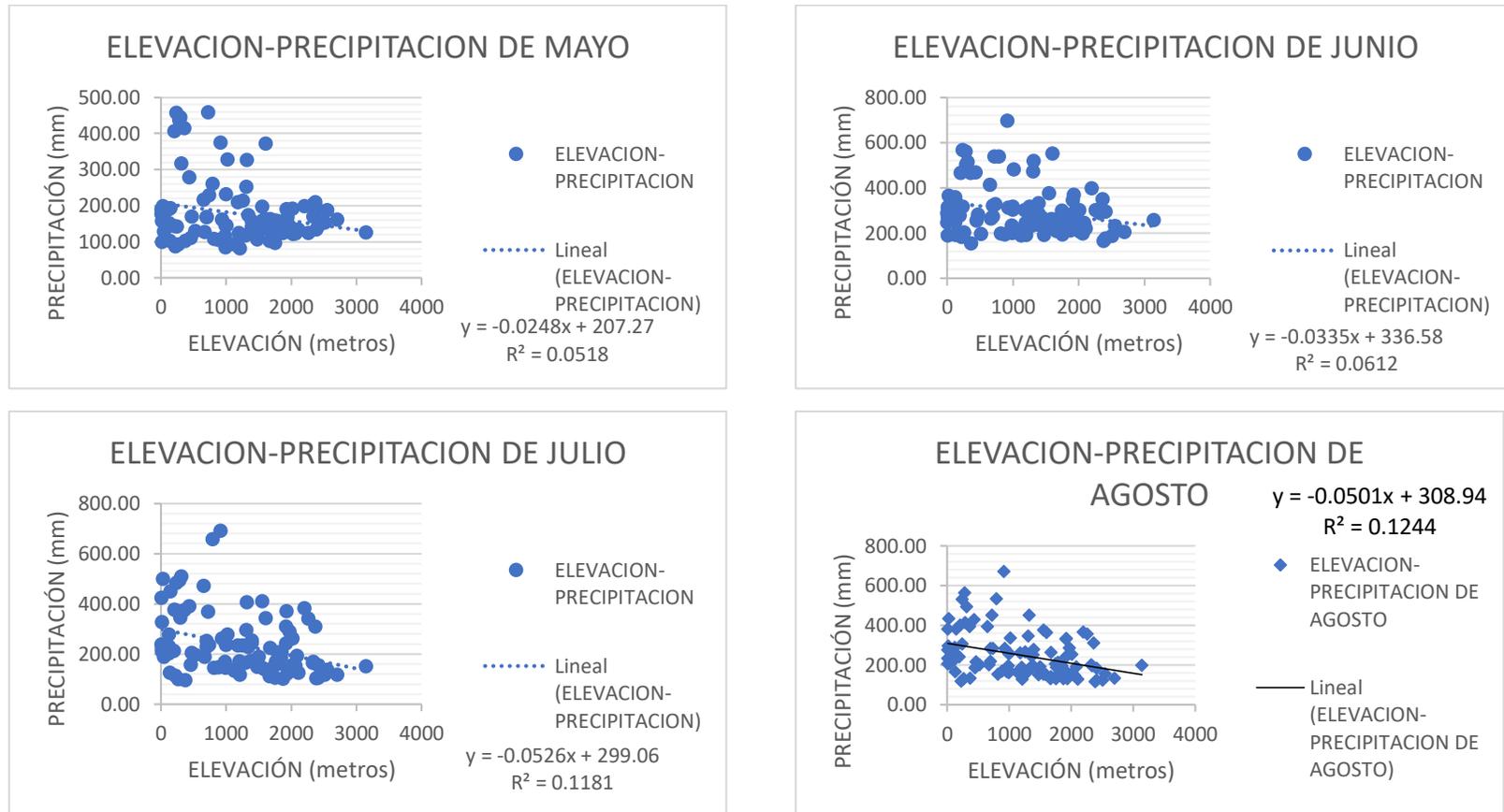


Figura 47. Gráficos de correlación entre elevación y la precipitación de mayo a agosto. Fuente: Elaboración propia.

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI–

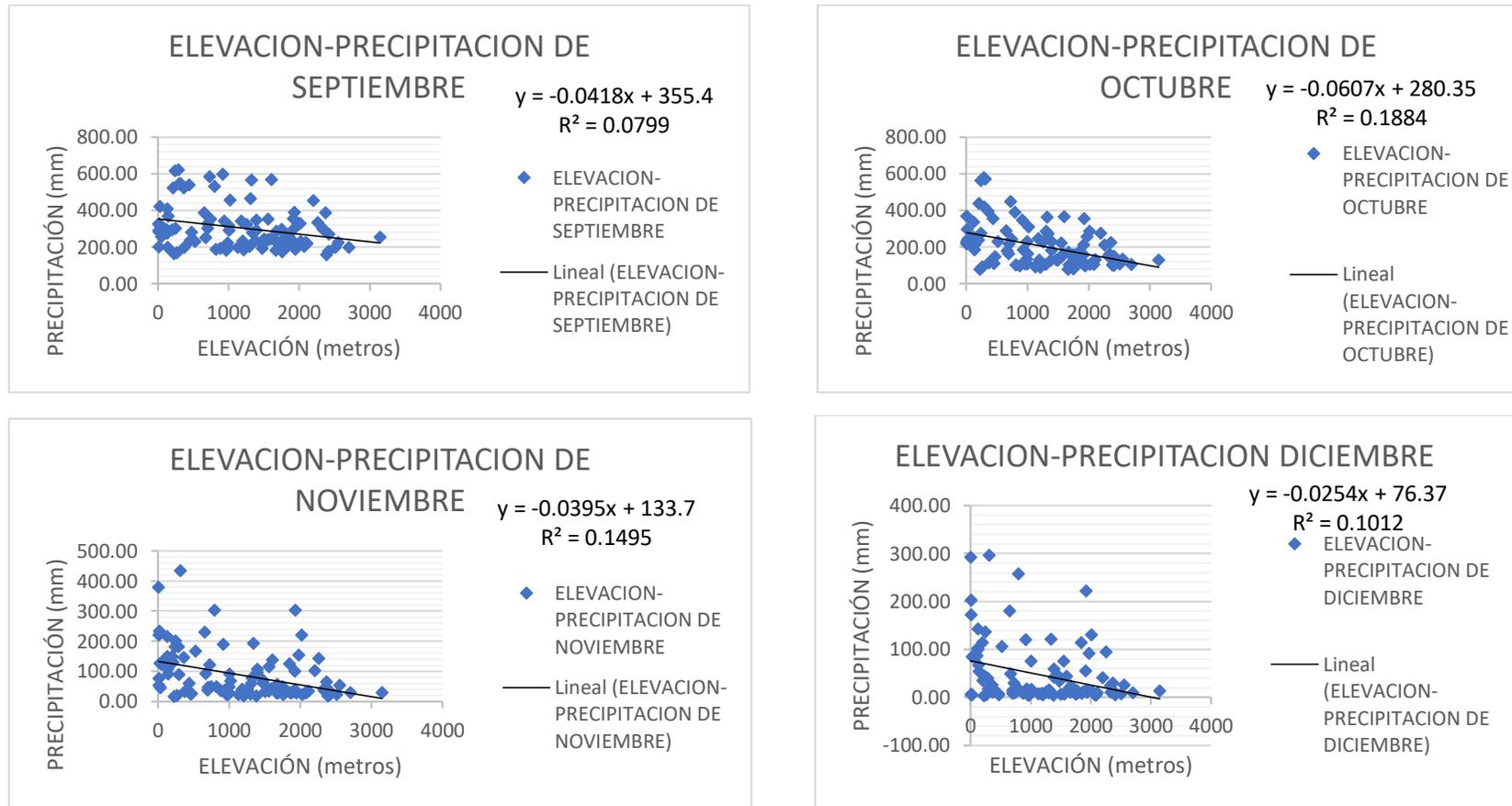


Figura 48. Gráficos de correlación entre elevación y la precipitación de septiembre a diciembre. Fuente: Elaboración propia.

DISTANCIA GOLFO DE MÉXICO – PRECIPITACIÓN

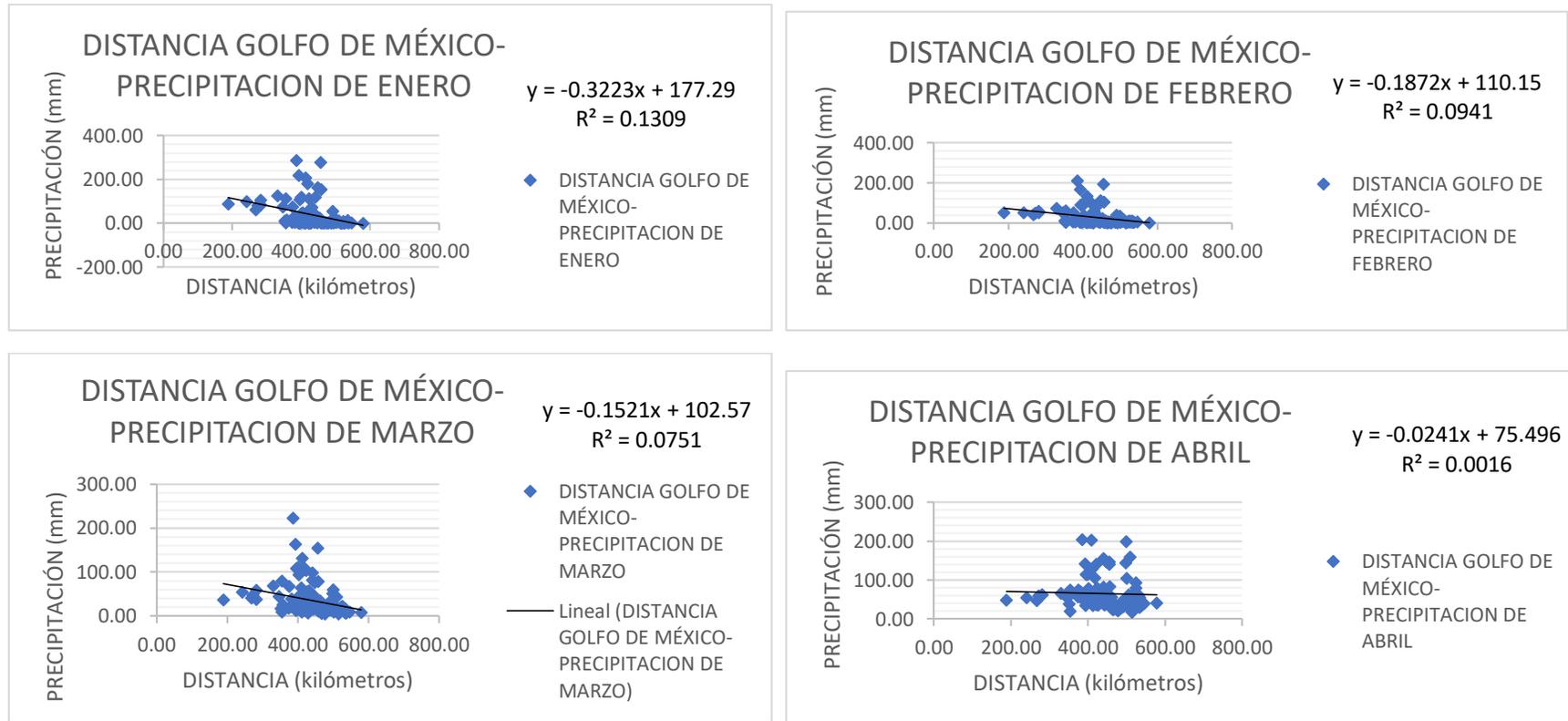


Figura 49. Gráficos de correlación entre golfo de México y la precipitación de enero a abril. Fuente: Elaboración propia.

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI–

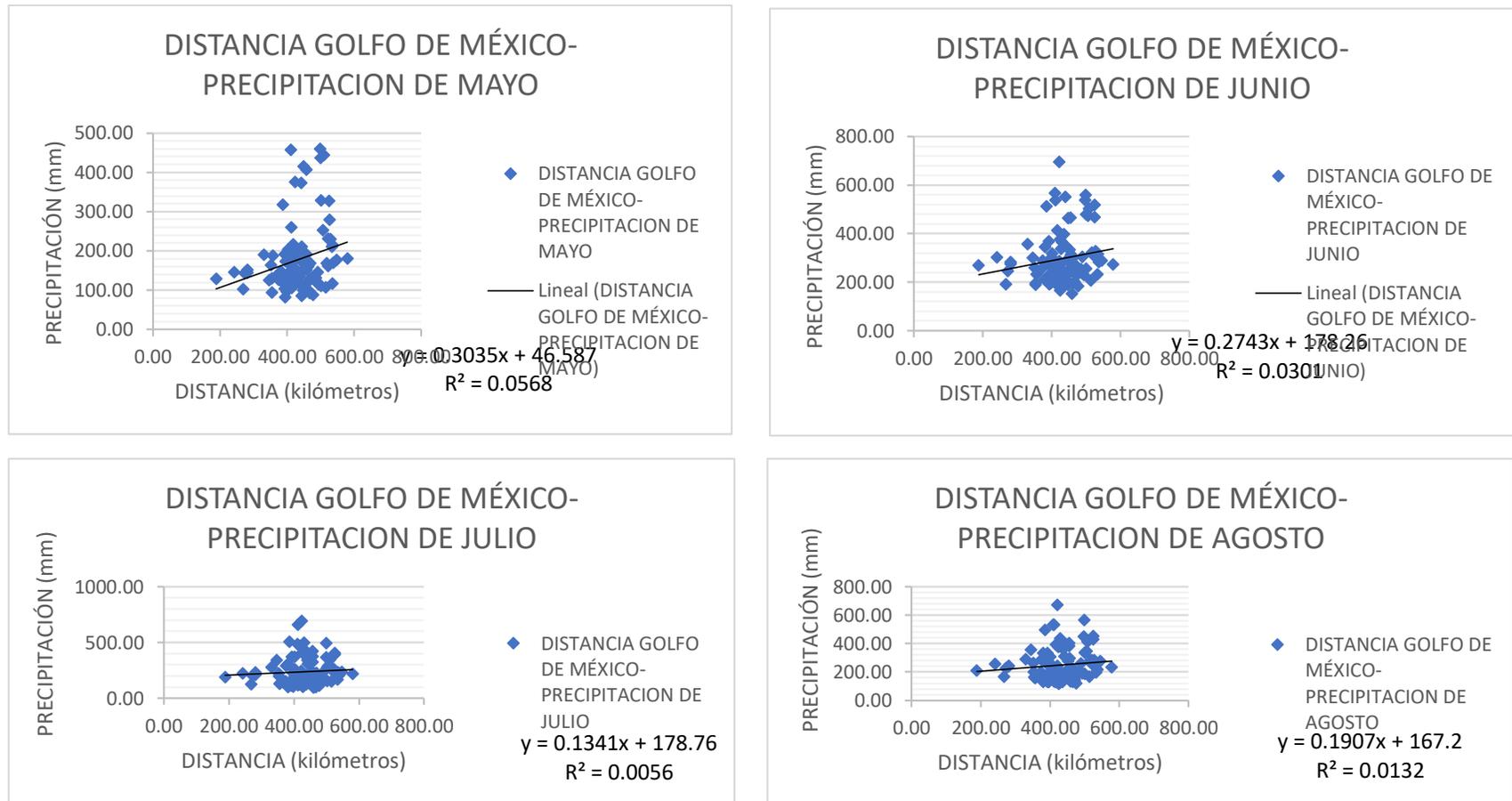


Figura 50. Gráficos de correlación entre golfo de México y la precipitación de mayo a agosto. Fuente: Elaboración propia.

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI–

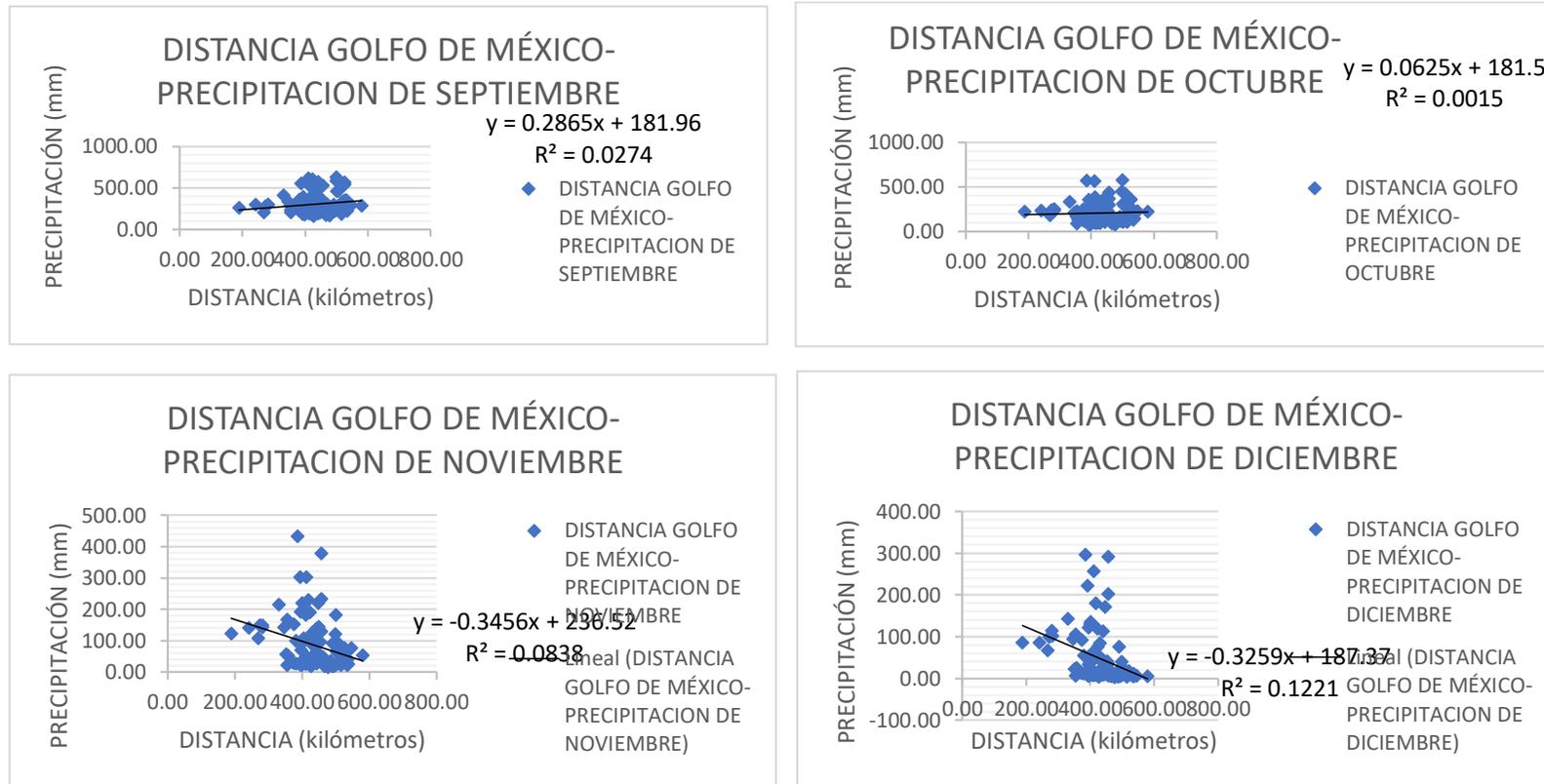


Figura 51. Gráficos de correlación entre golfo de México y la precipitación de septiembre a diciembre. Fuente: Elaboración propia.

DISTANCIA OCEÁNO PACÍFICO – PRECIPITACIÓN

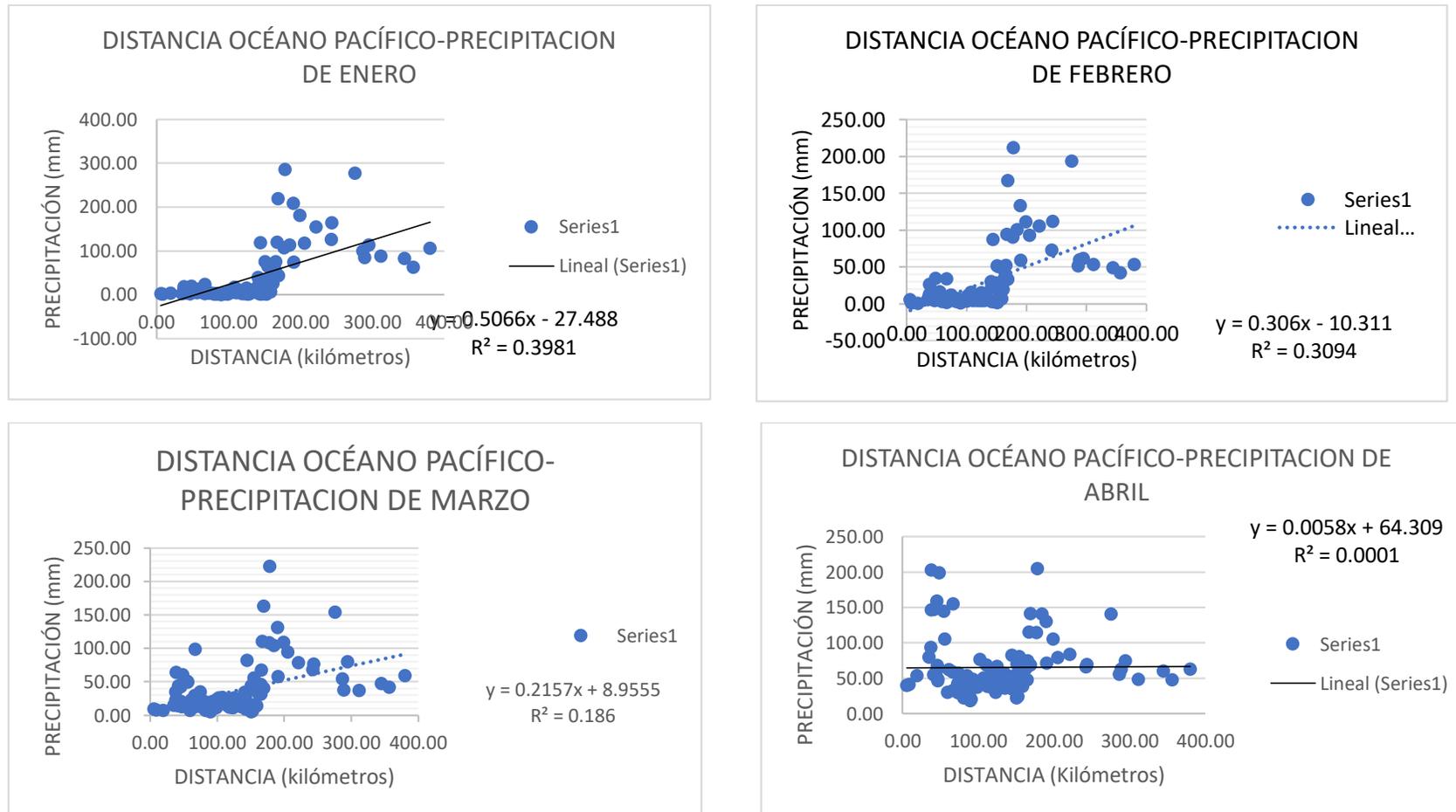


Figura 52. Gráficos de correlación entre el océano pacífico y la precipitación de enero a abril. Fuente: Elaboración propia.

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI–

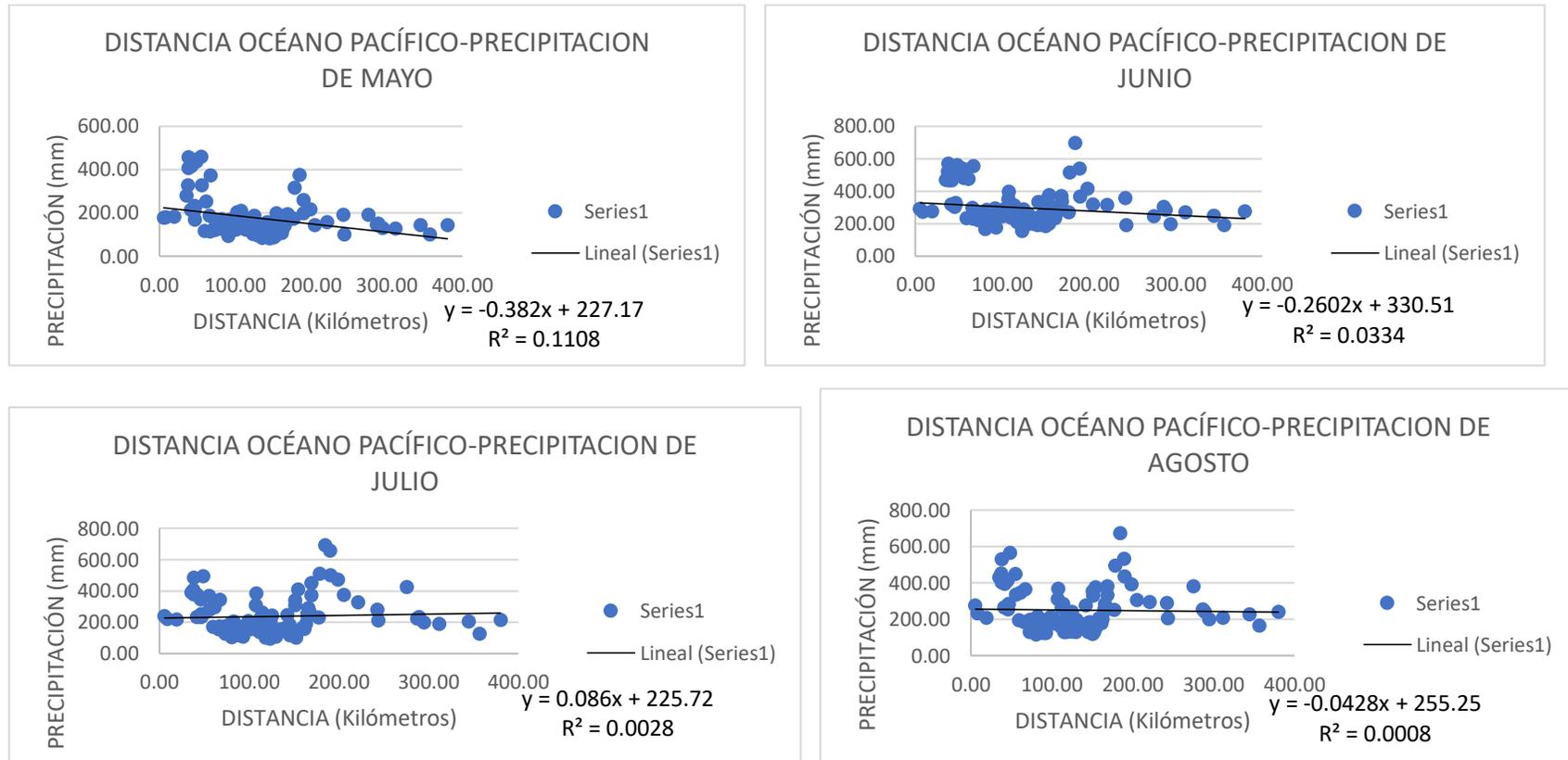


Figura 53. Gráficos de correlación entre el océano pacífico y la precipitación de mayo a agosto. Fuente: Elaboración propia.

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI–

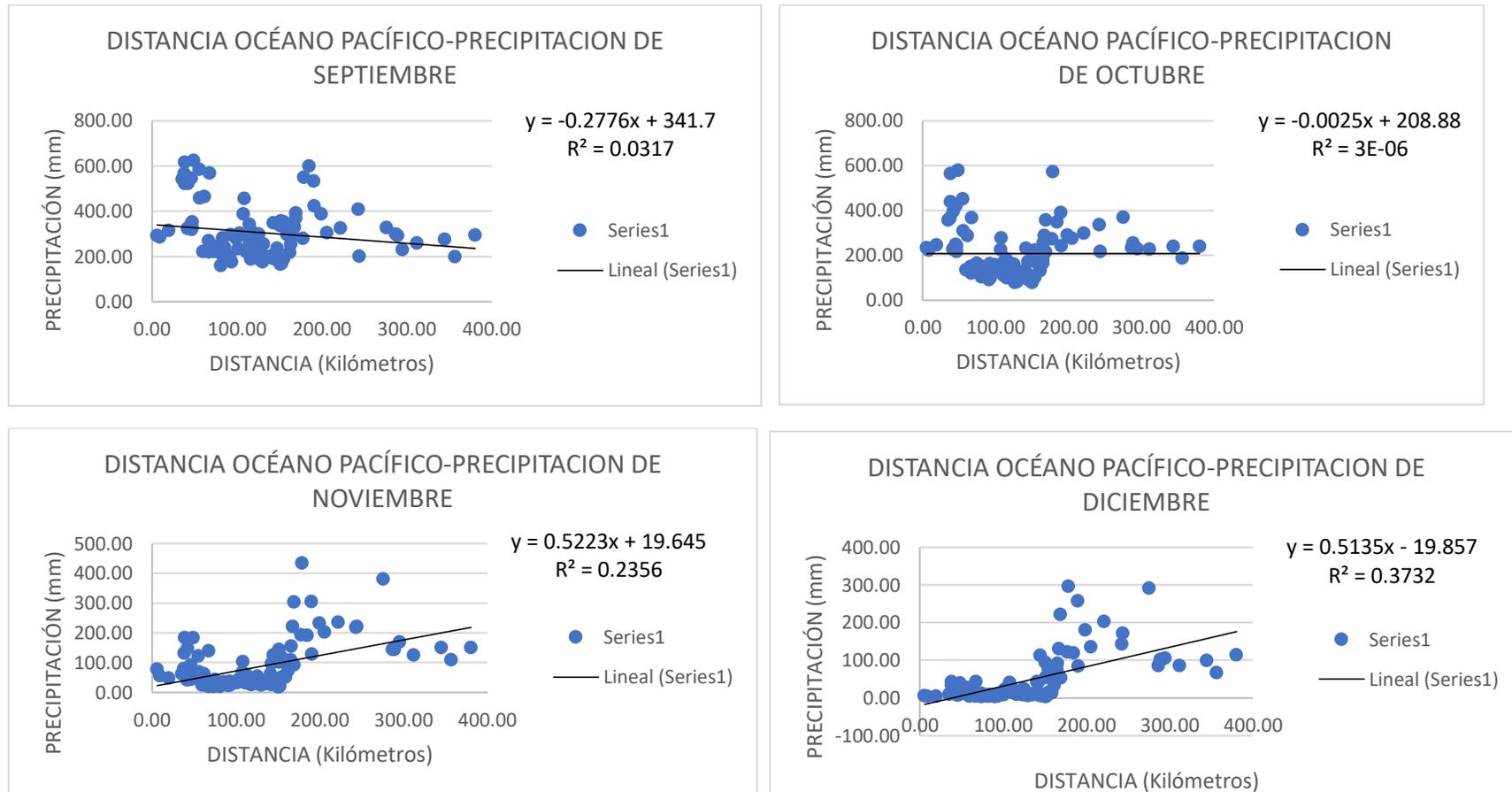


Figura 54. Gráficos de correlación entre el océano pacífico y la precipitación de septiembre a diciembre. Fuente: Elaboración propia.

DISTANCIA OCEÁNO ATLÁNTICO – PRECIPITACIÓN

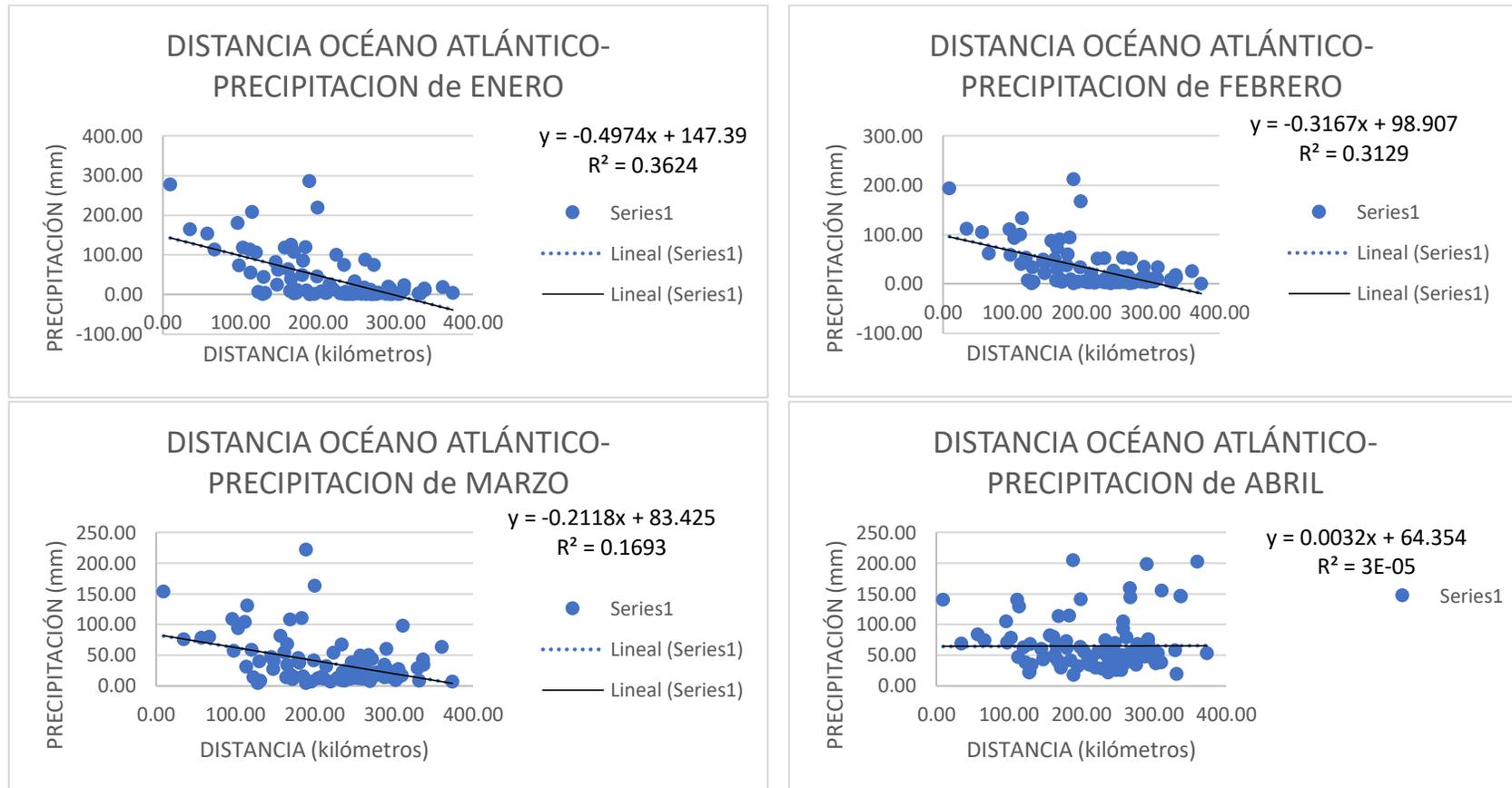


Figura 55. Gráficos de correlación entre el océano atlántico y la precipitación de enero a abril. Fuente: Elaboración propia.

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI–

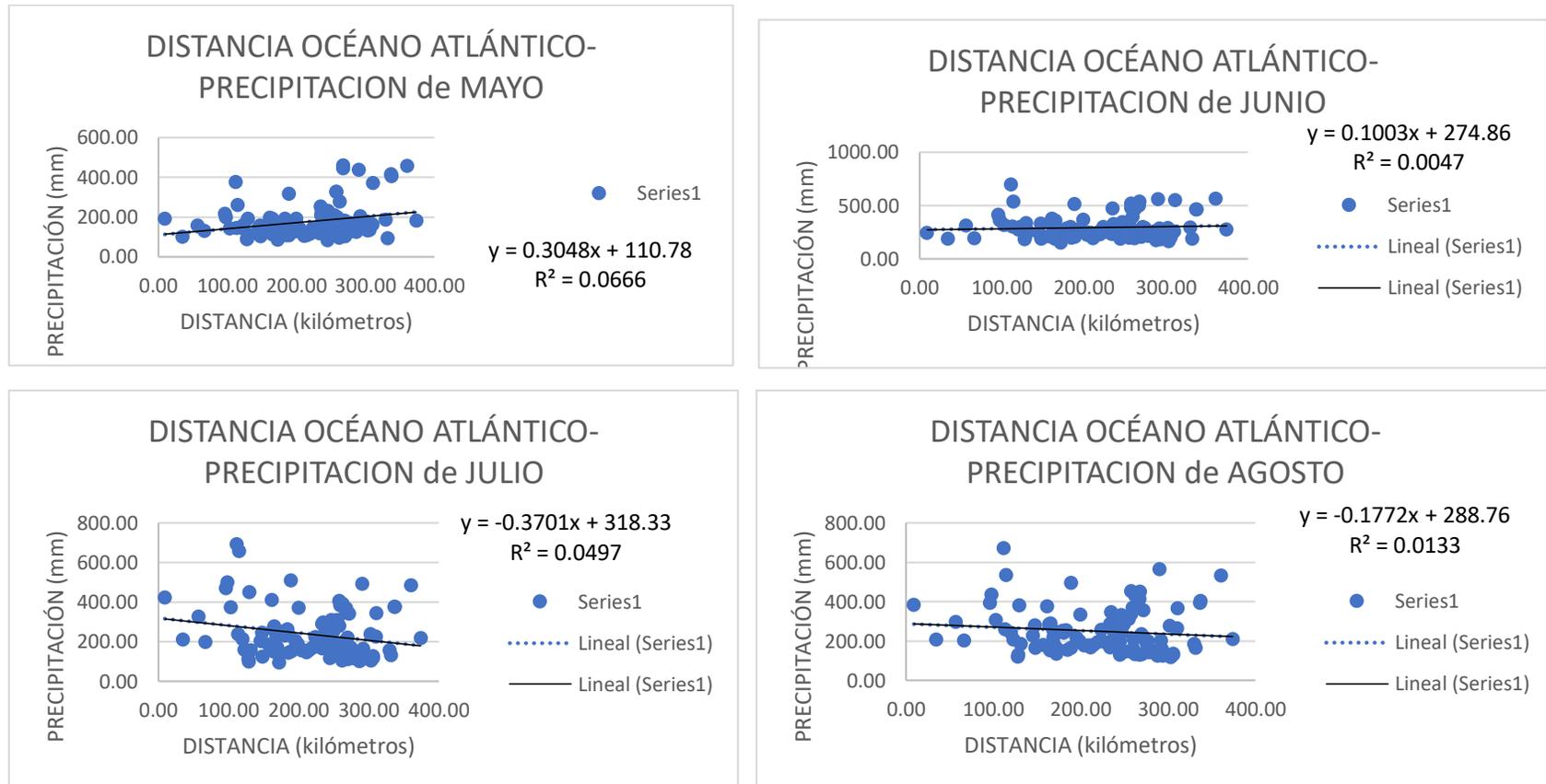


Figura 56. Gráficos de correlación entre el océano atlántico y la precipitación de mayo a agosto. Fuente: Elaboración propia.

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI–

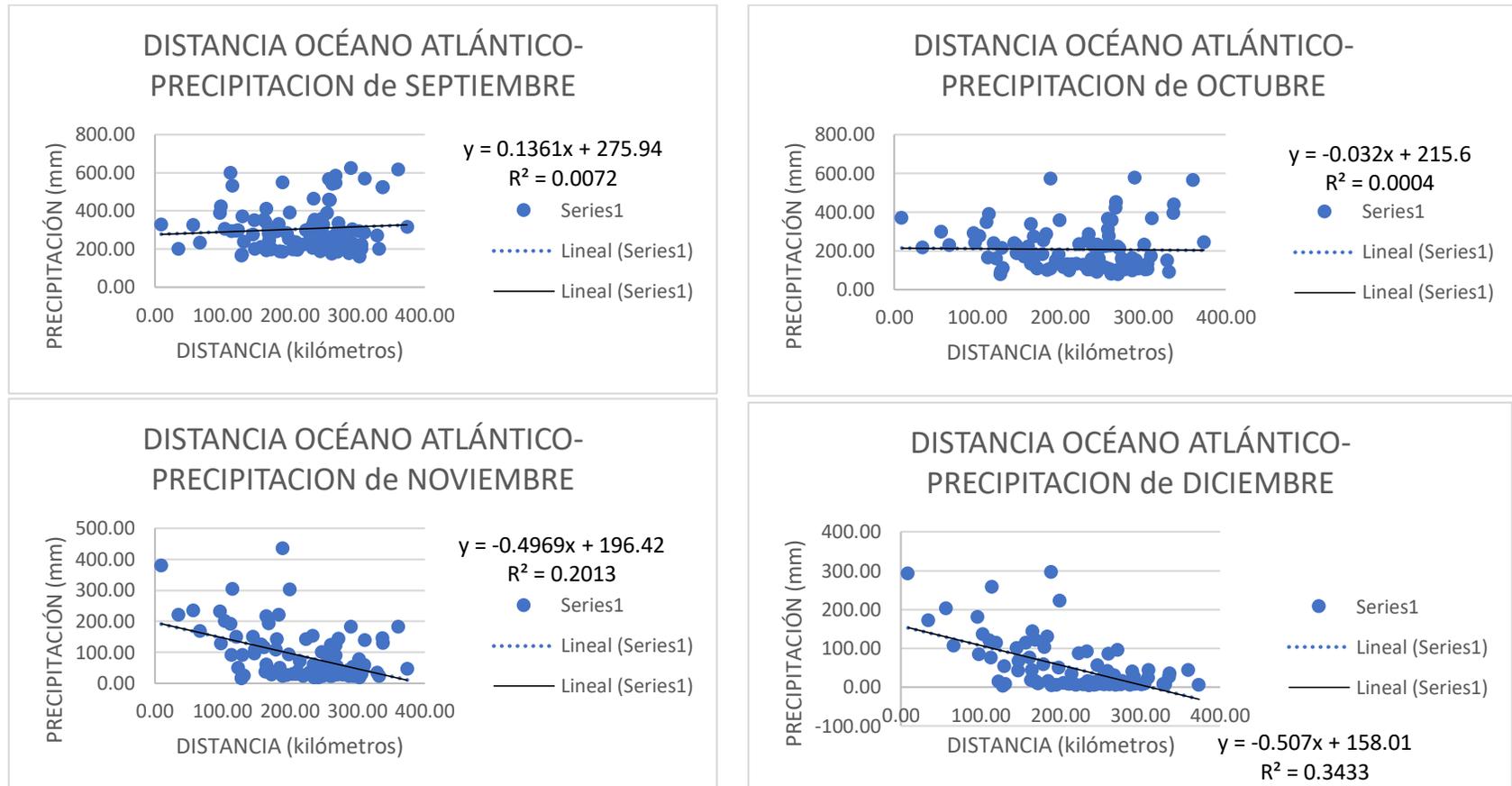


Figura 57. Gráficos de correlación entre el océano atlántico y la precipitación de septiembre a diciembre. Fuente: Elaboración propia.

PENDIENTE – PRECIPITACIÓN

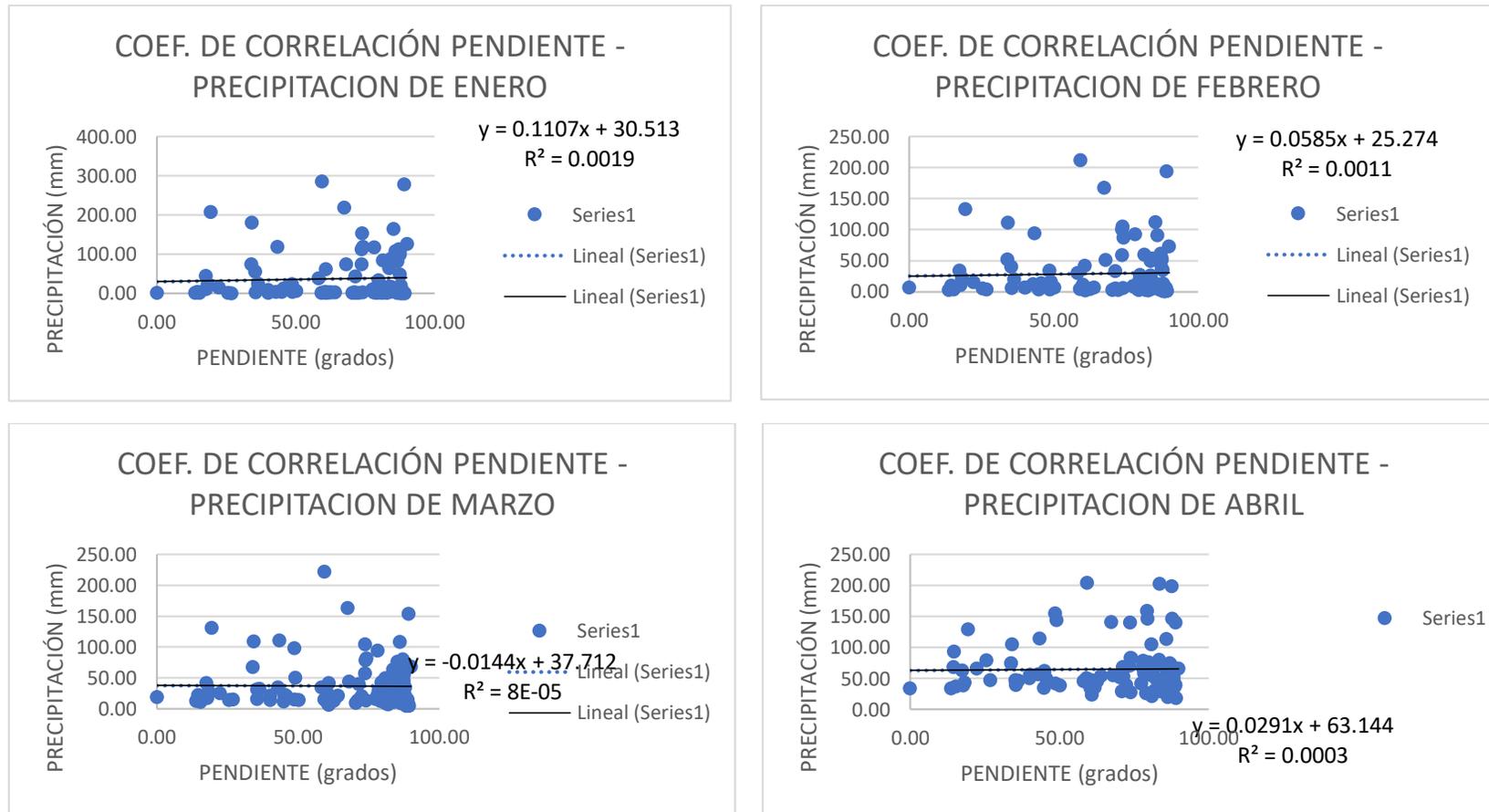


Figura 58. Gráficos de correlación entre la pendiente y la precipitación de enero a abril. Fuente: Elaboración propia.

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI–

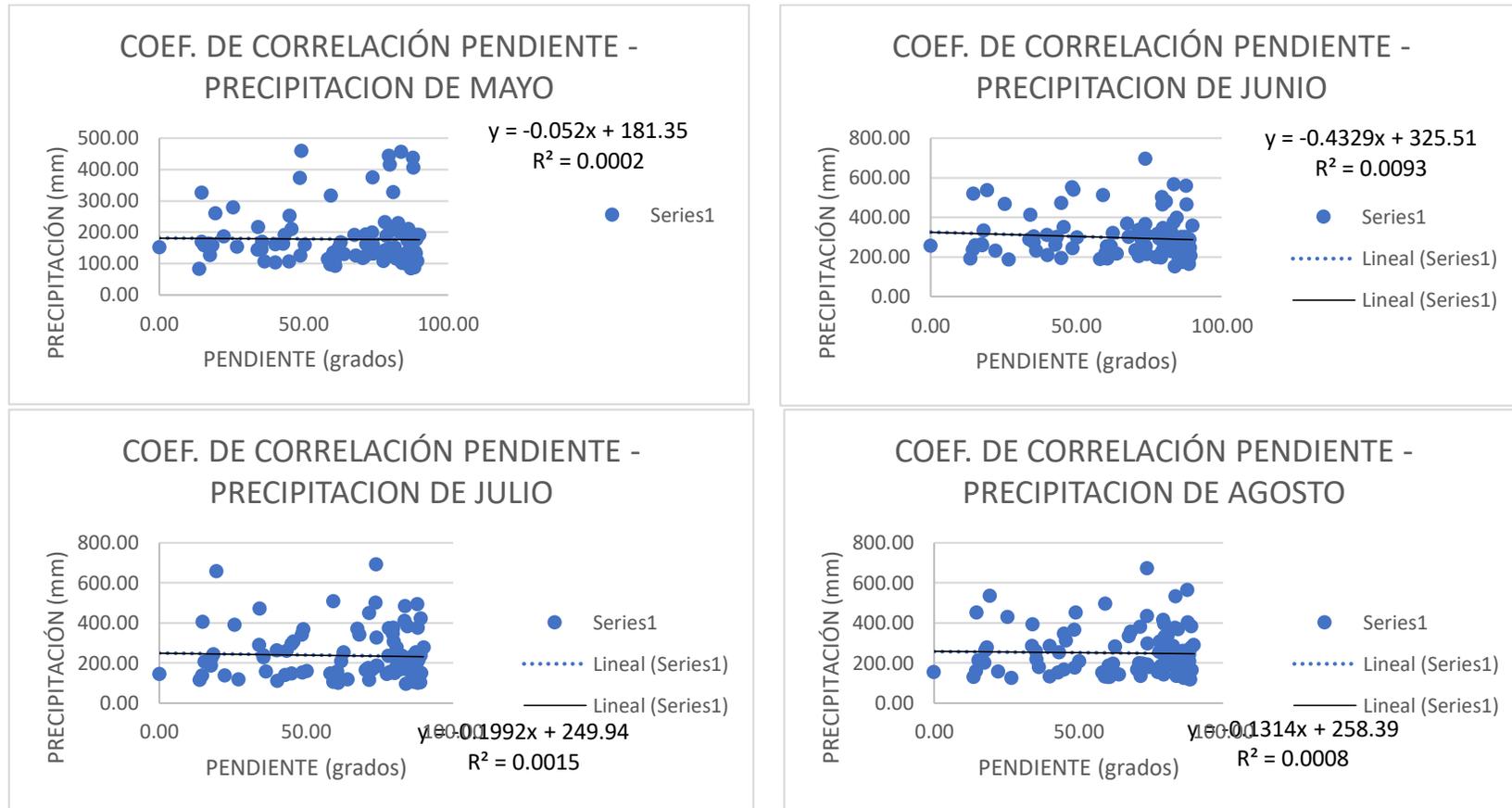


Figura 59. Gráficos de correlación entre la pendiente y la precipitación de mayo a agosto. Fuente: Elaboración propia.

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI–

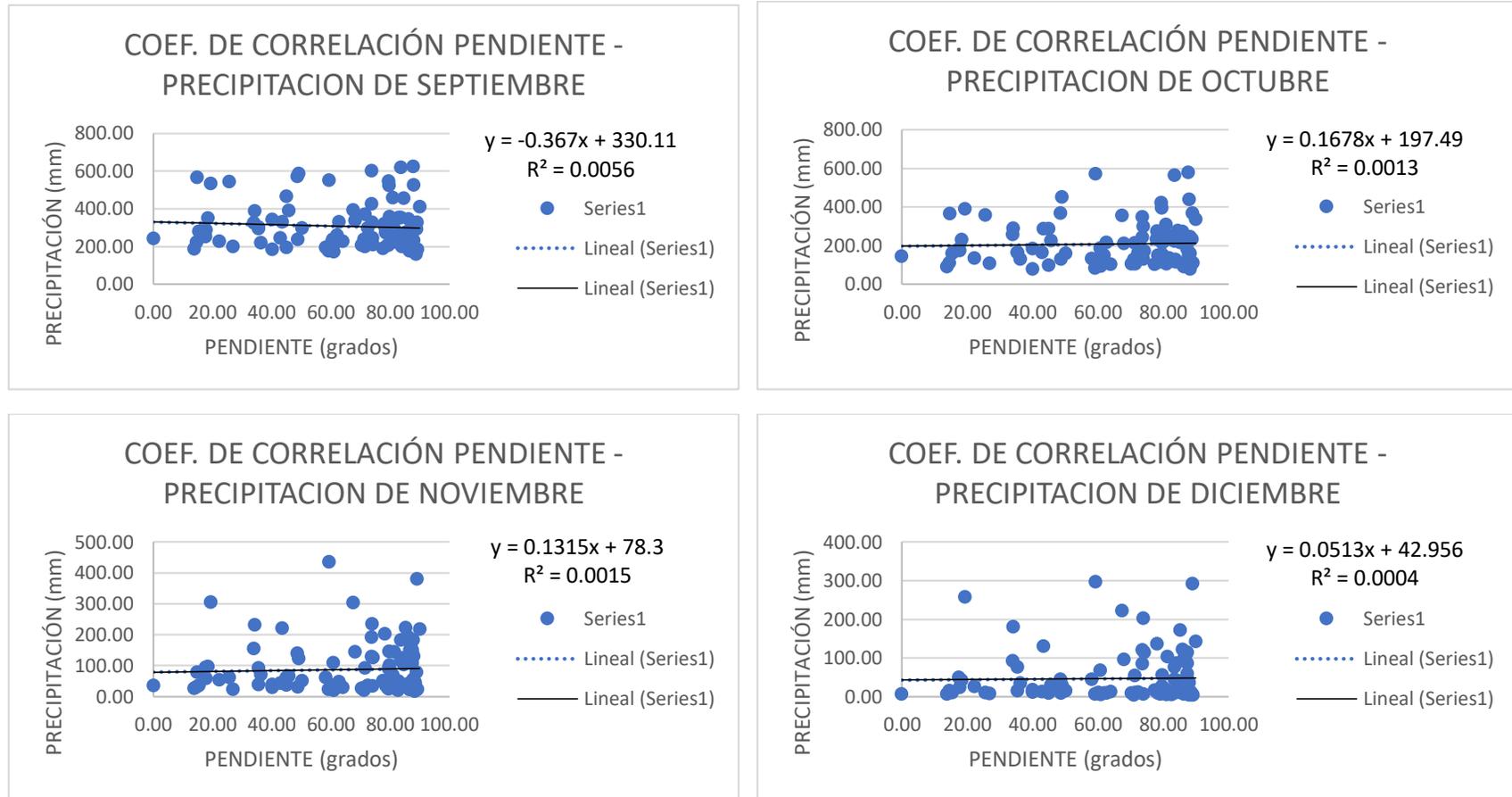


Figura 60. Gráficos de correlación entre la pendiente y la precipitación de septiembre a diciembre. Fuente: Elaboración propia.

LONGITUD (GRADOS) – PRECIPITACIÓN

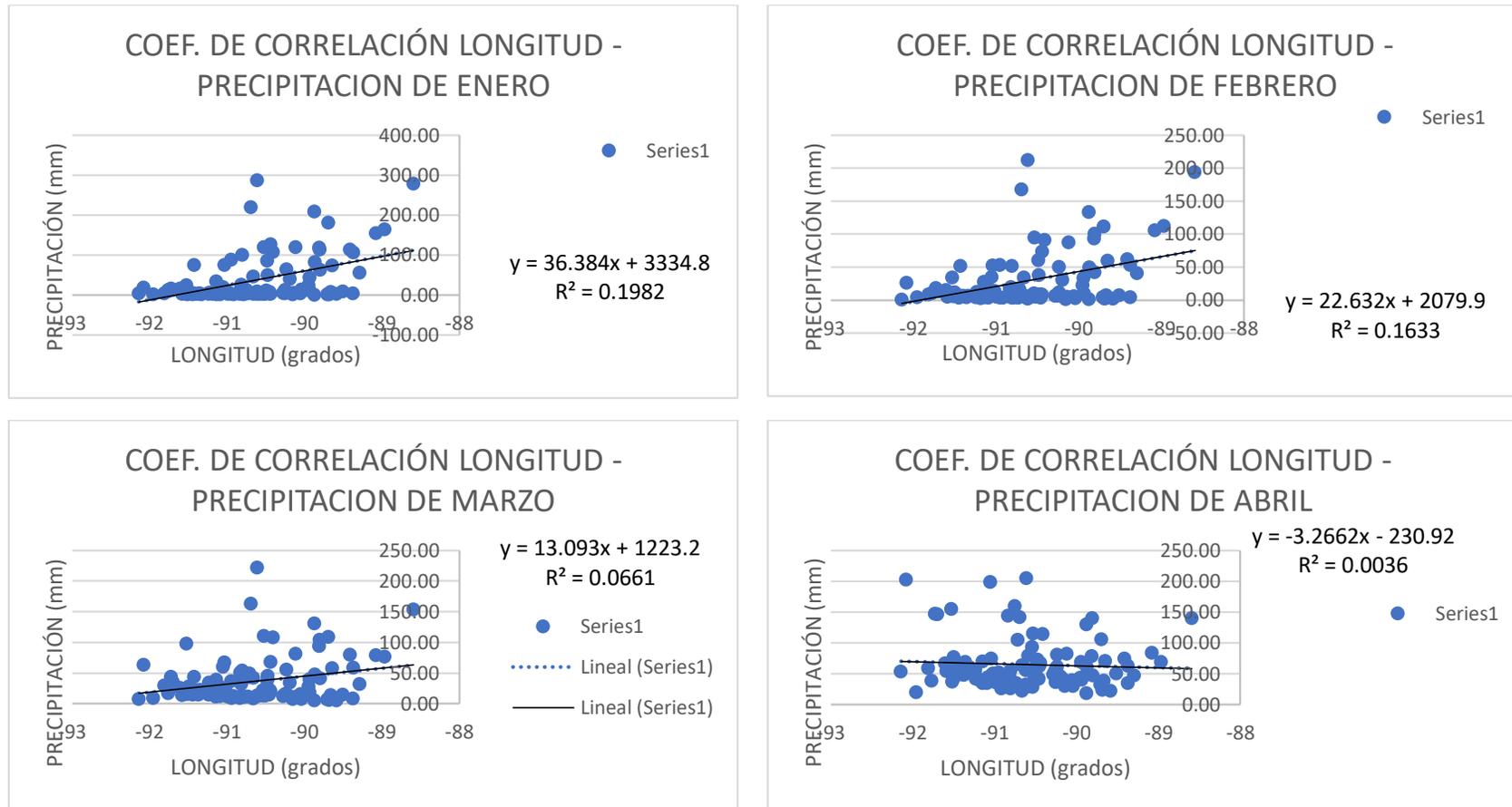


Figura 61. Gráficos de correlación entre longitud y la precipitación de enero a abril. Fuente: Elaboración propia.

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación -DIGI-

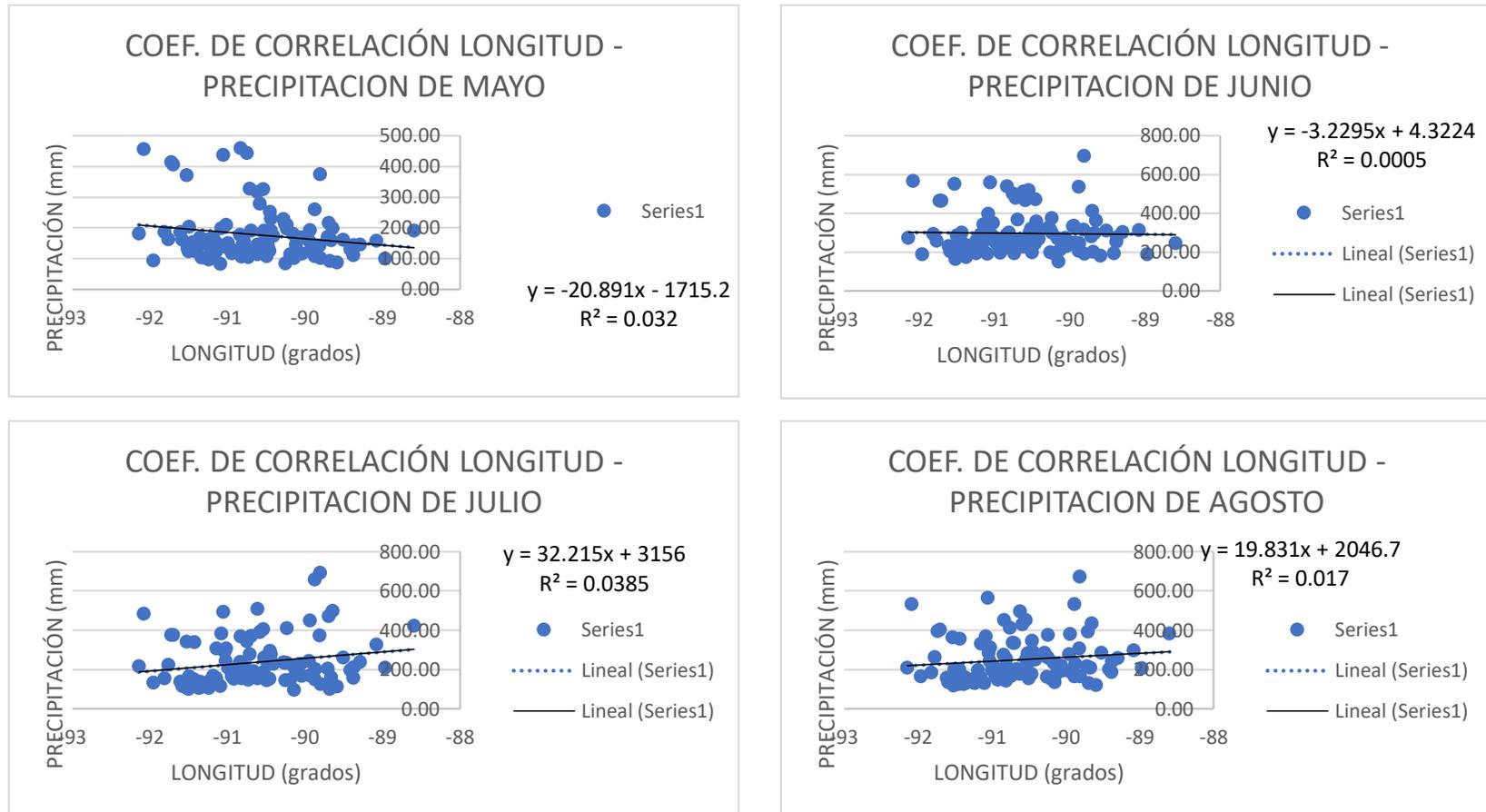


Figura 62. Gráficos de correlación entre longitud y la precipitación de mayo a agosto. Fuente: Elaboración propia.

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI–

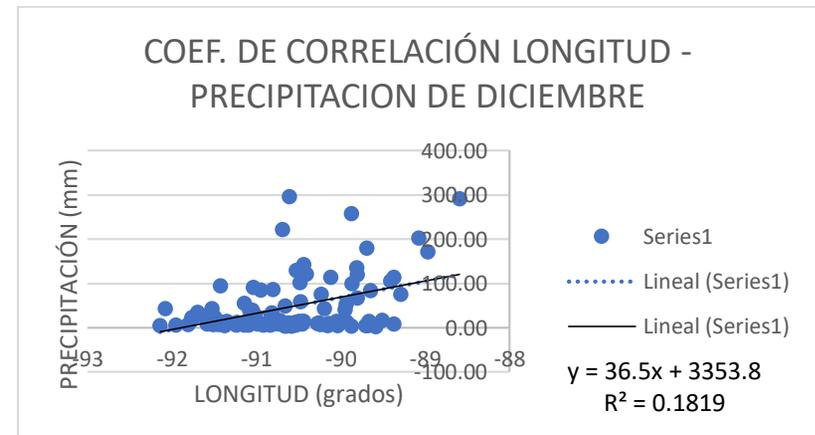
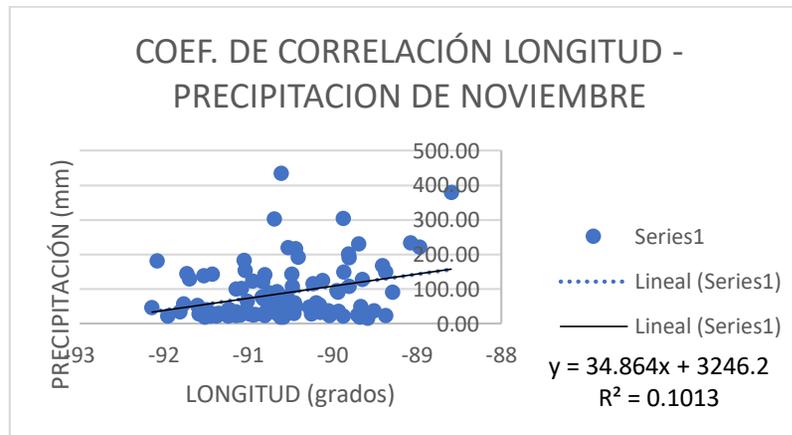
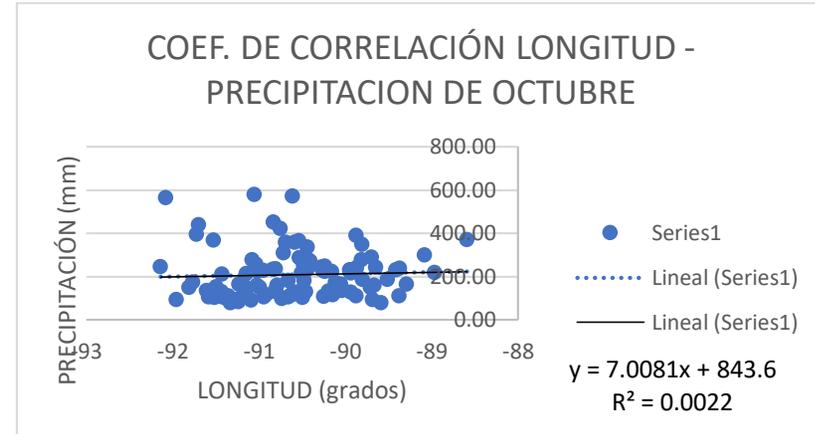
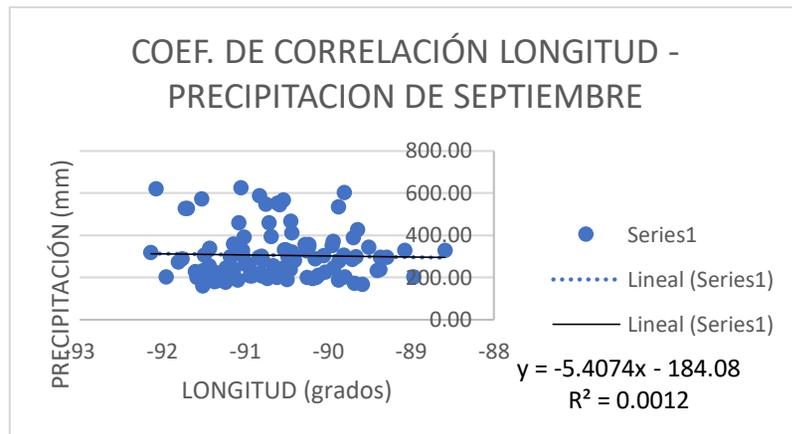


Figura 63. Gráficos de correlación entre longitud y la precipitación de septiembre a diciembre. Fuente: Elaboración propia.

LATITUD (GRADOS) – PRECIPITACIÓN

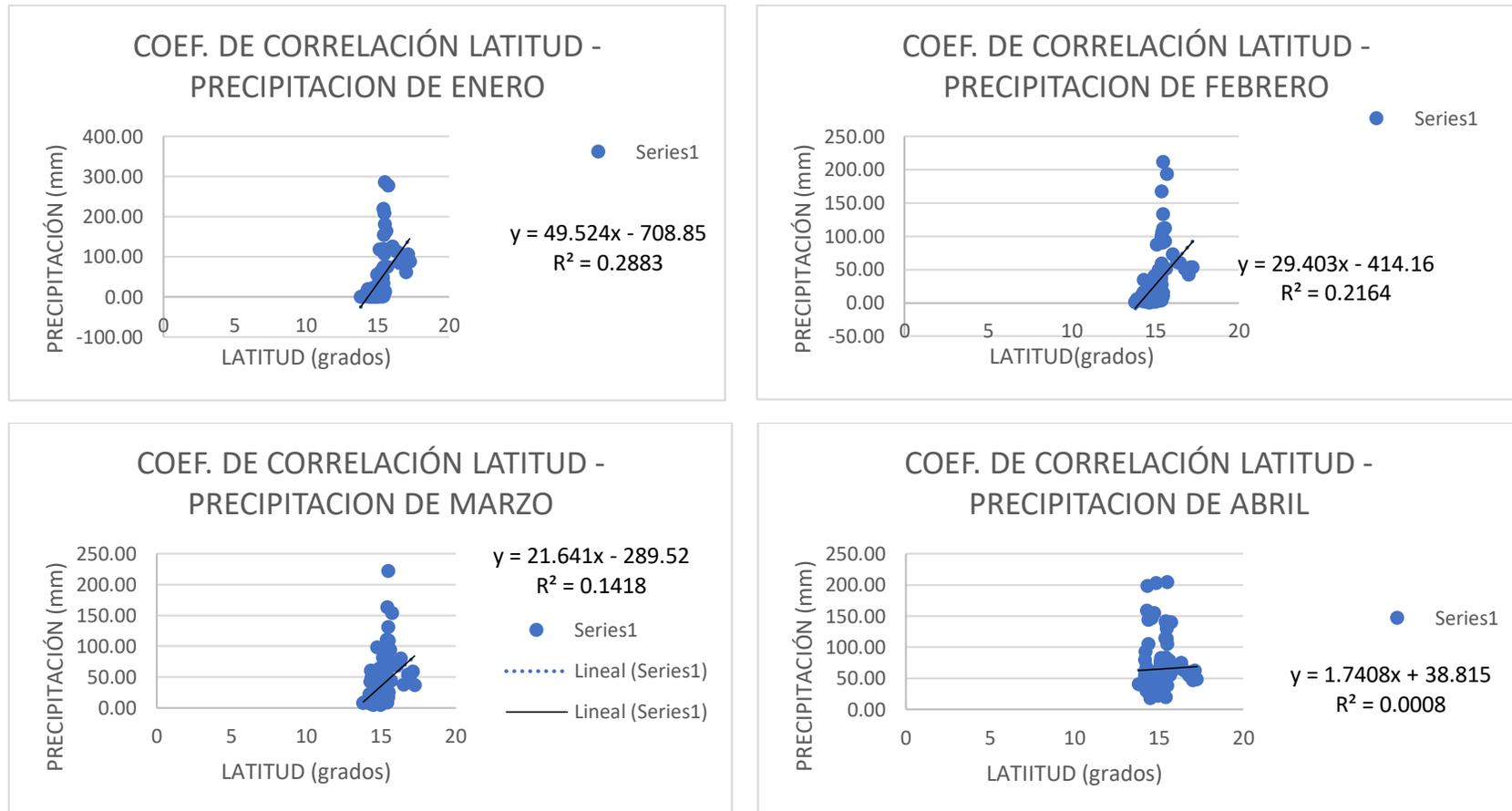


Figura 64. Gráficos de correlación entre latitud y la precipitación de enero a abril. Fuente: Elaboración propia.

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI–

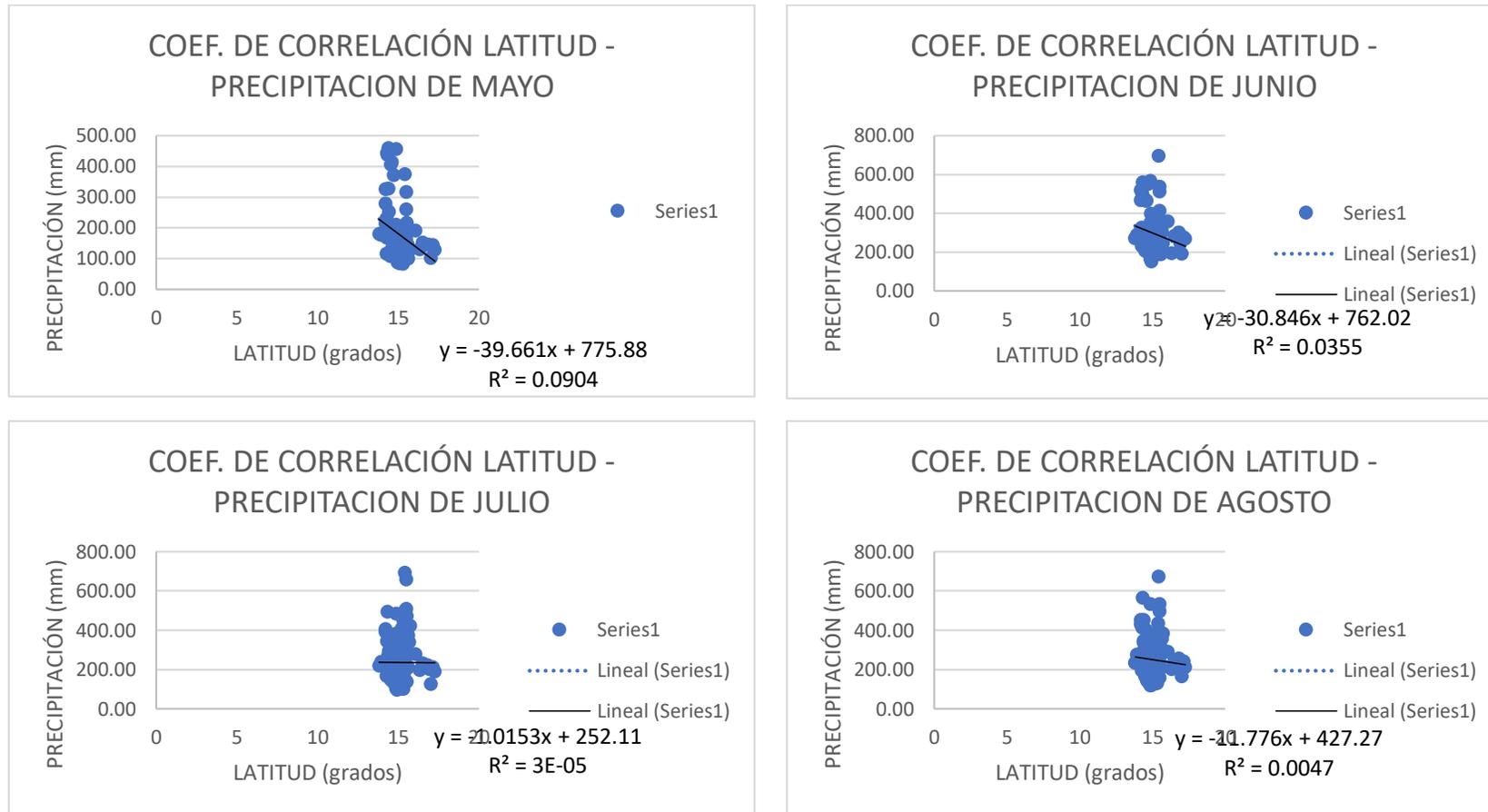


Figura 65. Gráficos de correlación entre latitud y la precipitación de mayo a agosto. Fuente: Elaboración propia.

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI–

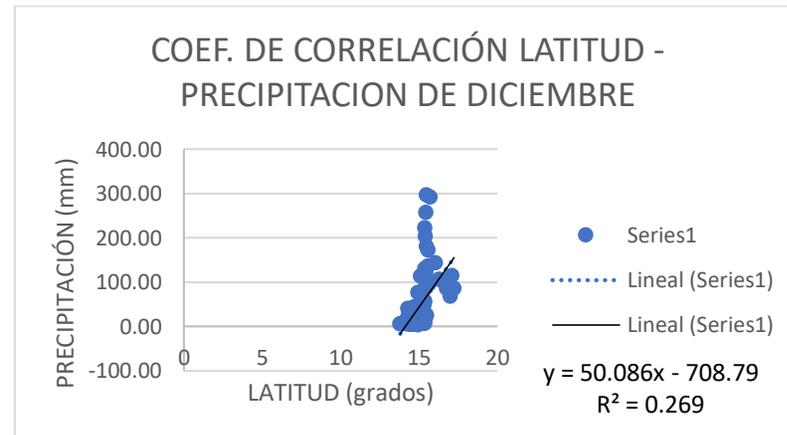
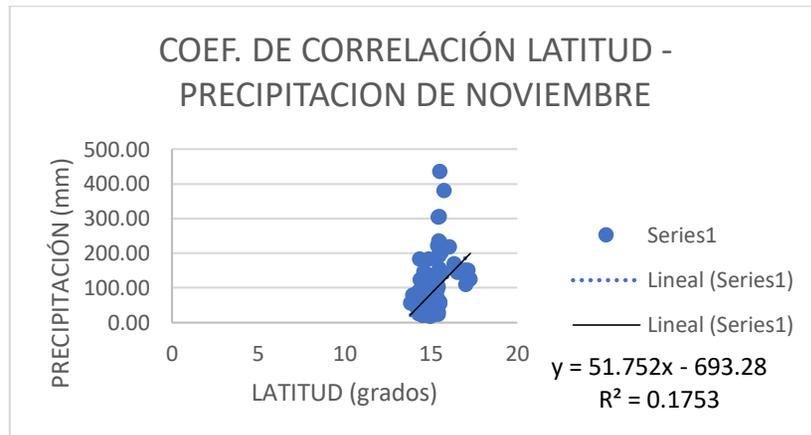
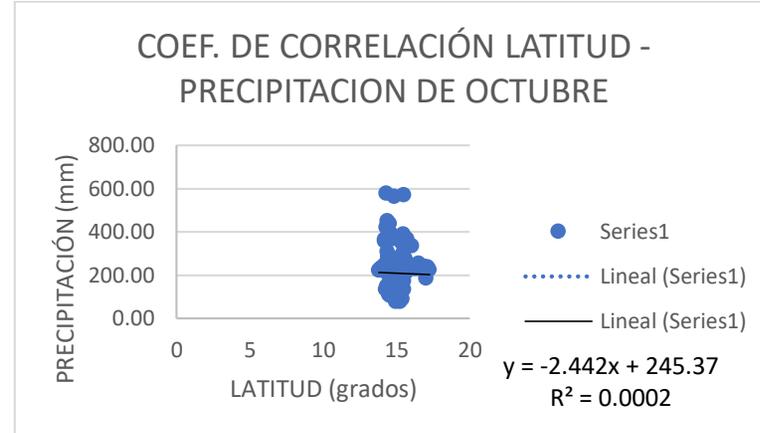
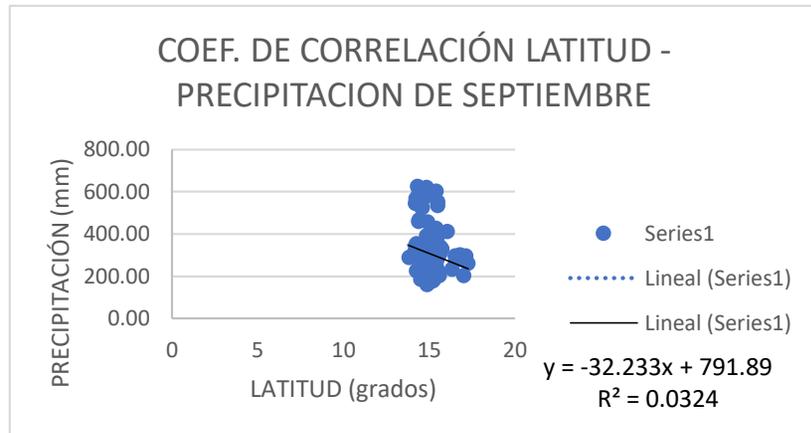


Figura 66. Gráficos de correlación entre latitud y la precipitación de septiembre a diciembre. Fuente: Elaboración propia.

VARIABLES (ELEVACIÓN, LATITUD, LONGITUD, PENDIENTE, DISTANCIA OCÉANO PACÍFICO, DISTANCIA OCÉANO ATLÁNTICO, DISTANCIA GOLFO DE MÉXICO VRS PRECIPITACIÓN

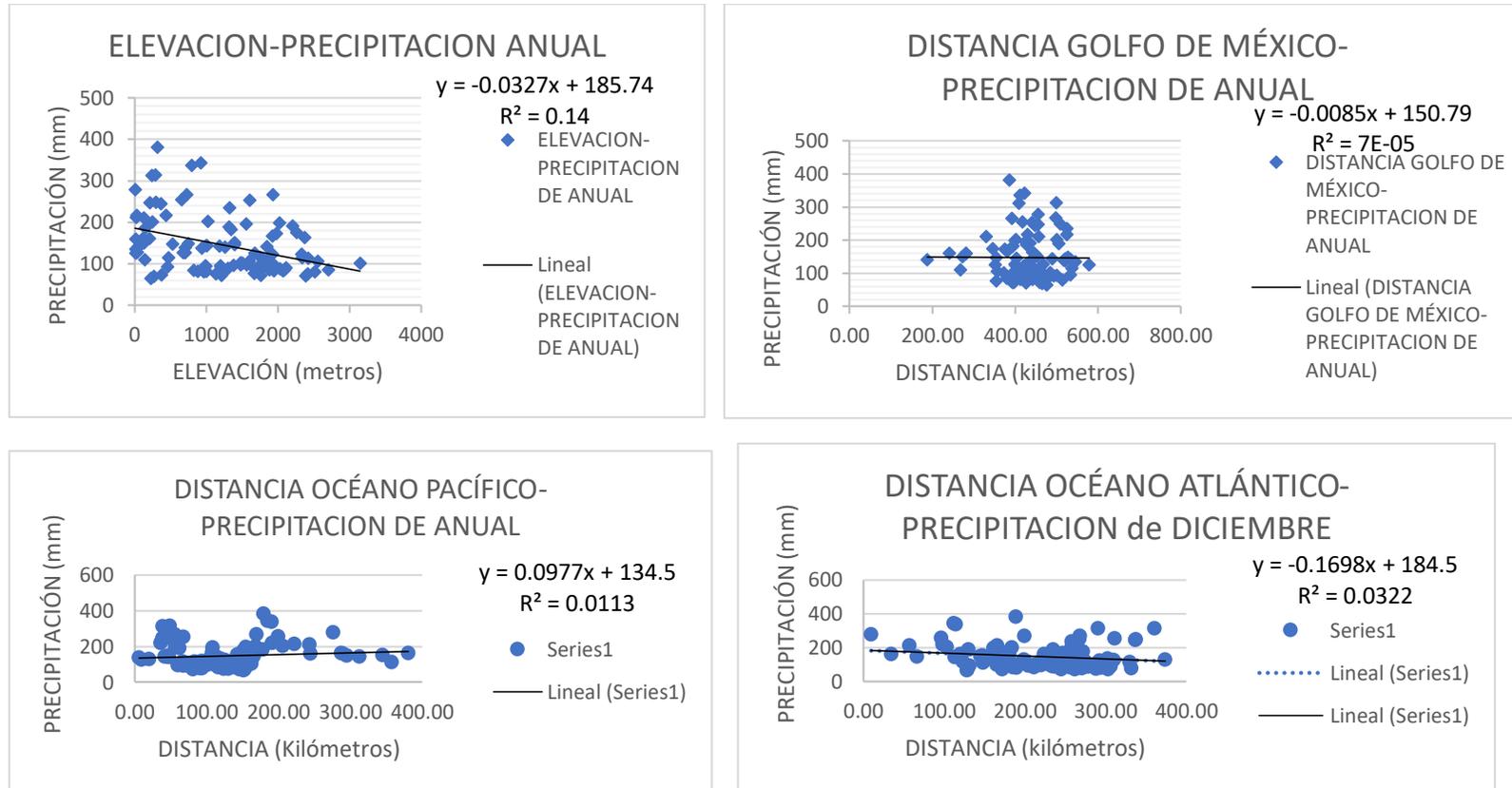


Figura 67. Gráficos de correlación entre elevación, distancia océano pacífico, distancia océano atlántico, distancia Golfo de México y la precipitación anual. Fuente: Elaboración propia.

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación -DIGI-

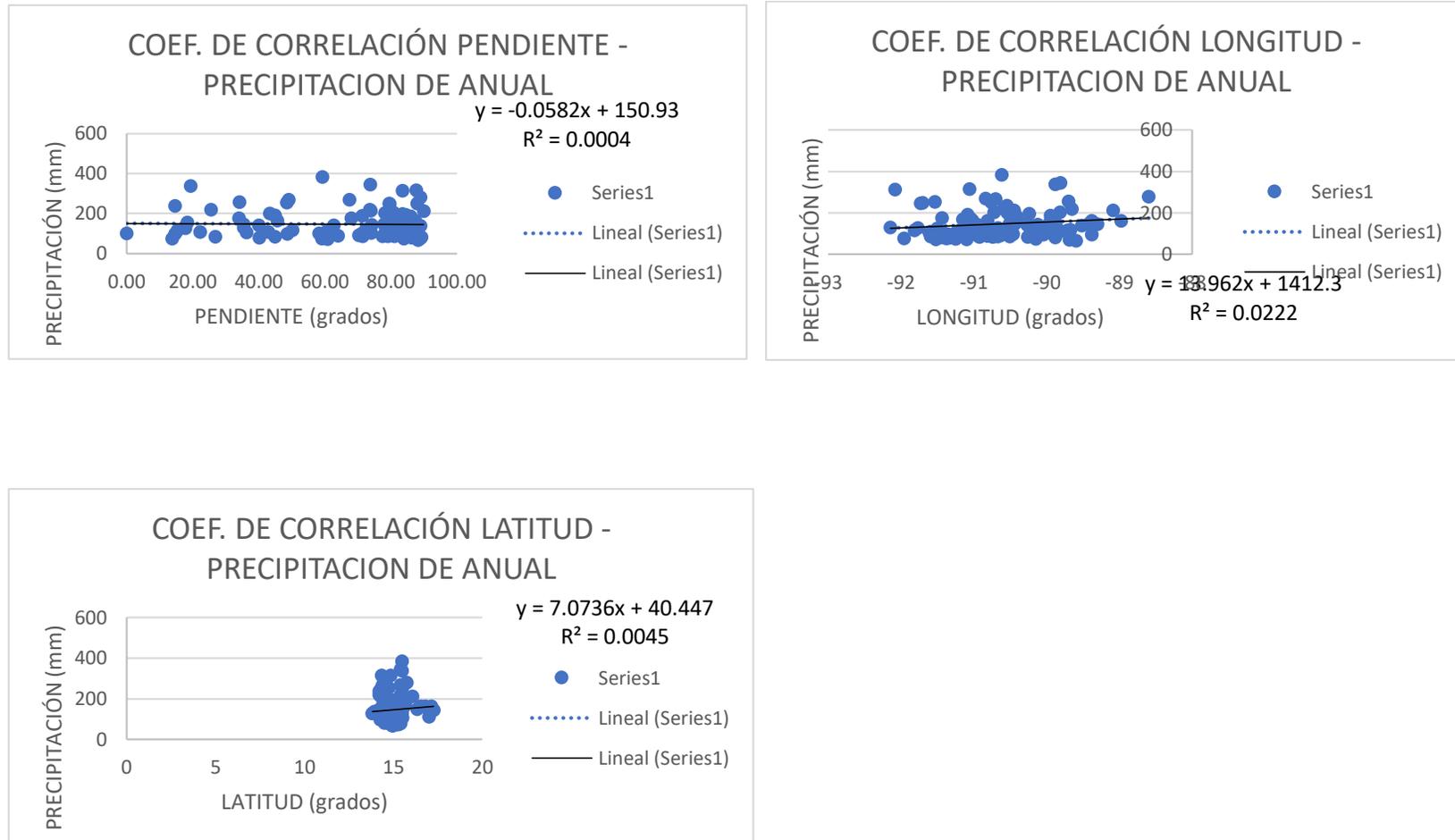


Figura 68. Gráficos de correlación entre pendiente, longitud, latitud y la precipitación anual. Fuente: Elaboración propia.

14. Estrategia de difusión

Como estrategia de difusión y divulgación se realizará la publicación de dos artículos (el primer artículo tendrá una visión heurística de los modelos de interpolación de la precipitación y el segundo presentará los resultados y hallazgos de esta investigación) científicos en revista indexada y se participaría en un congreso en dónde se presentarán los hallazgos y las metodologías que se incluyeron dentro de la investigación. Además, se desplegará en la página de la Unidad de Modelación Matemática los hallazgos, mapas, datos y artículos publicados; ya que, una de las aportaciones de esta investigación es que los expertos en hidrología, administrador del agua, planificadores, estudiantes, investigadores, gobiernos locales y el Estado de Guatemala utilicen los mapas y recursos que se reprodujeron. También, es importante, detallar que otro de los aportes de esta investigación radica en la metodología; dicha metodología podría aplicarse a regiones pequeñas o grandes, o se puede replicar en otras latitudes.

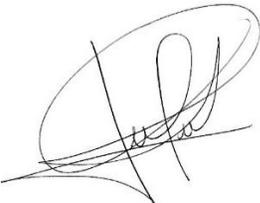
15. Aporte de la propuesta de investigación a los ODS:

Los resultados, metodologías y métodos utilizados en el presente estudio encajan dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible dado que se adapta a lo siguiente: con el mapeo de la precipitación que las metas del objetivo 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible indican en su sección 6.4 que se debe de asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua. Es decir, la precipitación es fundamental para definir los niveles de agua dulce disponible para ciertas regiones y con los mapeos con exactitud de la precipitación en Guatemala, se logrará determinar el agua de escorrentía, el agua de lagos, lagunas o agua de subterránea; Además, en la sección 11.5 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible se busca reducir significativamente el número de muertes causadas por los desastres, incluidos los relacionados con el agua y para ello, la información que se obtenga de esta investigación se puede utilizar para determinar áreas que pueden presentar áreas de inundaciones o de deslave que con la información precisa de la precipitación se podrá modelar áreas de riesgo.

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI-

16. Orden de pago final

Nombres y apellidos	Categoría (investigador /auxiliar)	Registro de personal	Procede pago de mes (Sí / No)	Firma
JOSÉ LUIS ARGUETA MAYORGA	COORDINADOR	20040255	NO	
WALTER ARNOLDO BARDALES ESPINOZA	INVESTIGADOR	20050424	NO	
EUGENIO MIGUEL POLANCO SOTOJ	AUXILIAR II	20210564	NO	

17. Declaración del coordinador(a) del proyecto de investigación

El coordinador de proyecto de investigación con base en el *Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación*, artículos 13 y 20, deja constancia que el personal contratado para el proyecto de investigación que coordina ha cumplido a satisfacción con la entrega de informes individuales por lo que es procedente hacer efectivo el pago correspondiente.

<p>José Luis Argueta Mayorga Coordinador del proyecto de investigación</p>	 Firma
Fecha: 22/11/2021	

18. Aval del director(a) del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario

De conformidad con el artículo 13 y 19 del *Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación* otorgo el aval al presente informe mensual de las actividades realizadas en el proyecto (escriba el

Informe final proyecto de investigación 2021

Dirección General de Investigación –DIGI-

nombre del proyecto de investigación) en mi calidad de (indique: Director del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario), mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

Vo.Bo. Telma Cano Morales Directora del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería	 Firma
Fecha: 22/11/2021	

19. Visado de la Dirección General de Investigación

Vo.Bo. LIUBA MARÍA CABRERA OVALLE	Firma
Fecha: 22/11/2021	

Vo.Bo. JULIO RUFINO SALAZAR	Firma
Fecha: 22/11/2021	