RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Viancy Milena Lázaro Meneses Jissneily Andrea Salas Moreno
FACULTAD	Ingenierías
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería Civil
DIRECTORA	Susana María Plata Jiménez
CO DIRECTORA	María Angelica Álvarez Bayona
TÍTULO DE LA TESIS	Análisis de las variaciones de precipitación mediante modelos climáticos regionales para la zona del Catatumbo.
TITULO EN INGLES	Analysis of precipitation variations using regional climate models for the Catatumbo region.

RESUMEN

En el desarrollo del proyecto de investigación, se realiza una estimación de las variaciones de precipitación en la zona del Catatumbo para el periodo 2024-2074. Para lograrlo, se emplearon proyecciones climáticas provenientes de un modelo climático regionalizado, para lo cual se llevó a cabo una corrección de sesgo mediante el análisis de datos de precipitación históricas específicas de la zona. Dicho análisis permitió generar representaciones gráficas para la comprensión del comportamiento de la precipitación en el Catatumbo durante el periodo de estudio.

RESUMEN EN INGLES

In the development of the research project, an estimation of precipitation variations in the Catatumbo area for the period 2024-2074 is carried out. To achieve this, climate projections from a regionalized climate model were used, for which a bias correction was conducted through the analysis of specific historical precipitation data for the area. This analysis allowed the generation of graphical representations to understand the behavior of precipitation in the Catatumbo region during the study period.

PALABRAS CLAVES	Precipitación diaria, trayectoria de concentración, variación climática, distribución estadística, serie de datos climáticos.
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Daily precipitation, concentration trajectory, climatic variation, statistical distribution, climate data series.

CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 133	PLANOS:0	ILUSTRACIONES: 65	CD-ROM: 0

Análisis de las variaciones de precipitación mediante modelos climáticos regionales para la zona del Catatumbo.

Viancy Milena Lázaro Meneses

Jissneily Andrea Salas Moreno

Facultad de ingeniería, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

Ingeniería Civil

Mgtr. Susana María Plata Jiménez

Mgtr. Maria Angélica Álvarez Bayona

16 Febrero 2024

Índice

Capítulo 1. Análisis de las variaciones de precipitación mediante modelos climáticos regionales para la zona del Catatumbo 10

1.1 Planteamiento del problema 10

1.2 Formulación del problema 13

1.3 Objetivos 13

1.3.1 Objetivo general 13

1.3.2 Objetivos específicos 14

1.4 Justificación 14

1.5 Delimitaciones 17

1.5.1 Operativa 17

1.5.2 Conceptual 18

1.5.3 Geográfica 18

1.5.4 Temporal 19

Capítulo 2. Marco referencial 20

2.1 Marco histórico 20

2.2 Marco teórico 27

2.2.1 Cambio climático 27

2.2.2 Escenarios climáticos 28

2.2.3 Modelo climático 31

2.2.4 El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) 40

2.2.5 Método de interpolación 41

2.3 Marco conceptual 43

2.3.1 Precipitación diaria 43

2.3.2 Trayectoria de concentración 43

2.3.3 Variación climática 43

2.3.4 Distribución estadística 44

2.3.5 Serie de datos climáticos 44

2.3.6 R 44

2.3.7 RStudio 45

2.4 Marco contextual 45

2.5 Marco legal 46

2.5.1 DECRETO 2811 DE 1974 46

2.5.2 LEY 99 DE 1993 46

Capítulo 3. Diseño metodológico 48

3.1 Tipo de investigación 48

3.2 Población y muestra 48

3.2.1 Población 48

3.2.2 Muestra: 48

3.3 Análisis de datos históricos 49

3.4 Identificación de escenarios futuros 49

3.5 Construcción y análisis de representaciones gráficas del comportamiento de la precipitación 50

Capítulo 4. Tratamiento de datos históricos 51

4.1. Delimitación de la zona 51

4.2 Extracción y tratamiento de datos históricos 52

4.3 Determinación ventana de tiempo 59

4.4 Ajuste de datos históricos 63

Capítulo 5. Identificación de escenarios futuros 66

5.1 Correlación de datos de las dos plataformas 66

5.2 Extracción de información para precipitaciones futuras 68

5.3 Corrección de sesgo 69

5.4 Construcción y análisis de representaciones gráficas del comportamiento de la precipitación 70

Capítulo 6. Resultados 79

6.1 Gráficos para el escenario RCP4.5 79

6.1.1 Periodo 2024-2033 80

6.1.2 Periodo 2034-2043 83

6.1.3 Periodo 2044-2053 87

6.1.4 Periodo 2054-2063 90

6.1.5 Periodo 2064-2074 94

6.2 Gráficos para el escenario RCP8.5 97

6.2.1 Periodo 2024-2033 97

6.2.2 Periodo 2034-2043 101

6.2.3 Periodo 2044-2053 104

6.2.4 Periodo 2054-2063 108

6.2.5 Periodo 2064-2074 111

Capítulo 7. Análisis de resultados 116

Capítulo 8. Conclusiones 123

Capítulo 9. Recomendaciones 124

Referencias 125

Lista de figuras

Figura 1 Ubicación geográfica del Catatumbo 19

Figura 2 Comportamiento de la concentración de emisiones GEI 31

Figura 3 Vecindad de IDW del punto seleccionado 42

Figura 4 Posición geográfica de las estaciones del Catatumbo 55

Figura 5 Histograma histórico de precipitación mensual 56

Figura 6 Pruebas de homogeneidad y consistencia para serie histórica 57

Figura 7 Histograma histórico de precipitación mensual corregida 58

Figura 8 Pruebas de homogeneidad y consistencia para serie histórica corregida 59

Figura 9 Histogramas de precipitaciones existentes en las estaciones meteorológicas .. 64

Figura 10 Precipitaciones completadas en las estaciones meteorológicas 65

Figura 11 Grilla establecida para la zona de estudio 67

Figura 12 Paso para definir el entorno en el Sistema de coordenadas..... 72

Figura 13 Paso para guardar el archivo en formato Shape 73

Figura 14 Paso para el ajuste de características IDW 74

Figura 15 Paso para extender la interpolación en toda el área..... 75

Figura 16 Paso para recorte del ráster..... 76

Figura 17 Paso para edición de características del ráster..... 77

Figura 18 Visualización de ráster final 78

Figura 19 Proyección de precipitación para el 2024-04 80

Figura 20 Proyección de precipitación para el 2031-04 81

Figura 21 Proyección de precipitación para el 2026-11 82

Figura 22 Proyección de precipitación para el 2026-12 83

Figura 23 Proyección de precipitación para el 2037-04 84

Figura 24 Proyección de precipitación para el 2043-04 85

Figura 25 Proyección de precipitación para el 2040-11 86

Figura 26 Proyección de precipitación para el 2043-11 86

Figura 27 Proyección de precipitación para el 2046-04 88

Figura 28 Proyección de precipitación para el 2046-06 88

Figura 29 Proyección de precipitación para el 2044-11 89

Figura 30 Proyección de precipitación para el 2048-12 90

Figura 31 Proyección de precipitación para el 2056-04 91

Figura 32 Proyección de precipitación para el 2058-04 92

Figura 33 Proyección de precipitación para el 2055-01 93

Figura 34 Proyección de precipitación para el 2063-02 93

Figura 35 Proyección de precipitación para el 2064-04 95

Figura 36 Proyección de precipitación para el 2073-05 95

Figura 37 Proyección de precipitación para el 2066-01 96

Figura 38 Proyección de precipitación para el 2070-01 97

Figura 39 Proyección de precipitación para el 2024-04 98

Figura 40 Proyección de precipitación para el 2025-04 99

Figura 41 Proyección de precipitación para el 2028-12 100

Figura 42 Proyección de precipitación para el 2033-11 100

Figura 43 Proyección de precipitación para el 2041-03 102

Figura 44 Proyección de precipitación para el 2041-04 102

Figura 45 Proyección de precipitación para el 2035-11 103

Figura 46 Proyección de precipitación para el 2038-12 104

Figura 47 Proyección de precipitación para el 2046-03 105

Figura 48 Proyección de precipitación para el 2047-04 106

Figura 49 Proyección de precipitación para el 2047-10 107

Figura 50 Proyección de precipitación para el 2049-01 107

Figura 51 Proyección de precipitación para el 2056-04 109

Figura 52 Proyección de precipitación para el 2057-03 109

Figura 53 Proyección de precipitación para el 2054-01 110

Figura 54 Proyección de precipitación para el 2062-02 111

Figura 55 Proyección de precipitación para el 2064-04 112

Figura 56 Proyección de precipitación para el 2073-04 113

Figura 57 Proyección de precipitación para el 2065-01 114

Figura 58 Proyección de precipitación para el 2065-12 114

Lista de tablas

Tabla 1 Periodos de datos disponibles de las estaciones climáticas 52

Tabla 2 Disponibilidad de datos de las diferentes estaciones 60

Tabla 3 Simbología para detallar la disponibilidad de datos 62

Tabla 4 Comparativa de mapas de valores máximos de precipitación con RCP4.5 117

Tabla 5 Comparativa de mapas de valores máximos de precipitación con RCP8.5 119

Tabla 6 Comparativa de mapas de valores mínimos de precipitación con RCP4.5..... 121

Tabla 7 Comparativa de mapas de valores mínimos de precipitación con RCP8.5..... 122

Capítulo 1. Análisis de las variaciones de precipitación mediante modelos climáticos regionales para la zona del Catatumbo

1.1 Planteamiento del problema

A lo largo de la historia se han registrado problemas ambientales globales, durante el siglo XXI el más importante ha sido el cambio climático. Impacta negativamente en las poblaciones humanas, en sus economías y en el proceso de desarrollo. A nivel mundial se requiere combatir esta problemática a través del trabajo en conjunto de todos los países. En 2015, la Organización de las Naciones Unidas adoptó los Objetivos de Desarrollo Sostenible, ODS, como un llamado universal para acabar con la pobreza, proteger el planeta y garantizar la paz y prosperidad para todos para 2023. El Objetivo de Desarrollo Sostenible N°13 “acción por el clima”, menciona como todos los países han tenido que afrontar las drásticas consecuencias de la crisis climática. Las emisiones de gases de efecto invernadero continúan aumentando y actualmente están un 50 % por encima del nivel de 1990. El calentamiento global ha causado cambios permanentes en el sistema climático, estos daños pueden ser irreversibles si no se actúa ahora. (Cambio climático - Desarrollo Sostenible, 2022)

Durante las últimas décadas, el mundo ha sido testigo de un aumento preocupante en fenómenos climáticos extremos, como la sequía y las olas de calor y frío. La época de sequía mundial presentada en el periodo de 1980-1999 experimentó un incremento de 29% con respecto al de 2000-2019, de 263 a 338, y las olas de calor y de frio un aumento del 232%, de 130 a 432, un cambio significativo para estos fenómenos climáticos extremos; dejando al menos 165.000

muertes reportadas (Broto, 2020). Regiones enteras como África central y las islas del pacifico se encuentran vulnerables por estos motivos, donde no solo el clima es el problema, sino todo lo que esto trae consigo, como escasez de alimentos, daños en la salud humana, entre otros (Portafolio, 2021).

Asimismo, en Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, muestra en los últimos 30 años un aumento significativo en las sequias y en las precipitaciones extremas, provee también una elevación en la temperatura del país de 0,9 grados centígrados para el 2040 y de 2,4 grados centígrados al término del siglo. En el territorio nacional, el 100 % de los municipios tiene algún grado de riesgo por cambio climático y en el 2040 el 25 % estará en riesgo alto y muy alto de sufrir fuertes afectaciones, en el recurso hídrico, el hábitat humano, la biodiversidad, la infraestructura, la salud y la seguridad alimentaria (IDEAM, 2017).

En el ámbito de la planeación de proyectos de ingeniería, es crucial considerar una amplia gama de variables que podrían tener un impacto en el desempeño y la durabilidad de dichos proyectos. Solo a través de un enfoque riguroso y científicamente fundamentado se pueden obtener resultados confiables que respalden la toma de decisiones en el diseño y la construcción de infraestructuras que se adapten a las realidades locales (Gómez-Galván et al., 2019) y sean resilientes frente a los desafíos medioambientales actuales y futuros. Por lo tanto, resulta esencial establecer escenarios futuros a los que un proyecto pueda estar expuesto a lo largo de su ciclo de vida.

En el mismo sentido, el desarrollo de un país está ligado a la infraestructura vial (Ariza-Zabala et al., 2022) y por tal motivo es necesario comprender en detalle las estimaciones de las variaciones de precipitación en una zona específica, ya que no solo permite anticipar y mitigar los posibles impactos climáticos, sino que también orienta la planificación y el diseño de nuevas obras, contribuyendo así al crecimiento sostenible y la resiliencia de la economía.

No obstante, para lograr simulaciones realistas de dichos escenarios, las suposiciones realizadas deben basarse en cálculos y estimaciones ajustadas a la realidad. Esto implica considerar datos precisos sobre el entorno y el clima local, así como la evolución y las tendencias de los fenómenos medioambientales relevantes, tales como cambios en los patrones de precipitación, eventos extremos y modificaciones en las temperaturas. Solo a través de un enfoque riguroso y científicamente fundamentado se pueden obtener resultados confiables que respalden la toma de decisiones en el diseño y la construcción de infraestructuras resilientes frente a los desafíos medioambientales actuales y futuros.

Existen herramientas como los modelos climáticos globales que ayudan a pronosticar y simular escenarios de cambio climático, considerando variables como temperatura superficial, precipitación total, evaporación, energía potencial, flujos de calor, viento, entre otros. Según Moya “Los modelos climáticos globales son capaces de reproducir bastante bien la distribución a gran escala de las principales variables climáticas y simulan de forma muy aceptable, los grandes rasgos del cambio climático observado. Gran parte de ellos coinciden cuantitativamente con muchos aspectos del cambio climático futuro.” (Universidad Continental, 2015).

Determinar los escenarios climáticos futuros a los que un proyecto podría estar sometido permite identificar información importante para estimar riesgos a los que las estructuras podrían estar expuestas. Son muchos los proyectos que deben contemplar este tipo de análisis, por ejemplo, el diseño de un sistema de drenaje debe considerar la demanda futura del mismo, con el propósito de garantizar su funcionamiento durante el periodo de diseño. También este tipo de información es útil para la gestión hidro económica de cuencas y la identificación de zonas expuestas a fenómenos como inundaciones o sequias. Actualmente en la gran mayoría de proyectos no se contemplan las variaciones ambientales a las que estarán sometidas las estructuras y por lo tanto carecen de estrategias que permitan gestionar los riesgos y minimizar sus consecuencias.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo podría la estimación de variaciones de precipitación mediante modelos climáticos regionales para la zona del Catatumbo convertirse en un insumo útil para la toma de decisiones en la región?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar las variaciones de precipitación en la zona del Catatumbo mediante el uso de modelos climáticos regionales para establecer patrones climáticos locales futuros.

1.3.2 Objetivos específicos

Identificar precipitaciones futuras del modelo regional MIROC5 en el Catatumbo para establecer correlaciones con información histórica meteorológica en la región.

Determinar escenarios futuros mediante la generación de mapas de distribución de precipitación en la zona del Catatumbo considerando correlaciones históricas con el modelo MIROC5.

Interpretar representaciones graficas futuras del comportamiento de la precipitación en Catatumbo según el modelo climático regional MIROC5 para generar conclusiones que puedan servir como herramientas en la toma de decisiones.

1.4 Justificación

En relación con lo detallado en este documento, el cambio climático trae consecuencias devastadoras a las zonas más vulnerables, afectando el normal desarrollo de las comunidades y su ambiente. Por consiguiente, es pertinente realizar control de las mediciones de variaciones provocadas por el cambio con el propósito de prevenir mayor incidencia de éstas. Además, deben ser identificadas particularmente estando delimitadas en determinada zona y tiempo.

Como se afirma anteriormente, es esencial reconocer el valor de las obras hidráulicas como estructuras de control y regulación, que faciliten una seguridad hídrica a cualquier nivel social, ambiental y económico, garantizando un espacio saludable y productivo, y que al tiempo asegure un entorno natural protegido y mejorado.

Por lo anterior, es evidente la importancia de tener información de factores ambientales que podrían afectar un proyecto ingenieril, siendo inevitable la presencia de éstos como riesgos puntuales a los proyectos y el entorno de las obras civiles, mencionando los más difíciles de controlar como lo son las inundaciones, deslizamientos, huracanes, etc., debido a que están fuera del control humano.

En Colombia, se viene haciendo un seguimiento riguroso a dos variables que marcan las tendencias de cambio climático inducidas tanto por factores naturales como por cambios que han generado las actividades humanas del planeta, como son la temperatura y la precipitación. (Torres et al., 2015). No obstante, se carece de información específica que permita la determinación de escenarios prospectivos de cambio climático, siendo así una limitante a la hora de proyectar distintas obras de ingeniería en la nación, y concretamente en la zona de estudio de este proyecto: el Catatumbo, una subregión colombiana ubicada en el noreste del departamento de Norte de Santander, que por su relevancia e influencia nacional debido a su riqueza en biodiversidad, clima, recursos naturales, hace ver su potencial desarrollo para el país; sin embargo, el conflicto armado y la violencia han hecho que sea una región un tanto olvidada por el Estado.

La capacidad productiva del Catatumbo es destacada repetidamente por diversos especialistas, debido a que la agricultura es el sector predominante en la economía rural de la zona. De aproximadamente 1.136.137 hectáreas que comprende el territorio, el 14.7 % posee un potencial agrícola, el 1.7 % se destina a ganadería y el 0.4 % es propicio para actividades forestales. El restante 56.8 % se encuentra catalogado como una zona de producción-protección, lo que implica que es posible llevar a cabo actividades productivas, siempre y cuando se formulen planes estratégicos que garanticen la sostenibilidad del territorio. La actividad agrícola se centra en diez productos, en la categoría de cultivos permanentes, resaltan el café, la palma de aceite y el cacao, y en la categoría de cultivos temporales están yuca, plátano, frijol, maíz, cebolla, tomate y piña. (Jairo Delgado Mora et al., 2016)

En cuanto a la actividad ganadera, según el IGAC solo el 1.7 % del suelo de Catatumbo es capacitado para esta actividad, pero se vio que para el año 2010, el 25.1% de la tierra estaba ocupada por pastos y herbazales. Se puede afirmar que la ganadería o la siembra de pastos y herbazales plantea uno de los desafíos más importantes para cualquier iniciativa productiva que se quiera emprender en el Catatumbo. (Jairo Delgado Mora et al., 2016)

Es así que se hace necesario realizar una evaluación e identificación, haciendo uso de métodos de investigación cuantitativa como modelos climáticos, con el propósito de contribuir a la gestión integral del territorio, la toma de decisiones informada y la preparación ante posibles impactos del clima en diversos sectores, desde la agricultura hasta la planificación urbana y la protección ambiental. Teniendo en consideración lo anterior, sumado a la ubicación geográfica

de nuestra alma máter que se encuentra en esta extensión, se estableció como área de estudio el Catatumbo.

Una de las principales características de este proyecto es el uso del modelo MIROC5, correspondiente al grupo de modelos incluidos al CMIP5, teniendo en cuenta la disponibilidad de descarga de datos, así como su comportamiento en el territorio colombiano. Universidades colombianas realizaron estudios que aprueban GCM MIROC5 para Colombia, donde especifican sobre estimación en ciertas zonas del país y correlación alta en el área de los Andes Colombianos. (Estupiñan, 2018)

1.5 Delimitaciones

1.5.1 Operativa

La obtención de datos para realizar esta investigación se hará mediante Projeta, plataforma brasileña de proyecciones de cambio climático para américa del sur regionalizados por el modelo Eta. Teniendo acceso amplio y flexible a información de diversos parámetros disponibles como la temperatura superficial, precipitación total, evaporación, energía potencial, flujos de calor, vientos; de igual forma, se realizará la extracción de datos históricos de las estaciones meteorológicas a través de la plataforma IDEAM. Toda esta información será recolectada con el fin de aplicarla a simulaciones regionales.

1.5.2 Conceptual

Se tendrán en cuenta como delimitación conceptual los siguientes términos, que servirán de apoyo y de base para el proyecto: Cambio climático, Modelo Climático global, MIROC5, pronóstico de precipitaciones, Estimación.

1.5.3 Geográfica

Se realizará la determinación de escenarios prospectivos de cambio climático en la zona de El Catatumbo, subregión colombiana ubicada en el noreste del departamento de Norte de Santander.

Figura 1

Ubicación geográfica del Catatumbo



Nota: La figura muestra la ubicación geográfica de la zona del Catatumbo. *(OCHA, 2018)*

1.5.4 Temporal

Se estima un tiempo aproximado para su desarrollo de 6 meses a partir de la aprobación del anteproyecto.

Capítulo 2. Marco referencial

2.1 Marco histórico

A lo largo de la historia, dados los cambios climáticos que se presentan en todo el mundo, se han venido analizando diversas variables que contribuyen a estas variaciones y las zonas afectadas. En este contexto, en la región asiática, se llevó a cabo una investigación conjunta por el Instituto Nacional de Estudios Ambientales (NIES), el Centro de Investigación del Sistema Climático (CCSR) de la Universidad de Tokio y el Centro de Investigación Fronteriza para el Cambio Global (FRCGC): "Simulaciones de cambio climático con un GCM acoplado océano-atmosfera llamado modelo para la investigación interdisciplinaria sobre el clima: MIROC"; en la que se realizó una serie de experimentos para el análisis del cambio climático histórico observado y la simulación de escenarios de cambio climático futuros teniendo en cuenta diversos factores antropogénicos, mediante el Modelo de Circulación General (GCM) CSR/NIES/FRCGC versión 5.7, basado en el CCSR/NIES AGCM: MIROC. Con respecto a los resultados de precipitación, se pudo deducir una acentuación del ciclo hidrológico a causa del calentamiento de la temperatura media global del aire en la superficie (SAT) induciendo a aumentos de agua precipitable (vapor de agua integrado en columna). (*[PDF] Climate Change Simulations with a Coupled Ocean-Atmosphere GCM Called the Model for Interdisciplinary Research on Climate: MIROC | Semantic Scholar*, 2007)

Igualmente, en esa misma zona, autores japoneses realizaron una investigación enfocada en las simulaciones climáticas utilizando la versión actualizada, MIROC5, del Modelo para la

Investigación Interdisciplinaria sobre el Clima (MIROC): “Control convectivo de ENOS simulado en MIROC”, en el que se examina la notable perceptibilidad del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en el esquema de convección de cúmulos. A pesar de utilizar una versión provisional de MIROC5 en este estudio, llamada MIROC5i, se consta que sus diferencias son menores y que no son de relevancia para la simulación climática con respecto al original. En esta investigación, se llevó a cabo cuatro experimentos con valores variables del parámetro λ, que afecta la eficiencia de la tasa de arrastre en los cúmulos, indicando que la amplitud de ENOS oscila en el rango de 0,6 a 1,6 K, resultando así una capacidad de simulación de ENOS más realista, en comparación con versiones anteriores del modelo, abriendo paso al estudio de mecanismos para el posible control convectivo de ENOS. (Watanabe et al., 2011)

Ahora bien, se encuentra la investigación elaborada por los autores Janeet Sanabria, Jose Marengo y Maria Valverde: “Escenarios de Cambio Climático con modelos regionales sobre el Altiplano Peruano (Departamento de Puno)”, la cual tuvo como objetivo la evaluación y proyección de cambios climáticos mediante tres modelos climáticos regionales como ETA CCS, HadRM3 y REgCM3, se analizaron la precipitación y la temperatura. Haciendo una validación del clima presente con el periodo comprendido entre 1961-1990 para luego analizar las simulaciones futuras entre 2071-2100. Dando como resultado que, entre los tres modelos, el que mejor se desempeñó en la proyección de la precipitación de la zona en cuanto a estacionalidad y ciclo anual de esta variable fue el modelo HadRM3. (Sanabria et al., 2009)

Del mismo modo, en la investigación realizada por Reyes Gómez, Núñez López, Viramontes Olivas y Quiñonez Quintana en el año 2010, “Aplicación y evaluación del modelo

MM5 para pronóstico de lluvia y temperatura en Chihuahua, México", se enfoca en la adaptación y validación de un sistema de pronóstico de condiciones extremas de temperatura y precipitación, para condiciones locales como el estado, por medio del MM5, modelo de meso-escala. Se establecieron dos dominios para el pronóstico de temperatura y lluvia con este modelo; el dominio uno (D1 denominado madre) que comprende todo México, en el que se contiene al segundo dominio (D2 o anidado) que comprende localmente el estado de Chihuahua. Por lo tanto, para reforzar su confiabilidad en precipitaciones, por sitio y en el total de ellos se estimó la correlación de Pearson, dando como resultado el alto grado del modelo para pronosticar lluvias hasta por 48 h en Chihuahua. En síntesis, en el estado de Chihuahua el modelo de meso-escala MM5 logra una exactitud estadística confiable para el pronóstico de lluvias y temperaturas en condiciones extremas. Aunque, se debe considerar en un futuro cercano, la validación y adaptación de modelos como el WRF, ETA, para constatar el pronóstico con el modelo MM5 y así evitar consecuencias derivadas a los fenómenos hidrometeorológicos como las oleadas de frio y calor e inundaciones. (Núñez-López et al., 2010).

Por otro lado, igualmente en México, pero en el estado de Coahuila se efectuaron proyecciones climáticas usando el modelo PRECIS bajo dos escenarios de emisiones, cuyo enfoque fue encaminar a la estimación de las consecuencias del calentamiento global respecto a dos escenarios de emisiones: A2 (condición regional sin restricciones) y B1 (condiciones globales con ciertas medidas restrictivas y de control); y la relación que sostienen con las actividades agrícolas dados los cambios climáticos. Para esto, se implementó el modelo numérico regional de alta resolución PRECIS (Providing REgional Climates for Impact Studies) para determinar proyecciones de temperatura y precipitación de los años 2020, 2050 y 2080, con

las cuales se buscó encontrar cualquier variación en las fórmulas climáticas según la reclasificación del clima. La clasificación inicial se hizo por el método de Köppen, modificado por Enriqueta García, mediante el análisis del clima con datos de 40 estaciones meteorológicas ubicadas en el estado, usando datos históricos de precipitación y temperatura del periodo comprendido desde 1961 a 1990. (María et al., 2013).

También, estas dos variables las analizaron Moya Álvarez, et al., principalmente evaluaron el modelo climático global MIROC5 y se realizaron estimaciones de temperaturas y precipitaciones para las zonas sur y norte del Perú, en el que inicialmente se toman datos de salida "historical" del modelo, utilizado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en la fase cinco (CMIP5) del proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados, para la verificación para el tiempo presente, la cual permitió el ajuste de las simulaciones para las dos variables hacia los años 2030, 2070 y 2100. Gracias a todo ello, se presenta que el modelo estima anomalías de la precipitación media anual hacia 2100, así como un decrecimiento de esta variable para las localidades del sur y un incremento para las localidades en el norte. Resultados que coinciden con los publicados en la Segunda Comunicación Nacional. (Universidad Continental, 2015).

Igualmente, la investigación realizada en Ecuador "Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador", bajo distintos escenarios de cambio climático, se utilizaron cuatro modelos climáticos globales del proyecto CMIP5, seleccionados bajo un cálculo de precisión con respecto a los demás; bajo los escenarios de Cambio Climático del Quinto Reporte de Evaluación (AR5) del IPCC, para proyecciones de precipitación y temperatura.

Dichos modelos arrojaron una correcta representación del clima del país, mostrando poca diferencia entre cada modelo. (Porras et al., 2016).

En cuanto a Colombia, se realiza una validación espacial y temporal de la precipitación de unos de los modelos del CMIP5 en el país en el periodo histórico, con el objetivo de tener una base de datos sólida para disminución de riesgos e incertidumbres, en la investigación "Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia". Frente a este análisis, se logran reconocer los modelos y trimestres que mejor representan esta variable en determinada región natural nacional. Para la representación más cercana del ciclo anual de precipitación se concluye el modelo CMCC-CMS de todos los modelos analizados del CMIP5. (Bonilla-Ovallos & Mesa Sánchez, 2017).

En el caso de Chile, en el proyecto de investigación "Simulaciones climáticas regionales", se establece la generación de proyecciones climáticas por medio de la modelación climática regional. Dichas simulaciones se realizaron utilizando el modelo climático regional Regional Climate Model System versión 4 (RegCM4) para un periodo histórico comprendido entre 1979-2015 y uno futuro ajustado a dos escenarios de forzamiento antrópico diferente entre 2016-2050. Se concluye que dicha herramienta computacional (RegCM4) presenta simulaciones adecuadas de clima y ciclos tanto de temperatura como de precipitación en las regiones analizadas. (Bozkurt et al., 2018).

En Brasil, en la investigación "Proyecciones de cambio climático en tres regiones metropolitanas del sureste de Brasil utilizando el modelo climático regional no hidrostático Eta

con una resolución de 5 km", se realizó una evaluación del cambio climático en tres regiones del Sudeste del país (Rio de Janeiro, São Paulo y Santos) por medio de las proyecciones del Modelo Climático Regional Eta (RCM). Inicialmente se evaluaron las simulaciones para el periodo histórico comprendido entre 1961 y 1990 de una mayor resolución. Seguidamente del análisis para el periodo 1961-2100 de simulaciones de 5 km como resultado del segundo anidamiento de reducción de escala en las simulaciones HadGEM2-ES RCP4.5 y RCP8.5. Es así que al compararlas se logra observar que los patrones espaciales de precipitación y temperatura de las simulaciones concuerdan. (Lyra et al., 2018).

Del mismo modo, en el proyecto "Evaluación de Modelos Climáticos Regionales para representar la precipitación en la provincia de Buenos Aires", se llevó a cabo la evaluación del desempeño de seis modelos climáticos regionales (RCMs) del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados, ya de la Fase 5 (CMIP5), para la representación de las características espacio-temporales de la precipitación observada en la provincia de Buenos Aires, Argentina. Para lograr todo ello, se realizó una comparación, en 15 estaciones meteorológicas, de intensidad de precipitación y probabilidad de día húmedo por un espacio de 35 años comprendido entre 1970 y 2005. Dando como resultado que los mejores rendimientos para la simulación de precipitaciones fueron los modelos CCSM4 y MRIC6CM3, arrojando una mayor precisión para futuras evaluaciones de cambio climático en la región. (Vargas et al., 2019)

Ahora bien, en la región del Orinoco colombiano, se evaluaron las mismas variables en la investigación "Análisis de la precipitación y la evaporación en el Orinoco colombiano según los modelos climáticos regionales del experimento CORDEX-CORE", y se plantean como objetivo

que la precipitación y evaporación total mensual sea representada para una cuenca hidrográfica ubicada en la región. Para lograrlo, se incorporaron datos de fuentes como Global Precipitation Climatology Center (GPCC), el reanálisis atmosférico (ERA5), Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS), y Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM). Por otra parte, se hizo uso de métodos gráficos y cuantitativos para comparar los ensambles de los modelos y las observaciones. Como resultados, se evidencia la correcta representación en temporalidad y magnitud de los valores promedio de precipitación, por el ensamble del modelo RegCM, al mismo tiempo que el ensamble del modelo REMO muestra un mejor resultado en temporalidad de valores promedio de evaporación total solamente. (Florian-Vergara et al., 2021).

Se destaca también, la "Comparación de series mensuales de precipitación y temperaturas de los Modelos CMIP6 para Guatemala", en la que se realizó una simulación del clima de Guatemala en el periodo comprendido entre 1971- 2014, y consistió en la comparación de las métricas de 37 modelos climáticos globales (GCM) de la Fase 6 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6). La Unidad de Investigación Climática de la Universidad del este de Anglia (CRU) fue la encargada de suministrar datos de temperatura y precipitación mensual para su comparación. Al finalizar, se concluye que los modelos tienden a sobreestimar ligeramente la temperatura y subestimar la precipitación. También, el modelo con mejor habilidad fue el modelo IPS-CM6A-LR para precipitación, y para temperatura fue el CIESM. (Rivera et al., 2022).

De la misma forma, los autores de la investigación “Evaluación horaria WRF para eventos de precipitación extrema”, evidencian la aplicación del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) en la verificación de la precipitación horaria para eventos de precipitación extrema (EPE) registrados en el noreste de España, con el objetivo de evaluar su rendimiento de acuerdo a la clasificación de las estaciones con EPE registradas según la distribución horaria de precipitación. Es así que se formuló un conjunto de simulaciones WRF con tres esquemas de microfísica y dos parametrizaciones de capa límite planetaria (PBL). Adicional a esto, se emplearon diversas medidas estadísticas de bondad de ajuste y distribuciones de precipitación espacial y temporal con el mismo fin. Dando como resultado la evidencia de que los modelos poseen imperfectos en la representación de las distribuciones temporales y espaciales de la precipitación en EPE, debido a las características de los eventos. Las EPE provenientes de extensas lluvias mostraron un mejor desempeño que las EPE en puntos específicos espaciotemporales. Resultados que siguen siendo similares con respecto a estudios anteriores. No obstante, no son recomendable las comparaciones entre ellos ya que existe una variabilidad de métodos y áreas de estudio. (Merino et al., 2022).

2.2 Marco teórico

2.2.1 Cambio climático

El cambio climático hace referencia a la variación del clima a nivel global, siendo producto de factores naturales y de la actividad humana, como lo son los daños provocados por la quema de petróleo, la perdida de bosque y otras actividades relacionadas con la industria, el

transporte y la agricultura. La retención del calor del sol en la atmósfera debido a los daños mencionados, es conocida como el fenómeno de efecto invernadero, los gases que hacen esto incluyen dióxido de carbono, óxido nitroso y metano. (IDEAM, 2017)

El calentamiento global afecta directamente los extremos meteorológicos y climáticos en todas las regiones del mundo. Evidencia de estos cambios significativos son las olas de calor, fuertes lluvias, sequias, inundaciones y ciclones tropicales. Generando impactos adversos en la seguridad alimentaria, salud, economía, daños en la naturaleza, entre otros. Datos como los relacionados en los periodos de 1850-1900 y 2010-2019 en investigaciones con base a observaciones y modelos climáticos determinaron que el calentamiento fue ocasionado netamente por humanos. (IPCC, 2022).

2.2.2 Escenarios climáticos

Los escenarios de cambio climático se pueden utilizar para analizar las variaciones en el clima, en particular para construir modelos climáticos, permitiendo evaluar un margen de incertidumbre del análisis.

La entidad encargada de fortalecer, estudiar y contrastar los modelos es el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), con base en exploraciones y modelaciones relacionadas por las diferentes agrupaciones científicas, ellos presentan informes de evaluación con un enfoque en la parte científica actualizada (grupo de estudio I), un estudio

de impactos sobre el cambio climático (grupo de trabajo II) y una propuesta de mitigación (grupo de trabajo III).

Los escenarios y trayectorias modeladas se implementan con el fin de indagar las emisiones futuras, los impactos, las estrategias de mitigación y para esto se basan en una variable de suposición. Las proyecciones obtenidas son cuantitativas, cabe aclarar que no son predicciones ni previsiones. Las trayectorias modeladas globalmente, teniendo en cuenta las que se apoyan en puntos de vista rentables, contienen resultados particulares por región y tienen que evaluarse con respecto a las suposiciones específicas. En su mayoría no aclaran directamente las suposiciones sobre la equidad global, la justicia ambiental o la distribución del ingreso intrarregional. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático adopta un enfoque neutral a los escenarios evaluados, que no se aplica a todos los futuros posibles. (IPCC, 2022).

La plataforma Projeta es un instrumento que brinda información sobre las trayectorias de acceso a diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) denominado RCP (Representative Concentration Pathways), se utiliza para representar los posibles escenarios climáticos futuros. Los RCP abarcan desde un escenario de mitigación (RCP2.6) a uno de emisiones de referencia muy alto (RCP8.5), incluyendo otros dos escenarios de estabilización media (RCP4.5) y (RCP6.0). Las trayectorias RCP usadas por la plataforma Projeta son las siguientes:

- RCP 2.6: representa un futuro en el que las emisiones de gases de efecto invernadero se reducen y se consolidan alrededor de 2.100, lo que restringe el calentamiento global por debajo de los 2°C en comparación con los niveles preindustriales (se relacionan con las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmosfera previa al inicio de la era industrial, que tuvo lugar en el siglo XVIII).

- RCP 4.5: representa un futuro en el que las emisiones de gases de efecto invernadero incrementan hasta mediados del siglo y luego disminuyen, lo que resulta en un calentamiento global de aproximadamente de 2.4°C en comparación con los niveles preindustriales.

- RCP 6.0: representa un futuro en el que los gases de efecto invernadero incrementan a lo largo del siglo XXI y logran su punto máximo cerca del año 2.080, dando como consecuencia un calentamiento global de unos 3°C por encima de los niveles preindustriales.

- RCP 8.5: que representa un futuro en el que, sin medidas de mitigación significativas, las emisiones de gases de efecto invernadero aumentan durante todo el siglo XXI, lo que provoca un calentamiento global de unos 4.5°C por encima de los niveles preindustriales.

Estas trayectorias RCP son empleadas para predecir los impactos potenciales del cambio climático en varios sectores como la agricultura, la salud, la energía y la infraestructura, y para

evaluar las posibles opciones de mitigación y adaptación al cambio climático. (van Vuuren et al., 2011). En la Figura 2 se muestra el comportamiento de las concentraciones de emisiones GEI para cada trayectoria RCP.

Figura 2

Comportamiento de la concentración de emisiones GEI

Escenario	Forzamiento Radiamento (W/m^2)	CO_{2eq} atmosférico (ppm)	Anomalía de temperatura	Trayectoria	Equivalente para escenarios SRES (AR4)
RCP8.5	8.5	>1370	4.9	2100, en aumento	SRES A1F1
RCP6.0	6.0	850	3	Estabilización después de 2100	SRES B2
RCP4.5	4.5	650	2.4	Estabilización después de 2100	SRES B1
RCP2.6	2.6	490	1.5	Picos antes de 2100 y después declina	Ninguno

Nota: El gráfico muestra los cuatro caminos de Forzamiento Radiamento (FR) seleccionados por el IPCC para evaluar el comportamiento de la concentración de emisiones GEI en el planeta a 2100. (Torres et al., 2015)

2.2.3 Modelo climático

Actualmente los modelos climáticos son un instrumento indispensable para determinar y pronosticar el comportamiento, evolución y desarrollo de los eventos meteorológicos. Resulta preciso implementar modelos climáticos regionales y modelos globales de alta resolución

mejorando de esta manera la resolución espacial, con el fin de analizar detalladamente el clima simulado. (Blázquez, 2011)

El IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) utiliza modelos climáticos como herramientas que permiten la simulación del clima actual y la proyección de posibles escenarios futuros, emplea una serie de ecuaciones y algoritmos matemáticos para simular el comportamiento de este en Colombia. Los modelos se basan en datos observados y medidas climáticas, así como en la información proporcionada por los satélites meteorológicos y otros instrumentos de monitoreo. Tiene en cuenta una serie de factores como la temperatura, la precipitación, la humedad y la velocidad del viento, se utiliza para la predicción del clima a corto, mediano y largo plazo en todo el territorio. Información que resulta importante, ya que permite la toma decisiones informadas en la gestión de recursos naturales, la planificación de infraestructuras, la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático. (Pabón, 2003)

MIROC5 juega un papel importante en la actualización de los esquemas de parametrización en el clima del modelo, mejorando así la resolución del modelo. A partir de los perfeccionados esquemas de predicción de MIROC5, se puede conseguir la propiedad media de las nubes con similitud a las mediciones satelitales. Este modelo resalta una sensibilidad climática de equilibrio de 2.6 K siendo 1 K menor a la de MIROC3.2, puede deberse a la retroalimentación negativa de las nubes bajas ante el aumento de las concentraciones de CO2, que resulta opuesto al de MIROC3.2. Con base en el modelo MIROC3.2 se desarrolló MIROC5,

sin embargo, varios de los esquemas se han sustituido de la siguiente manera, de acuerdo a los autores (Watanabe et al., 2010):

a. Componentes de la atmósfera

1. Renúcleo dinámico

Se reemplaza usando una coordenada vertical en MIROC3.2, donde el pico del modelo era de aproximadamente 8 hPa en resolución media. Una coordenada hibrida s2p de MIROC5 es compartida por nuestro modelo del sistema Tierra (ESM), que se adopta con el límite del modelo de 0.003 hPa. Para MIROC5 la resolución vertical estándar de la atmosfera es de 40 niveles hasta 3hPa, estando entre MIROC3.2(madres) con 20 niveles y MIROC3.2(hires) con 56 niveles.

2. Radiación

Para MIROC5 la estimación de la trasferencia radiactiva se realiza a través de una versión actualizada del esquema de distribución k empleado en MIROC3.2. Este nuevo esquema tiene mejoras tanto en la absorción de línea como en la absorción continua, gracias a un incremento en el número de bandas de absorción de 18 a 29. Estas modificaciones forman en conjunto un cálculo más exacto del calentamiento radioactivo, al mismo tiempo que mitigaron una tendencia fría cerca de la tropopausa, identificada previamente en MIROC3.2.

3. Convención de cúmulos

En MIROC5 el esquema de cúmulos, se trata de un modelo de pluma de arrastre, que presenta variaciones en la tasa de arrastre lateral en función del ambiente vertical próximo. El esquema presenta sensibilidad a los perfiles de temperatura y humedad, así como su impacto en la climatología de modelo, también tiende a generar tasas de arrastre más elevadas cerca de la base de la nube. La introducción de una tasa de arrastre dependiente del estado, conduce a una supresión efectiva de la convección profunda cuando el entorno presenta sequedad en la troposfera libre, eliminando así una función desencadenante artificial para la profundidad.

4. Nube y microfísica de la nube

Se llevaron a cabo dos modificaciones significativas en MIROC5 con el fin de mejorar la representación de la retroalimentación entre las nubes y su radiación: la introducción de un esquema LSC de pronóstico y un esquema microfísico simple. Este primero, soluciona las ecuaciones de predicción para la varianza y la asimetría a una escala de subred de una cantidad conservadora vinculada a la temperatura y al agua total, por ende, aborda diversos regímenes de nubes que exhiben distintas propiedades ópticas. En cuanto al segundo, se ocupa directamente de los procesos asociados a la lluvia fría y la cálida, tales como nucleación, deposición y sublimación, formación de burbujas, fusión del hielo y la captura de gotas de lluvia al caer el hielo, entre otros.

5. Turbulencia

Tipo Mellor - Yamada es el esquema de difusión vertical, con un nivel de cierre de 2.5 pero mejorado en varios aspectos. Fue diseñada especialmente para modelos de gran nivel, la escala maestra de longitud, L, que se determina en base a la media armónica de tres escalas de longitud (LS, LT y LB), las cuales caracterizan la capa superficial, la capa límite convectiva y la capa estratificada estable, respectivamente. Además, se han incorporado los efectos de corte y flotabilidad en los términos de covarianza de presión, y utilizando resultados extensos de simulación de remolinos, fueron reevaluadas las constantes de cierre.

6. Aerosoles

Conocido como Modelo de Transporte de Radiación Espectral para Especies de Aerosoles (SPRINTARS) en MIROC5, realiza pronósticos sobre las proporciones de mezcla en masa de los primordiales aerosoles en la troposfera, tales como carbonosos (carbono negro y materia orgánica), sulfatos, polvo de suelo y sal marina, gases precursores de sulfato (dióxido de azufre) y sulfato de dimetilo (DMS). Los procesos relacionados con el transporte de aerosoles abarcan emisiones, advección, difusión química del azufre, deposición húmeda, deposición seca y sedimentación gravitacional. Mediante parámetros internos del modelo se calculan las emisiones de polvo de suelo, sal marina y DMS, mientras que para otras fuentes de aerosoles se emplean inventarios de emisiones externas. Se integra SPRINTARS con los esquemas de microfísica de radiación y nubes para evaluar los efectos directos e indirectos de los aerosoles.

b) Componente oceánico

1. Características generales

COCO versión 4.5 es el modelo de circulación general oceánica usado en MIROC5, que tiene un cambio el sistema de coordenadas con respecto a la versión anterior. En este modelo las ecuaciones fundamentales se formulan en una coordenada horizontal curvilínea generalizada, que se lleva a cabo con la transformación del sistema de coordenadas latitud y longitud, así como los meridianos y círculos de la latitud, empleando la proyección estereográfica polar y el mapeo conforme. El número de niveles verticales ha aumentado de 43 a 49 después del modelo MIROC3.2 (madres) y la resolución horizontal sigue equivalente.

2. Parametrización física

Para COCO4.5 se realizaron actualizaciones en esquemas de parametrización, pero no se ha modificado los enfoques para la convección vertical, la capa límite inferior, la difusión del fondo y la penetración de la radiación de onda corta. Se ha aumentado la difusividad de fondo a 2,0310 metros, con el fin de simular la formación de agua intermedia del Pacifico Norte. La representación del proceso de mezcla turbulenta sigue la parametrización propuesta en la versión anterior, no obstante, se ha ajustado la definición del número de Prandtl turbulento.

c) Componente de hielo marino

Se pronostica la concentración de hielo marino, el grosor del hielo, la profundidad de la nieve y la energía de fusión del hielo para MIROC5 en diversas categorías dentro de una celda

de cuadrícula. El modelo de hielo marino evalúa el progreso del hielo marino a una escala de subcuadrícula, siguiendo la ecuación fundamental de Thorndike et al. (1975) y de acuerdo con la metodología de Bitz et al. (2001), se discretizan la distribución del grosor y la evaluación del término de redistribución mecánica. Cada cuadrícula horizontal del hielo marino se divide en cinco categorías, adicionalmente de las áreas de aguas abiertas.

1. Termodinámica

Se determina el crecimiento, derretimiento y variación de temperatura del hielo marino utilizando el esquema termodinámico de conservación de energía propuesto por Bitz y Lipscom (1999). Este esquema se aplica con una única capa de hielo marino, excluyendo la temperatura de la nieve bajo la suposición de que la nieve carece de capacidad calorífica, la salinidad del hielo marino se mantiene constante en 5 psu y la radiación solar no penetra en la nieve ni en el hielo. Los coeficientes de albedo establecidos para una superficie de hielo expuesto son de 0,8 en la banda visible y 0,65 en la banda infrarroja cercana. En el caso de una superficie cubierta de nieve, el albedo varía en función de la temperatura, tomando en cuenta la existencia de la capa parcial de nieve, específicamente en condiciones de temperaturas relativamente altas.

2. Dinámica

Dentro del modelo de hielo marino de múltiples categorías y la concentración de hielo marino para cada categoría, son percibidas a través de la velocidad de pronóstico del hielo, la cual es uniforme para todas las categorías en una cuadrícula. Para calcular el término de

advección ascendente se utiliza un esquema simple de primer orden. Por lo demás, los esquemas dinámicos se mantienen consistentes con la versión anterior, con excepción de las modificaciones en los parámetros tales como, la fuerza del hielo por unidad de espesor y concentración se ha fijado en 2,0310 SUST, y el coeficiente de resistencia hielo-océano ha sido incrementado a 0,02.

d) Componente terrestre

Se incorpora una versión actualizada del modelo de superficie terrestre denominado Tratamiento mínimos avanzados de interacción superficial y escorrentía (MATSIRO) para MIROC5, que pronostica la temperatura y el contenido de agua en seis capas de suelo hasta una profundidad de 14 metros, abarcando también una capa de dosel y tres de nieve. Esta nueva iteración de MATSIRO, ha implementado un tratamiento en mosaico para representar la fracción de subcuadrícula de distintos tipos de superficie del terreno. La cuadrícula de superficie terrestre se divide en tres mosaicos en la trayectoria de control: vegetación potencial, tierras de cultivo y cuerpos de agua. Cada mosaico calcula todas las variables de pronóstico y diagnóstico, y los flujos en la superficie terrestre se promedian implementando sus pesos fraccionarios.

1. Submodelo lago

Se realiza el cálculo de los movimientos de agua y calor en la superficie de los lagos como parte de los mosaicos en una cuadrícula. Se pronostica para la capa superficial la temperatura y la masa del agua, con un espesor mínimo de 1 metro y cuatro capas

subsuperficiales. Estos se logran a través de procesos de difusión térmica y conversión de masa, teniendo en cuenta el vuelco vertical, la evaporación, la precipitación y el flujo de entrada y salida de los ríos. Permanecen constantes a lo largo del tiempo, la distribución y fracción de los lagos.

2. Ruta del río

El modelo de trayectoria del río sigue siendo idéntico al utilizado en MIROC3.2, con la única diferencia de que la red fluvial ha sido actualizada para la resolución T85 y se ha modificado el método para calcular el flujo de los ríos.

3. Albedo de nieve y hielo

En MATSIRO se tiene en cuenta el impacto del envejecimiento de la nieve en el albedo de la superficie. De los tres coeficientes que influyen en el aumento de la edad adimensional del nivel, aquel que representa el efecto de la suciedad se incrementa proporcionalmente a su concentración en la capa superficial de nieve. Este fenómeno restringe la relación observada entre el albedo de la nieve y la concentración de suciedad. La cantidad de suciedad se determina mediante el cálculo de los flujos de deposición de polvo y hollín en SPRINTARS. Debido a las notables diferencias en los coeficientes de absorción del polvo y el hollín, los flujos de deposición se ajustan multiplicándolos por sus respectivos factores de ponderación (0,012 y 0.988) para el polvo del suelo y para el negro de carbono, respectivamente. El resultado total se emplea como el depósito radiactivo eficaz de polvo y hollín.

2.2.4 El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)

El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), es un fenómeno climático natural de amplia magnitud que implica variaciones en la temperatura del océano en las zonas central y oriental del océano Pacífico ecuatorial, junto con alteraciones en la atmósfera que se encuentra sobre esta zona. El Niño y La Niña representan los aspectos oceánicos, mientras que la Oscilación del Sur constituye la componente atmosférica, razón por la cual se le denomina El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Este fenómeno, al modificar el estado climático, genera consecuencias importantes en la salud de la humanidad como resultado de los efectos causados en diversos factores, como la calidad del agua y del aire, el medio ambiente y la seguridad de la infraestructura de salud. El impacto más usual del fenómeno de El Niño en la región de América Latina, es el de producir estados más secos en el norte de Brasil y, en Centroamérica, el Norte de Perú, el Ecuador y las zonas norte y sudeste de América del Sur, fuertes precipitaciones. (*El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)*, 2023)

MIROC5 simula ENOS de manera más realista que los modelos anteriores, que producían un ENOS débil incluso con una resolución más alta. El nuevo MIROC emplea un tratamiento de pronóstico para la proporción de mezcla de agua y hielo de las nubes, así como la fracción de nubes, considerando procesos de lluvia fría y cálida. La validación de los campos de nubes del modelo utilizando datos satelitales recientes muestra que se simulan mejor en MIROC5 que en MIROC3.2. (Watanabe et al., 2010)

2.2.5 Método de interpolación

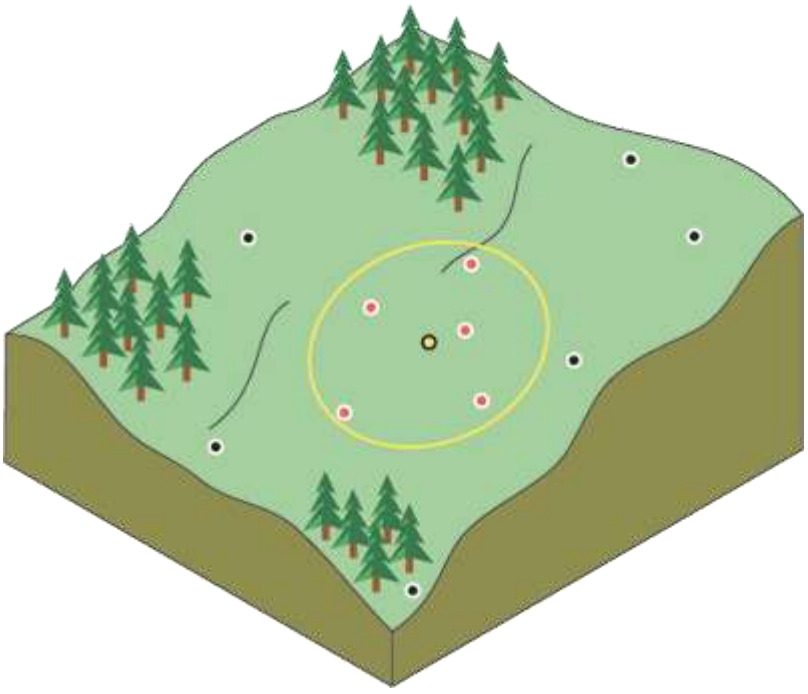
De acuerdo a lo descrito en (*Comprender el análisis de interpolación—ArcGIS Pro | Documentación*, 2016), la interpolación es un método matemático que permite la proyección de estimaciones a partir de una serie de datos de referencia. Una de sus características más notables es que permite la correlación de los objetos distribuidos espacialmente de esa misma forma, es decir, que valores cercanos tienden a tener similitud entre sí. Este procedimiento se aplica frecuentemente en la creación de un modelo de elevación utilizando un conjunto de datos de muestra.

Hay diversas formas de obtener una estimación para cada punto; cada una se conoce como modelo; los cuales tienen diferentes formas de analizar los datos generando cálculos distintos, según sea el propósito del tratamiento de éstos; por ejemplo, un modelo puede capturar de manera más efectiva la variabilidad local que otro. En ArcGis, estos modelos realizan estimaciones utilizando datos de muestra para todas las ubicaciones en un conjunto de datos ráster de salida, independientemente de haber o no tomado una medida en esa ubicación. Usualmente, las herramientas de interpolación son clasificadas en métodos determinísticos y de estadísticas geográficas. El primero de éstos, asigna valores a las ubicaciones según las medidas tomadas cercanas y en fórmulas matemáticas particulares que definen la uniformidad de la superficie generada. (*Descripción general del conjunto de herramientas Interpolación—ArcGIS Pro | Documentación*, 2016)

Inverse Distance Weighting (IDW), traducido al español como “Inverso De La Distancia Pondera”, es un método determinístico de interpolación que emplea una función inversa de la distancia, basándose en la premisa de que los objetos cercanos son más similares y, por ende, ejercen una mayor influencia sobre el punto que se está estimando. (Diego Murillo et al., 2012) En este método, la superficie que se está interpolando debe corresponder a una variable que modifica en función de la ubicación. (*Cómo funciona IDW—ArcGIS Pro | Documentación*, 2016)

Figura 3

Vecindad de IDW del punto seleccionado



Nota. La figura muestra cómo los puntos cercanos a uno influyen al interpolar por IDW. (*Cómo funciona IDW—ArcGIS Pro | Documentación*, 2016)

2.3 Marco conceptual

2.3.1 Precipitación diaria

Corresponde a la cantidad de agua (lluvia, nieve, granizo, etc.) que cae en una zona específica en un periodo de 24 horas. Que resulta importante para entender y estudiar las condiciones meteorológicas, el ciclo hidrológico y los fenómenos climáticos. La precipitación diaria puede variar según la ubicación geográfica, la estación del año y las condiciones climáticas locales. (Hulme, 1996)

2.3.2 Trayectoria de concentración

Conocida también como t de concentración de gases de efecto invernadero, es un escenario hipotético que describe cómo cambiarán las concentraciones de GEI en la atmósfera en el futuro en diversas suposiciones sobre emisiones y políticas de mitigación. (van Vuuren et al., 2011)

2.3.3 Variación climática

Concerniente al cambio natural en las condiciones climáticas en una región dada a escala global. Estas variaciones pueden darse en diferentes escalas de tiempo, desde cambios 69interanuales hasta cambios a largo plazo durante décadas. El cambio climático puede ser causado por una variedad de factores, que incluyen variaciones en la radiación solar, cambios en

las corrientes oceánicas, fenómenos meteorológicos naturales como El Niño y La Niña, y cambios en la actividad volcánica. (IPCC, 2022)

2.3.4 Distribución estadística

Uno de los principales objetivos de la estadística es la comprensión cuantitativa de un caso particular. Para esto se debe crear un modelo de esta realidad objeto de estudio, basado en la suposición de que las cosas reales son siempre más complicadas que cualquier modelo que se pueda construir. (Distribuciones de probabilidades, 2014)

2.3.5 Serie de datos climáticos

Conjunto de observaciones sistemáticas y registradas que cambian con el tiempo y representan diversas variables climáticas como presión atmosférica, viento, humedad, precipitación, temperatura, entre otras. Estas series de datos climáticos son recopiladas por estaciones, satélites y otras herramientas de medición. (Bustamante Lozano et al., 2013)

2.3.6 R

Lenguaje de programación utilizado mayormente en investigación científica, manipulación de datos, análisis estadístico, entre otros. Es de utilidad al momento de emplear técnicas estadísticas, tales como modelos de regresión lineal y logísticos, análisis de series de tiempo, agrupamientos, pruebas estadísticas clásicas, etc. Del mismo modo, permite generar

gráficos necesarios en una calidad alta para el análisis de datos trabajado. (*¿Qué es R? ¿Para qué sirve? Datademia*, 2021)

2.3.7 RStudio

Software libre que permite visualizar el programa R de una manera más fluida, siendo así una interfaz para usar R. Cuenta con la capacidad de dar lugar al orden y la visualización de los procesos generados con R de manera simultánea. (*RStudio para Estadística Descriptiva en Ciencias Sociales*, 2019)

2.4 Marco contextual

En el desarrollo del proyecto de investigación "ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES DE PRECIPITACIÓN MEDIANTE MODELOS CLIMÁTICOS REGIONALES PARA LA ZONA DEL CATATUMBO", se busca realizar una estimación de las variaciones de precipitación en la zona del Catatumbo para el periodo 2024-2074. Para lograrlo, se emplearán proyecciones climáticas provenientes de un modelo climático regionalizado, para lo cual se contempla llevar a cabo una corrección de sesgo mediante el análisis de datos de precipitación históricas específicas de la zona. Dicho análisis permitirá generar representaciones gráficas que faciliten la comprensión del comportamiento de la precipitación en el Catatumbo durante el periodo de estudio.

2.5 Marco legal

2.5.1 DECRETO 2811 DE 1974

En el artículo 8, definición y normas generales de política ambiental, menciona que la contaminación es un cambio en el medio ambiente causado por actividades humanas o naturales en forma de materia o energía en tal concentración o nivel que puede perturbar el bienestar y la salud de las personas, poner en peligro la flora y la fauna, deteriorar la calidad del entorno o los recursos. Asimismo, en el artículo 73, de la atmosfera y del espacio aéreo, indica que **e**s responsabilidad del gobierno mantener la atmosfera en buen estado, sin provocar molestias o daños que interfieran con la vida humana, animal o vegetal y recursos naturales renovables. En el artículo 189, usos urbanos, habitacionales e industriales, explica que, en los centros urbanos, las industrias que por su naturaleza puedan causar degradación ambiental, se ubicarán en un área determinada con el fin de no causar molestias a los residentes de las industrias vecinas, la ubicación geográfica tendrá en cuenta la dirección del viento, características del medio y emisiones no controlables. En el artículo 191, usos urbanos, habitacionales e industriales, señala que, en las zonas rurales, cuando se creen industrias que por su naturaleza puedan causar degradación ambiental, se examinará previamente el área, teniendo en cuenta factores geográficos, a fin de evitar emisiones o vertimientos no controlados que causen perturbaciones o daños al cuerpo humano, suelos, agua, aire, fauna y flora.

2.5.2 LEY 99 DE 1993

En el artículo 17, del instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, IDEAM. El IDEAM debe recopilar, analizar, investigar, procesar y transferir información sobre hidrológica, hidrogeológica, geográfica y meteorológica para el manejo y aprovechamiento de los recursos de la nación, brindando información pronostica, avisos y servicios de asesoramiento al público. En el artículo 49, de la obligación de la licencia ambiental, especifica que la ejecución de obras, el establecimiento de industrias o actividades que puedan ocasionar un deterioro significativo de los recursos naturales renovables o modificar de forma notoria el paisaje solicita Licencia Ambiental. En el artículo 83. atribución de policía, define que el Ministerio del Medio Ambiente y las Corporaciones Autónomas Regionales, quedan investidos a prevención de autoridades competentes, con el fin de imponer y ejecutar las medidas de policía, multas y sanciones establecidas por la ley según sea el caso.

Capítulo 3. Diseño metodológico

3.1 Tipo de investigación

Se realizará una investigación con enfoque cuantitativo de tipo descriptivo, en la que se recopilan y analizan datos de variables, para este caso precipitación. En este contexto, la asociación o correlación busca establecer una relación causal que pueda explicar el motivo detrás de los acontecimientos y su manifestación en una forma específica. Se usarán proyecciones climáticas resultantes de un modelo climático regionalizado, con el fin de analizar las representaciones gráficas generadas que facilitarán la comprensión del comportamiento de la precipitación en el Catatumbo durante el periodo de estudio.

3.2 Población y muestra

3.2.1 Población

La población usada en esta investigación abarca todos los datos arrojados por las bases de datos meteorológicas descargadas del IDEAM, específicamente de la zona del Catatumbo.

3.2.2 Muestra:

Mediante un análisis estadístico se determina una ventana de tiempo, establecida con un periodo de 25 años para el tratamiento de los datos, de igual manera, para ese mismo tiempo se

seleccionan solamente las estaciones climáticas de la zona de estudio que cuenten con mayor número de datos disponibles y de mejor calidad.

3.3 Análisis de datos históricos

Es necesario un análisis de consistencia para los datos históricos, en el cual se determina la prueba de t student y f de Fisher donde se verifica que la primera sea homogénea y la segunda sea congruente, esto aplicado para cada una de las estaciones. Seguidamente, se procesa esa información mediante la interfaz de RStudio, usando del lenguaje de programación, con el fin de rellenar los datos faltantes en caso de ser necesario.

3.4 Identificación de escenarios futuros

Con la información completa se establece una grilla que abarca la zona del Catatumbo, con el propósito de generar puntos con las características necesarias para el ingreso a la plataforma Projeta. De acuerdo a lo anterior, se extraen de la plataforma Projeta, los datos de precipitaciones futuras para el periodo determinado, considerando las trayectorias establecidas; por consiguiente, se define un factor específico por estación derivado del sesgo histórico y se corrige el sesgo con estos datos para adaptar las proyecciones a las condiciones particulares de la zona.

3.5 Construcción y análisis de representaciones gráficas del comportamiento de la precipitación

A partir de los datos obtenidos, se realiza la construcción de mapas de los datos mensuales proyectados más críticos en formato ráster, empleando el programa ArcGIS; para así analizar visualmente las variaciones en las precipitaciones en el periodo establecido. Por otra parte, se elabora una comparación entre ráster de precipitaciones históricas con futuras, para verificar la tendencia de este fenómeno.

Capítulo 4. Tratamiento de datos históricos

4.1. Delimitación de la zona

Colombia está ubicada sobre la placa suramericana rodeada por la placa Nazca y del Caribe (Criado-Rodríguez et al., 2020); la interacción entre estas hace que se origine la cordillera de los Andes, la cual ramifica en dos cordilleras llamadas Occidental y Central, y de esta se nace la Oriental, en la cual se encuentra el departamento de Norte de Santander, lo que hace que predominen los diferentes pisos térmicos de la región.

El Catatumbo, situado en el noreste del departamento de Norte de Santander, se destaca como una zona transfronteriza. Sus coordenadas geográficas son 8°57'39.77"N, 72°13'26.84"W, y presenta una altitud que oscila entre los 100 y 2.800 metros sobre el nivel del mar. Además, cuenta con una superficie total de 4.826 kilómetros cuadrados.

Esta región está conformada por 11 municipios: Ábrego, Convención, El Carmen, El Tarra, Hacarí, La Playa, Ocaña, San Calisto, Sardinata, Teorama y Tibú que, tienen importancia e influencia nacional por su rica biodiversidad, clima y recursos naturales, mostrando el potencial de desarrollo del país; sin embargo, el conflicto armado y la violencia la han convertido en una región olvidada por el Estado.

El departamento de Norte de Santander muestra una marcada variabilidad espacial en la distribución de la precipitación. Las mayores lluvias son evidentes en la región de Catatumbo,

con niveles que se acercan a los 5000 mm al año en ciertas zonas del municipio de Tibú. Por otro lado, en las áreas de Ocaña, Ábrego y La Playa, se observan lluvias menores, con valores entre 1000 a 1500 mm anuales. (*CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DE NORTE DE SANTANDER*, 2020)

La zona de estudio experimenta un clima tropical de sabana, con temperaturas cálidas durante todos los meses, ya sea en estación seca o húmeda. La temperatura media anual en el Catatumbo es de 35°, la humedad promedio se mantiene en torno al 61% y el índice UV alcanza el nivel 7 en la región.

4.2 Extracción y tratamiento de datos históricos

La extracción de los datos históricos climatológicos de precipitación se realizó mediante la plataforma regional del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), descargados directamente del entorno virtual DHIME http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/, la cual proporcionó información a modo de registros mensuales de 54 estaciones pertenecientes a la zona de estudio, arrojando diferentes periodos de datos disponibles como se muestra en la Tabla 1 y ubicadas geográficamente como se observa en la Figura 4:

Tabla 1

Periodos de datos disponibles de las estaciones climáticas

MUNICIPIO	ESTACIÓN	CÓDIGO	PERIODO
SARDINATA	SARDINATA	16030120	1973-1985 y 1987-2005

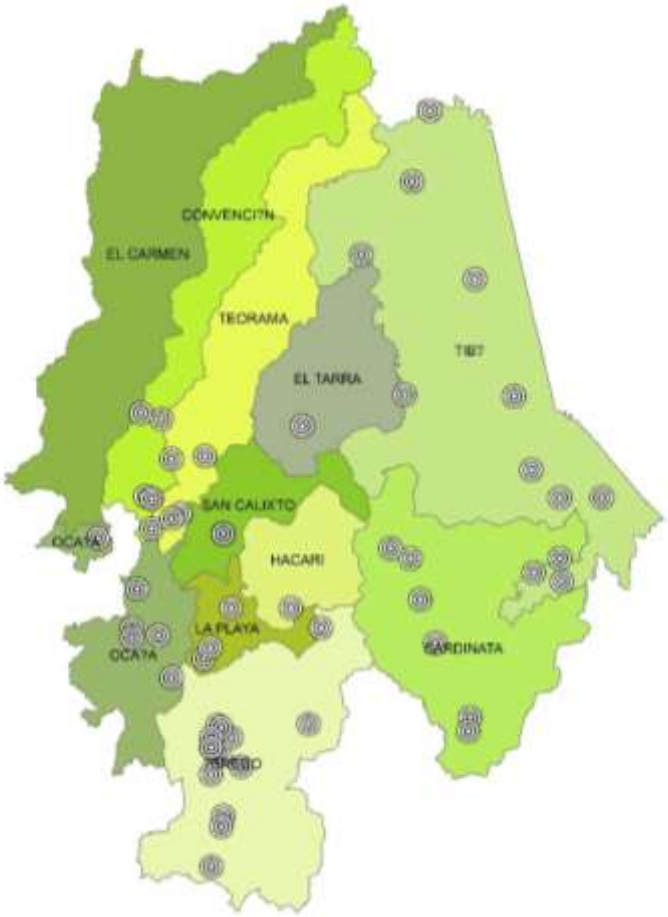
MUNICIPIO	ESTACIÓN	CÓDIGO	PERIODO
	SARDINATA	16035030	1961-1972
	SAN GIL	16030060	1973-2005
	LA PRADERA	16030040	1973-1980
	MERCEDES	16030050	1973-2002 y 2004-2005
	JORDAN	16030130	1983-2003
	DIVISONES	16030140	1984-2005
SAN CALIXTO	MARAVILLA LA	16055080	1986-2005
LA PLAYA	PLAYA LA	16055060	1961-2005
	MONTECITOS	16050260	1961-2005
	ASPASICA	16040030	1961-1987
HACARÍ	MESA RICA	16040020	1974-2004
CONVENCIÓN	VEGA LA	16050030	1966-1968 y 1970
	PALACIO EL	16050240	1984-2005
	LAGUNA LA	16050080	1982-1988
	INSTITUCIÓN AGRÍCOLA CONVENCIÓN	16055090	1990-2005
	GABRIEL M BARRIGA	16055110	1992 y 1994
	ESTRELLA LA	16050040	1969, 1978 y 1980
	COBRE EL	16050010	1973-1984
OCAÑA	AEROPUERTO AGUAS CLARAS	16055010	1979, 1981 y 1984-2005
	BROTARE	16050170	1961-2005
	CANTINA LA	16050070	1961-1971
	OCAÑA	16050050	1971-1983
	DEFENSA CIVIL	16050180	1981-1987 y 1989-1993
	UFPSO	16055100	1992-2005
ABREGO	ABREGO CENTRO ADMO	16055040	1969-2005
	ALTO EL VENADO	16040010	1961-2005
	BOCATOMA RIO FRIO	16050120	1966-1970, 1972-1974 y 1976-1996
	CAMPANARIO EL	16050130	1972-1974 y 1976-2005
	CANAL 02-07 KO	16047050	1972-1974, 1976 y 1978-2002
	CINCHO EL	16040040	1984-2001
	EL CHORRO	16050100	1971-2005
	MARIA LA	16055030	1985-2005
	LLANO SUAREZ	16050160	1974-2002
	MARIA LA - AUT	16040050	1973-1978 y 1986
	RIO FRIO K4+050-1	16047140	1972-1974 y 1976-2002
	TEJA LA	16050090	1975-2002
	JURISDICCIONES	16050140	1975-1979 y 1983
	SANTA LUCIA	16055050	1971-1973
EL TARRA	EL TARRA	16045020	1973-1980, 1983-1985 y 1988-2002
	HACHARIRA	16070030	1973-2005
TEORAMA	QUINCE LETRAS	16050020	1973-2005

MUNICIPIO	ESTACIÓN	CÓDIGO	PERIODO
	TEORAMA	16055020	1961-1973
	TEORAMA	16050190	1973-2005
TIBÚ	CAMPO TRES	16030030	1973-1975 y 1977-2005
	CNO LA RAYA	16060010	1973-2005
	ESTANCIA LA	16035040	1984-1985
	LIBERTAD LA	16030150	1984-1985
	ORU	16070040	1973-2005
	PETROLEA	16035020	1965-1966
	PETROLEA	16030110	1973-2005
	PISTA LA	16070020	1986-1999
	PUERTO BARCO	16070010	1973-2005
	TIBU	16035010	1961-2002 y 2005

Nota: La tabla muestra los periodos disponibles de cada una de las estaciones meteorológicas del Catatumbo.

Figura 4

Posición geográfica de las estaciones del Catatumbo



Nota: La figura muestra la posición geográfica que poseen las estaciones meteorológicas del Catatumbo.

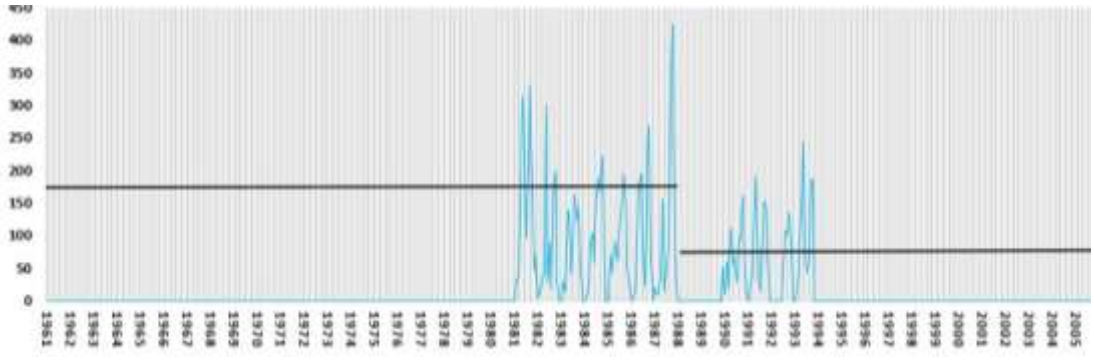
Para la determinación de la confiabilidad de los datos se realiza un análisis de consistencia de la información recopilada, en el que se identifica, describe y elimina los errores sistemáticos y la no homogeneidad de las series de tiempo hidrológica que requieran, dentro de los procesos que se llevan a cabo para el análisis de consistencia se encuentra el análisis visual grafico que permite identificar de manera clara y accesible diversos aspectos que pueden indicar

inconsistencias en los datos hidrológicos, como por ejemplo, picos inusuales o valores extremadamente bajos. En el siguiente ejemplo se puede observar lo descrito:

El análisis visual de la serie histórica de la estación Defensa Civil 16050180 (Figura 5) revela una clara división en dos periodos distintos. Se procede a realizar un análisis estadístico utilizando la prueba de t de Student para determinar la equiparación de las dos muestras con un nivel de confianza del 95 %. Asimismo, se lleva a cabo la verificación de la consistencia de la desviación estándar de los datos mediante la prueba de f de Fisher. Los resultados de ambas pruebas confirman, con un nivel de significancia del 5 %, que las dos muestras son estadísticamente iguales, reafirmando la no homogeneidad e inconsistencia de los datos (Figura 6).

Figura 5

Histograma histórico de precipitación mensual



Nota: La figura muestra el registro histórico mensual de precipitación para la estación Defensa Civil.

Figura 6

Pruebas de homogeneidad y consistencia para serie histórica

ESTACIÓN OCAÑA - DEFENSA CIVIL					
IDENTIFICAR Y ANALIZAR PERIODO A CORREGIR					
PERIODO	1		PERIODO	2	
Tamaño de la muestra(n1)=	96		Tamaño de la muestra (n2)=	216	
Media de la muestra $\overline{X_1}$ =	83.2292		Media de la muestra $\overline{X_2}$ =	14.9259	
Desviación Stand.(S1) =	91.6056		Desviación Stand(S2)=	40.8094	
Grados de libertad(GL1)=	95		Grados de libertad(GL2)=	215	
PRUEBA "T" DE STUDENT					
RESULTADOS					
Desviación estándar ponderada			Sp =	61.05	
Desviación de las diferencias de los promedios			Sd =	7.49	
Cálculo del T, calculado (Tc) según:			Tc =	9.12	
Grado de libertad			GL=GL1+GL2	310	
Probabilidad al 95%, con un nivel de significación del 5%			α =	5%	
Calculo del valor critico de t, tabular Tt:			Tt=	1.97	
|Tc| = 9.1215	>	Tt = 1.97	NO HOMOGENEO (CORRIJA LA PRECIPITACION)		
PRUEBA "F" DE FISHER					
RESULTADOS					
Cálculo de F calculado (Fc)según :				5.04	
Calculo del F tabular(valor critico de Ft) Ft				1.32	
Fc= 5.04	>	Ft = 1.32	INCONSISTENTE (CORRIJA LA PRECIPITACION)		

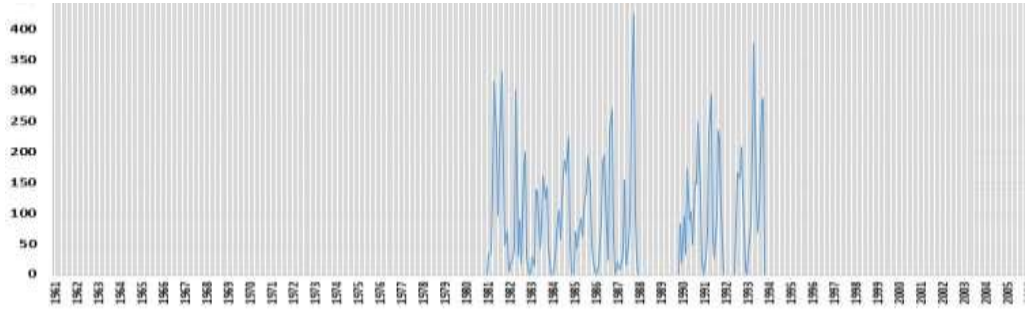
Nota: La figura muestra el análisis estadístico realizado a la serie histórica para identificar el periodo a corregir.

Con el objetivo de lograr una serie de datos confiable, homogénea y consistente, se lleva a cabo el tratamiento de datos para cada estación mediante una hoja de cálculo en Microsoft Excel, utilizando una programación específica. Este proceso, esencial para la revisión del análisis de consistencia, implica una verificación de posibles anomalías e irregularidades en los conjuntos de datos, con especial atención a la coherencia temporal y la detección de patrones inusuales. Las Figuras 7 y 8 proporcionan una visualización gráfica de la serie resultante después

de este proceso, sirviendo como herramientas visuales para evaluar la calidad y consistencia de los datos.

Figura 7

Histograma histórico de precipitación mensual corregida



Nota: La figura muestra el registro histórico mensual de precipitación corregida para la estación Defensa Civil.

Figura 8

Pruebas de homogeneidad y consistencia para serie histórica corregida

ESTACIÓN OCAÑA - DEFENSA CIVIL			
PERIODO DUDOSO	PERIODO 1	PERIODO CONFIABLE	PERIODO 2
Tamaño de la muestra(n1)=	96	Tamaño de la muestra (n2)=	216
Media de la muestra $\bar{X}_1$ =	64.2712	Media de la muestra $\bar{X}_2$ =	48.4675
Desviación Stand. (S1) =	97.2135	Desviación Stand (S2)=	107.3206
Grados de libertad (GL1)=	95	Grados de libertad (GL2)=	215
PRUEBA "T" DE STUDENT			
RESULTADOS			
Desviación estándar ponderada		Sp =	104.33
Desviación de las diferencias de los promedios		Sd =	12.80
Cálculo del T, calculado (Tc) según:		Tc =	1.23
0		GL=GL1+GL2	310
Probabilidad al 95%, con un nivel de significación del 5%		α =	5%
Calculo del valor critico de t, tabular Tt:		Tt=	1.97
|Tc| = 1.2349	<	Tt = 1.97	HOMOGENEO
PRUEBA "F" DE FISHER			
RESULTADOS			
Cálculo de F calculado (Fc)según :			1.22
Calculo del F tabular(valor critico de Ft) Ft			1.35
Fc= 1.22	<	Ft = 1.35	CONSISTENTE

Nota: La figura muestra el análisis estadístico realizado a la serie histórica corregida.

4.3 Determinación ventana de tiempo

Con el objetivo de determinar la ventana de tiempo más apropiada para llevar a cabo el proyecto, se ha considerado de manera detallada la disponibilidad y calidad de la información proporcionada por parte de las entidades operadoras de las estaciones involucradas.

Se emplea la serie de datos disponibles de las estaciones, siendo estas variables, así como sus periodos de datos faltantes. Inicialmente se consideran 54 estaciones meteorológicas con datos para los periodos entre los años 1961 y 2005. La elección de la ventana de tiempo se centra

en el intervalo de tiempo con la mayor cantidad de datos disponibles para realizar la correcta validación. La sección de tiempo tiene una duración de 25 años, inicia el 1 de enero de 1980 y finaliza el 31 de diciembre de 2005, debido a que las series de datos históricas del modelo climático regional empleado finalizan en esas fechas.

Tabla 2

Disponibilidad de datos de las diferentes estaciones

ESTACIONES	**1960-1970**	**1970-1980**	**1980-1990**	**1990-2000**	**2000-2005**
CAMPO TRES [16030030]	-	+	+	++	+
CNO LA RAYA [16060010]	-	+	++	+	-
LIBERTAD LA [16030150]	-	-	*	++	++
ORU [16070040]	-	+	+	+	++
PETROLEA [16030110]	-	+	++	++	+
PISTA LA [16070020]	-	-	*	+	-
PUERTO BARCO [16070010]	-	+	++	++	++
TIBU [16035010]	++	++	++	++	*
QUINCE LETRAS [16050020]	-	*	+	++	++
TEORAMA [16050190]	++	*	-	-	-
TEORAMA [16055020]	-	+	++	++	++
AEROPUERTO AGUAS CLARAS [16055010]	-	*	*	++	+
BROTARE [16050170]	++	++	++	++	++
CANTINA LA [16050070]	+	-	-	-	-
DEFENSA CIVIL [16050180]	-	-	+	-	-
OCAÑA [16050050]	-	+	*	-	-
UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER [16055100]	-	-	-	+	++

ESTACIONES	1960-1970	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2005
ABREGO CENTRO ADMO [16055040]	*	++	++	++	++
ALTO EL VENADO [16040010]	-	+	++	+	++
BOCATOMA RIO FRIO [16050120]	*	+	+	+	++
CAMPANARIO EL [16050130]	-	*	++	++	++
CANAL 02-07 KO [16047050]	-	+	++	+	*
CINCHO EL [16040040]	-	-	*	+	-
EL CHORRO [16050100]	-	++	++	++	++
JURISDICCIONES [16050140]	-	*	*	-	-
LA MARIA - AUT [16040050]	-	-	+	++	++
LLANO SUAREZ [16050160]	-	*	++	+	*
MARIA LA [16055030]	-	+	*	-	-
RIO FRIO K4+050-1 [16047140]	-	+	++	+	-
SANTA LUCIA [16055050]	-	*	-	-	-
TEJA LA [16050090]	-	*	++	+	*
EL TARRA [16045020]	-	*	*	+	-
HACHARIRA [16070030]	-	*	+	++	*
COBRE EL [16050010]	-	+	*	-	-
ESTRELLA LA [16050040]	*	*	-	*	-
GABRIEL M BARRIGA [16055110]	-	-	-	*	-
INSTITUCION AGRICOLA CONVENCION [16055090]	-	-	-	++	++
LAGUNA LA [16050080]	-	-	+	-	-
PALACIO EL [16050240]	-	-	+	++	++
VEGA LA [16050030]	*	-	-	-	-
MESA RICA [16040020]	-	+	++	++	+

ESTACIONES	1960-1970	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2005
ASPASICA [16040030]	++	++	+	-	-
MONTECITOS [16050260]	-	-	+	++	++
PLAYA LA [16055060]	-	-	+	++	++
MARAVILLA LA [16055080]	-	-	*	+	++
DIVISIONES [16030140]	-	-	+	++	++
JORDAN EL [16030130]	-	-	+	++	+
MERCEDES LAS [16030050]	-	+	++	++	*
PRADERA LA [16030040]	-	+	-	-	-
SAN GIL [16030060]	-	+	++	++	++
SARDINATA [16030120]	++	*	-	-	-
SARDINATA [16035030]	-	+	+	++	++

Nota: La tabla muestra el grado de disponibilidad de datos de las estaciones según la simbología establecida

.

Tabla 3

Simbología para detallar la disponibilidad de datos

Símbolo	Estado	Descripción
++	Completo	Existencia de todos los datos del periodo
+	Semicompleto	Existencia de 6 años o más y para el periodo del 2000 al 2005, 3 años o más
*	Tiene datos	Existencia de menos de 6 años y para el periodo del 2000 al 2005, menos de 3 años
-	Sin datos	No hay datos

Nota: Simbología establecida para definir el grado de disponibilidad de datos de las estaciones.

Las estaciones que no contaban con la información suficiente, se descartaron del registro de datos para el relleno de información en las series de precipitación, como las estaciones

meteorológicas: Sardianata 16030120, La Pradera 16030040, Vega La 16050020, Gabriel M Barriga 16055110, Estrella La 16050040, Cantina La 16050070, Maria La 16055030, Jurisdicciones 16050140, Santa Lucia 16055050, Teorama 16050190, Estancia La 16035040, Petrolea 16030110; y finalmente contar con 42 estaciones disponibles para continuar con el procesamiento.

4.4 Ajuste de datos históricos

Con lo generado anteriormente, se inicia el procesamiento de las series de datos hidrológicos mediante la interfaz de RStudio, usando del lenguaje de programación R.

- Inicialmente se hace el llamado de las bibliotecas necesarias, en caso de no tenerlas instaladas es preciso hacerlo con el comando *"install.packages".*

- Una vez instaladas, se importa la serie de datos de precipitaciones de las estaciones disponibles con el comando "*setwd*".

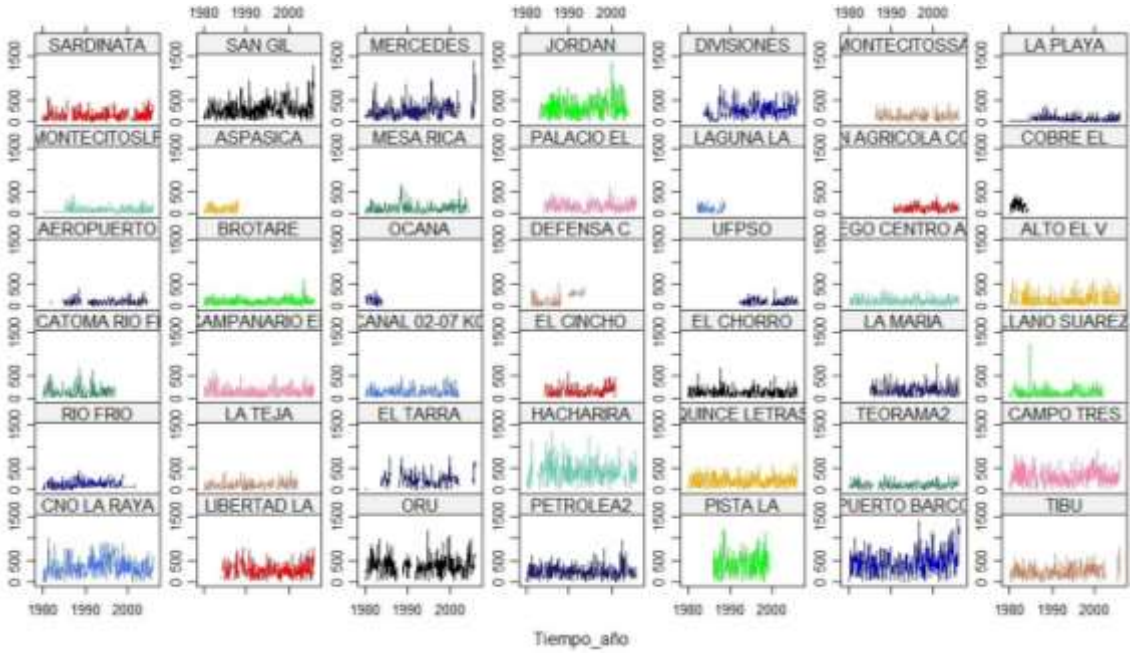
- Seguidamente se genera una gráfica para la visualización general de los datos existentes de cada una de las estaciones en el tiempo (ventana de tiempo), observando de esta forma los datos faltantes en ellas, como se muestra en la Figura 9.

- Mediante el procesamiento estadístico de los datos de precipitación existentes, se ejecuta en el programa el relleno de datos faltantes, originando una base de datos final.

- En este punto se realiza una gráfica, donde se muestra la serie completa de datos de precipitación en el tiempo de cada una de las estaciones, como se muestra en Figura 10.

Figura 9

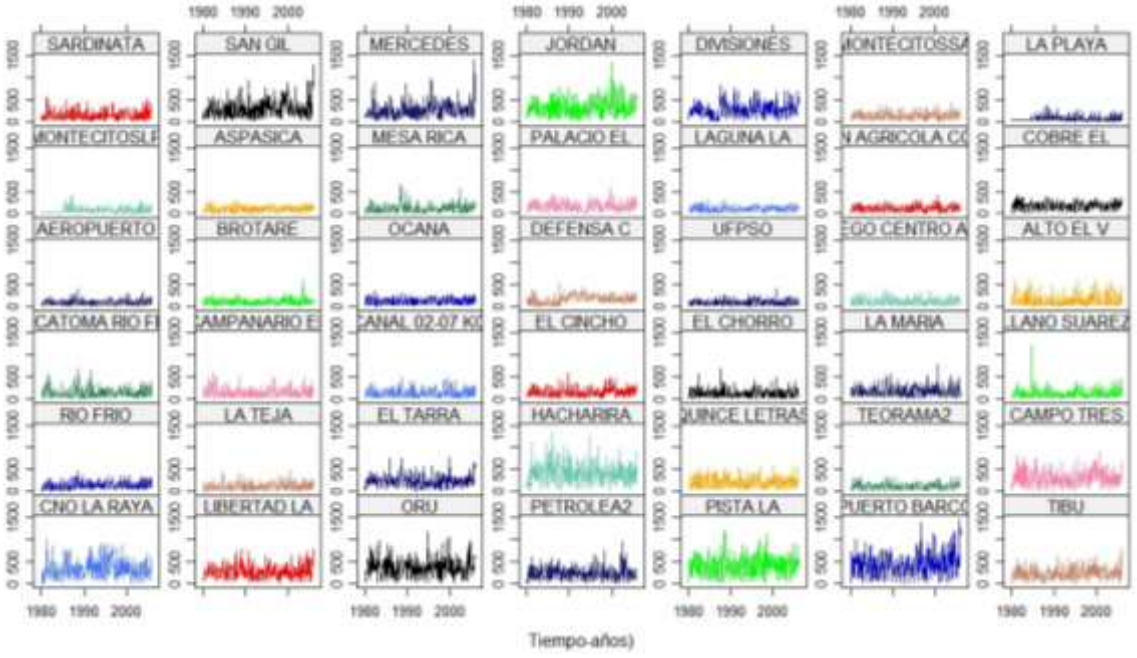
Histogramas de precipitaciones existentes en las estaciones meteorológicas



Nota: La figura muestra los histogramas generados para los datos existentes de precipitaciones de las estaciones meteorológicas.

Figura 10

Precipitaciones completadas en las estaciones meteorológicas



Nota: La figura muestra los histogramas generados para los datos completados de precipitaciones de las estaciones meteorológicas.

Capítulo 5. Identificación de escenarios futuros

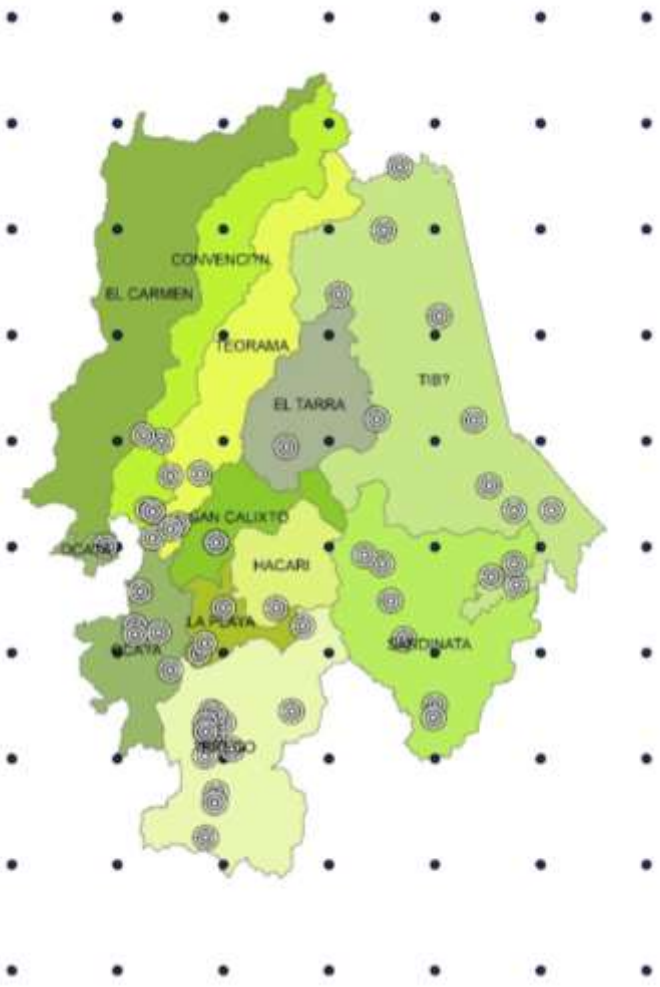
La plataforma Projeta cuenta con varias trayectorias de acceso a diferentes escenarios climáticos futuros, este proyecto abarca dos de ellos, un escenario de estabilización media (RCP 4.5) y uno de emisiones de referencia muy alto (RCP 8.5). Con esto se conoce el comportamiento de la precipitación mensual para las estaciones y se concluye la identificación de escenarios.

5.1 Correlación de datos de las dos plataformas

Al tener la información completa se procede a establecer una grilla espaciada cada 20 km (debido a que la plataforma Projeta está configurada con ese valor de resolución), para así generar puntos con las características necesarias para el ingreso a dicha plataforma. Esta cuadrícula posee unas coordenadas perimetrales de N9.40, W-73.60; N9.40, W-72.40; N7.60, W-72.40; N7.60, W-73.60; que abarca toda la zona del Catatumbo.

Figura 11

Grilla establecida para la zona de estudio



Nota: La figura muestra los puntos de la grilla generada para la zona del Catatumbo.

Para el ajuste de datos históricos y reubicación de los mismos a una escala regional usando el modelo MIROC5, se determina la precipitación acumulada mensual por medio de interpolación lineal para cada una de las estaciones y puntos de la grilla, esto mediante la descarga de datos en la plataforma Projeta teniendo en cuenta los siguientes parámetros: el escenario climático (20 km, histórico, continental, MIROC5.), la frecuencia mensual, un lapso concerniente a la ventana de tiempo establecida, la variable (PREC – Precipitación Total), en el

formato JSON y se convierten a Excel mediante el portal web https://products.aspose.app/cells/es/conversion/json-to-xlsx, para estandarizar el formato de todos los datos.

Teniendo ahora los datos reubicados, se precisa determinar el sesgo histórico llevando a cabo una comparación mensual entre los valores obtenidos mediante la simulación y los datos históricos observados, generando factores de ajuste mensuales, los cuales se calculan a través de la división entre los promedios mensuales de precipitación simulado y observado, para todas y cada una de las estaciones, (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute, 2009), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\delta P_m^{ip} = \frac{\bar{P}_{MIROC5,m}^{ip}}{\bar{P}_{Obs,,m}^{ip}}$$

Donde δP_m^{ip} es el factor mensual de ajuste de precipitación, ip es el índice de estaciones meteorológicas de precipitación usadas en el modelo y Obs y $MIROC5$, corresponden a las condiciones del clima históricas observadas y simuladas en el escenario base de las proyecciones MIROC5. (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute, 2009)

5.2 Extracción de información para precipitaciones futuras

Para reubicar las proyecciones de datos futuros a la posición de las estaciones, es necesario seguir el mismo procedimiento con el modelo regional MIROC5, usado en los datos históricos. Esto mediante la descarga de información en Projeta de acuerdo a cada uno de los puntos de la grilla, tomando en cuenta los siguientes parámetros para ambas trayectorias: el escenario climático (20 km, RCP4.5 o RCP8.5, continental, MIROC5.), la frecuencia mensual, lapso concerniente a los años entre 2024 y 2074, la variable (PREC – Precipitación Total). Los datos se obtienen en formato JSON y se realiza el procedimiento mencionado anteriormente de conversión al formato Excel.

5.3 Corrección de sesgo

Con base en la información expuesta, se avanza en el proceso de selección de precipitaciones futuras para el periodo comprendido entre los años 2024 y 2074, tomando en consideración las trayectorias RCP 4.5 y RCP 8.5. Este procedimiento se inicia extrayendo los meses que presentan las dos precipitaciones máximas (tendrán más lluvias) y las dos precipitaciones mínimas (tendrán más sequias), organizadas en intervalos de 10 años, teniendo en cuenta el promedio de todas las estaciones hidrológicas involucradas en el estudio.

Posteriormente, con el propósito de ajustar las proyecciones de precipitación mensual se utilizan los factores de ajuste mensuales respectivos, derivados del sesgo histórico recopilado de la plataforma IDEAM. Este cálculo se efectúa dividendo la precipitación mensual futura obtenida del cálculo con el modelo MIROC5 entre el sesgo histórico correspondiente, con el fin de adaptar estas proyecciones a las condiciones particulares de la zona del Catatumbo, como se

observa en la siguiente ecuación: (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute, 2009)

$$PS^{ip}_{MIROC5TOT(RCP),m} = PS^{ip}_{MIROC5(RCP),m} / \delta P^{ip}_{m}$$

Donde $PS^{ip}_{MIROC5TOT(RCP),m}$ es el valor de proyección usando el factor mensual de ajuste respectivo, $iPS^{ip}_{MIROC5(RCP),m}$ corresponde a la proyección precipitación generado a través del modelo MIROC5. (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute, 2009)

Los datos resultantes de este proceso se convierten en información esencial para llevar a cabo la construcción de representaciones gráficas que ilustren el comportamiento anticipado de las precipitaciones. Este análisis gráfico se realiza mediante el uso de la plataforma ArcGIS, permitiendo así una visualización clara y detallada de las tendencias previstas en las condiciones de precipitación en la región del Catatumbo durante el periodo mencionado.

5.4 Construcción y análisis de representaciones gráficas del comportamiento de la precipitación

A partir del conjunto de datos resultantes, se realizan los pasos que se describen a continuación, usando herramientas propias de ArcGIS Desktop tales como ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox, para la edición y visualización de las capas, la administración de archivos y bases

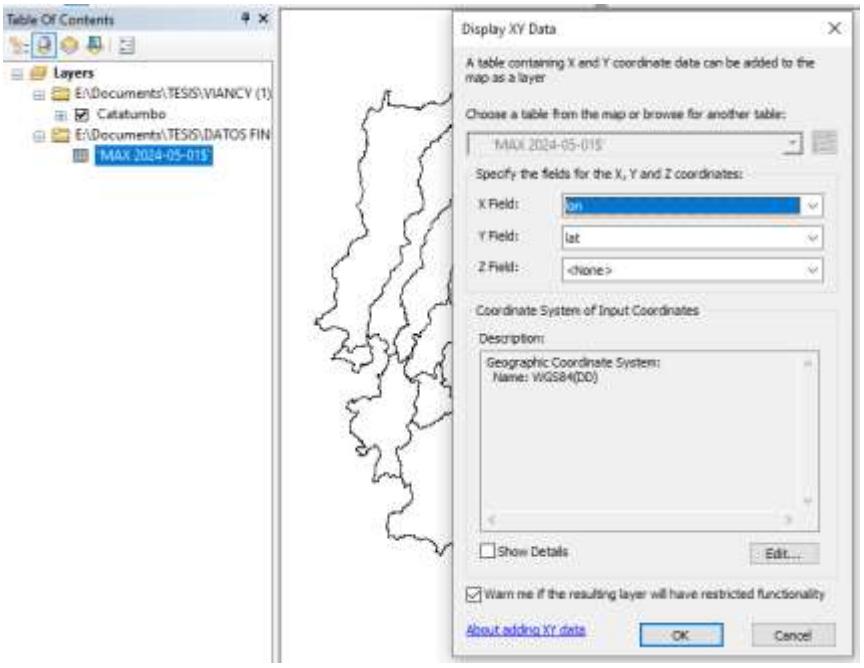
de datos, el empleo de herramientas de geoprocesamiento y la visualización y acondicionamiento de los resultados.

- Importar el mapa en formato ráster de la zona: Catatumbo. Asimismo, el documento a ArcGIS en formato de Libro de Excel 97-2003 para un mejor empalme con el programa.

- Para definir el entorno en el Sistema de coordenadas de salida, será necesaria la opción *"Display XY Data"* (Figura 12), que aparecerá luego de darle click derecho en el archivo importado, siendo así posible especificar los valores de X y Y correspondientes, de igual forma definir el sistema de coordenadas UTM de acuerdo al área de estudio.

Figura 12

Paso para definir el entorno en el Sistema de coordenadas

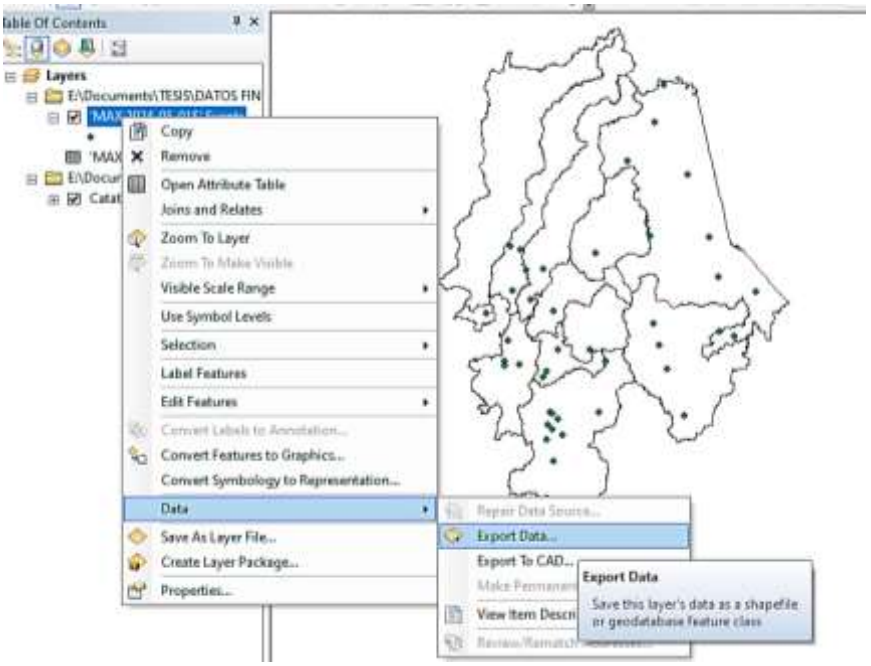


Nota: La figura muestra el paso para definir el entorno en el sistema de coordenadas en ArcGIS.

- De esa manera, se podrá visualizar la ubicación geográfica de las estaciones; sin embargo, para su permanencia en el archivo actual, se procede a guardar la capa mediante la opción *"Data"» "Export Data"*, que aparecerá luego de darle click derecho. (Figura 13)

Figura 13

Paso para guardar el archivo en formato Shape



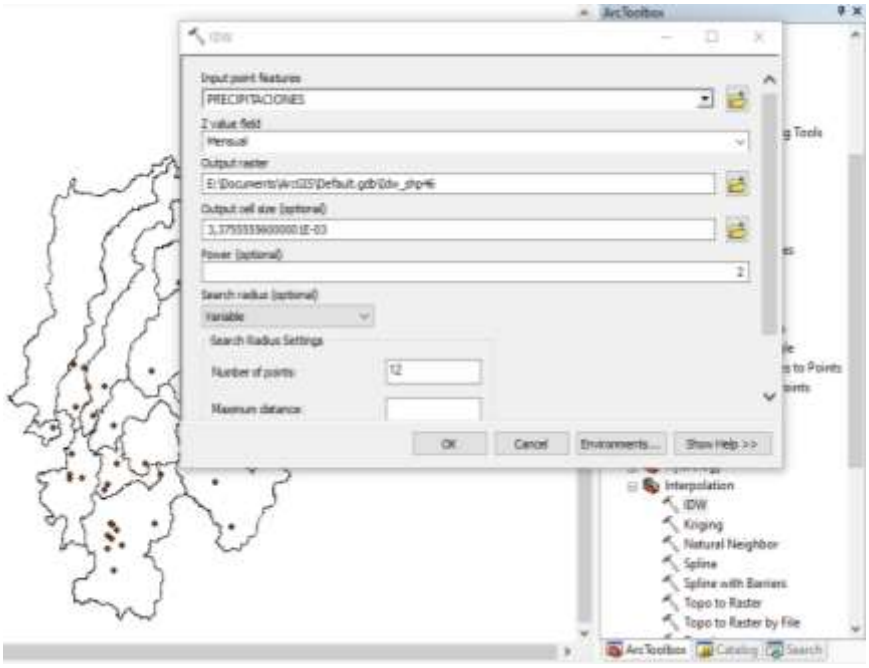
Nota: La figura muestra el paso para guardar el archivo en formato Shape en ArcGIS.

- Posteriormente, nos dirigimos a ArcToolBox y para poder interpolar los datos de precipitación con el fin de obtener el ráster de éstos, nos ubicamos en la opción *"Spatial Analyst Tools"» "Interpolation"* y escogemos el método de interpolación que más se ajustó a los datos: *"IDW"*.

- En éste, se escoge la capa guardada como punto de entrada en *"Input point features"* y el nombre de columna donde se encuentran los datos de precipitación en el campo correspondiente a valores de Z: *"Z value field";* siendo los demás parámetros generados por defecto del programa. (Figura 14)

Figura 14

Paso para el ajuste de características IDW

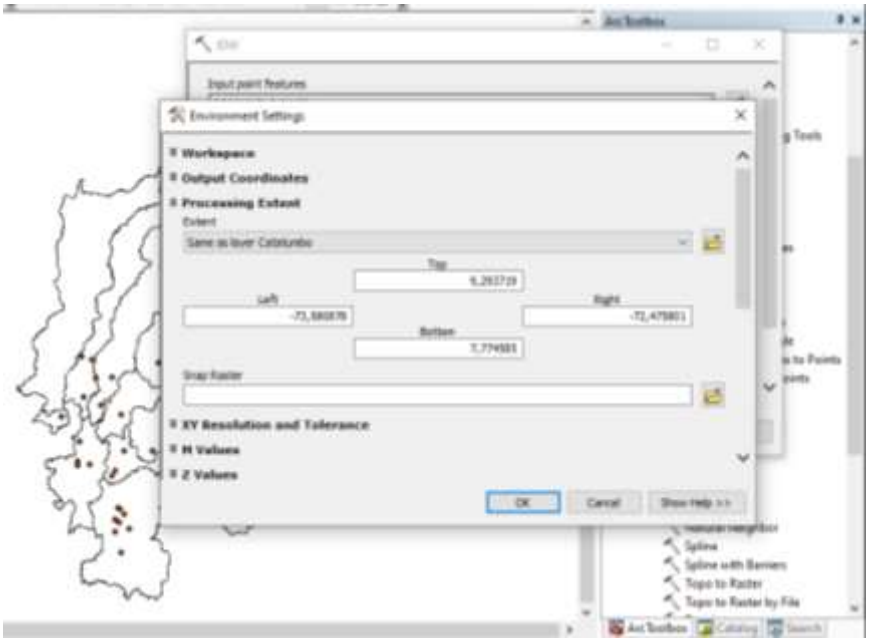


Nota: La figura muestra el paso para para el ajuste de características IDW en ArcGIS.

- Procurando que la capa interpolada abarque y se extienda en toda el área de estudio y, antes de finalizar con el método de interpolación, nos dirigimos a la opción *"Environments"» "Processing Extent"» "Extent"*, en el que se escoge la capa correspondiente a Catatumbo.

Figura 15

Paso para extender la interpolación en toda el área



Nota: La figura muestra el paso para extender la interpolación en toda el área en ArcGIS.

- Para poder obtener solamente la información dentro de la zona, nos ubicamos nuevamente en la opción *"Spatial Analyst Tools"* para luego ir a *"Extraction"»* *"Extract by Mask"*, en el cual seleccionamos primero el raster de precipitaciones, luego la capa que va a demarcar el corte: Catatumbo y posteriormente la ruta de guardado.

Figura 16

Paso para recorte del ráster

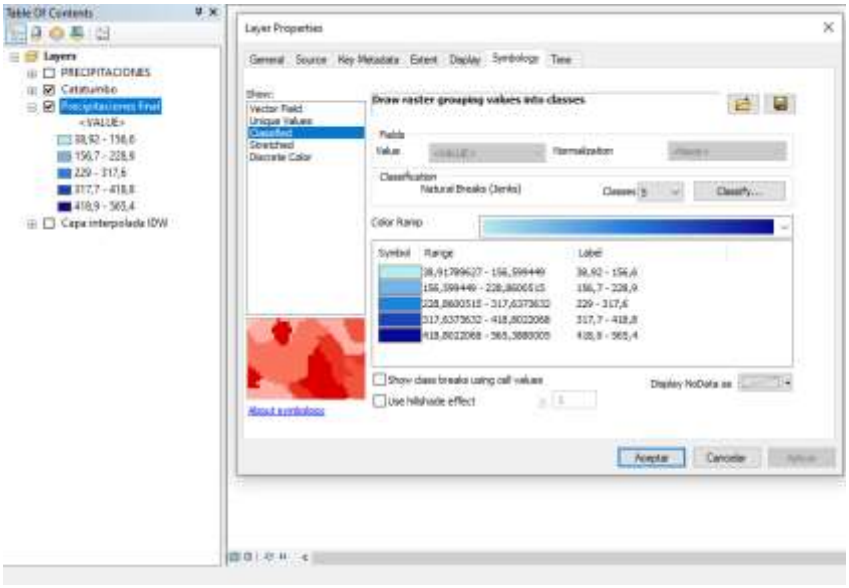


Nota: La figura muestra el paso para recortar el ráster en ArcGIS.

- Teniendo a continuación el ráster definitivo de los datos de precipitación delimitados a la zona de estudio, finalmente se editan características gráficas de éste en la opción *"Properties"» "Simbology"» "Classified"* y características propias como el nombre de capa en *"Properties"» "General"» "Layer Name*". (Figura 17)

Figura 17

Paso para edición de características del ráster

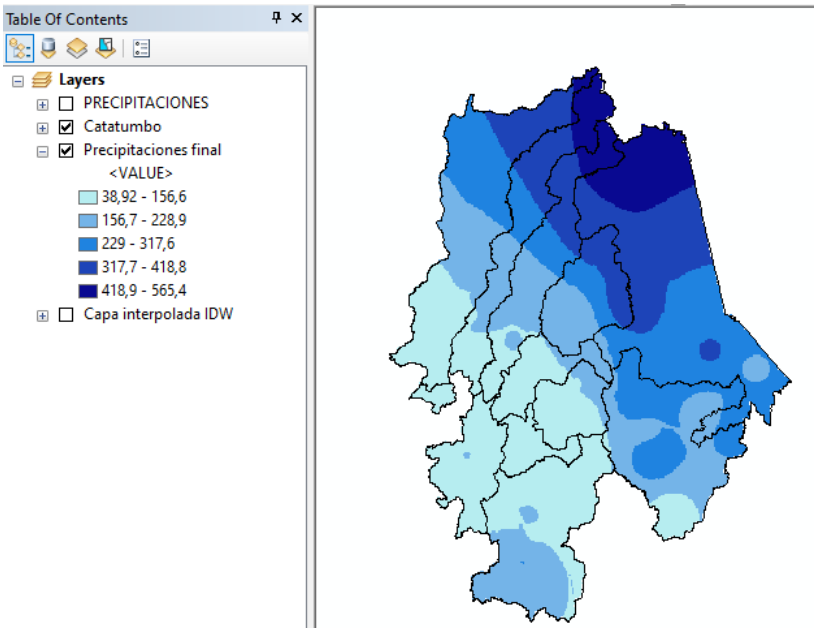


Nota: La figura muestra el paso para la edición de características del ráster en ArcGIS.

- Visualización final del total del proceso realizado para un periodo.

Figura 18

Visualización de ráster final



Nota: La figura muestra el paso para la visualización de ráster final en ArcGIS.

Capítulo 6. Resultados

Las representaciones gráficas generadas destacan las variaciones en las precipitaciones mediante una codificación visual distintiva: las precipitaciones máximas se presentan en tonalidades de azul, mientras que las precipitaciones mínimas se representan en tonos naranjas. Este esquema de colores proporciona una clara diferenciación entre los extremos climáticos, permitiendo identificar de manera intuitiva condiciones meteorológicas específicas.

Esto ofrece una proyección visible de los pronósticos de lluvias a lo largo del periodo correspondiente a la venta de tiempo que abarca desde el año 2024 hasta el 2074. Este enfoque gráfico accesible contribuye a una comprensión más profunda de los posibles escenarios climáticos en el horizonte temporal definido, respaldando así la toma de decisiones informadas en diversos campos, desde la planificación urbana hasta la gestión de recursos hídricos.

Primeramente, se estudian los mapas tipo ráster generados teniendo en cuenta que fueron analizados los más críticos, para el escenario de estabilización media (RCP4.5), luego, se analizan para el escenario de emisiones de referencia muy alto (RCP8.5); cada uno de ellos fraccionados en 5 periodos distribuidos así: Primer periodo (2024-2033), Segundo periodo (2034-2043), Tercer periodo (2044-2053), Cuarto periodo (2054-2063) y Quinto periodo (2064-2074).

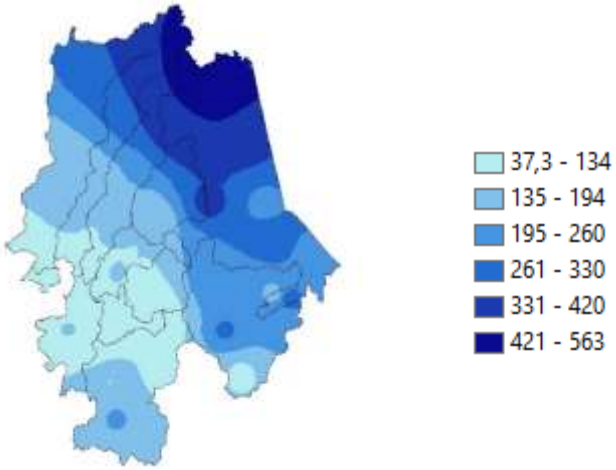
6.1 Gráficos para el escenario RCP4.5

6.1.1 Periodo 2024-2033

Para los valores máximos de precipitación en el primer periodo, se observa para el mes de abril de 2024 (Figura 19), un foco de lluvias máximas comprendidas entre 331 mm y 563 mm para la zona norte de los municipios de Tibú, Teorama, Convención y El Carmen; decreciendo en dirección sur-occidental, con precipitaciones mínimas (37,3 mm-134 mm) en los municipios de La Playa, Ocaña, Norte de Abrego y Sur de San Calixto, Teorama, Hacarí, Convención y El Carmen, volviendo a tener un crecimiento de precipitaciones medias y mínimas (135 mm-194 mm) al sur del municipio de Abrego. Por otra parte, en el mes de abril de 2031 (Figura 20), los valores decrecen en dirección sur-occidental continuamente, comprendiendo precipitaciones máximas de 517 mm hasta mínimas de 38,3 mm. En síntesis, se visualiza una proyección similar en las dos estimaciones.

Figura 19

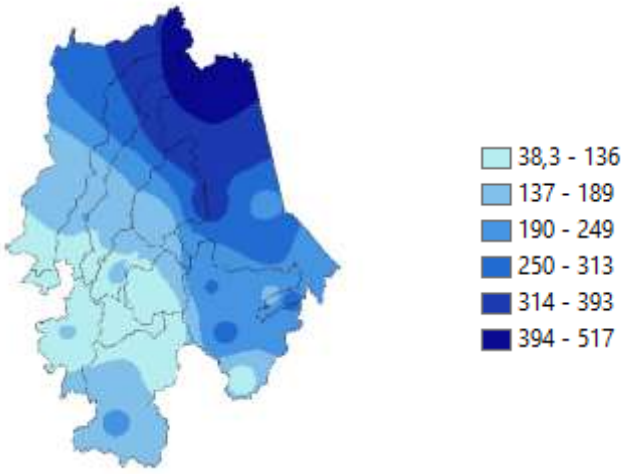
Proyección de precipitación para el 2024-04



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para el 2024-04 para el escenario RCP4.5.

Figura 20

Proyección de precipitación para el 2031-04

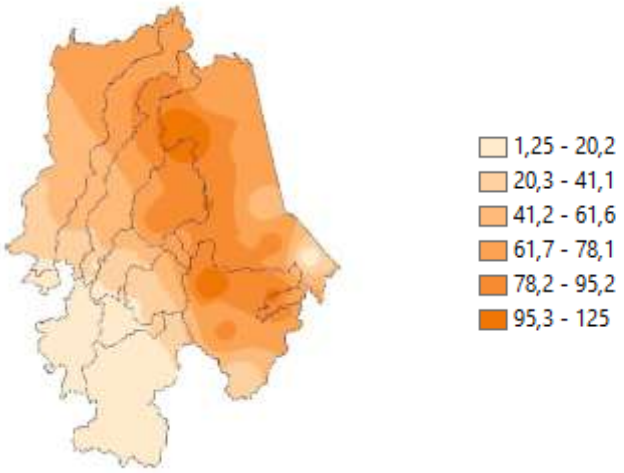


Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para el 2031-04 para el escenario RCP4.5.

Durante este período se visualizan las precipitaciones mínimas, correspondiente al año 2026, para este primero en el mes de noviembre, como se observa en la Figura 21 se presentan precipitaciones entre 1,25 mm y 125 mm, estos cambios se reflejan desde la parte nor-oriental del mapa del Catatumbo y van disminuyendo las precipitaciones hacia la parte sur-occidental, evidenciando que las zonas con más escases de lluvias para esta época serían Ábrego, Ocaña, La Playa, Hacarí, San Calixto y parte de Convención. Consecutivamente, en diciembre como se observa en la Figura 22 se contará con la misma tendencia, en esta temporada las precipitaciones disminuirán aún más y estarán entre 0,557 mm y 37,2 mm.

Figura 21

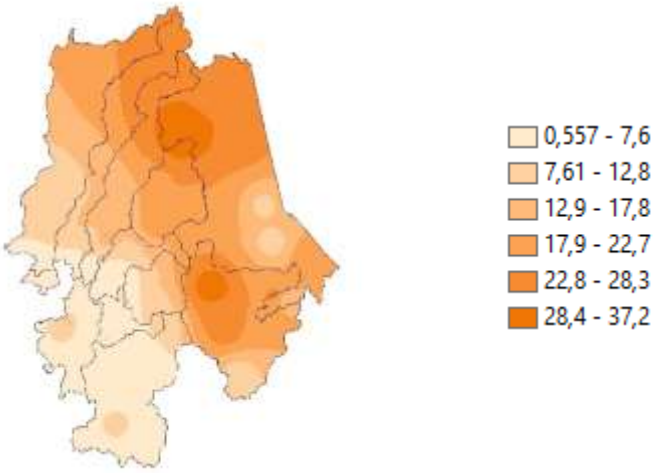
Proyección de precipitación para el 2026-11



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2026-11 para el escenario RCP4.5.

Figura 22

Proyección de precipitación para el 2026-12



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2026-12 para el escenario RCP4.5.

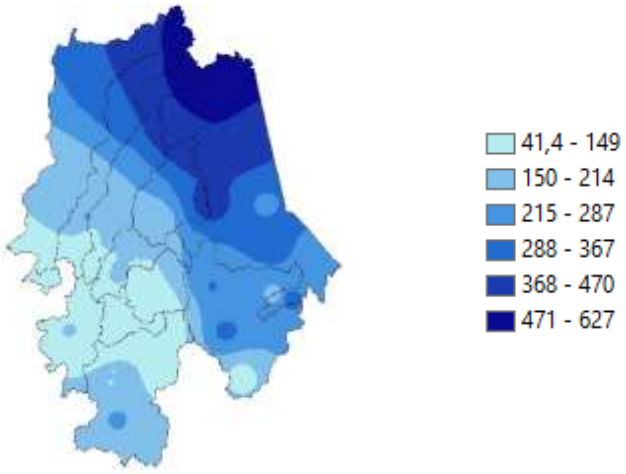
6.1.2 Periodo 2034-2043

Para los valores máximos de precipitación en el segundo periodo, se observa para el mes de abril de 2037 (Figura 23), un foco de lluvias máximas comprendidas entre 368 mm y 627 mm para la zona norte de los municipios de Tibú, Teorama, Convención y El Carmen; decreciendo en dirección sur-occidental, con precipitaciones mínimas (41,4 mm-149 mm) en los municipios de La Playa, Ocaña, Norte de Abrego y Sur de San Calixto, Teorama, Hacarí, Convención y El Carmen, volviendo a tener un crecimiento de precipitaciones medias y mínimas (150 mm-214 mm) al sur del municipio de Abrego. Por otra parte, en el mes de abril de 2043 (Figura 24), los valores decrecen en dirección sur-occidental continuamente, comprendiendo precipitaciones

máximas de 657 mm hasta mínimas de 41,3 mm. En síntesis, se visualiza una proyección similar en las dos estimaciones.

Figura 23

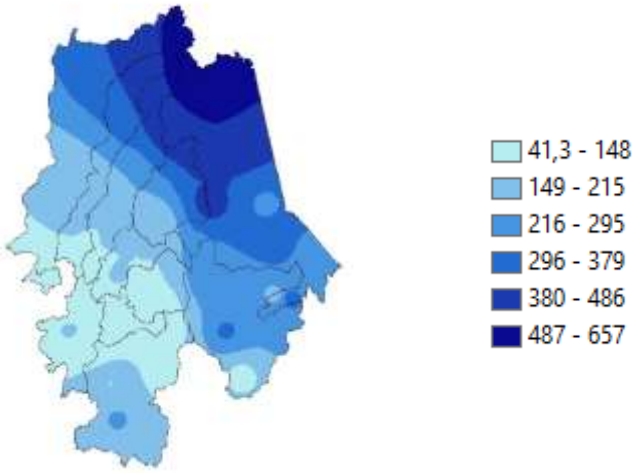
Proyección de precipitación para el 2037-04



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2037-04 para el escenario RCP4.5.

Figura 24

Proyección de precipitación para el 2043-04

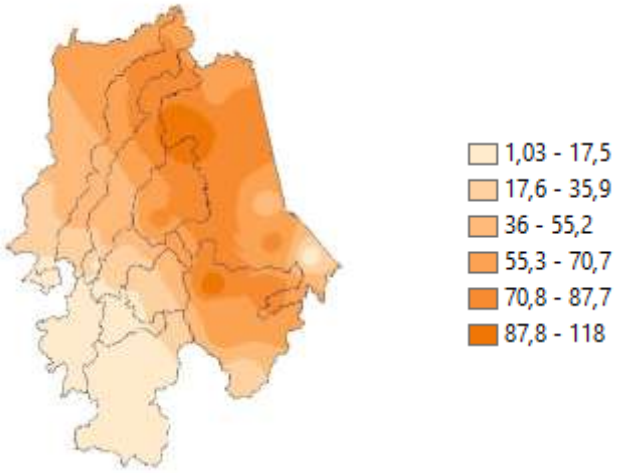


Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2043-04 para el escenario RCP4.5.

Durante este período se visualizan las precipitaciones mínimas, que corresponden a los años 2040 y 2043, para este primero en el mes de noviembre, como se observa en la Figura 25 se presentan precipitaciones entre 1,03 mm y 118 mm, estos cambios se reflejan desde la parte nor-oriental del mapa del Catatumbo y van disminuyendo las precipitaciones hacia la parte sur-occidental, evidenciando que las zonas con más escases de lluvias para esta época serían Ábrego, Ocaña, La Playa, Hacarí, San Calixto y parte de Convención. Igualmente, en noviembre del 2043 como se observa en la Figura 26 se contará con la misma tendencia, en esta temporada las precipitaciones disminuirán aún más y estarán entre 1,04 mm y 121 mm.

Figura 25

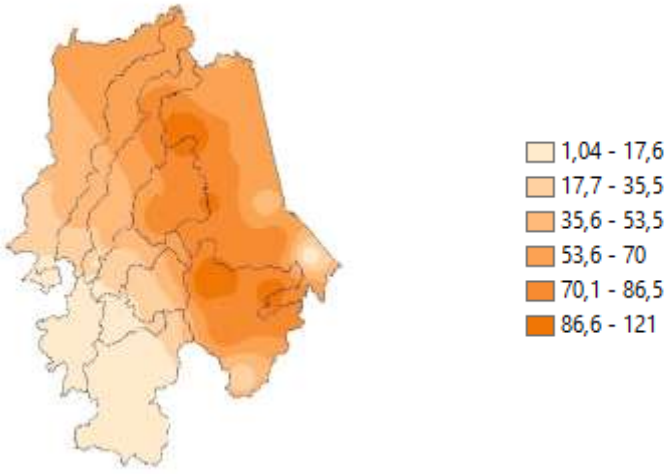
Proyección de precipitación para el 2040-11



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2040-11 para el escenario RCP4.5.

Figura 26

Proyección de precipitación para el 2043-11



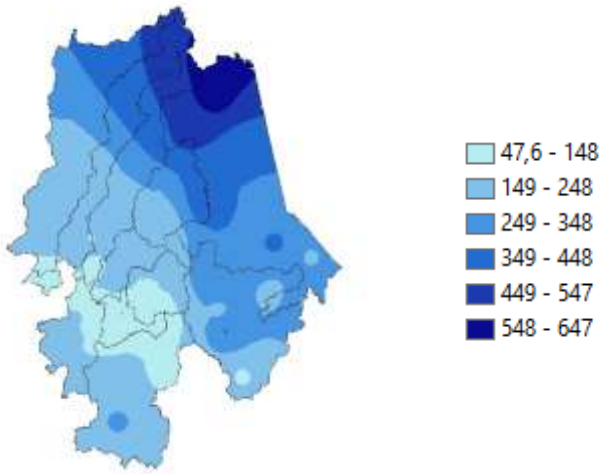
Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2043-11 para el escenario RCP4.5.

6.1.3 Periodo 2044-2053

Para los valores máximos de precipitación en el tercer periodo, se observa para el mes de abril de 2046 (Figura 27), un foco de lluvias máximas comprendidas entre 449 mm y 647 mm para la zona norte de los municipios de Tibú, Teorama, Convención y El Carmen; decreciendo en dirección sur-occidental, con precipitaciones mínimas (47,6 mm-148 mm) en el municipio de La Playa, en el sur de Hacarí y, norte de Ocaña y Ábrego, volviendo a tener un crecimiento de precipitaciones medias y mínimas (149 mm-248 mm) al sur de los municipios de Abrego y Ocaña. Por otra parte, para el mismo año en el mes de junio (Figura 28), los valores decrecen en dirección sur-occidental continuamente, comprendiendo precipitaciones máximas de 450 mm hasta mínimas de 0,036 mm. En síntesis, se visualiza una proyección similar en las dos estimaciones.

Figura 27

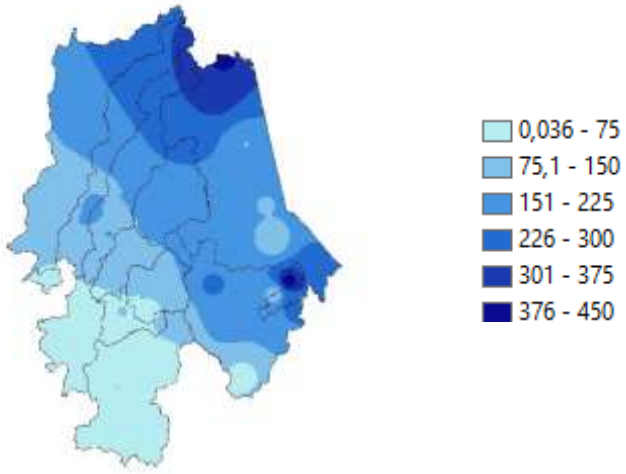
Proyección de precipitación para el 2046-04



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2046-04 para el escenario RCP4.5.

Figura 28

Proyección de precipitación para el 2046-06

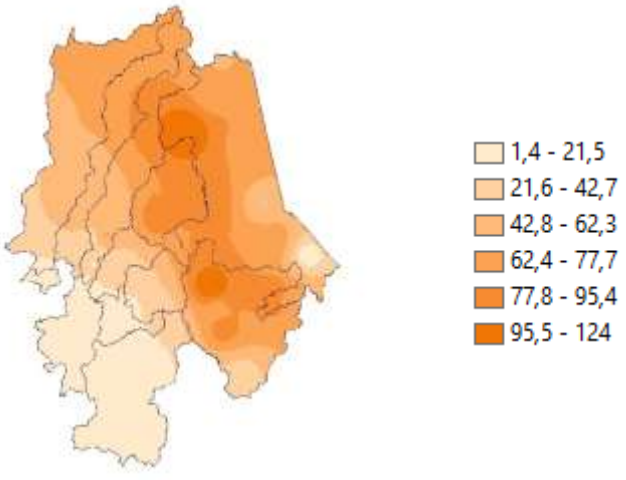


Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2046-06 para el escenario RCP4.5.

Durante este período se visualizan las precipitaciones mínimas, que corresponden a los años 2044 y 2048, para este primero en el mes de noviembre, como se observa en la Figura 29 se presentan precipitaciones entre 1,4 mm y 124 mm, estos cambios se reflejan desde la parte nor-oriental del mapa del Catatumbo y van disminuyendo las precipitaciones hacia la parte sur-occidental, evidenciando que las zonas con más escases de lluvias para esta época serían Ábrego, Ocaña, La Playa, Hacarí, San Calixto y parte de Convención. Igualmente, en diciembre del 2048 como se observa en la Figura 30 se contará con la misma tendencia, en esta temporada las precipitaciones disminuirán aún más y estarán entre 0,619 mm y 51,1 mm.

Figura 29

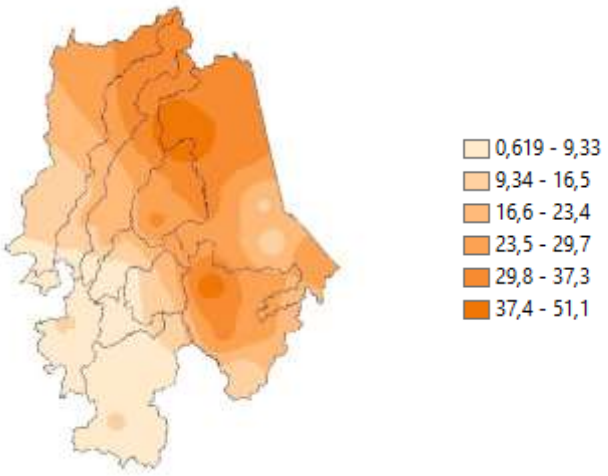
Proyección de precipitación para el 2044-11



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2044-11 para el escenario RCP4.5.

Figura 30

Proyección de precipitación para el 2048-12



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2048-12 para el escenario RCP4.5.

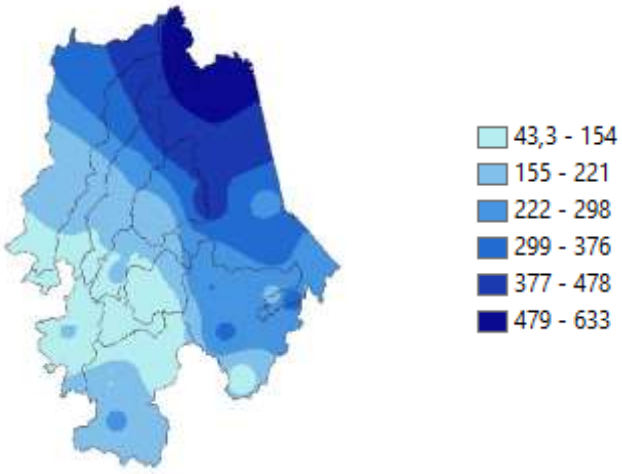
6.1.4 Periodo 2054-2063

Para los valores máximos de precipitación en el cuarto periodo, se observa para el mes de abril de 2056 (Figura 31), un foco de lluvias máximas comprendidas entre 377 mm y 633 mm para la zona norte de los municipios de Tibú, Teorama, Convención y El Carmen; decreciendo en dirección sur-occidental, con precipitaciones mínimas (43,3 mm-154 mm) en los municipios de La Playa, Ocaña, Norte de Abrego y Sur de San Calixto, Teorama, Hacarí, Convención y El Carmen, volviendo a tener un crecimiento de precipitaciones medias y mínimas (155 mm-221 mm) al sur del municipio de Abrego. Por otra parte, en el mes de abril de 2058 (Figura 32), los

valores decrecen en dirección sur-occidental continuamente, comprendiendo precipitaciones máximas de 683 mm hasta mínimas de 46,2 mm. En síntesis, se visualiza una proyección similar en las dos estimaciones.

Figura 31

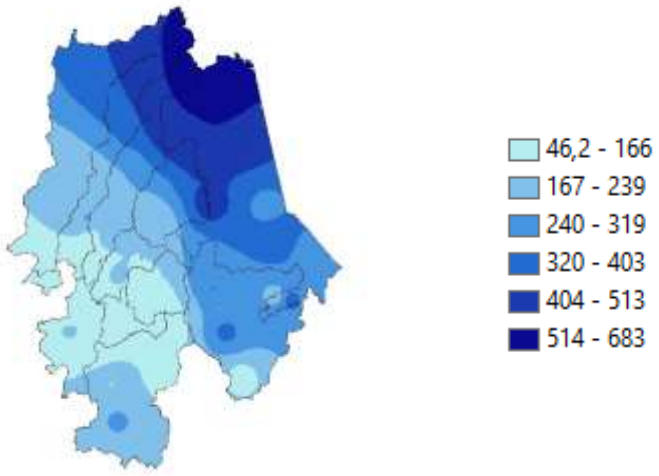
Proyección de precipitación para el 2056-04



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2056-04 para el escenario RCP4.5.

Figura 32

Proyección de precipitación para el 2058-04

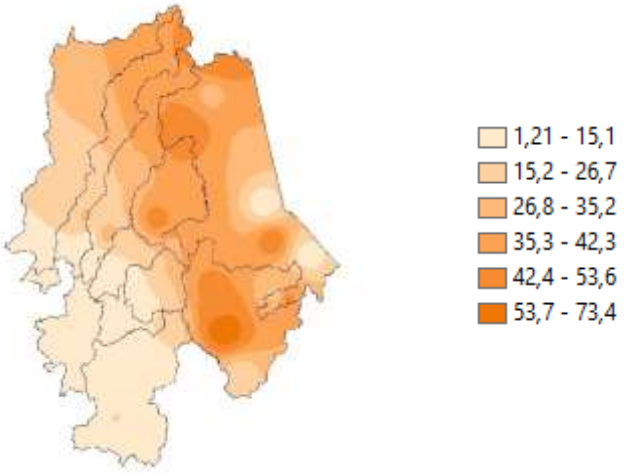


Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2058-04 para el escenario RCP4.5.

Durante este período se visualizan las precipitaciones mínimas, que corresponden a los años 2055 y 2063, para este primero en el mes de enero, como se observa en la Figura 33 se presentan precipitaciones entre 1,21 mm y 73,4 mm, estos cambios se reflejan desde la parte nor-oriental del mapa del Catatumbo y van disminuyendo las precipitaciones hacia la parte sur-occidental, evidenciando que las zonas con más escases de lluvias para esta época serían Ábrego, Ocaña, La Playa, Hacarí, San Calixto y parte de Convención. Igualmente, en febrero del 2063 como se observa en la Figura 34 se contará con la misma tendencia, en esta temporada las precipitaciones disminuirán aún más y estarán entre 1,6 mm y 49,2 mm.

Figura 33

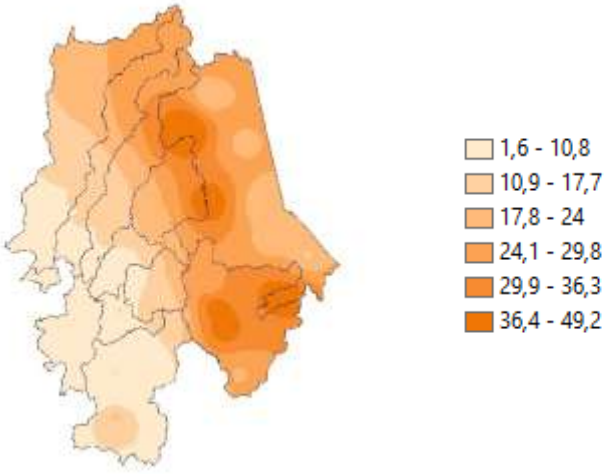
Proyección de precipitación para el 2055-01



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2055-01 para el escenario RCP4.5.

Figura 34

Proyección de precipitación para el 2063-02



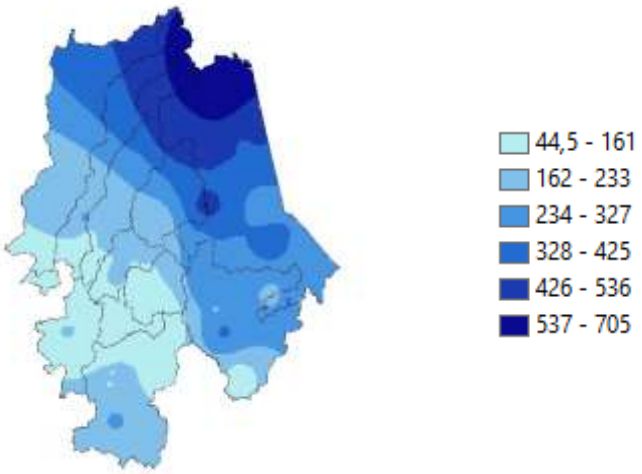
Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2063-02 para el escenario RCP4.5.

6.1.5 Periodo 2064-2074

Para los valores máximos de precipitación en el quinto periodo, se observa para el mes de abril de 2064 (Figura 35), un foco de lluvias máximas comprendidas entre 426 mm y 705 mm para la zona norte de los municipios de Tibú, Teorama, Convención y El Carmen; decreciendo en dirección sur-occidental, con precipitaciones mínimas (44,5 mm-161 mm) en el municipio de La Playa, en el sur de Hacarí y, norte de Ocaña y Ábrego, volviendo a tener un crecimiento de precipitaciones medias y mínimas (162 mm-233 mm) al sur de los municipios de Abrego y Ocaña. Por otra parte, para el año 2073 en el mes de mayo (Figura 36), los valores decrecen en dirección sur-occidental continuamente, comprendiendo precipitaciones máximas de 379 mm hasta mínimas de 4,05 mm. En síntesis, se visualiza una proyección similar en las dos estimaciones.

Figura 35

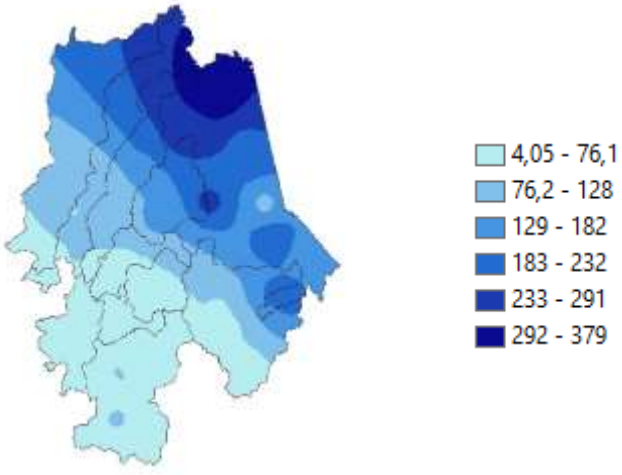
Proyección de precipitación para el 2064-04



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2064-04 para el escenario RCP4.5.

Figura 36

Proyección de precipitación para el 2073-05

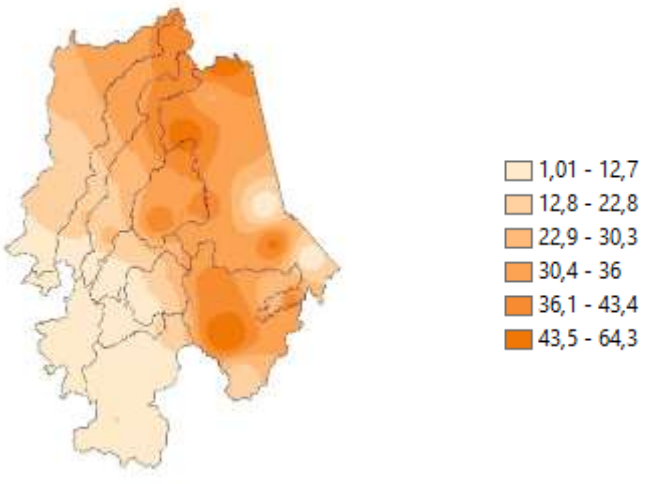


Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2073-05 para el escenario RCP4.5.

Durante este período se visualizan las precipitaciones mínimas, que corresponden a los años 2066 y 2070, para este primero en el mes de enero como se observa en la Figura 37 se presentan precipitaciones entre 1,01 mm y 64,3 mm, estos cambios se reflejan desde la parte nor-oriental del mapa del Catatumbo y van disminuyendo las precipitaciones hacia la parte sur-occidental, evidenciando que las zonas con más escases de lluvias para esta época serían Ábrego, Ocaña, La Playa, Hacarí, San Calixto y parte de Convención. Igualmente, en enero del 2070 como se observa en la Figura 38, se contará con la misma tendencia, en esta temporada las precipitaciones disminuirán aún más y estarán entre 0,983 mm y 58,6 mm.

Figura 37

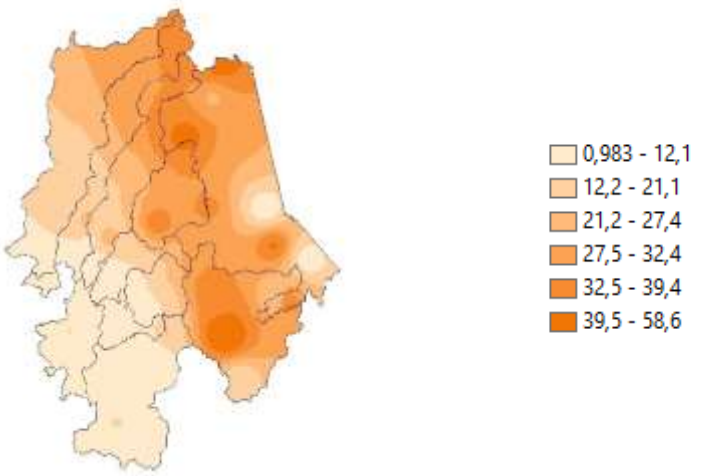
Proyección de precipitación para el 2066-01



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2066-01 para el escenario RCP4.5.

Figura 38

Proyección de precipitación para el 2070-01



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2070-01 para el escenario RCP4.5.

6.2 Gráficos para el escenario RCP8.5

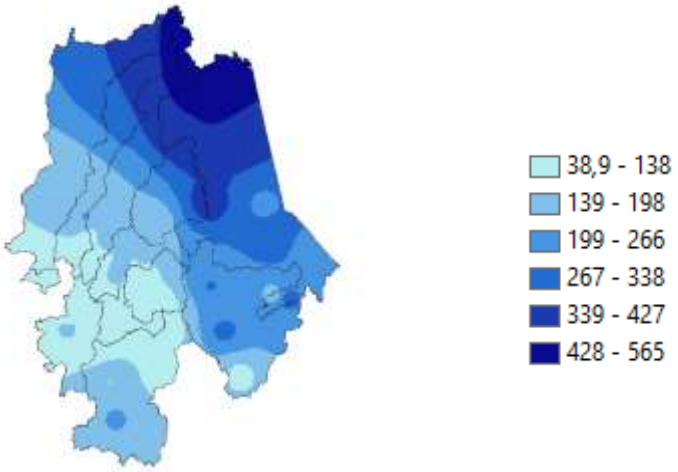
6.2.1 Periodo 2024-2033

Para los valores máximos de precipitación en el primer periodo, se observa para el mes de abril de 2024 (Figura 39), un foco de lluvias máximas comprendidas entre 339 mm y 565 mm para la zona norte de los municipios de Tibú, Teorama, Convención y El Carmen; decreciendo en dirección sur-occidental, con precipitaciones mínimas (38,9 mm-138 mm) en el municipio de La Playa, en el sur de Hacarí y, norte de Ocaña y Ábrego, volviendo a tener un crecimiento de precipitaciones medias y mínimas (139 mm-198 mm) al sur de los municipios de Abrego y

Ocaña. Por otra parte, para el año 2025 en el mes de abril (Figura 40), los valores decrecen en dirección sur-occidental continuamente, comprendiendo precipitaciones máximas de 590 mm hasta mínimas de 38,8 mm. En síntesis, se visualiza una proyección similar en las dos estimaciones, coincidiendo en que suceden en el mes de mayo.

Figura 39

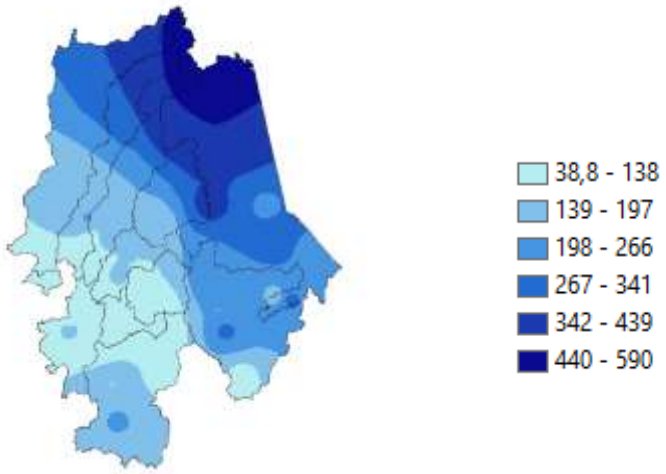
Proyección de precipitación para el 2024-04



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2024-04 para el escenario RCP8.5.

Figura 40

Proyección de precipitación para el 2025-04

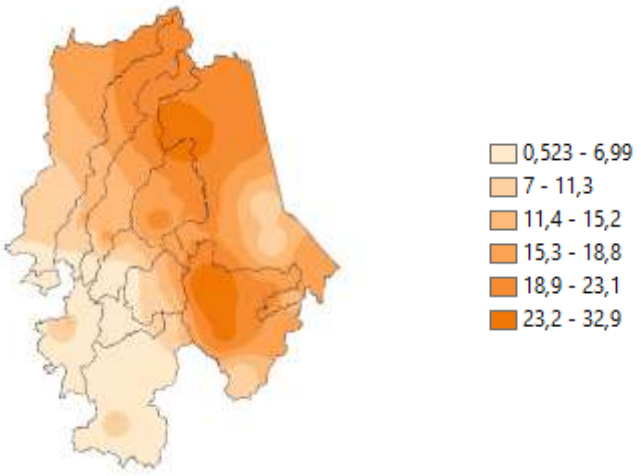


Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2025-04 para el escenario RCP8.5.

Durante este período se visualizan las precipitaciones mínimas, que corresponden a los años 2028 y 2033, para este primero en el mes de diciembre como se observa en la Figura 41 se presentan precipitaciones entre 0,523 mm y 32,9 mm, estos cambios se reflejan desde la parte nor-oriental del mapa del Catatumbo y van disminuyendo las precipitaciones hacia la parte sur-occidental, evidenciando que las zonas con más escases de lluvias para esta época serían Ábrego, Ocaña, La Playa, Hacarí, San Calixto y parte de Convención. Igualmente, en noviembre del 2033 como se observa en la Figura 42 se contará con la misma tendencia, en esta temporada las precipitaciones disminuirán aún más y estarán entre 1,06 mm y 114 mm.

Figura 41

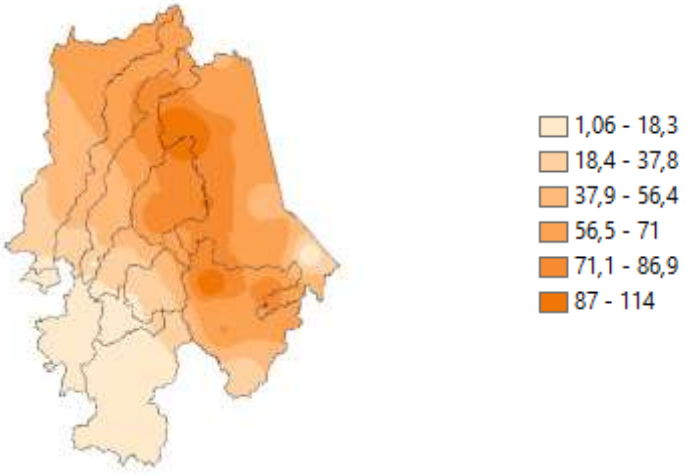
Proyección de precipitación para el 2028-12



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2028-12 para el escenario RCP8.5.

Figura 42

Proyección de precipitación para el 2033-11



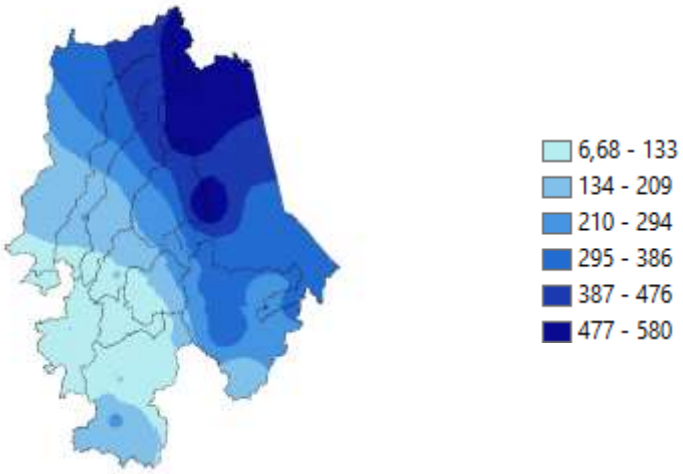
Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2033-11 para el escenario RCP8.5.

6.2.2 Periodo 2034-2043

Para los valores máximos de precipitación en el segundo periodo, se observa para el mes de marzo de 2041 (Figura 43), un foco de lluvias máximas comprendidas entre 387 mm y 580 mm para la zona norte de los municipios de Tibú, Teorama, Convención y El Carmen; decreciendo en dirección sur-occidental, con precipitaciones mínimas (6,68 mm-133 mm) en los municipios de La Playa, Ocaña, Norte de Abrego y Sur de San Calixto, Teorama, Hacarí, Convención y El Carmen, volviendo a tener un crecimiento de precipitaciones medias y mínimas (134 mm-209 mm) al sur del municipio de Abrego. Por otra parte, en el mes de abril de 2041 (Figura 44), los valores decrecen en dirección sur-occidental continuamente, comprendiendo precipitaciones máximas de 534 mm hasta mínimas de 38 mm. En síntesis, se visualiza una proyección similar en las dos estimaciones.

Figura 43

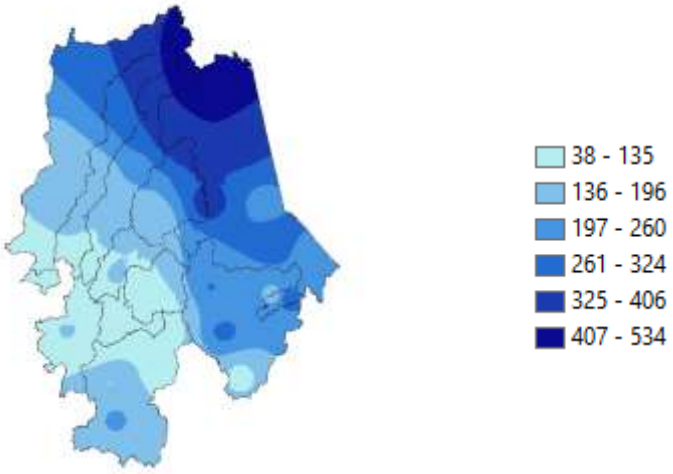
Proyección de precipitación para el 2041-03



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2041-03 para el escenario RCP8.5.

Figura 44

Proyección de precipitación para el 2041-04

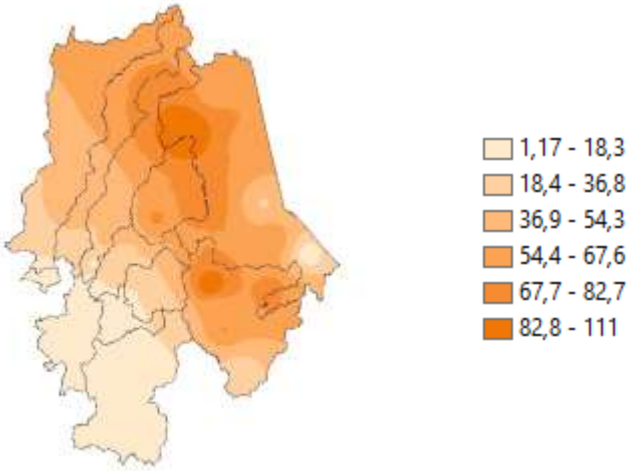


Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2041-04 para el escenario RCP8.5.

Durante este período se visualizan las precipitaciones mínimas, que corresponden a los años 2035 y 2038, para este primero en el mes de noviembre como se observa en la Figura 45 se presentan precipitaciones entre 1,17 mm y 111 mm, estos cambios se reflejan desde la parte nor-oriental del mapa del Catatumbo y van disminuyendo las precipitaciones hacia la parte sur-occidental, evidenciando que las zonas con más escases de lluvias para esta época serían Ábrego, Ocaña, La Playa, Hacarí, San Calixto y parte de Convención. Igualmente, en diciembre del 2038 como se observa en la Figura 46 se contará con la misma tendencia, en esta temporada las precipitaciones disminuirán aún más y estarán entre 0,537 mm y 35,3 mm.

Figura 45

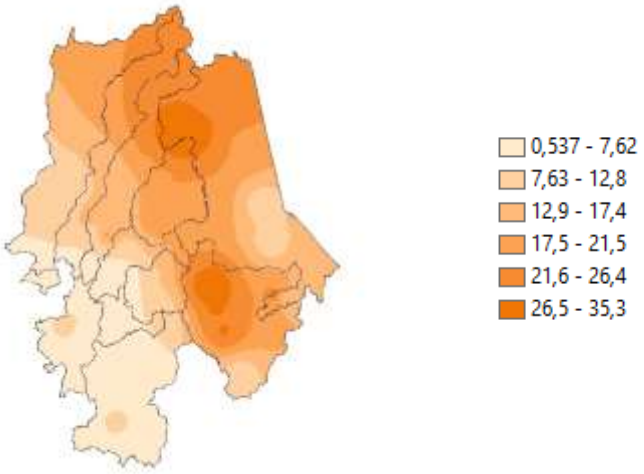
Proyección de precipitación para el 2035-11



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2035-11 para el escenario RCP8.5.

Figura 46

Proyección de precipitación para el 2038-12



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2038-12 para el escenario RCP8.5.

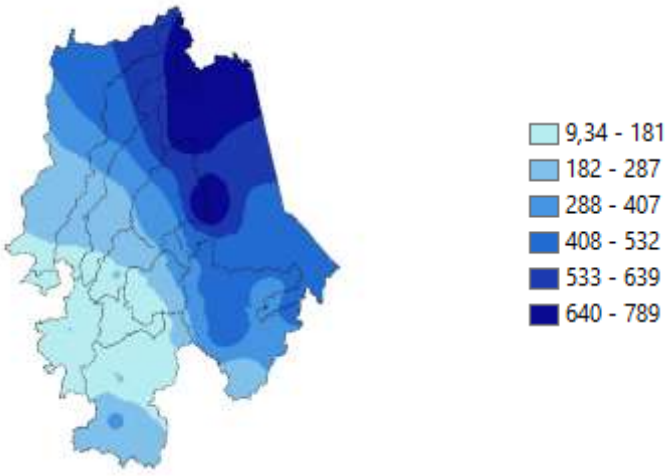
6.2.3 Periodo 2044-2053

Para los valores máximos de precipitación en el tercer periodo, se observa para el mes de marzo de 2046 (Figura 47), un foco de lluvias máximas comprendidas entre 533 mm y 789 mm para la zona norte de los municipios de Tibú, Teorama, Convención y El Carmen; decreciendo en dirección sur-occidental, con precipitaciones mínimas (9,34 mm-181 mm) en los municipios de La Playa, Ocaña, Norte de Abrego y Sur de San Calixto, Teorama, Hacarí, Convención y El

Carmen, volviendo a tener un crecimiento de precipitaciones medias y mínimas (182 mm-287 mm) al sur del municipio de Abrego. Por otra parte, en el mes de abril de 2047 (Figura 48), los valores decrecen en dirección sur-occidental continuamente, comprendiendo precipitaciones máximas de 797 mm hasta mínimas de 50,4 mm. En síntesis, se visualiza una proyección similar en las dos estimaciones.

Figura 47

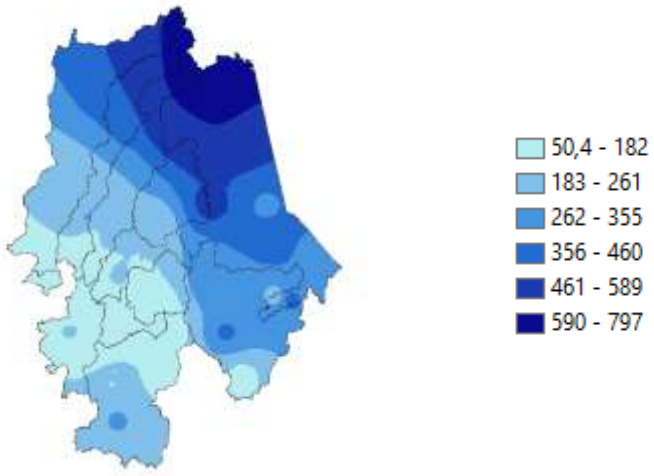
Proyección de precipitación para el 2046-03



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2046-03 para el escenario RCP8.5.

Figura 48

Proyección de precipitación para el 2047-04

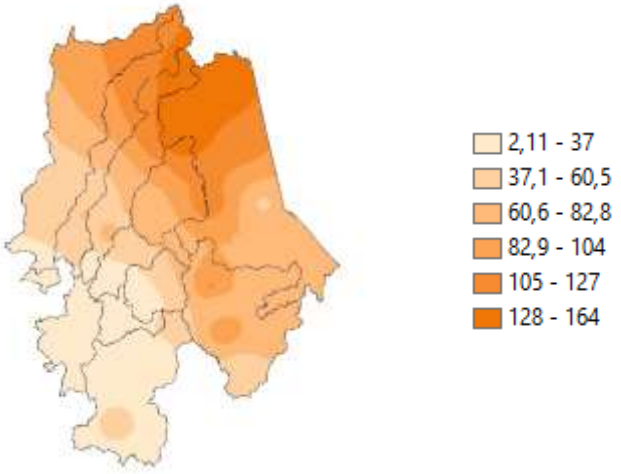


Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2047-04 para el escenario RCP8.5.

Durante este período se visualizan las precipitaciones mínimas, que corresponden a los años 2047 y 2049, para este primero en el mes de octubre como se observa en la Figura 49 se presentan precipitaciones entre 2,11 mm y 164 mm, estos cambios se reflejan desde la parte nor-oriental del mapa del Catatumbo y van disminuyendo las precipitaciones hacia la parte sur-occidental, evidenciando que las zonas con más escases de lluvias para esta época serían Ábrego, Ocaña, La Playa, Hacarí, San Calixto y parte de Convención. Igualmente, en enero del 2049 como se observa en la Figura 50 se contará con la misma tendencia, en esta temporada las precipitaciones disminuirán aún más y estarán entre 1,02 mm y 66,1 mm.

Figura 49

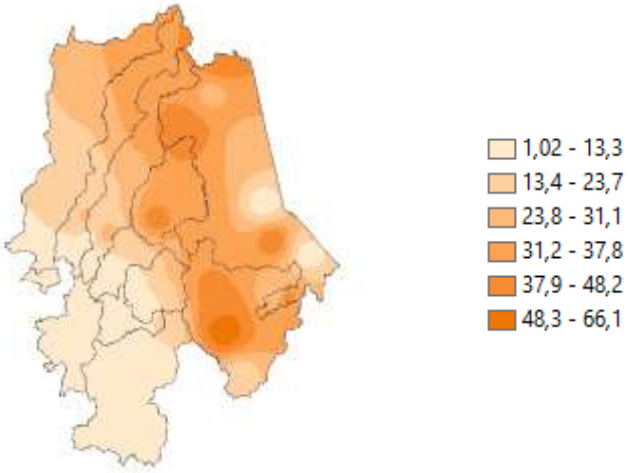
Proyección de precipitación para el 2047-10



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2047-10 para el escenario RCP8.5.

Figura 50

Proyección de precipitación para el 2049-01



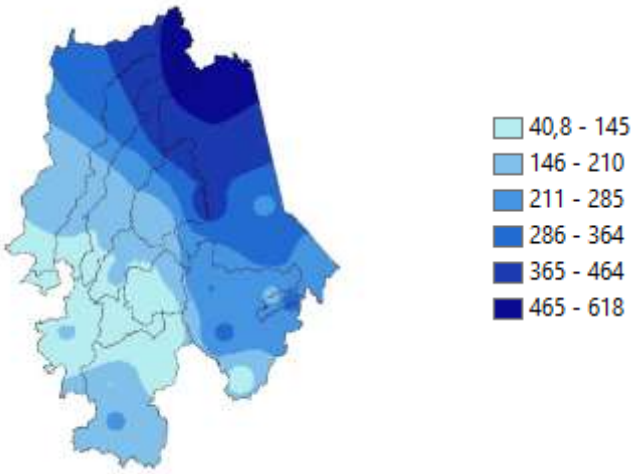
Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2049-01 para el escenario RCP8.5.

6.2.4 Periodo 2054-2063

Para los valores máximos de precipitación en el cuarto periodo, se observa para el mes de abril de 2056 (Figura 51), un foco de lluvias máximas comprendidas entre 365 mm y 618 mm para la zona norte de los municipios de Tibú, Teorama, Convención y El Carmen; decreciendo en dirección sur-occidental, con precipitaciones mínimas (40,8 mm-145 mm) en los municipios de La Playa, Ocaña, Norte de Abrego y Sur de San Calixto, Teorama, Hacarí, Convención y El Carmen, volviendo a tener un crecimiento de precipitaciones medias y mínimas (146 mm-210 mm) al sur del municipio de Abrego. Por otra parte, en el mes de marzo de 2057 (Figura 52), los valores decrecen en dirección sur-occidental continuamente, comprendiendo precipitaciones máximas de 671 mm hasta mínimas de 8,17 mm. En síntesis, se visualiza una proyección similar en las dos estimaciones.

Figura 51

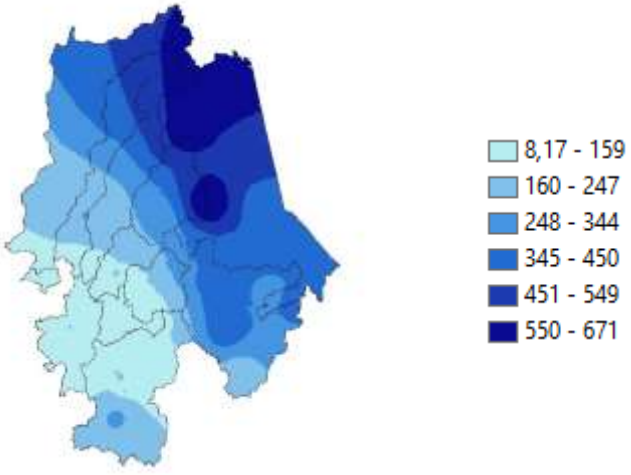
Proyección de precipitación para el 2056-04



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2056-04 para el escenario RCP8.5.

Figura 52

Proyección de precipitación para el 2057-03

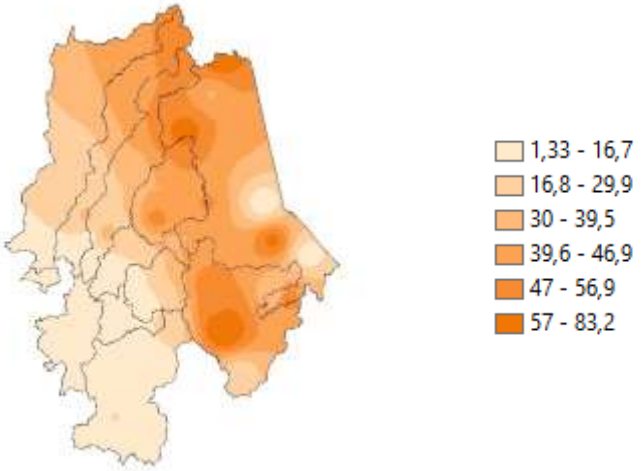


Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2057-03 para el escenario RCP8.5.

Durante este período se visualizan las precipitaciones mínimas, que corresponden a los años 2054 y 2062, para este primero en el mes de enero como se observa en la Figura 53 se presentan precipitaciones entre 1,33 mm y 83,2 mm, estos cambios se reflejan desde la parte nor-oriental del mapa del Catatumbo y van disminuyendo las precipitaciones hacia la parte sur-occidental, evidenciando que las zonas con más escases de lluvias para esta época serían Ábrego, Ocaña, La Playa, Hacarí, San Calixto y parte de Convención. Igualmente, en febrero del 2062 como se observa en la Figura 54 se contará con la misma tendencia, en esta temporada las precipitaciones disminuirán aún más y estarán entre 1,92 mm y 67,1 mm.

Figura 53

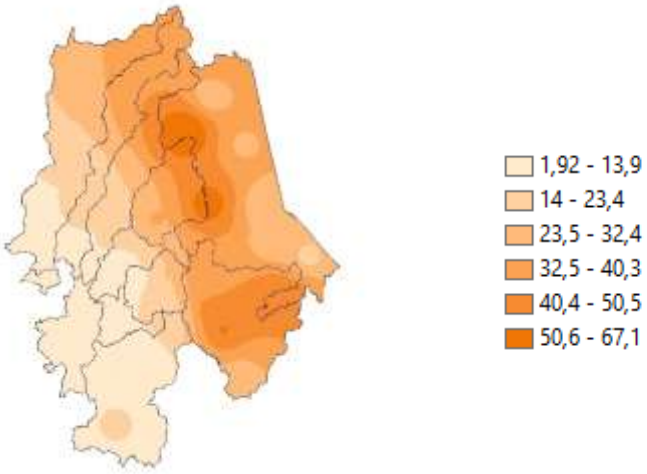
Proyección de precipitación para el 2054-01



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2054-01 para el escenario RCP8.5.

Figura 54

Proyección de precipitación para el 2062-02



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2062-02 para el escenario RCP8.5.

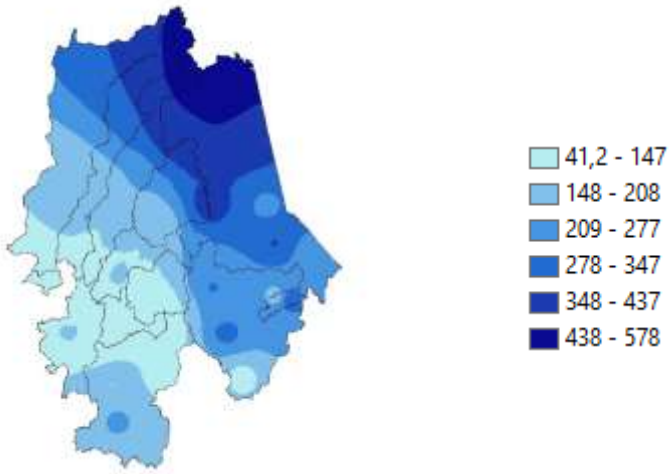
6.2.5 Periodo 2064-2074

Para los valores máximos de precipitación en el cuarto periodo, se observa para el mes de abril de 2064 (Figura 55), un foco de lluvias máximas comprendidas entre 348 mm y 578 mm para la zona norte de los municipios de Tibú, Teorama, Convención y El Carmen; decreciendo en dirección sur-occidental, con precipitaciones mínimas (41,2 mm-147 mm) en los municipios de La Playa, Ocaña, Norte de Abrego y Sur de San Calixto, Teorama, Hacarí, Convención y El

Carmen, volviendo a tener un crecimiento de precipitaciones medias y mínimas (148 mm-208 mm) al sur del municipio de Abrego. Por otra parte, en el mes de abril de 2073 (Figura 56), los valores decrecen en dirección sur-occidental continuamente, comprendiendo precipitaciones máximas de 551 mm hasta mínimas de 39,6 mm. En síntesis, se visualiza una proyección similar en las dos estimaciones.

Figura 55

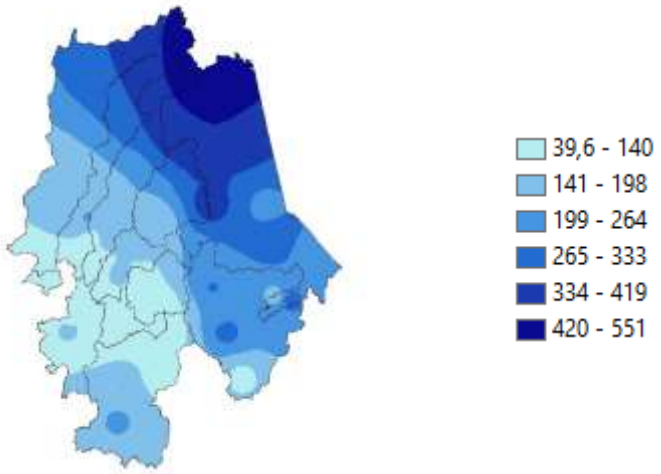
Proyección de precipitación para el 2064-04



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2064-04 para el escenario RCP8.5.

Figura 56

Proyección de precipitación para el 2073-04

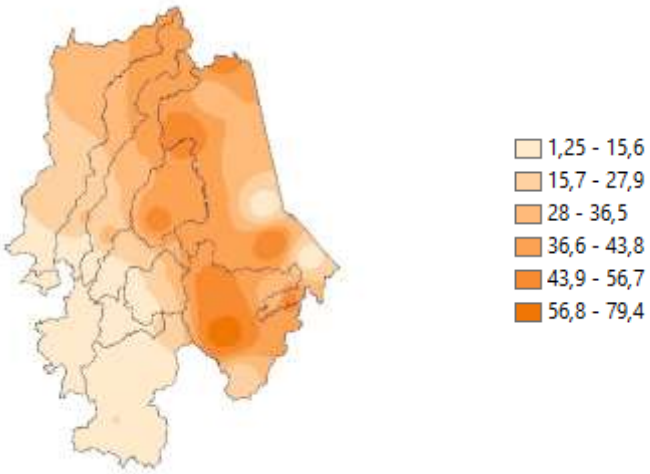


Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2073-04 para el escenario RCP8.5.

Durante este período se visualizan las precipitaciones mínimas, que corresponden al año 2065, para este primero en el mes de enero como se observa en la Figura 57 se presentan precipitaciones entre 1,25 mm y 79,4 mm, estos cambios se reflejan desde la parte nor-oriental del mapa del Catatumbo y van disminuyendo las precipitaciones hacia la parte sur-occidental, evidenciando que las zonas con más escases de lluvias para esta época serían Ábrego, Ocaña, La Playa, Hacarí, San Calixto y parte de Convención. Igualmente, en diciembre del mismo año, como se observa en la Figura 58 se contará con la misma tendencia, en esta temporada las precipitaciones disminuirán aún más y estarán entre 0,811 mm y 55 mm.

Figura 57

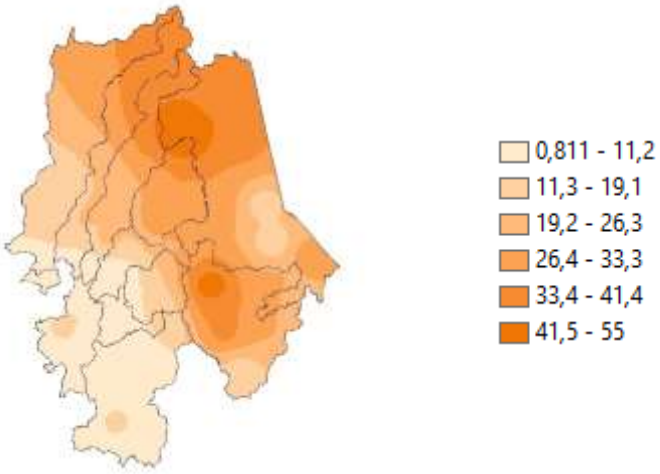
Proyección de precipitación para el 2065-01



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2065-01 para el escenario RCP8.5.

Figura 58

Proyección de precipitación para el 2065-12



Nota: La figura muestra el comportamiento de la precipitación proyectada para del 2065-12 para el escenario RCP8.5.

Capítulo 7. Análisis de resultados

En los últimos años, se ha observado la aparición del fenómeno de El Niño en diferentes regiones del país. En ciertas zonas se manifiesta a través de precipitaciones, mientras que en otras se observan sequias, principalmente durante los meses de diciembre, enero y febrero. Expertos prevén que este evento climático podría prolongarse hasta mayo de 2024. Esta situación podría acarrear daños en la agricultura, reducción en los niveles de agua en las reservas hidroeléctricas, que constituyen la principal fuente de energía eléctrica nacional, y un incremento en la incidencia de incendios forestales. (Liz Castrellón & Camilo Álvarez, 2023)

Para este proyecto se realiza la comparación entre las precipitaciones presentadas para el periodo histórico más cercano a la ventana de tiempo futuro: 2013-2023, escogiendo el mes de más lluvias y el más seco, tomados de la descarga de 20 estaciones meteorológicas disponibles para ese periodo, a través de la plataforma del IDEAM, aclarando que los datos se mantuvieron sin ningún tipo de tratamiento posterior; y, las proyecciones con valores igualmente más críticos obtenidos en el presente trabajo de las 42 estaciones seleccionadas, teniendo en cuenta los dos escenarios de cambio climático usados, tales como RCP4.5 y RCP8.5 en los periodos comprendidos entre 2024-2074.

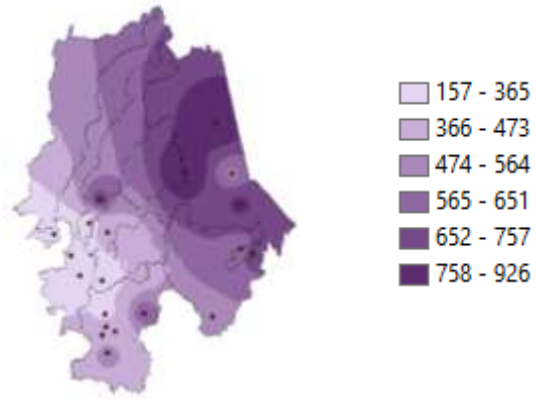
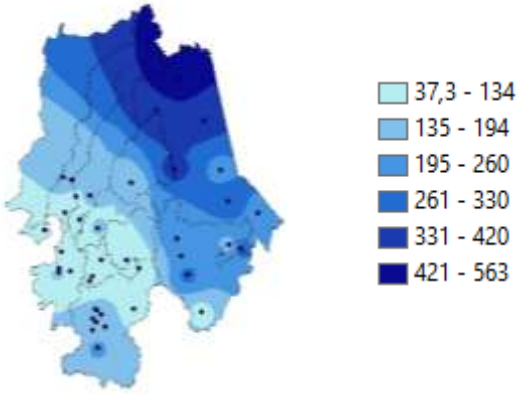
Se presenta la comparación de valores máximos de precipitación, en la que se determinan valores del año 2018, que se destacó como el más fresco en promedio de los últimos cuatro años. Esto se respalda con datos que indican que la temperatura media global se elevó aproximadamente 1°C (0.99 ± 0.13 °C) por encima del nivel base de la era preindustrial (1850-

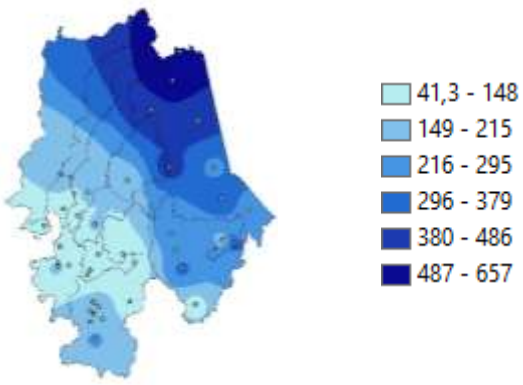
1900). La mayoría de los riesgos naturales estuvieron vinculados a fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, las inundaciones continuaron siendo el fenómeno que afectó a más personas. (Enrique Vivanco Font, 2019)

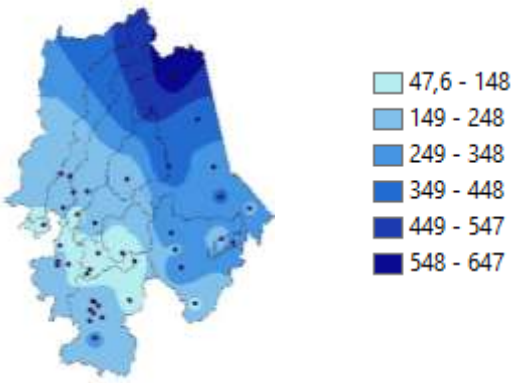
En la Tabla 4 y 5, se aprecia el contraste existente entre las precipitaciones máximas de septiembre del 2018, como el mes del periodo con mayores valores de lluvia llegando hasta los 926 mm, con respecto a las proyecciones de ambas trayectorias RCP4.5 y RCP 8.5, respectivamente; con valores máximos que oscilan entre 563 mm y 705 mm para la primera y, entre 578 mm y 797 mm para la segunda. En dichas proyecciones realizadas se observa que los datos tienden a ser mayores en la zona nor-oriental, decrecen en dirección sur-occidental y aumentan nuevamente al sur de la zona de estudio. Asimismo, se resalta la disminución predominante de las precipitaciones estimadas ante las registradas en el año 2018, contemplando que abril es el mes en el que este fenómeno se manifiesta con mayor frecuencia.

Tabla 4

Comparativa de mapas de valores máximos de precipitación con RCP4.5

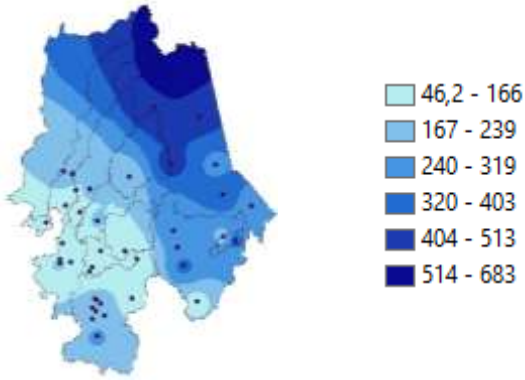
Precipitación 2018-09	Proyección RCP 4.5 para 2024-04
	
Proyección RCP 4.5 para 2043-04	Proyección RCP 4.5 para 2046-04

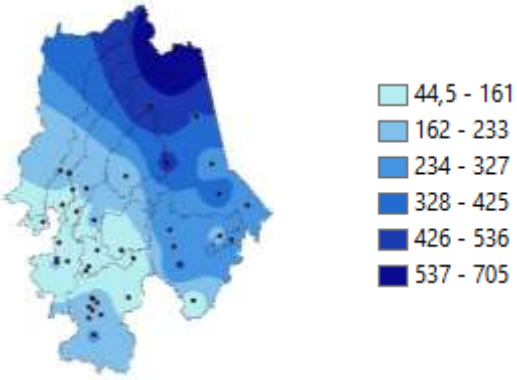




Proyección RCP 4.5 para 2058-04

Proyección RCP 4.5 para 2064-04

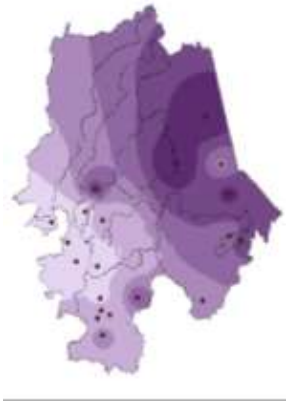
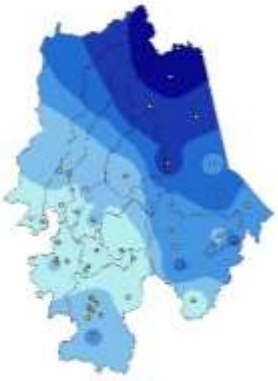
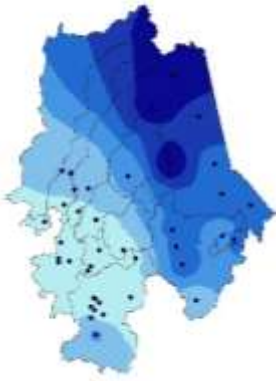
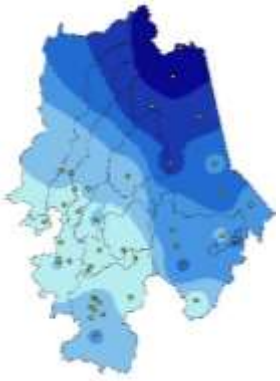
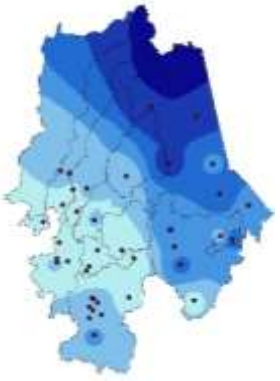




Nota: La tabla muestra la comparación realizada entre el comportamiento de la precipitación máxima registrada en el 2018 y las precipitaciones máximas proyectadas para el escenario RCP4.5.

Tabla 5

Comparativa de mapas de valores máximos de precipitación con RCP8.5

Precipitación 2018-09	Proyección RCP 8.5 para 2025-04
	
Proyección RCP 8.5 para 2041-03	Proyección RCP 8.5 para 2047-04
	
Proyección RCP 8.5 para 2057-03	Proyección RCP 8.5 para 2064-04
	

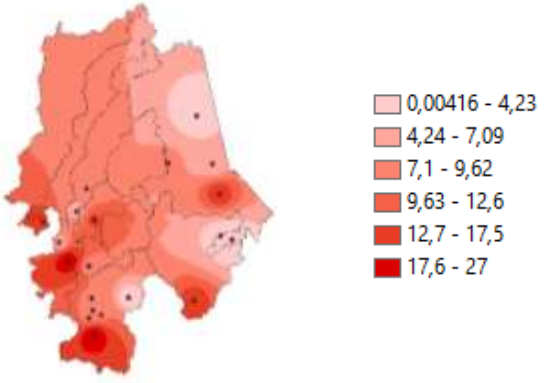
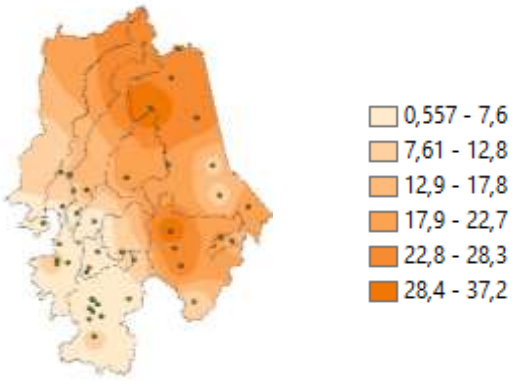
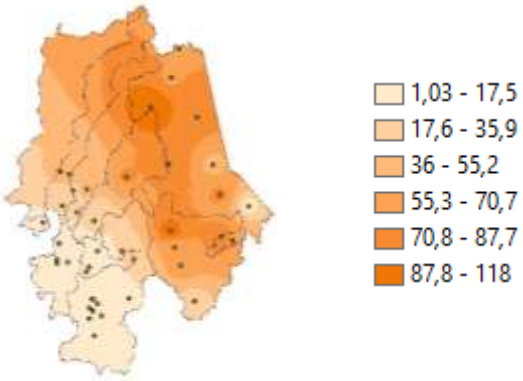
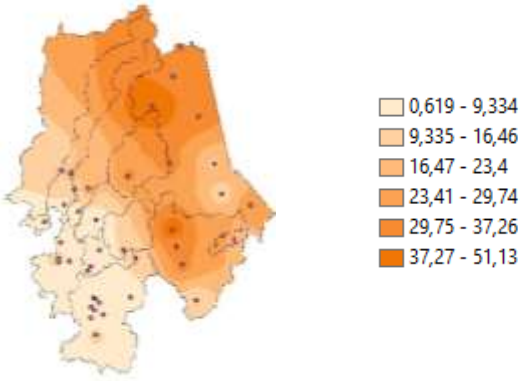
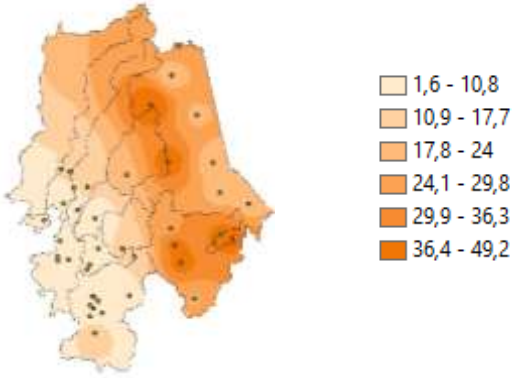
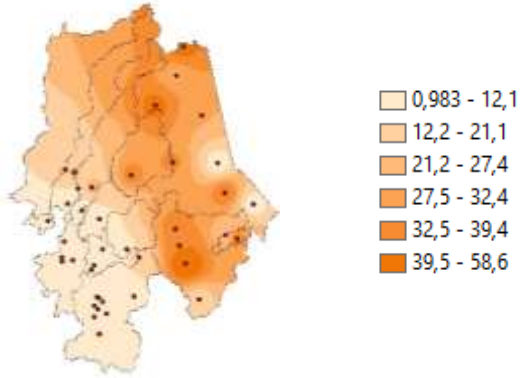
Nota: La tabla muestra la comparación realizada entre el comportamiento de la precipitación máxima registrada en el 2018 y las precipitaciones máximas proyectadas para el escenario RCP8.5.

A su vez, se presenta la comparación de valores mínimos de precipitación, en la que se determinan valores del año 2019, siendo este año considerado como el segundo más cálido registrado, con una temperatura global promedio 1.1 grados Celsius por encima del período preindustrial, siendo superado históricamente solo por 2016 debido a un fuerte fenómeno de El Niño. Junto con las altas temperaturas, se observaron fenómenos como la retirada de hielo en los polos, aumento del nivel del mar y cambios en los patrones climáticos extremos, teniendo un impacto notable en la salud humana y el medio ambiente. (Naciones Unidas, 2020)

En la Tabla 6 y 7 se presenta el contraste de valores de precipitación mínimos de enero del 2019, como el mes del periodo con menores valores de lluvia llegando hasta los 27 mm, con respecto a las proyecciones de ambas trayectorias RCP4.5 y RCP 8.5, respectivamente; representadas con valores mínimos que oscilan entre 37,2 mm y 118 mm para la primera y, entre 32,9 mm y 67,1 mm para la segunda. En dichas graficas se observa que los datos tienden a ser mayores en la zona nor-oriental y oriental, y van decreciendo hacia el sur de la zona de estudio, como se dio generalmente en las proyecciones realizadas. De igual forma, se destaca un leve aumento de las precipitaciones estimadas ante las registradas en el año 2019.

Tabla 6

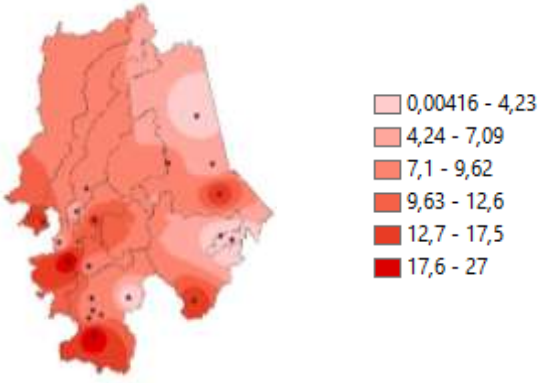
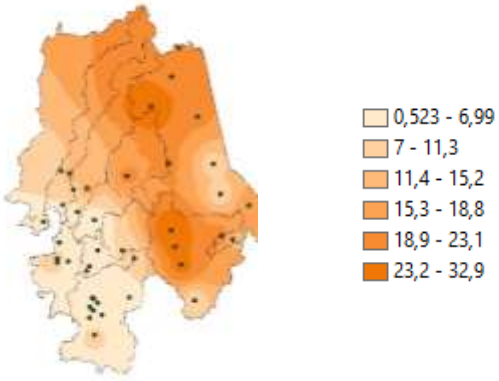
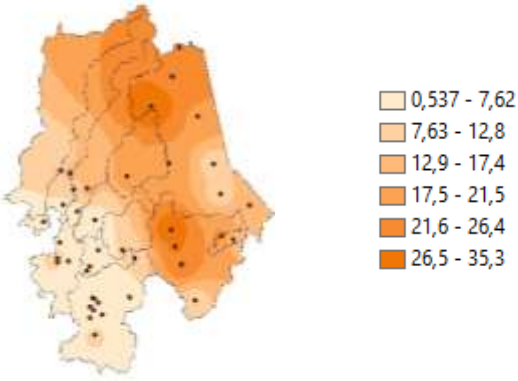
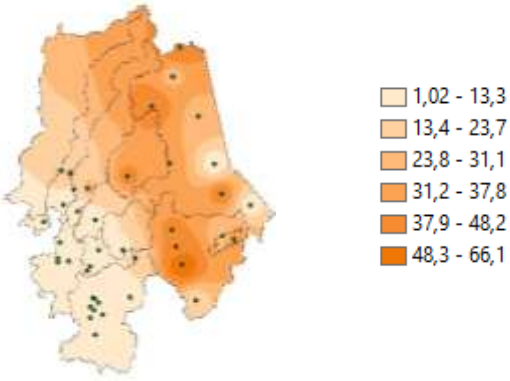
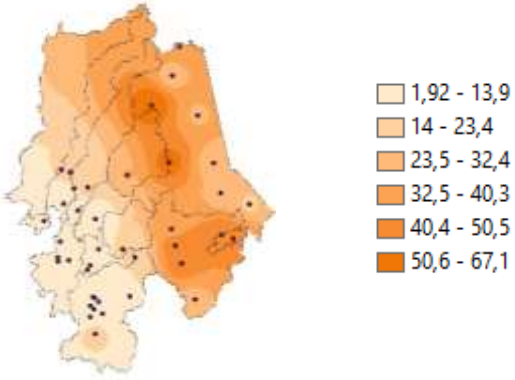
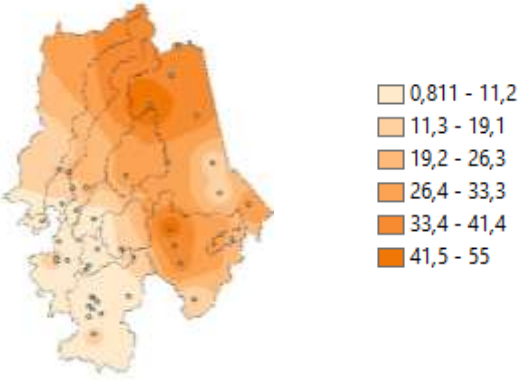
Comparativa de mapas de valores mínimos de precipitación con RCP4.5

Precipitación 2019-01	Proyección RCP 4.5 para 2026-12
	
Proyección RCP 4.5 para 2040-11	Proyección RCP 4.5 para 2048-12
	
Proyección RCP 4.5 para 2063-02	Proyección RCP 4.5 para 2070-01
	

Nota: La tabla muestra la comparación realizada entre el comportamiento de la precipitación mínima registrada en el 2019 y las precipitaciones mínimas proyectadas para el escenario RCP4.5.

Tabla 7

Comparativa de mapas de valores mínimos de precipitación con RCP8.5

Precipitación 2019-01	Proyección RCP 8.5 para 2028-12
	
Proyección RCP 8.5 para 2038-12	Proyección RCP 8.5 para 2049-01
	
Proyección RCP 8.5 para 2062-02	Proyección RCP 8.5 para 2065-12
	

Nota: La tabla muestra la comparación realizada entre el comportamiento de la precipitación mínima registrada en el 2019 y las precipitaciones mínimas proyectadas para el escenario RCP8.5.

Capítulo 8. Conclusiones

Se identificaron precipitaciones futuras del modelo regional MIROC5 para el periodo comprendido entre los años 2024 y 2074 en el Catatumbo, tomando en consideración las trayectorias RCP 4.5 y RCP 8.5. Determinando que los meses proyectados que presentan las dos precipitaciones máximas (temporada de mayores lluvias) generalmente son marzo y abril, y las dos precipitaciones mínimas (temporada de sequía) se dan en noviembre y diciembre.

La determinación de escenarios futuros se llevó a cabo ajustando las proyecciones de precipitación, adaptando así los datos a las condiciones particulares de la zona del Catatumbo. Se evidenció mediante los mapas de distribución de precipitaciones, para el municipio de Tibú valores máximos con niveles que oscilan entre los 700 mm y 800 mm, para los municipios Ocaña, Ábrego y La Playa una disminución de niveles próximos entre los 100 mm y 200 mm, para los escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5. Esta tendencia de la precipitación es consistente con las características climáticas típicas de la región.

Al analizar las representaciones graficas futuras del comportamiento de la precipitación en la zona, de acuerdo al modelo climático regional MIROC5, se considera la existencia de una buena correlación de datos conforme a las tendencias climáticas globales y regionales, en las que se anticipan lluvias fuertes durante épocas propensas a ser más húmedas y períodos más secos durante posibles temporadas de sequía. Estos resultados se pueden emplear como insumo para la formulación de estrategias y políticas que mitiguen los posibles impactos de eventos climáticos extremos.

Capítulo 9. Recomendaciones

Aunque los datos proporcionados por los modelos climáticos ofrecen una visión valiosa del panorama climático, existen algunas áreas de incertidumbre y limitaciones del estudio, como la disponibilidad de datos, posibles sesgos y la variabilidad climática, que puede afectar la precisión de las proyecciones. Se recomienda que, para minimizar ese margen de error en futuras investigaciones, instituciones competentes como el IDEAM, encargada de la instalación y monitoreo de las estaciones meteorológicas, tengan en cuenta la ampliación del número de éstas en la zona del Catatumbo y otras regiones similares, así como la toma de datos climatológicos de manera constante y permanente.

Referencias

Ariza-Zabala, D. A., Sánchez-Mejía, C. D., & Carreño- García, K. (2022). Propiedades volumétricas de mezclas asfálticas en caliente con asfalto natural “MAPIA” y grano de caucho reciclado como llenante mineral. *Revista Ingenio*, *19*(1), 43-49. https://doi.org/10.22463/2011642X.3051

Blázquez, J. (2011). *Proyecciones climáticas sobre Sudamérica utilizando modelos climáticos globales. Análisis de incertidumbres* [Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales]. https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/tesis/document/tesis_n5093_Blazquez

Bonilla-Ovallos, C. A., & Mesa Sánchez, O. J. (2017). Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *41*(158), 107. https://doi.org/10.18257/raccefyn.427

Bozkurt, D., Urquiza, A., Billi, M., Falvey, M., Muñoz, F., Valdebenito, N., Meneses, M., Saveedra, F., Tondreau, N., & Ogaz, M. G. (2018). *Simulaciones climáticas regionales*. 26.

Broto, A. (2020, octubre 16). *Estas son las catástrofes naturales más mortales del último siglo*. El Español. https://www.elespanol.com/ciencia/medio-ambiente/20201016/catastrofes-naturales-mortales-ultimo-siglo/527697652_0.html

Bustamante Lozano, Á. M., Páez Martínez, A., Espitia Barrera, J. E., & Cárdenas Castro, E. (2013). Análisis de datos meteorológicos para identificar y definir el clima en Yopal, Casanare. *Revista de Medicina Veterinaria*, *25*, 85. https://doi.org/10.19052/mv.2301

Cambio climático—Desarrollo Sostenible. (2022). https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/

CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DE NORTE DE SANTANDER. (2020). http://www.ideam.gov.co/AtlasWeb/info/Textos/Departamentos/memoNORTESANTANDER.pdf

Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute. (2009). *Guía Metodológica –Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP*.

Cómo funciona IDW—ArcGIS Pro | Documentación. (2016). https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-idw-works.htm

Comprender el análisis de interpolación—ArcGIS Pro | Documentación. (2016). https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/understanding-interpolation-analysis.htm

Criado-Rodríguez, D. M., Pacheco-Vergel, W. A., & Afanador-García, N. (2020). Vulnerabilidad sísmica de centros poblados: Estudio de caso. *Revista Ingenio*, *17*(1), 43-48. https://doi.org/10.22463/2011642X.2441

Descripción general del conjunto de herramientas Interpolación—ArcGIS Pro | Documentación. (2016). https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-interpolation-tools.htm

Diego Murillo, Irene Ortega, Juan David Carrillo, Andrés Pardo, & Jeiser Rendón. (2012). *Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos*.

https://bibliotecadigital.usb.edu.co/flip/?pdf=https://bibliotecadigital.usb.edu.co/server/api/core/bitstreams/26df87f5-8db0-47d9-8d78-3cec1da6ffc3/content

Distribuciones de probabilidades. (2014). Epidat. https://www.sergas.es/Saude-publica/Documents/1899/Ayuda_Epidat_4_Distribuciones_de_probabilidad_Octubre2014.pdf

El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). (2023, noviembre 9). https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/el-nino-southern-oscillation-(enso)

Enrique Vivanco Font. (2019). *Estado del clima durante el 2018 Indicadores del cambio climático*. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27183/1/BCN_Estado_del_clima_durante_el_2018_OMM.pdf

Estupiñan, D. F. G. (2018). *APLICABILIDAD DE DATOS CLIMATOLÓGICOS ESCALADOS PARA LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO TONA EN SANTANDER*.

Florian-Vergara, C., Salas, H. D., & Builes-Jaramillo, A. (2021). Análisis de la precipitación y la evaporación en el Orinoco colombiano según los modelos climáticos regionales del experimento CORDEX-CORE. *TecnoLógicas*, *24*(52), e2144. https://doi.org/10.22430/22565337.2144

Gómez-Galván, M., Gallardo-Amaya, R., & Macgregor-Torrado, A. A. (2019). Pavimentación con asfalto natural “MAPIA”. Estudio de caso: Proyecto mejoramiento de la vía El Diviso – Torcoroma del municipio de San Martin, Cesar. *Revista Ingenio*, *16*(1), 10-15. https://doi.org/10.22463/2011642X.2334

IDEAM. (2017). *100% de los municipios de Colombia en riesgo por CAMBIO CLIMÁTICO* (25).

IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability | Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

Jairo Delgado Mora, Santiago Tobón Rubio, & Lorenza Arango Vásquez. (2016). *Una apuesta por la competitividad del Catatumbo*. https://www.icpcolombia.org/dev/wp-content/uploads/2016/05/Competitividad-en-el-Catatumbo.pdf

Liz Castrellón & Camilo Álvarez. (2023, noviembre 15). *El fenómeno de El Niño prende las alarmas en Colombia ante la amenaza de graves afectaciones*. https://www.vozdeamerica.com/a/fenomeno-el-nino-prende-alarmas-colombia-amenaza-graves-afectaciones/7356636.html

Lyra, A., Tavares, P., Chou, S. C., Sueiro, G., Dereczynski, C., Sondermann, M., Silva, A., Marengo, J., & Giarolla, A. (2018). Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. *Theoretical and Applied Climatology*, *132*(1), 663-682. https://doi.org/10.1007/s00704-017-2067-z

María, J., Manuel, J., & Jesús, J. (2013). *PROYECCIONES CLIMÁTICAS PARA EL ESTADO DE COAHUILA USANDO EL MODELO PRECIS BAJO DOS ESCENARIOS DE EMISIONES*.

Merino, A., García-Ortega, E., Navarro, A., Sánchez, J. L., & Tapiador, F. J. (2022). WRF hourly evaluation for extreme precipitation events. *Atmospheric Research*, *274*, 106215. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106215

Naciones Unidas. (2020). *Cambio climático: El año 2019, el segundo más cálido registrado tras 2016*. https://news.un.org/es/story/2020/01/1468012

Núñez-López, D., Reyes-Gómez, V. M., Viramontes-Olivas, Ó. A., & Quiñonez-Quintana, V. D. (2010). Aplicación y evaluación del modelo MM5 para pronóstico de lluvia y temperatura en Chihuahua, México: *TECNOCIENCIA Chihuahua*, *4*(1), Article 1. https://doi.org/10.54167/tch.v4i1.722

OCHA. (2018). *Colombia: Restricciones al acceso y desplazamientos en el Catatumbo (Norte de Santander)—Reporte de Situación No.03 (04/05/2018) | HumanitarianResponse*. https://www.humanitarianresponse.info/en/operations/colombia/document/colombia-restricciones-al-acceso-y-desplazamientos-en-el-catatumbo-1

Pabón, J. D. (2003). *EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL Y SU MANIFESTACIÓN EN COLOMBIA*. https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/10277/10796

[PDF] Climate Change Simulations with a Coupled Ocean-Atmosphere GCM Called the Model for Interdisciplinary Research on Climate: MIROC | Semantic Scholar. (2007). https://www.semanticscholar.org/paper/Climate-Change-Simulations-with-a-Coupled-GCM-the-Nozawa-Nagashima/cb8407cbbf5aee9b1d59dd048be32311f263992a

Porras, G. E. A., Cedeño, J. L. V., & Jácome, P. S. (2016). *PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA PARA ECUADOR, BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO*.

Portafolio. (2021, octubre 22). *Colombia, entre los 11 países con más riesgos «graves» por el clima*. Portafolio.co. https://www.portafolio.co/economia/finanzas/colombia-es-uno-de-los-paises-con-mas-riesgos-graves-por-el-clima-segun-estados-unidos-557637

¿Qué es R? ¿Para qué sirve? —Datademia. (2021, octubre 18). https://datademia.es/blog/que-es-r

Rivera, P., Herrera, E., & Ochoa, W. (2022). Comparación de series mensuales de precipitación y temperaturas de los Modelos CMIP6 para Guatemala. *Ciencia, Tecnologí-a y Salud*, *9*(2), Article 2. https://doi.org/10.36829/63CTS.v9i2.1285

RStudio para Estadística Descriptiva en Ciencias Sociales. (2019, julio 3). https://bookdown.org/gboccardo/manual-ED-UCH/

Sanabria, J., Marengo, J., & Valverde, M. (2009). *Escenarios de Cambio Climático con modelos regionales sobre el Altiplano Peruano (Departamento de Puno).*

Torres, O. F., Pérez, L. C. A., Martínez, M. T., López, G. V., Samper, P. V., & Castaño, R. S. (2015). *Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100.*

Universidad Continental (Ed.). (2015). Evaluación del Modelo Climático Global MIROC5 y estimaciones de temperatura y precipitaciones para las zonas sur y norte del Perú. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, *05*(02). https://doi.org/10.18259/acs.2015028

van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, *109*(1), 5. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z

Vargas, C. A. S., Ochoa, C. G., Demaria, E., Sarandón, R., & Pinilla, A. M. (2019). *Evaluación de Modelos Climáticos Regionales para representar la precipitación en la provincia de Buenos Aires*.

Watanabe, M., Chikira, M., Imada, Y., & Kimoto, M. (2011). Convective Control of ENSO Simulated in MIROC. *Journal of Climate*, *24*(2), 543-562. https://doi.org/10.1175/2010JCLI3878.1

Watanabe, M., Suzuki, T., O'ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H., & Kimoto, M. (2010). Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. *Journal of Climate*, *23*(23), 6312-6335. https://doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1